

# 月面用エネルギー供給技術「ガラスの海」

宇宙開発事業団 先端ミッション研究センター

\*月利用推進研究室 招聘研究員

\*\*月利用推進研究室 客員開発部員

\*\*\*月利用推進研究室長

横山 隆明\*・園山 実\*\*・長島 隆一\*\*\*

## Energy supply technology on the moon, “Glass Ocean”

Takaaki Yokoyama\*, Minoru Sonoyama\*\*, Ryuich Nagashima\*\*\*

National Space Development Agency of Japan

### 1. はじめに

将来の月面活動において、夜間におけるエネルギーの確保は極めて重要である。月の夜は約14日間も続き、月表面の温度は赤道上で約 $-170^{\circ}\text{C}$ まで低下する。長期間ミッションを遂行する人間や機器にとって、この厳しい低温環境への対応も含めた定常的なエネルギー源の確保は、月開発利用構想における大きな課題となっている。

このような観点より、本論では、月面産の安定したエネルギー供給システムの新しい概念を提案する。

### 2. ガラスの海構想の概要

月の表土(レゴリス)の特徴の一つとして、熱伝導率が極めて低く、わずかに表面下数十cmの温度は昼夜変わらず一定(赤道付近では約 $-20^{\circ}\text{C}$ )であることが知られている。このことから、月面のレゴリスには一種の断熱の優れた魔法瓶としての機能が存在することがわか

る。

この魔法瓶の中に、月面材料を用いた蓄熱材を生成して、14日間の昼間に太陽集熱装置を用いて温め、エネルギー溜め(湯たんぼ)として利用する。この熱は、熱そのものとして、もしくは熱電変換を経て電力として利用することが考えられる。この湯たんぼを「ガラスの海」と俗称的に呼ぶことにする。

「ガラスの海」と呼ぶ理由は、その蓄熱材の材質の発想にある。システムの中核となる蓄熱材として、レゴリスを太陽集熱器により溶解(融点約 $1400\sim 1700\text{K}$ )し、冷却固化させ塊状(ブロック状)にしたものを最も有望視している。この蓄熱材については、化学(燃焼)反応を用いて形成したブロックやパウダー状のレゴリスにヘリウムや窒素などのガスを混合したものを利用するアイデアもある。レゴリスを高温で溶かして冷却・固化した塊が「ガラス」と呼ぶに相応しいものであるか否かの正確な判断は読者に委ねたいが、我々は「ガラス」という言葉の持つ美しく機能的な響きに、月での全く新たなエネルギー源の概念を重ねて表現した。もっとも月表土に豊富に含まれている珪素や珪素を成分としたグリーンガラスやオレンジガラスなどと呼ばれる粒子は「ガラスの海」の主要な

〒305-8050 つくば市千現 2-1-1

TEL 0298-52-2251

FAX 0298-52-2247

E-mail: Yokoyama.Takaaki@nasda.go.jp

原料となる。また、「海」という言葉は、広大な月面にシステムを自己増殖させるという期待を表現しているものである。

月の昼間に、このガラスの海を太陽集熱装置を用いて 800~1000°C 近傍まで加熱しておき、夜間はガラスの海と月面上（赤道約-170°C）との温度差を利用して発電等を行う。昼間にはガラスの海を太陽集熱装置により加熱すると同時に、太陽集熱部と月面上との温度差により発電も実施する。

図1にガラスの海システム構想の概要を示す。

ガラスの海の外観は、ガラス（蓄熱材）を月面レゴリスの中に埋め込んだものとなり、月表面には太陽集熱システムや発電システム、放熱システムなどが設置される。また、月表面に構

築したガラスを後からレゴリスで被覆することも考えられる。ガラスの海の性能は熱伝導効率に大きく左右されるため、ヒートパイプや金属板などをガラスの海との十分な接触を伴う形で差し込んでおく必要がある。

### 3. ガラスの海システムの構成

ガラスの海発電システムは大きく分けて以下の3つの部分から構成される。

- 集熱部—太陽光を集めてその熱を蓄熱部に伝える部分。
- 蓄熱部—集熱部で集められた熱を夜間の発電に利用できるように蓄える部分。
- 発電部—昼間は集熱部で集めた熱を、夜間は蓄熱部に蓄えられた熱を利用し発電する。

