

太陽発電衛星と月資源利用

佐々木 進¹

宇宙に浮ぶ発電所、太陽発電衛星は、将来のクリーンエネルギーシステムとして大きな可能性を持っているだけでなく、宇宙空間利用を人類社会の基盤構造に組込む第一歩として重要な意味を持っている。太陽発電衛星が、地球社会を支えるエネルギー源としての役割を果たすためには、従来の衛星や宇宙基地などの宇宙飛行体の概念から質的にも量的にも全く異なる巨大な宇宙システムを考える必要がある。このような宇宙システムの構築には、月資源の利用が原理的に望ましいと考えられている。本稿では、太陽発電衛星への月資源利用の可能性と研究の現状、及びこの分野で今後必要な研究課題について述べる。

1. 太陽発電衛星 (SPS) の概念

太陽発電衛星(Solar Power Satellite)とは、宇宙空間で太陽エネルギーを利用して発電し、その電力を無線送電で地上に送り、商用電力に変換して既存の電力網を通じ利用者に配電する、未来の電力システムである。地球近傍での宇宙空間の太陽エネルギー密度は 1.4kW/m^2 であり、夜があり天候の影響を受ける地上での平均日射量の5~10倍に達する。太陽エネルギーから電力への変換は太陽電池又は熱発電装置を用いる。得た電力を地上へ無線送電する方法としては、マイクロ波やレーザーが考えられている。

SPSのアイデアは、1968年に米国のグレーザー博士によって最初に提案された[1]。1970年代に

は、石油危機が引金となり、米国エネルギー省とNASAによってSPSの本格的な概念検討が行なわれた。この時、設計された太陽発電システムは、リファレンスシステム[2]と呼ばれ、現在でもSPSの雛型になっている(図1)。しかしながら当時の検討では、21世紀に必要とされる米国の電力の全てをまかなうという、あまりにも巨大な規模のシステム(発電総量300GW、総重量300万トン)を検討の前提としたため、当時の社会的要求から飛躍がありすぎ、将来のための継続的な研究の必要性は認められたものの、具体的な計画としてはスタートしなかった。

その後、SPSは遠い将来の計画と位置付けられてしまい、その研究は、世界各国の個々の研究者レベルで細々と進められてきた。しかしながら、1980年代の後半になってからは、深刻化する地球環境問題が動機となり、新しい技術と発想に基づく、より現実的なSPSの研究の機運が高まりつつある。我が国においても、1990年には、地球環境問題に対する国としての対応として、「地球再生計画」が関係閣僚会議で申し合わされたが、SPSは其中で、次世代をにう革新的エネルギー関連技術の一つとして取上げられるに至っている。

現在、人類の総需要エネルギーの8割以上は化石燃料でまかなわれており、地球温暖化の主因である炭酸ガスの約9割は、化石燃料の消費によりもたらされると言われている。化石燃料の消費による、地球環境の急速な悪化をくいとめるには、

¹宇宙科学研究所

真の意味でクリーンな、化石燃料に代わるエネルギー供給システムを、早期に開発する必要がある。

現代社会が必要としているエネルギー供給量は膨大であるが、それでも太陽から地球に供給されるエネルギーのわずか15,000分の1に過ぎない。SPSは、豊富な太陽エネルギーをそのエネルギー源として利用すること、地球生態系外の広大な宇宙空間をエネルギー取得の場として利用すること、発電にともなう廃棄物がないことから、人類社会が直面している地球環境問題を根本的に解決し得る、エネルギー供給システムとして大きな可能性を持っている。

SPSの構築には、宇宙への打ち上げ輸送技術、宇宙での大型建造物の建設と制御、太陽発電、無線送受電技術が必要である。これらの技術開発には、今後とも新規の研究が必要ではあるが、いずれも核融合のような未踏の原理の検証を前提とした技術ではなく、現在の科学技術の延長上にある。この点が、近未来のエネルギーシステムとしてのSPSの大きな特長である。宇宙科学研究所でも、1987年に太陽発電衛星ワーキンググループが組織され、SPSの理工学的研究とそれが地球電磁環境や生態環境に及ぼす影響についての研究を行なっている。このワーキンググループは、個々のSPS技術検証のための将来ミッションの検討、観測ロケットを用いたマイクロ波送電実験、生物生態へのマイクロ波の長期曝露の研究プロジェクトとともに、SPSのデモンストレーションモデルとして10MWatt級の太陽発電衛星SPS2000の概念設計研究を行なっている[3]。SPS2000は、近未来のSPS技術と既存の輸送系を前提とし、西暦2000年の建設開始を目指したモデル

