

# ガラスの海構想（1）

## —コンセプト概要—

長島隆一，滝沢悦貞，川添豪，名村栄次郎，○園山実（宇宙開発事業団）

賀谷信幸（神戸大・工），藤田正晴（通信総研）

浜野亘男，長野聰，前田利秀，林原光男，塩野修（日立製作所）

首藤俊夫，落合孝正，土屋正春（三菱総研）

### 1. はじめに

月面活動において、夜間におけるエネルギーの確保は重要である。月の夜は約14日間も続き、月表面の温度は赤道上で約-170°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、月开发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、わずか表面下数十cmの温度は昼夜変らず一定（赤道付近では-20°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（湯たんぽ）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。この湯たんぽを「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。蓄熱材として有望なものとして、レゴリスを太陽集熱器により溶解（融点約1400~1700K）ガラス化し、塊状（ブロック状）にしたもののが考えられる。また、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。

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、ガラス海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海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。

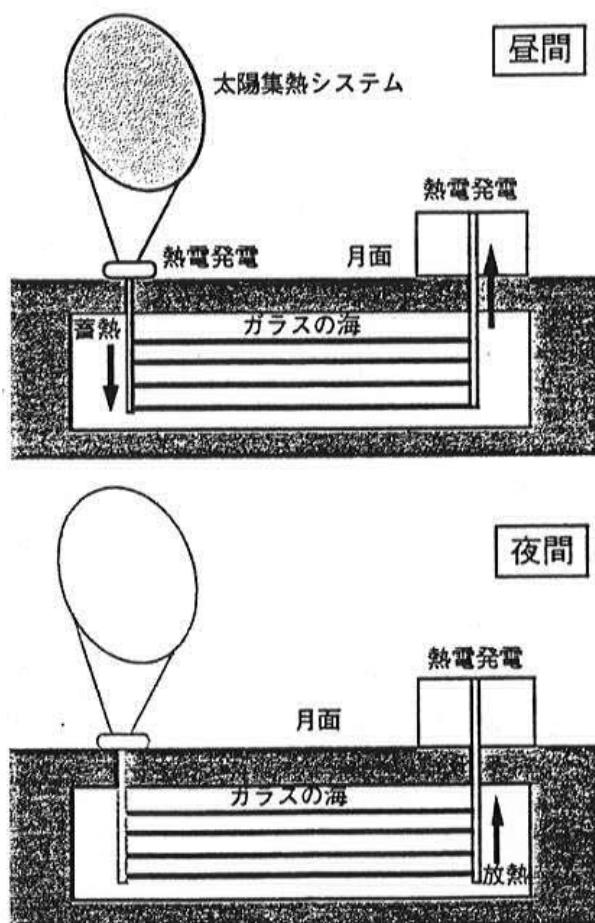


図1 ガラスの海構想の概念

### 3. 自己増殖性の確保

月の开发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。これまでに提案し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。経済的な月开发利用を実現するには、輸送にかけ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2にガラスの海における月資源の活用について示す。

熱電素子においては、入熱の一部は電気に変換される。従って、発電部から放熱部へ流れる熱エネルギーのバランスから次式が成立つ。

$$A_1 \cdot \lambda \cdot \frac{(T_h(t) - T_c(t))}{L} \cdot (1 - \eta(t)) = A_2 \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{rad}(t)^4 \quad \dots \dots (6)$$

$A_2$  : 放熱器の表面積 ( $m^2$ )

$\epsilon$  : 輻射率 (-)

$T_{rad}$  : 放熱板温度 (K)

$\sigma$  : ステファン-ボルツマン定数 ( $5.68 \times 10^{-8} W/m^2 K^{-4}$ )

また、熱電素子の効率  $\eta(t)$  は、次式で与えられる 1)。

$$\eta(t) = \frac{(T_h(t) - T_c(t))}{T_h(t)} \cdot \frac{(M-1)}{(M + T_h/T_c)} \quad \dots \dots (7)$$

$$M = (1 + Z T_M(t))^{1/2}$$

$Z$  : 性能指数 ( $1/^\circ C$ )

$$T_M(t) : (T_h(t) - T_c(t)) / 2$$

熱媒体については、自己増殖の観点から、レゴリス中に含まれるガスを作動流体とする、あるいは地球から運んだ資源を用いる等が考えられる。ここでは、蓄熱部から発電部への熱輸送は材料の制約からレゴリスに含まれるヘリウムで行なうとした。解析に用いた条件を表1にまとめて示す。