#### 3.1 集熱部

一般に太陽光を集めて高温を得るにはパラボラ型の集熱装置が用いられている。この方法については実用化の研究も行われ、集光効率が高い。ただし、集パラボラ型の集熱装置では熱の中心をパラボラから離れた位置に設置する必要があり、蓄熱部への伝熱経路が長くなる傾向がある。

集熱部を円錐型とし、太陽光を円錐の頂点の位置に集熱する方法も考えられる。この場合には円錐型頂点が集熱の中心となるため蓄熱部への熱の伝熱経路を比較的短くすることができ、また構造的にも簡単である。ただし入射角度により集熱の中心に到達できなかつたり、複数回の反射が必要であったりするため、集熱効率はパラボラ型に比べて低くなる。集熱部を太陽に対して正対するように移動させる事で集熱効率を上げることも考えられるが、集光装置はかなりの大きさになると考えられるのでパラボラの向きを変化させる事は現実的には難しい。

以上の事からガラスの海発電システムの集光部としては、据え置き型のパラボラ型が適当であると考えられる。

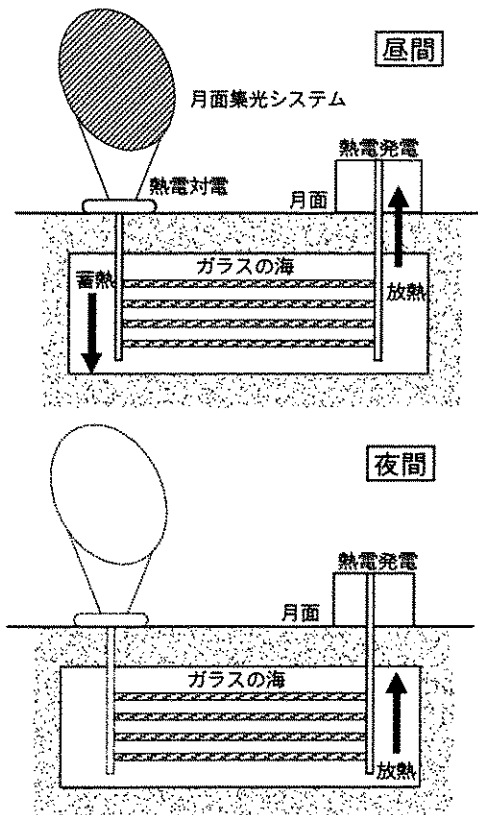


図1 ガラスの海構想の概念

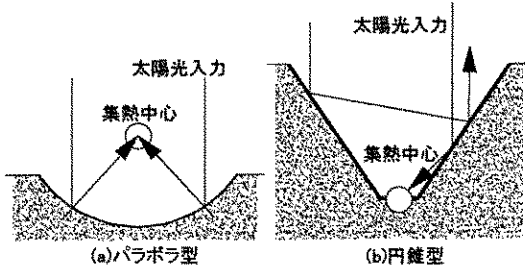


図2 集光装置の形状

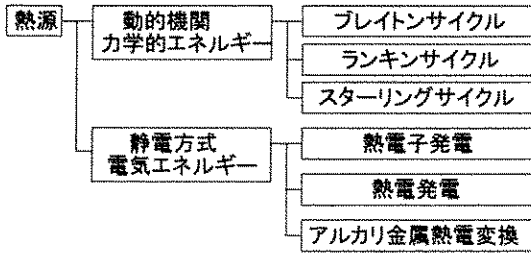


図3 エネルギー変化方式の分類

3.2 発電部

ガラスの海をエネルギーシステムとして成立させるためには、集光した熱を何らかの方法により電気エネルギーに変換しなければならないが、熱を他のエネルギーに変換する方法は図3に示すように分類される<sup>1)</sup>。

動的機関を用いる方法は非常に効率が高いが、高度な機械的構成要素が必要とされ、これらを月面上で製造するのはまず不可能と考えられる。

ガラスの海発電システムで利用する技術としては比較的構成要素が簡単で、回転部などが無く、メンテナンスに必要とされる手間が少なく済む、熱エネルギーから電気エネルギーへの直接変換方式が適当であろう。その中でも月面上で発電に必要な材料を比較的調達しやすいという点から、熱電発電が現時点では最も有望と考える。