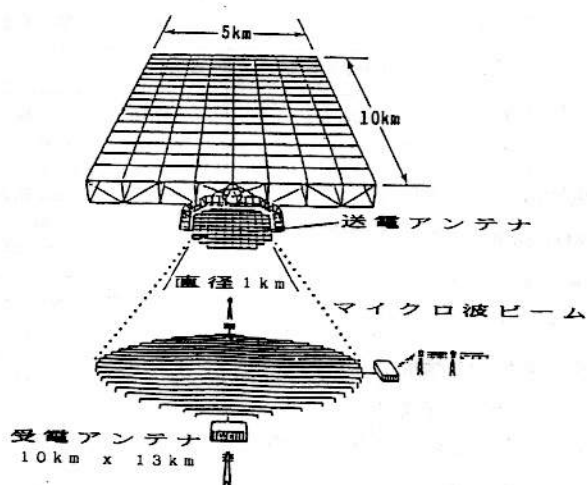


図1. NASAリファレンスシステム

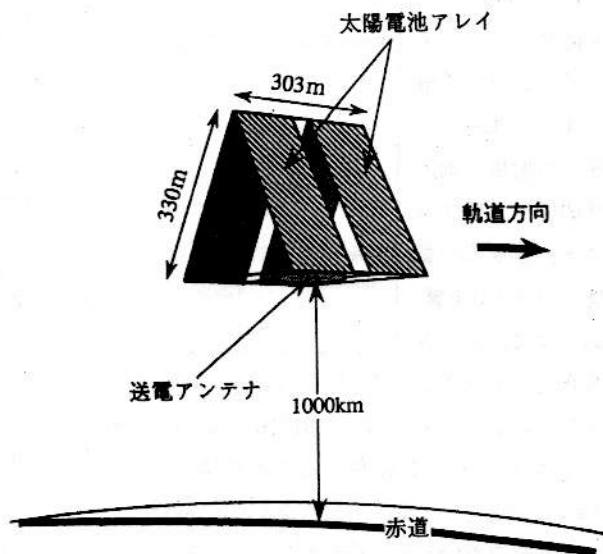


図2. SPS2000システム概念図

ルである。このモデルの試験運用により、SPSシステム技術の評価、環境への影響評価、電力システムとしてのコスト評価を行ない、より本格的なSPS計画へ移行することを目指している。

SPS2000は、図2に示すように1辺約300mの三角柱の形状を持っている。上2面に太陽電池を張り付け、下面にマイクロ波の送電アンテナをとり

つける。重力傾斜力により、アンテナ面は常時地上に向けられる。太陽電池は、3m幅、300m長単位のフレキシブルアモルファスシリコンパネル180枚から構成し、1000Vで発電を行なう。送電は、アンプを内蔵したスリットアンテナで約132m四方の送電アンテナ（スペースステナ）を構成する。軌道は、既存の射場の地理学的位置、輸送コスト、放射線の影響、デブリの影響、同一受電所での受

表1 太陽発電衛星の主要な構成部材とその材料

WBS Item	Mass %	Description	Principal Mtls	%Lunar Mtls
Bklt & C	37.1	Borosilicate Glass Encapsulation & Other Blanket Parts	Glass Copper Steel	90
Klystrons	16.8	Klystron Linear Beam Tubes, Electromagnet Focus, with Driver & Control Circuit	Steel Copper Aluminum Moly	60
Solar Cells	13.8	Single-Crystal Silicon Solar Cells 6.5-m-sq and 50-Micrometers Thick	Silicon	90
Primary Struc	9.9	Graphite Composit Space Frame Truss Composed of Trbeams Space-Fab	Graphite Plastic Steel	100
Subarray Str	7.0	Distribution & Radiating Waveguides and Support Structure: 7720 Unite 10.4-m-sq	MM Graphite	100
Power Proc	6.4	Power Processors and Conductors Plus Batteries	Aluminum Copper Steel Plastic	50
Power Buses	2.7	Aluminum Main & Acquisition Buses 1-mm Thick, Width as Required	Aluminum	100
Laser Annealer	1.5	Moving Gantries, CO2- EDL's, and Solar Array Power Units	Graphite Solar Arr Spcl Mtls	70