## 6. 解析結果

図6に100kW発電システムの概略寸法を示す。発電部の寸法は、熱媒体と発電部(熱電素子)との温度落差の設定値に依存する。ここでは落差を50°C以内と設定して解析した。その結果、発電部の面積は3120m<sup>2</sup>となることがわかった。また、蓄熱部の容積は5370m<sup>3</sup>、放熱部の面積は4340m<sup>2</sup>、集熱部の面積は3680m<sup>2</sup>になることがわかった。

熱電素子は発電部断面積/素子の長さの比が一定であれば、出力は変わらないので、接触熱抵抗の影響が無視できる範囲内で発電部容積を小さくすることができる。表2はその性質を利用し、熱電素子の分散化配置により吸熱板断面積の1/4が発電部断面積であるとして解析した結果である。

## 7. まとめ

自己増殖性を有する月面発電システムを検討し、蓄熱部をレゴリス焼結体、発電部を熱電素子で構成した発電システムを考案した。このシステム構成に基づいて、100kWの発電システムを設計し、蓄熱部、発電部等のサブシステムの規模(寸法)を明らかにした。

### (参考文献)

- 1) 上村欣一、西田勲夫：熱電半導体とその応用：日刊工業新聞社 (1988)

表1 解析条件

集熱部	・集熱強度: 1.3 [kW/m <sup>2</sup> ] ・集熱効率: 60 [%]
蓄熱部	・800°C ~ 600°C
発電部	・温度差: $\Delta T = \frac{Q}{A \cdot h} < 50^\circ C$ [ $T_{acc} = T_h + \Delta T$ , $T_{rad} = T_c - \Delta T$ ]
放熱部	・0°C < $T_{rad} < 100^\circ C$

$\Delta T$  : 温度差 (°C)       $Q$  : 発電部への入熱 (W)  
 $A$  : 吸熱板断面積 ( $m^2$ )       $h$  : 热伝達率 ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )  
 $T_{acc}$  : 蓄熱部の温度 (°C)       $T_{rad}$  : 放熱部の温度 (°C)

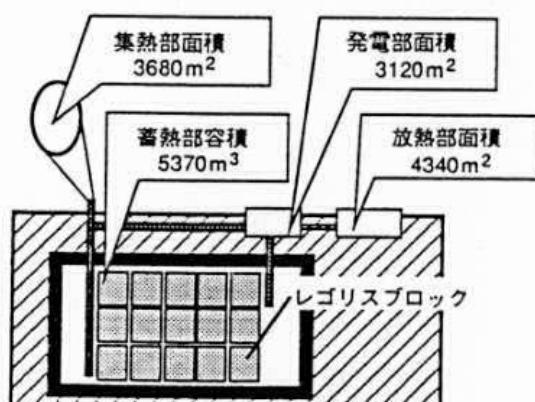


図6 100kWの発電システム

表2 100kW発電システムの規模

集熱部 :	3680m <sup>2</sup>	蓄熱部 :	5370m <sup>3</sup>
発電部* :	780m <sup>2</sup>	放熱部 :	4340m <sup>2</sup>

\* (熱電素子配置の分散化による)

図3-2にシステム3を基本にした590kW発電のシステムのイメージを示す。寸法は3.1での検討に基づいている。

昼間の発電時におけるガスの循環経路と熱入力と熱損失の関係を図3-3に示す。以下の検討でガス循環用のパイプの直径は10cmとする。

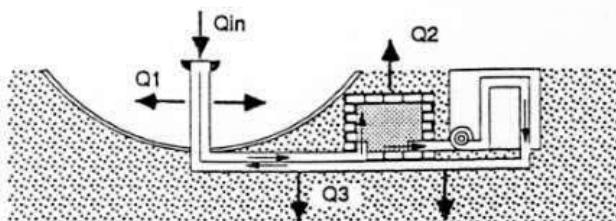


図3-3 昼間の熱入力と熱損失

#### (1) 集熱部での熱入力 Qin

3.1より14日間での1基あたりの熱入力は下式で示される。

$$Q_{in} = 2.4 \times 10^{17} J / 16939 = 1.42 \times 10^{13} J \quad (3-10)$$

ここで窒素ガスは800°C程度までに加熱されるものとする。

#### (2) パイプ露出部での放熱 Q1

太陽光の直接あるいは反射入力は無視して宇宙( $T_2 = 0K$ )への放射のみとし、パイプ部の温度を $T_1=800^\circ C$  ( $1073K$ )とすると、 $Q_1$ は以下の式で示される。