3.3 蓄熱部

次に、熱の蓄積について述べる。石英ガラス

表1 各素材の熱伝導率

素材	熱伝導率(推定値) W/m·K
レゴリス	0.01
鋳造ガラス	2~2.5
テルミット材 (SiO <sub>2</sub> +1.6)	>1.6
He ガスを混入したレゴリス	0.84~1.76 <sup>(4)</sup>

の熱伝導率は、2 W/m·K 程度<sup>3)</sup>であり、月のレゴリスを溶かして固めたガラスの海の熱伝導率はこれに近い値になると予測される。レゴリスとの熱伝導率の差を利用して熱エネルギーの流れをつくり、熱電素子などにより電気エネルギーに変換する。

表1にガラスの海システムに用いられる可能性のある種々の素材の熱伝導率を示す。これらのどの素材についても、レゴリスの熱伝導率の100倍程度の値であることが予想され、種々の方式による蓄熱の可能性が十分にあることがわかる。

上記に関して以下レゴリスの断熱材としてのパフォーマンスを検証する。ガラスの海の初期温度を1000°Cとし、輻射放熱による温度低下を、レゴリス表面の輻射率を0.92<sup>5)</sup>として計算した。計算には、SINDA (Systems Improved Numerical Differencing Analyzer) を用いた。月面の夜(14日間)におけるガラスの海の温度低下は、ガラスの海の上のレゴリスの厚さが1.0mのとき約23度、0.3mのとき約43度となり、レゴリスの断熱材としての十分な能力が確認された(図4, 図5)。

蓄熱システムに関してはいくつかの方式が考えられる。ここでは蓄熱体としてレゴリスを融解して固めたブロックを用い、熱伝達媒体として窒素またはヘリウムガスを用いた方式を提案する(図5)。蓄熱部の周囲は熱伝導率の低い砂状レゴリスで覆っている。レゴリスの熱伝導率は、約0.01 W/m·K<sup>2)</sup>であり、ガラスウールや毛布、羊毛、石綿、コルクなどの0.04~

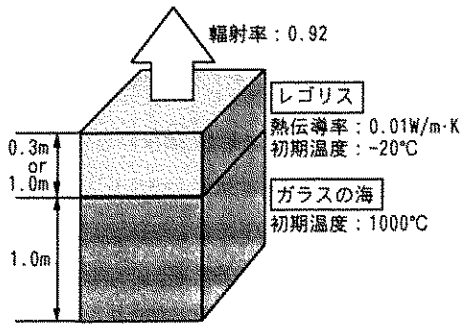


図4 解析モデル

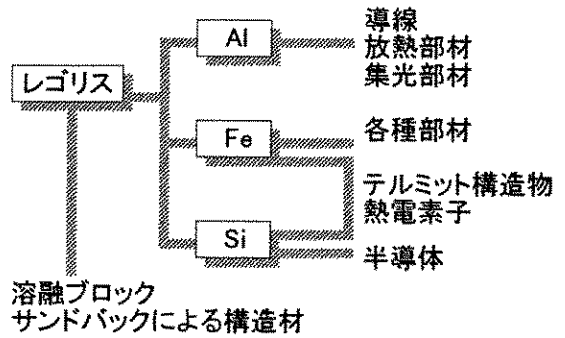


図7 ガラスの海における月資源の活用

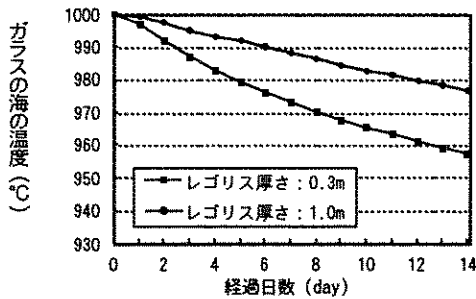


図5 ガラスの海の温度低下

#### 4. 自己増殖性の確保

月の開発利用シナリオを構築する上の大きな問題の一つとして、地球から月への膨大な輸送量が必要となる点が挙げられる。これまでに提案されてきた種々の月面基地構築シナリオにおいても、輸送のためのコストは全体コストの多大な部分を占めている。経済的な月開発利用を実現するには、輸送にかかるコストを極力小さくする必要がある。