電頻度、を考慮して、高度1100kmの赤道円軌道としている。これにより、赤道域では、直径2kmの受電アンテナを設置することにより、平均200kWの電力を受電し、揚水など同地域の社会的な有効利用をはかることができる。受電アンテナは、80%以上の太陽光を透過し、環境へのインパクトが少ないワイヤーアンテナ方式のものが考案されている。

2. SPSへの月資源利用の可能性

SPSが、人類のエネルギーシステムとして一定の役割を果たすためには、最終的には、少なくとも、全消費エネルギーの10%以上を供給する程

度のシステムとする必要がある。このためには100～1,000GWクラスのスPSを必要とし、今後の技術開発にもよるが、受電総面積にして100km四方、総重量千万トンクラスの規模の発電衛星が必要である。実際にはこれよりも1/10～1/100程度小さい規模の発電衛星群で構成することになるが、いずれにしても宇宙基地など近未来の大型宇宙構造物と比較しても、桁違いに巨大なシステムになることは間違いない。1つ1つの衛星は、平面的な形状ではあるが、スケールから言えば火星の衛星フォボス程度の大きさとなる。ただしその質量はその 10^{-7} 程度である。

リファレンスシステムでは、その建設資材を地

表2 月面試料の原子、分子組成

Mean atomic composition of the lunar surface*

Element	Apollo 11	Apollo 12	Lunar 16	Lunar 17	Appolo 14	Apollo 15	Lunar 20	Appolo 16	Appolo 17	Earth's crust
O	59.87	59.9	60.15	63.2	60.8	60.4	60.3	61.1	61.1	49.13
Si	16.31	16.0	15.97	15.7	17.4	17.3	16.0	16.3	16.3	26.00
Si	16.31	16.0	15.97	15.7	17.5	17.3	16.0	16.3	16.3	26.00
Al	6.30	6.3	6.95	5.7	7.7	6.5	9.7	11.6	10.1	7.45
Fe	5.12	5.4	5.39	4.7	3.1	4.5	2.1	1.6	1.8	4.20
Ca	4.92	4.1	4.99	4.4	4.3	4.4	5.9	6.1	6.1	3.25
Mg	4.57	6.8	4.99	6.3	5.4	5.9	5.2	3.0	4.0	2.35
Ti	2.19	0.9	0.98	1.8	0.5	0.5	0.15	0.15	0.15	0.60
Na	0.33	0.3	0.37	-	0.40	0.3	0.4	0.29	0.4	2.40

Mean molecular composition of the lunar surface*

Molecule	Apollo 11	Apollo 12	Lunar 16	Appolo 14	Apollo 15	Lunar 20	Appolo 16	Appolo 17	Earth's crust
SiO ₂	40.70	44.95	43.8	48.0	46.07	42.40	45	47	48.5
FeO	17.42	20.53	19.35	10.5	21.19	6.40	7.5	8.6	10.5
CaO	10.52	10.94	10.4	10.7	10.21	18.20	13	12.1	10
TiO ₂	11.00	3.32	4.9	2.1	2.13	0.38	0.8	1.5	2.1
Al ₂ O ₃	9.43	9.19	13.7	17.1	8.95	20.20	23	21.2	16
MgO	7.34	9.83	7.05	8.7	9.51	12.00	8.5	9.9	7
Cr ₂ O ₃	0.32	0.51	0.55	-	-	-	0.15	0.21	0.03
Na ₂ O	0.49	0.28	0.38	0.7	0.26	0.40	0.48	0.48	2.8
MnO	0.23	0.27	0.20	-	0.28	-	0.09	0.11	0.2
K ₂ O	0.18	0.058	0.15	0.5	0.034	0.52	0.20	0.15	1.2
P ₂ O ₅	0.12	0.088	-	-	0.07	-	0.26	0.24	0.3