$$Q_1 = A\sigma\epsilon(T_1 - T_2) = 1.2 \times 10^6 W \quad (3-11)$$

ここで、Aは露出部の表面積、

$$A = 2\pi \times 0.1m \times 50m = 31.4m^2$$

$\sigma$ はステファンボルツマン定数、

$\epsilon$ は800°Cの石英ガラス相当の赤外放射率(4)、

$$\epsilon = 0.5$$

14日間の合計では $1.5 \times 10^{12} J$ になり、これは熱入力 $Q_{in}$ の約10%である。

#### (3) 蓄熱部での放熱 Q2

蓄熱部は周囲を厚さ数10cmのレゴリスブロックで密閉され、その周囲は断熱性の高い砂状レゴリスが囲まれる。上部の砂状レゴリスの厚さを $d = 1m$ とし、密閉するブロックを700°C、地表の温度を100°Cとすると熱伝導により蓄熱部から地表への放热量は下式で表される。

$$Q_2 = \frac{\lambda \Delta T}{d} A = 3000 W \quad (3-12)$$

ここで $\lambda$ は砂状レゴリスの熱伝導率、

$$\lambda = 0.01 W/mK$$

Aは蓄熱部上面の面積、

$$A = 20 \times 25 = 500 m^2$$

また上部以外の地中では、密閉ブロック周囲1m近傍での温度を-30°Cとすると、同様に $A = 2300 m^2$ から $Q = 16800 W$ となる。これらの14日間の合計は、 $2 \times 10^{10} J$ となり、熱入力 $Q_{in}$ の約0.1%程度である。

#### (4) 埋設部での放熱 Q3

パイプ直径の2倍付近で-30°Cとすると、長さ $L = 200m$ の500°Cのパイプから周囲への熱伝導量は以下の式

で表せる。

$$Q_3 = \frac{2\pi\lambda\Delta T}{\ln(r_2/r_1)} L = 1 \times 10^4 W \quad (3-13)$$

14日間の合計は $1.2 \times 10^{10} J$ となり、熱入力 $Q_{in}$ の約0.1%である。

以上より、昼間の発電時における熱損失の合計は、熱入力 $Q_{in}$ の約10%と考えられる。

次に夜間発電時の熱損失を検討する。夜間の発電時におけるガスの循環経路と熱入力と熱損失の関係を図3-4に示す。夜間においては、ガスの循環を蓄熱部と発熱部間だけで行い、蓄熱部にはガスを循環させない機構を用意するため、蓄熱部における熱損失は発生しない。

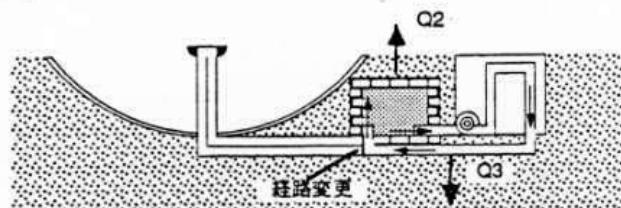


図3-4 夜間の熱損失

#### (1) 蓄熱部の放熱 Q2

昼間の相違として地表が-150°Cになり、ガスによる熱供給がないため蓄熱部のレゴリスブロックも14日間で700°Cから200°Cまで温度が低下するものとする。レゴリスブロックは平均温度として450°Cとすると、(3-12)式と同様の計算により、蓄熱部上部での放熱が2750W、上部以外での放熱が11000Wになる。

これらの合計は14日間で $Q_2 = 1.7 \times 10^{10} J$ であり、蓄熱量 $Q_{in}$ の約0.1%である。

#### (2) 埋設部での放熱 Q3

パイプ長 $L = 100m$ 、パイプの温度を450°Cとすると、(3-13)式より放熱量は4400Wとなり、14日間の合計では $Q_3 = 5 \times 10^9 J$ となる。これは蓄熱量 $Q_{in}$ の約0.03%である。

以上より、夜間時の熱損失は蓄熱量 $Q_{in}$ の約0.1%程度となる。

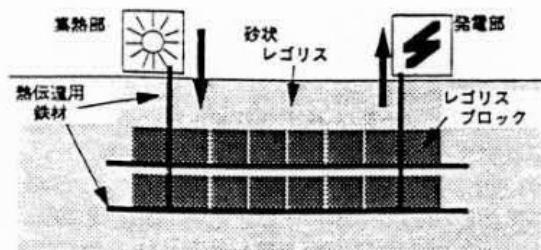
## 4. おわりに

本論ではガラスの海システムに関して、構成と蓄熱性能の点から現実的な可能性を踏まえて検討を行った。今後はさらに詳細なシステムモデルでの解析を行い、実現に向けての技術検討を進めていく。