このような問題点を考慮し、ガラスの海システムでは、月の資源の最大限の活用と、月面産エネルギーに基づく自己増殖性の実現を目指す。

図7にガラスの海における月資源の活用について示す。

レゴリスを構成する主な鉱物は、輝石、長石、カンラン石、チタン鉄鉱であり、これらの形態で種々の元素が存在する。月表土全体の平均では、酸素、珪素、鉄、アルミニウムの4つの元素が重量比で80%以上も占めている（うち、酸素が40%強）。

前述の課題より、本格的な月利用を実現するためには、月面に豊富なこれらの元素を最大限に活用することが望まれる。ガラスの海システムの自己増殖性確保のために、以下のような月資源の活用を考えている。

##### ■レゴリス

- 太陽集光炉により加熱し、溶融ブロックを製造

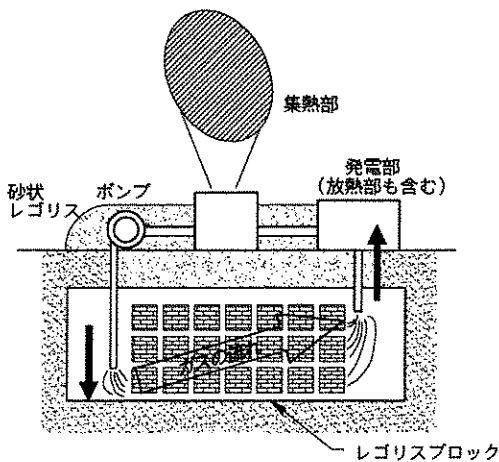


図6 システム概要部

0.06 W/m·K<sup>3</sup>)という熱伝導率と比較しても優れた断熱材であることがわかる。この原因はレゴリスがパウダー状になっていることに由来する。

- サンドバッグに詰めて構造材として利用

■鉄

- 各種部材や機械部品の製造

■アルミニウム

- 銅の代わりの導線を製造
- 放熱部材の製造
- 集光装置の表面部分の材料

■酸化鉄（チタン鉄鉱）+珪素

- 部材やブロックを形成するためのシリコン  
テルミット反応の材料（酸化鉄（チタン鉄  
鉱）+珪素→鉄（+チタン）+珪酸の燃焼合  
成）

■鉄+珪素

- 珪化鉄熱電素子の製造

■珪素

- 半導体製造（パワーアンプなど）

ガラスの海により、ある程度の発電が月面で可能になれば、これらの物資を月のエネルギーを用いて製造することにより、自己増殖的にシステムを拡張していくことが可能になる。

5. ガラスの海の規模

ここでは、昼夜の0°C~1000°Cの理想的な蓄熱及び放熱が行えることを仮定し、月の夜間に100 kWの電力を発生させるために必要なガラスの海の規模を計算する。ガラスの海の材質としては、鋳造ガラスを想定する。

5.1 集熱部の規模算定

ガラスの海システムの集熱部の規模を試算する。

ここでは以下を前提条件として用いた。

- 昼夜とも同量の発電を行う。
- 発電量は昼夜とも100 kWとする。
- 昼夜は太陽光入力による熱エネルギーの約半分で発電を行い、残りは蓄熱部に蓄える。
- 夜間は蓄熱部に蓄えられた熱により発電を行う。
- 蓄熱部及び配管系の熱損失を、昼間は全体の

10.6%、夜間は全体の0.3%とする。

- 太陽光入力密度：1323 W/m<sup>2</sup>
- 集光装置の効率：60%
- 発電の効率：5%

発電量100 kWをそれぞれ昼夜14日間にわたり発電するためには総エネルギー量として以下の熱エネルギーが必要である。

• 14日間の100 kW発電に必要な熱エネルギー  
 = 発電量 × 14日 × 24時間 × 3600秒 / 発電効率  
 = 100 × 10<sup>3</sup> W × 14 × 86400 × 0.05 = 2.4192 × 10<sup>12</sup> J