球から運搬し、低高度軌道で建設した後、静止衛星軌道へ移動させることを前提として検討が行なわれた。しかし、SPSの建設のための膨大な資材は、地上から運ぶよりも、月から資材を調達する方が、重力離脱エネルギーが地球からの場合よりもはるかに小さくてすむ上（月面からの脱出速度は2.37km/sec）、空気抵抗がないことから、輸送・建設コストを下げるができる可能性がある。また、建設に伴う地球環境へのインパクト（例えば頻繁な輸送による大気、電離層汚染など）も考えなくてすむ。

しかし、後で述べる³Heを除きレゴリスに代表される月資源そのものが資源として絶対的な価値を持っている訳ではない。月のレゴリスが地上にあっても、それを貴重な資源と考える人はいないだろう。月資源が価値あるのは、まさにそれが月

にあり、宇宙空間の軌道へ輸送するためのエネルギーが、地球からよりも小さいためである。SPSの建造に地球外資源を利用する可能性については、SPSの概念が出された当初から提案され、SPS技術の研究と並行して研究が行なわれている。1991年のSPSの国際会議SPS91 Power from Spaceでは、その10%程度の論文が地球外資源の利用の可能性を扱っている。宇宙のインフラストラクチャーは宇宙資源で建設すべきであるという考えは、一定の説得力を持っている。

SPSは、太陽電池、送電アンプ、アンテナ、集電ケーブル、構体が主な構成要素である。リファレンスシステムの場合の主な建設要素と主要素材を表1に示す[4]。素材としては、アルミ、鉄、銅、シリコン、ガラス等がその主要なものである。月の表面は、細かい砂と岩石、鉱物のレゴリスで覆

われている。アポロやルナが地球へ持ちかえったサンプル約300kgの分析を通じ、60度以下の低緯度領域については既にデータが蓄積されている(表2)[5]。成分比1%以上の主要な元素は、O, Si, Al, Ca, Fe, Mg, Tiである。これらの表からわかるように、SPSの素材の大部分は、月資源から原理的には調達することができる。表1の右端のコラムには、SPSの各構成要素について、月資源の利用が可能な率を示している。リファレンスシステムを対象としたMITの研究では、SPSの重量の90-96%の素材は月から供給可能とされている。SPSの発電方式としては太陽熱機関も候補ではあるが、地球外資源の利用の可能性の点からは、太陽電池方式が有利である。

しかしながら、現段階では、月資源はあくまでも潜在的に利用可能な資源にすぎず、月資源を利用するためのシナリオの確立(採掘、精製、輸送)とそれに基づくコスト評価を行なった上で初めて、月資源の利用がSPSにとって有効か否かが判断される。但し、月資源利用はSPSを目的として考えるべきものではなく、より大きな枠組みである宇宙資源利用のインフラストラクチャーの中で検討されるべきものであることは言うまでも無い。

3. 資源利用の具体的な方法

月資源を始めとする宇宙資源の利用の概念は、1974年オニール博士の"The Colonization of Space"[6]により初めて系統的に議論された。月資源の利用には、資源の精製・製品の製造と利用場所への輸送の2つの要素を考慮しなければならない。SPSに必要な生産、輸送システムは、実験プラント的なものではなく、本格的な産業レベルのものである。例えばSPSの主要要素である太陽電池に必要なシリコンは、10GWattのSPSの場合、6,000-15,000トンに達することが算定されている

(地上で毎年使用されているシリコンは2,000トンにすぎない)。

3.1 資源の精練

月資源は、大部分の鉱物が酸化物の状態になっているので、鉱物の精製は、基本的には還元プロセスとなる。現在のところ、標準的な精練プロセスは以下のように考えられている。(a) 原材料をクラッシャーで粒状にする。(b) 磁場を利用した分離器で磁性成分と非磁性成分を分離する。(c) 加熱して、揮発成分と非揮発成分に分離する。(d) 還元、遠心質量分離、冷却プロセス、電気分解の組合せで、鉄、シリコン、炭素、カルシウム、マグネシウム、酸素等を取り出す。