## 参考文献

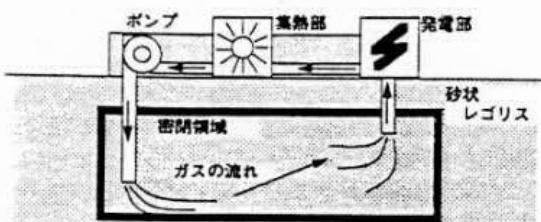
- (1) 廣田、宇宙用原子力発電、日本機械学会、「宇宙における発電システムと排熱技術に関する調査研究分科会」成果報告書
- (2) 日本機械学会編、「伝熱工学資料」(1986)
- (3) Roger A.Crane, "Evaluation of In-Situ Thermal Energy Storage for Lunar Based Solar Dynamic Systems", NASA-CR-189054 (1991)
- (4) 「伝熱計算法」、工学図書

ルミニウムが最も優れている(2)。



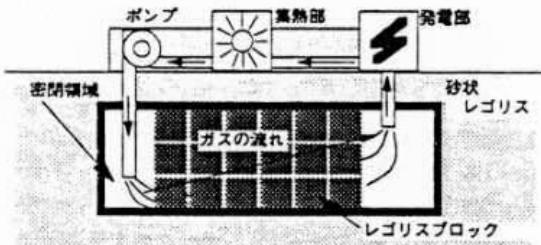
蓄熱体：レゴリスを融解して固めたレゴリスブロック  
熱伝達媒体：レゴリスから抽出した鉄により製造された平板もしくは線状の鉄材

図 2-3 システム 1 概要図



蓄熱体：月面上に自然に存在する状態の砂状レゴリス  
熱伝達媒体：窒素もしくはヘリウムガス

図 2-4 システム 2 概要図



蓄熱体：レゴリスを融解して固めたレゴリスブロック  
熱伝達媒体：窒素もしくはヘリウムガス

図 2-5 システム 3 概要図

表 2-1 Al, Fe, Si の熱伝導率(2)

温度 K	熱伝導率 W/(m · K)		
	アルミニウム Al	鉄 Fe	けい素 Si
150	248	104	409
250	235	86.5	191
300	237	80.3	148
600	232	54.7	61.9
800	220	43.3	42.2
1000	----	32.6	31.2
1200	----	28.2	25.7

表 2-2 Al, Fe, Si の融点(2)

融点 K	アルミニウム Al	鉄 Fe	けい素 Si
	933.5	1810	1685

しかし、表 2-2 に示すようにアルミニウムは融点が低いため、1200K程度まで温度が上昇する蓄熱部に用いることはできない。

このためシステム 1 では熱伝達体として鉄材を利用することとしたが、これは熱の伝達効率の点からは非常に効率が悪いと言わざるを得ない。システム 1 の成立の可能性は、これによりかなり低下してしまう。

また、熱の伝達効率を上げるためにレゴリスブロックと鉄材の接触面積をできるだけ大きくするように、それぞれの表面を平滑に処理することが必要となるが、月面上でそのように精度を要求される処理を行うことは困難であろう。

システム 2 は自然の状態の砂状のレゴリスを蓄熱体に用いる方式である。熱の伝達には、月面上の表土に多く含まれているといわれる窒素ガスもしくはヘリウムガスを用いる。集熱部でガスを熱し、温度が上昇したガスを砂状レゴリスの中を循環させることでレゴリスに熱を伝達し蓄熱する。

ガスを循環するためにはポンプ等の機械部品が必要とされるが、これに関しては月面上で製造するのが困難であれば、地球から輸送することを考える。

ガスを用いる場合にはなんらかの方法で密閉空間を作り出さなければならないが、テルミット反応を利用して地中のレゴリスを壁状に固めることにより、レゴリスを掘り返すことなく密閉空間の構築は可能であろう。またこのシステムではレゴリスブロックを作成する必要もない。

これらの点から、システム 2 は構築方法としては今回検討するシステムの中では、最も簡単な方式であると言える。しかし、ガスが循環することにより砂状レゴリスが舞い上がり、ガスが循環するパイプの壁面およびポンプの内部に砂状レゴリスが付着し、それにより発電システムの機能に支障をきたすことが考えられる。

システム 3 ではシステム 1 と同様に蓄熱体にレゴリスブロックを使用し、伝熱媒体にはシステム 2 と同じく窒素ガスを利用する方式である。レゴリスブロックは月面地下に設けられた密閉された空間の中に、適当な隙間において並べられる。集熱部で熱され温度が上昇した窒素ガスは、ポンプにより密閉空間の内部を循環し、並べられたレゴリスブロックに熱を伝達し蓄熱する。

この方式によればシステム 1 のように熱伝導率の低い鉄材を使用する必要もなく、またシステム 2 のようにガス循環経路に対しての砂状レゴリスの影響も心配する必要はなくなる。レゴリスブロックを大量に必要とすることと、蓄熱部を並べるための空間を月面上に作り、ガスが漏れないように処理しなければならないことといった構築上での問題はあるが、この方式が今回検討したシステムの中では、システムとしての成立の可能性が最も高い方式であると考える。