このため太陽光集熱装置で集熱しなければならない熱エネルギーは、以下の様に算定できる。

• 太陽光集熱装置で集熱するエネルギー  
 = 100 kW分の熱エネルギー / (1 - 昼間の熱損失) + 100 kW発電分の熱エネルギー / (1 - 夜間の熱損失)  
 = 2.4192 × 10<sup>12</sup> J / (1 - 0.106) + 2.4192 × 10<sup>12</sup> J / (1 - 0.03)  
 = 5.20 × 10<sup>12</sup> J

この熱エネルギーのうち52.0%は昼間の発電に使い、残りの48.0%は夜間の発電のための蓄熱に利用する。

太陽光集熱部で集熱する熱入力の総量は、集光装置を60%とすると以下ようになる。

- 熱入力総量

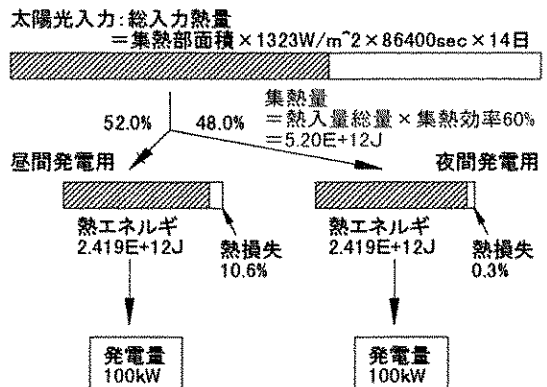


図8 エネルギーの流れ

=太陽光集熱装置で集熱する熱エネルギー/集熱効率

$$=52.0\% \times 1012 \text{ J}/0.6=8.67 \times 10^{12} \text{ J}$$

この熱入力を集めるために必要な集熱部面積は、以下で求められる。

• 集熱部面積

$$= \text{熱入量総量} / (\text{太陽光熱入力密度} \times 14 \text{ 日} \times 86400 \text{ 秒})$$

$$= 8.67 \times 10^{12} \text{ J} / (1323 \times 14 \times 86400) = 5.42 \times 10^3 \text{ m}^2$$

集熱部を円形のパラボラ型とすると、円の半径 r は

$$\begin{aligned} \text{集熱部半径} &= \text{SQRT}(\text{集熱部面積} / \pi) \\ &= \text{SQRT}(5.42 \times 10^3 \text{ m}^2 / \pi) \\ &= 42 \text{ m} \end{aligned}$$

となる。

5.2 ガラスの海の規模の算定

ガラスの海システムの蓄熱部の体積は以下の式で求められる。

$$We = \eta \cdot Wm \cdot (Cph \cdot Th - Cpl \cdot Tl)$$

ただし、

We : 14 日間で必要な総電力量 [1.21 × 10<sup>11</sup> (J)]

η : 発電システム効率 [5(%)]

Cph : 1000°Cにおける比熱 [1.11(J/g·K)]

Cpl : 0°Cにおける比熱 [0.70(J/g·K)]

Th : ガラスの海温度 (高温時) [1273(K)]

Tl : ガラスの海温度 (低温時) [273(K)]

Wm : ガラスの海の重量

より、Wm を求めると約 1980(ton) となる。ガラスの海の密度を 2.5(g/cm<sup>3</sup>) とすると、体積は約 792(m<sup>3</sup>) となり、一辺が約 9.25(m) の立方体となる。ガラスの海の比熱については、0°Cと 500°Cにおける石英ガラスのデータを用いた。固体の比熱は温度の上昇とともに増加する傾向にあるため、実際には 1000°Cの比熱は更に大きくなり、本モデル下における蓄熱能力は更に高くなるものと予想される。