加熱、還元プロセスでは、熱及び還元材をできるだけサイクルさせ効率を高めるための多くの方式が提案されている。熱は太陽集光器や太陽発電・原子力発電の電力で供給する。図3に精練プロセスの1例[7]を示す。

加熱プロセスでは、最近注目されている ^3He も取得することができる。 ^3He と重水素との核融合は、原理的にはクリーンであると考えられている。 ^3He は地球上にはほとんどないが、長年にわたり太陽風の ^3He を固定した月面では、 10^8kg オーダーの ^3He が吸着していると推定されている。ウイスコンシン大学のクルチンスキー教授の試算によれば、月の ^3He の総量は今後1000年以上の地球のエネルギー需要を満たすと予測している。ただし、1トンの ^3He を得るには 10^8 トンのレゴリスを処理する必要がある。また、これには、 $\text{D}-^3\text{He}$ 核融合が原理的に可能であり、かつ、この反応が真にクリーンであることを実証することが前提となる。

しかしながら、このような地上のコンビナートのような複雑な産業システムは、実現されるにしても相当先のことと思われる。月資源利用の初期

要なエネルギーは、5万トンの素材（5GWatt クラスのSPS）に対し70MWatt 年と計算されている。分離効率が50%であれば、1km²の太陽電池パネルと0.1km²の放熱板によって運転ができると試算している。イオン化は、ガス化に比べて通常10倍以上のエネルギーが必要であるが、電離ガス（プラズマ）は単純な電磁システムで質量分離することができる可能性がある。分離方法としては、以前、宇宙科学研究所で行なった回転プラズマ方式もその有力な方法の1つである[8]。この方法は、0.1-10mTorrの低電離プラズマを放射状の電場とそれに直交する電磁場で高速回転させ、遠心力で質量分離を行なおうとするもので、He, Arの混合気体では分離率1.55を得ている。

3.2 製品の製造

精製された月資源から、SPSに必要な太陽電池、送電アンパ、構造部材、配線部材、送電アンテナ部材を製造することができる。部材の製造は、精練システムに接続する比較的簡単なプロセスで行なうことができるが、太陽電池、アンパの製造には、地上と同様複雑なプロセスが必要である。

結晶系の太陽電池は、高純度のシリコン（99.999%以上）によって作られる。光電変換効率の高い単結晶の場合は、地上では、通常1500度Cの高温を加え、単結晶を成長させる(Czochralski法)。結晶をスライスし磨いた上で、結晶に不純物を拡散させ、電極をとりつけ、その後反射防止膜処理を行なう。一方アモルファスシリコン太陽電池の場合は、シリコンを含んだガスを放電によって分解し、基板上にシリコンを堆積させて製造する。アモルファスシリコン太陽電池は、現状では、単・多結晶太陽電池より効率が悪いが、低温での製造が可能であり、大面積の電池の大量生産が可能であることから、SPS用の太陽電池として有力

である。

宇宙環境では、上記の結晶成長方式よりも閉じ込めた熔融シリコンからシリコンリボンを圧出する方法(Stepanov法)が望ましいと考えられており、スペースシャトルでも実験されている。また宇宙でのシリコンフィルム製造としては、フィルム上に分子を直接付着させる分子エビタキシー法も従来から研究されている。この場合不純物の混入を避けるため、超高真空が必要であるが、この点では月面や軌道上宇宙空間は理想的な環境である。

3.3 資源の精製・製品製造場所と輸送手段

このような資源精製、製品製造を大掛かりに行なうためには、そのための大規模なエネルギー源が必要である。例えば、年間30万トンの月原料を処理するためだけでも0.5GWattの電力が必要とされている。夜の長い月面に生産工場をおく場合には、太陽発電だけでなく、原子力発電も必要であると考えられている。これに対し、オニール博士は、軌道安定点である、夜の長いラグランジュポイント(L2点と呼ばれている)が、生産の場・人類移住の場として最も相応しい領域として提案している。