### 3. システムの規模

#### 3.1 システム全体の熱収支

太陽光熱入力のエネルギーをもとにガラスの海発電

システムにおいて、熱エネルギーが電気に変換されるまでのエネルギーの流れを図3-1に示す。

ここでは、以下のことを前提条件として検討した。

- ・昼夜とも同量の発電を行う。
- ・発電量は昼夜とも10GWとする。
- ・昼間は太陽光熱入力によるエネルギーの50%で発電を行い、残りの50%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。
- ・蓄熱部および配管系の熱損失を、昼間は全体の10%夜間は全体の0.1%とする。(3.2参照)
- ・太陽光熱入力密度: 1323W/m<sup>2</sup>
- ・集熱装置の効率: 60%
- ・発電の効率: 5%

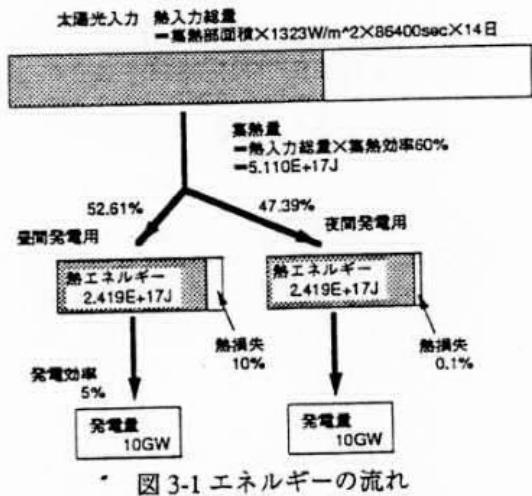


図3-1 エネルギーの流れ

昼夜とも発電量10GWをそれぞれ14日間にわたり発電するためには、総エネルギーとして以下の熱エネルギーが必要である。このエネルギーは夜間の発電に用いる分は蓄熱部に蓄えられ、昼間は順次発電に利用される。

$$\begin{aligned} \text{14日間の10GW発電に必要な熱エネルギー} \\ &= \text{発電量} \times 14\text{日} \times 24\text{時間} \times 3600\text{秒} / \text{発電効率} \\ &= 10 \times 10^9 \text{W} \times 14 \times 86400 / 0.05 \\ &= 2.4192 \times 10^{17} \text{J} \end{aligned} \quad (3-1)$$

このために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、以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} \text{太陽光集熱装置で集熱する熱エネルギー} \\ &= 10\text{GW発電分の熱エネルギー} \\ &\quad / (1 - \text{昼間の熱損失}) \\ &+ 10\text{GW発電分の熱エネルギー} \\ &\quad / (1 - \text{夜間の熱損失}) \\ &= 2.4192 \times 10^{17} \text{J} / (1-0.1) + 2.4192 \times 10^{17} \text{J} / (1-0.01) \\ &= 5.110 \times 10^{17} \text{J} \end{aligned} \quad (3-2)$$

この熱エネルギーのうち52.61%は昼間の発電に用い、残りの47.39%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、集熱効率を60%とすると以下になる。

$$\begin{aligned} \text{熱入力総量} \\ &= \text{太陽光集熱装置で集熱する熱エネルギー} / \text{集熱効率} \end{aligned}$$

$$= 5.110 \times 10^{17} \text{J} / 0.6 = 8.516 \times 10^{17} \text{J} \quad (3-3)$$

この熱入力を集めるために必要な集熱部面積は、以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} \text{集熱部総面積} \\ &= \text{熱入力総量} \\ &/ (\text{太陽光熱入力密度} \times 14\text{日} \times 86400\text{秒}) \\ &= 8.516 \times 10^{17} \text{J} / (1323 \times 14 \times 86400) \\ &= 5.322 \times 10^8 \text{m}^2 \end{aligned} \quad (3-4)$$

集熱部を円形のパラボラ型とし円の直径を200mとする、上記の集熱部の総面積を確保するためには集熱部を以下の数用意することが必要である。

$$\begin{aligned} \text{集熱部の数} &= \text{集熱部総面積} / \pi 100^2 \\ &= 16939 \end{aligned} \quad (3-5)$$

蓄熱部に対してひとつの集熱部を用意することになると、ガラスの海1基での発電量は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{ガラスの海1基発電量} \\ &= 10\text{GW} / 16939 \end{aligned} \quad (3-6)$$

$$= 590\text{kW}$$

次に以上の規模の発電に必要なガラスの海1基あたりの蓄熱部の体積を求める。

ガラスの海1基において14日間で発電するエネルギー量Eは次式で求められる。

$$\begin{aligned} E &= 590\text{kW} / 0.05 \times 86400\text{sec} \times 14\text{日} \\ &= 1.427 \times 10^{10} \text{kJ} \end{aligned} \quad (3-7)$$