5.3 100 kW 級ガラスの海システムのスケール

図9に上記の検討による 100 kW 発電のシステムのスケールイメージを示す。

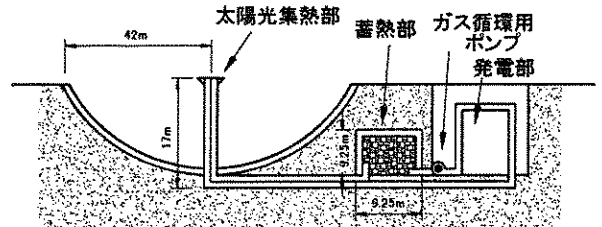


図9 100 kW 級ガラスの海スケールイメージ

6. 地球へのエネルギー伝送

地球資源の枯渇問題は、21世紀に更に深刻化する世界規模の社会問題である。とりわけ、エネルギー資源については、世界人口の増加に伴い非常に困難な局面を迎えるものと考えられる。

図10に世界人口<sup>6)</sup>と電力需要の増加の予測を示す。

世界人口は約半世紀後には現在の2倍に達するものと予想されている。個人の電力消費量<sup>7)</sup>が現在の世界平均レベルであるとする、電力需要も現在の約2倍 (LOW ケース)、一人当たりの電力需要が日本のレベルに達するとすると現在の5倍以上の電力が必要となる (HIGH ケース)。地球資源の有限性を越えて、

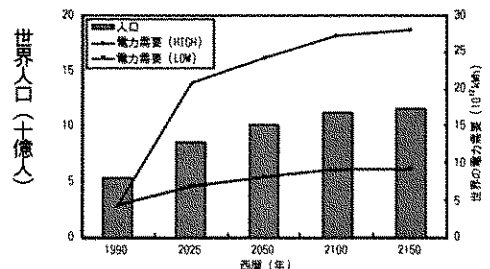


図10 世界人口と電力需要の予測

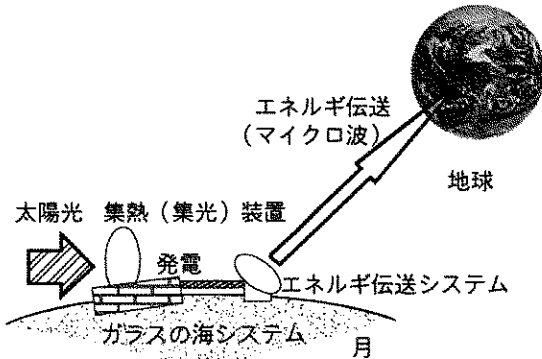


図11 月-地球エネルギー伝送システムのイメージ

このようなエネルギー需要の増加を支える手段の一つとして地球外資源があり、ガラスの海もその一要素となり得るものと考えている。

ガラスの海の最大の特徴は、自己増殖的な拡大が可能な点にある。この特徴を生かせば、地球からの初期投資（エネルギー）をはるかに上回るエネルギーのリターンを得ることが可能になる。また、ガラスの海システムは、稼働部分が少なく、地上の発電システムと比較して極めて耐用年数が高いものと考えられ、拡張という観点からも有利である。

ガラスの海システムで発生されるエネルギーと前述の月資源により、地球からの資源に極力頼らずに、新たなガラスの海システムを構築する。このようにして拡大されたガラスの海システムによる電力を地球に送電する。伝送方式は、SPS（太陽発電衛星：Solar Power Satellite）

と同様にマイクロ波等による送電を考えている。

このような観点から、月から地球への5 GWの送電を実現するための発電+送電システム、それらのインテグレーション、月資源によるシステム構築の可能性について検討を進めている。

図11 伝送システムの概要を示す。

## 7. おわりに

本論では、月面産の安定したエネルギー供給システムとして、ガラスの海システムを提案した。宇宙エネルギー獲得の選択肢の一つとすべく、今後も更に詳細な技術検討を進めていく所存である。

## 参考文献

- 1) 廣田, 宇宙原子力発電, 日本機会学会, 「宇宙における発電システムと廃熱技術に関する調査研究分科会」.
- 2) NASA SP-330, Apollo 17 Preliminary Science Report, 1973.
- 3) 国立天文台編, 理科年表, 丸善.
- 4) B. Tillotson, AIAA 91-3420, Regolith Thermal Energy Storage for Lunar Nighttime Power, 1991.
- 5) JPL D-8160, Thermal Environment, 1991.
- 6) World Resources, 1992-93.
- 7) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課, 総合エネルギー統計, 平成4年度版, 通商産業研究社.