資源精製、製品製造の場をどこに置くにしても、月資源利用には宇宙輸送手段が必須である。月から宇宙空間の目的地まで物資を運ぶ方法としては、電磁マストライバー、月資源から得る液体酸素・液体水素を用いたロケットが考えられている。月の重力は地球の1/6であり空気抵抗もないので、その離脱には必ずしも推力の大きいロケットは必要ではない。オニール博士の提案した電磁マストライバーは、リニアモーターと同様な方法で、月面上の長いランチャーで輸送体を月離脱速度まで加速するもので、電気のエネルギーを効率よく運

動エネルギーに変換することができる。宇宙研の高速加速装置レールガンは、同様の原理で1gの物体を7km/secまで加速することに成功しており、宇宙輸送に応用するためのコイルガンの研究も行なわれている。プリンストン大学では、この方式で1,800G（離脱速度 $= (2 \times (\text{加速距離}) \times (\text{加速度}))^{1/2}$ より、理論上160mのランチャーで月離脱速度に達する）の加速実験に成功している。一方、液酸液水ロケットは、既に実用のテクノロジーであり、酸素、水素ともに月資源から取得できる。しかしながら、酸素は、月資源から容易に得られると考えられているが、水素を得るためのコストは相当大きいものになると考えられている。このため、水素は地球から供給し、月資源から取得されるアルミニウムを50%程度混合した液酸液水ロケットも提案されている。

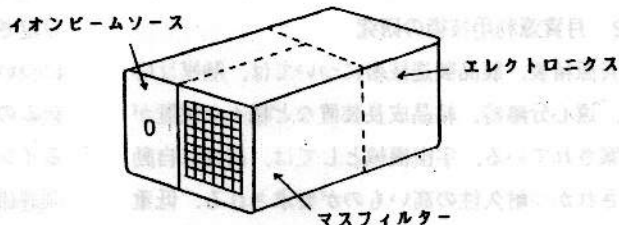


図4. 簡易SIMSによる月面探査

4. 今後必要な研究

4.1 資源探査

現在考えられている月資源利用は、ルナ、アポロの持帰った試料のデータを基に検討がなされている。月面を覆っているレゴリスは、海や高地という場所により若干の差はあるが、基本的に似た組成をしている。標準的に存在する資源から鉱物を抽出しようという考え方は、明らかに地上でのやり方と異なっており、その為に抽出方法も地上のやり方より複雑になっている。地上では、鉱物資源は自然作用により一定レベルの精練が行なわれてきた鉱脈を探し、そこから鉱物を取得することにより、取得コストを下げている。鉱脈探査に必要なコストは、標準的に存在する資源から微量鉱物を精製するより少ないためである。地球の

ような水の作用の無い月にも、月活動の初期に形成された鉱脈、例えば FeNi 、 FeTiO_3 、 FeCr_2O_4 、 Fe_2TiO_4 などが集中して存在する可能性があると考えられており、今後鉱脈の本格的な探査が必要である。

アポロ、ルナの採取した試料には、月に水の存在を示す証拠はなかったが、高緯度部には氷結した水の存在の可能性が指摘されている。水が存在する場合としない場合の月資源利用のシナリオは大きく異なってくる。極域での氷の存在には否定的な見解も多いが、月の極域探査は、月起源・進化の研究のためだけでなく資源利用の立場からも重要である。

今後米国の資源探査衛星による月面無人探査が

予定されている。しかしながら、地球の資源探査が衛星による遠隔探査だけでは不十分のように、最終的には、直接的な着陸探査、探鉱が必要である。この場合、地上と異なり探査士の行動が制約される真空環境であるという点を考慮した簡素な汎用型探査法の開発が必要である。イオンビームとイオン分析器を組合せた懐中電灯型の遠隔二次イオン分析器[9]もその一つの候補である。これは、イオンガンからの酸素イオンビームを月表面に照射し、スパッタリングで発生する二次イオンを質量分析することにより、元素組成を遠隔探査しようとするものである(図4)。