ここで0.05は発電の効率である。

蓄熱部として必要な体積Vは次式で求められる。

$$V = \frac{E}{\rho(C_H T_H - C_L T_L)} \quad (3-8)$$

ここでCはガラス相当としたレゴリスブロックの比熱C(kJ/kg/K)であり、温度T(K)の時に次式のように表せる(3)。添字HとLはそれぞれ高温時と低温時を示す。

$$C = -1.8485 + 1.04741 \times \log(T) \quad (3-9)$$

$$T_H = 700^\circ\text{C}, T_L = 200^\circ\text{C}$$

レゴリスブロックの密度を

$$\rho = 2000\text{kg/m}^3$$

$$V = 8968 \text{m}^3$$

つまり、昼間に蓄熱した温度によりガラスの海が700°Cまで上昇し、14日間の夜間の発電によりそれが200°Cまで低下するとした場合に、590kw発電システムの蓄熱部に必要な体積Vは約9000m<sup>3</sup>となる。

### 3.2 システムの熱損失

2.で検討したシステム3の方式をベースに、ガラスの海発電システムにおける熱損失について検討する。

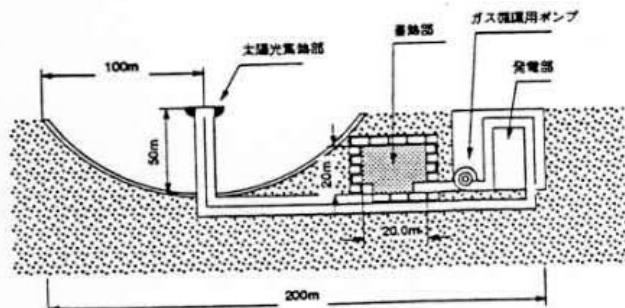


図3-2 検討システムイメージ

# ガラスの海構想（2） —フィージビリティスタディとシステムトレードオフ—

長島隆一, 滝沢悦貞, 川添豪, 名村栄次郎, 園山実 (宇宙開発事業団)

賀谷信幸 (神戸大・工), 藤田正晴 (通信総研)

浜野亘男, 長野聰, 前田利秀, 林原光男, 塩野修 (日立製作所)

首藤俊夫, 落合孝正, ○土屋正春 (三菱総研)

## 1. はじめに

第1報において「ガラスの海」として月面産の安定したエネルギー供給システムの概念を提案した。本論ではこの「ガラスの海」の基本システムについていくつかの可能性のある方式を考え、それぞれのシステムについて構成と蓄熱性能の観点から比較検討を行う。

## 2. システム構成比較検討

### 2.1 システム構成要素

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。
- ・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。
- ・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。

### 2.2 集熱部

一般的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。この方法は実用化の研究も行われ、集熱効率は高い。ただし、集熱の中心をパラボラから離れた位置に設置することが必要となり、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あつたりするため、集熱効率はパラボラ型に比べて低い。

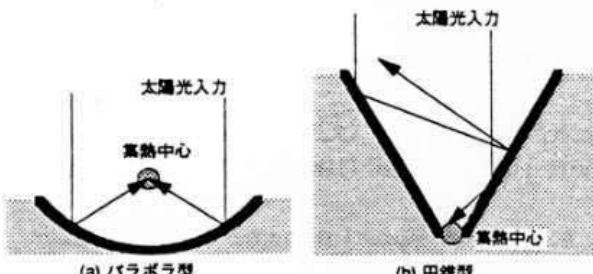


図 2-1 集熱部の形状

集熱部を太陽に対して正対するように移動させることで集熱効率を向上させることができるが、地球への電力伝送を前提に規模を大きくした場合、全体の規模は集熱装置が直径数10m～数100m程度の大きさとなる

ため、パラボラの向きを変化させるのは現実的には困難であろう。

以上のことから、ガラスの海発電システムの集熱部はとしては、据え置きのパラボラ型が適当であると考える。

### 2.3 発電部

集熱した熱は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式は図に示すように分類される(1)。

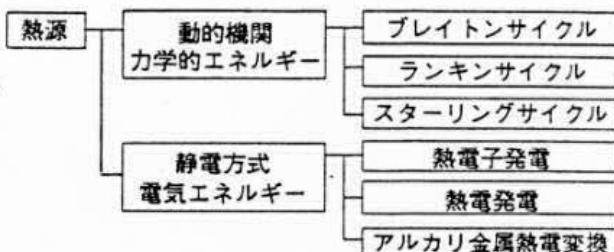


図 2-2 エネルギー変換方式の分類

動的機関を用いる方式は非常に効率が高いが、高度な機械構成要素が必要とされ、これらを月面上で製造すること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、比較的構造が簡単で、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て済む、熱エネルギーから電気エネルギーへ直接変換する方式が適当であると考える。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言える。

### 2.4 蓄熱部

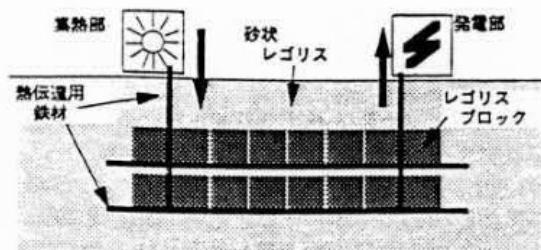
蓄熱部に関してはその構成としていくつかの方式が考えられる。図2-3、図2-4、図2-5に方式の異なる3種類のシステムを示す。

どのシステムにおいても蓄熱部の周囲は砂状レゴリスでおおい、レゴリスの優れた断熱特性を利用して蓄熱部からの放熱を防ぐ構成としている。

システム1および3で蓄熱体として利用するレゴリスブロックはレゴリスを融解（融点約1400～1700K）し、ブロック状に固めたものであり、ガラスと同程度の熱容量になるとされる。

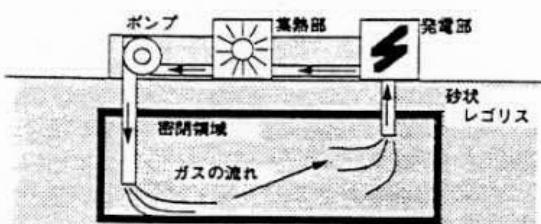
レゴリスに含まれる金属元素で大きな割合を占める元素は、第1報で述べたように珪素、鉄、アルミニウムである。それぞれの熱伝導率は表2-1に示すようにア

ルミニウムが最も優れている(2)。



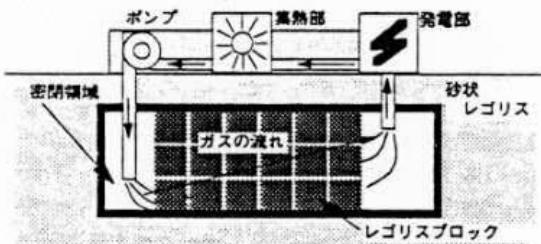
蓄熱体：レゴリスを融解して固めたレゴリスブロック  
熱伝達媒体：レゴリスから抽出した鉄により製造された平板もしくは線状の鉄材

図 2-3 システム 1 概要図



蓄熱体：月面上に自然に存在する状態の砂状レゴリス  
熱伝達媒体：窒素もしくはヘリウムガス

図 2-4 システム 2 概要図



蓄熱体：レゴリスを融解して固めたレゴリスブロック  
熱伝達媒体：窒素もしくはヘリウムガス

図 2-5 システム 3 概要図

表 2-1 Al, Fe, Si の熱伝導率(2)

温度 K	熱伝導率 W/(m · K)		
	アルミニウム Al	鉄 Fe	けい素 Si
150	248	104	409
250	235	86.5	191
300	237	80.3	148
600	232	54.7	61.9
800	220	43.3	42.2
1000	----	32.6	31.2
1200	----	28.2	25.7

表 2-2 Al, Fe, Si の融点(2)

融点 K	アルミニウム Al	鉄 Fe	けい素 Si
	933.5	1810	1685

しかし、表 2-2 に示すようにアルミニウムは融点が低いため、1200K程度まで温度が上昇する蓄熱部に用いることはできない。

このためシステム 1 では熱伝達体として鉄材を利用することとしたが、これは熱の伝達効率の点からは非常に効率が悪いと言わざるを得ない。システム 1 の成立の可能性は、これによりかなり低下してしまう。

また、熱の伝達効率を上げるためにレゴリスブロックと鉄材の接触面積をできるだけ大きくするように、それぞれの表面を平滑に処理することが必要となるが、月面上でそのように精度を要求される処理を行うことは困難であろう。

システム 2 は自然の状態の砂状のレゴリスを蓄熱体に用いる方式である。熱の伝達には、月面上の表土に多く含まれているといわれる窒素ガスもしくはヘリウムガスを用いる。集熱部でガスを熱し、温度が上昇したガスを砂状レゴリスの中を循環させることでレゴリスに熱を伝達し蓄熱する。

ガスを循環するためにはポンプ等の機械部品が必要とされるが、これに関しては月面上で製造するのが困難であれば、地球から輸送することを考える。

ガスを用いる場合にはなんらかの方法で密閉空間を作り出さなければならないが、テルミット反応を利用して地中のレゴリスを壁状に固めることにより、レゴリスを掘り返すことなく密閉空間の構築は可能であろう。またこのシステムではレゴリスブロックを作成する必要もない。