4.2 月資源利用技術の研究

資源精製、製品製造技術については、触媒反応炉、遠心分離器、結晶成長装置など様々な装置が提案されている。宇宙機械としては、高度に自動化されかつ耐久性の高いものが要求される。低重力、高真空という宇宙環境で、実験装置としてではなく産業機器として期待どおりの精製・製造性能が発揮できるか否かは実験的に検証する必要がある。これまでに提案されたアイデアは多いが、実証された技術は極めて部分的である。今後この分野の研究は、アイデアだけでなく、宇宙実験も含む実験的研究を行なうことが必要な段階に来ている。また、月面での産業活動は、特別な工夫を施さないかぎり、塵やガスを発生させる可能性がある。地球上では問題にならないレベルでの塵の発散やガスの放出でも、高真空の月面環境には大きな影響を及ぼし、逆に、高真空を前提とした製造方法は成立たなくなるかも知れない。産業機械や施設が月面環境に及ぼす影響の評価やその対策については、これまで殆ど研究が行なわれていない。月資源利用システムの研究は、環境への影響を評価しつつ進めなければ、現実性を持たないと

思われる。

4.3 社会的インフラストラクチャーとしての月資源利用システムの研究

月資源利用システムは、単一目的のために構築されるものではなく、社会的なインフラストラクチャーとして考えられなければならない。そのためには、その構築に関わる技術的問題だけではなく、人類社会、産業、経済、地球環境への影響を正しく評価・研究する必要がある。月資源利用システムの構築のためには、膨大な社会資源の投資が必要であり、社会的な合意のもとに推進されなければならない。推進の枠組みは、国際社会によって設定されようが、その為に必要な法律や国際組織についての研究も行なう必要がある。月資源システムのような巨大でその構築に多大の年数を要するインフラストラクチャーについては、完全な予測評価を行なうことは不可能である。その構築には、常に最新の技術を反映できるような柔軟性と計画を正しく評価しつつ次のステップに進めるような開発のシナリオを研究する必要がある。

5. むすび

太陽発電衛星構築への月資源利用の可能性、関連する研究の現状及び今後この分野に必要な研究について述べた。私たちは、現在、文部省科学研究費による“太陽発電衛星の総合研究”(総合研究(B)、代表者 長友信人宇宙科学研究所教授)を実施している。これは、近い将来社会的にも受け入れられるような太陽発電衛星システム概念を構築するための重点領域研究設定を目指した企画調査活動である。本重点領域研究では、太陽発電衛星に関連する宇宙インフラストラクチャーの一つとして、月資源など地球外資源の利用に関する研究を遂行することを計画している。現在構想され

ているSPSは、必ずしも宇宙資源利用を必要条件としてはいないが、将来、宇宙資源利用のインフラストラクチャーが形成される場合には、SPSはその主要なユーザーとしてだけでなく、それを支えるエネルギーシステムとしての役割を果たすと思われる。

参考文献

- [1] Glaser, P.E., 1968: Power from the Sun: its Future, Science, 162, 867-886.
- [2] DOE/NASA, 1980: Program Assessment Report Statement of Fiding-Satellite Power Systems Concept Development and Evaluation Program, DOE/ER-0085.
- [3] 宇宙科学研究所 太陽発電衛星ワーキンググループ SPS2000 タスクチーム, 1993: SPS2000 概念計画書.
- [4] Woodcock, G.R., 1982: Space Settlements and Extraterrestrial Resources-What Benefits to SPS Construction?, Space Solar Power Review, 3, 167-192.
- [5] Kopal, Z., 1974: The Moon in the post-Apollo era., D.Reidel Publishing Company.
- [6] O'Neil, G.K., 1974: The Colonization of Space, Phys.Today, 27, 32-40.
- [7] Phinney, W.C., Criswell, D., Drexler, E., and Garmirian, J., 1977: Lunar Resources and Their Utilization, Space-Based Manufacturing from Nonterrestrial Materials, Progress in Astronautics and Aeronautics, 57, 97-123.
- [8] Kaneko, O., Sasaki, S., and Kawashima, N., 1978: Mass Separation Experiment with a Partially Ionized Rotating Plasma, Plasma Phys., 20, 1167-1178.
- [9] 佐々木進, 矢守章, 河島信樹, 三浦保範, 太田正廣, 米田哲也, 1990: 二次イオン分析法(SIMS)を用いた惑星探査方法の基礎開発実験, 文部省科学研究費補助金重点領域研究(1) 原始太陽系と惑星の起源 研究成果 報告書, 440-450.