これらの点から、システム 2 は構築方法としては今回検討するシステムの中では、最も簡単な方式であると言える。しかし、ガスが循環することにより砂状レゴリスが舞い上がり、ガスが循環するパイプの壁面およびポンプの内部に砂状レゴリスが付着し、それにより発電システムの機能に支障をきたすことが考えられる。

システム 3 ではシステム 1 と同様に蓄熱体にレゴリスブロックを使用し、伝熱媒体にはシステム 2 と同じく窒素ガスを利用する方式である。レゴリスブロックは月面地下に設けられた密閉された空間の中に、適当な隙間において並べられる。集熱部で熱され温度が上昇した窒素ガスは、ポンプにより密閉空間の内部を循環し、並べられたレゴリスブロックに熱を伝達し蓄熱する。

この方式によればシステム 1 のように熱伝導率の低い鉄材を使用する必要もなく、またシステム 2 のようにガス循環経路に対しての砂状レゴリスの影響も心配する必要はなくなる。レゴリスブロックを大量に必要とすることと、蓄熱部を並べるための空間を月面上に作り、ガスが漏れないように処理しなければならないことといった構築上での問題はあるが、この方式が今回検討したシステムの中では、システムとしての成立の可能性が最も高い方式であると考える。

### 3. システムの規模

#### 3.1 システム全体の熱収支

太陽光熱入力のエネルギーをもとにガラスの海発電

#### 4. レゴリス焼結体

蓄熱部は上述した様に、レゴリスブロックで構成する。このレゴリスブロックについては、熱的物性値が不明なことから、一例として  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  をそれぞれ 46 重量%、16 重量%、15 重量%、13 重量%、10 重量% 含む模擬レゴリスを、1080°C、3ton/cm<sup>2</sup> で加圧焼結し、焼結体を作製した。製造方法を図 4 に示す。この焼結体の比熱を測定した結果、640°C で 750 J/(kg·°C) が得られたので、以下の解析ではこの値を用いた。

#### 5. 100 kW 発電システムの規模（寸法）解析

解析体系を図 5 に示す。集熱部、発電部、蓄熱部からの熱漏洩ではなく、集熱部からの熱エネルギーの供給量を一定であるとすると、昼間及び夜間の発電量は次式で与えられる。

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad \dots \quad (1)$$

$$P_{\text{昼}} = Q_2 \times \eta(t) \quad \dots \quad (2)$$

$$P_{\text{夜}} = Q_3 \times \eta(t) \quad \dots \quad (3)$$

ここで、

$Q$ ：昼間、集熱部から発電部、蓄熱部への入熱 (W)

$Q_1$ ：昼間、集熱部から蓄熱部への入熱 (W)

$Q_2$ ：昼間、集熱部から発電部への入熱 (W)

$Q_3$ ：夜間、蓄熱部から発電部への入熱 (W)

$\eta(t)$ ：熱電素子の熱電変換効率 (-)

$P_{\text{昼}}$ ：昼間における発電部の出力 (W)

$P_{\text{夜}}$ ：夜間における発電部の出力 (W)

である。

夜間においては蓄熱部の温度変化に伴い、熱電素子に生じる温度差が変化するため、発電量が時間の経過とともに変化する。設計した 100 kW の発電システムでは、平均電力を次式で定義した。

$$1/t \times \int Q_3(t) \eta(t) dt = 1/t \times \int P_{\text{夜}} dt = 100 \text{ kW} \quad \dots \quad (4)$$

サブシステムの内、蓄熱部、発電部および放熱部は以下のように解析した。蓄熱部は温度を均一と仮定すると、夜間、蓄熱部から発電部へ供給される熱エネルギー  $Q_3$  は次式で与えられ、熱漏洩がないとすれば、 $Q_3$  は発電部（熱電素子）へ流入する熱エネルギーに等しい。熱伝達に伴う温度の低下を無視すると、次式が成立する。

$$Q_3(t) = (C_P \cdot \rho \cdot V) \cdot \frac{dT_{\text{acc}}(t)}{dt} = A_1 \cdot \lambda \cdot \frac{(T_h(t) - T_c(t))}{L} \quad \dots \quad (5)$$

ここで、

$C_P$ ：レゴリス焼結体の定圧比熱 (J/(kg·°C))

$V$ ：レゴリス焼結体の体積 (m<sup>3</sup>)

$T_{\text{acc}}$ ：蓄熱材（レゴリス焼結体）の温度 (°C)

$T_h$ ：熱電素子の高温端温度 (°C)

$A_1$ ：熱電素子の総断面積 (m<sup>2</sup>)

である。

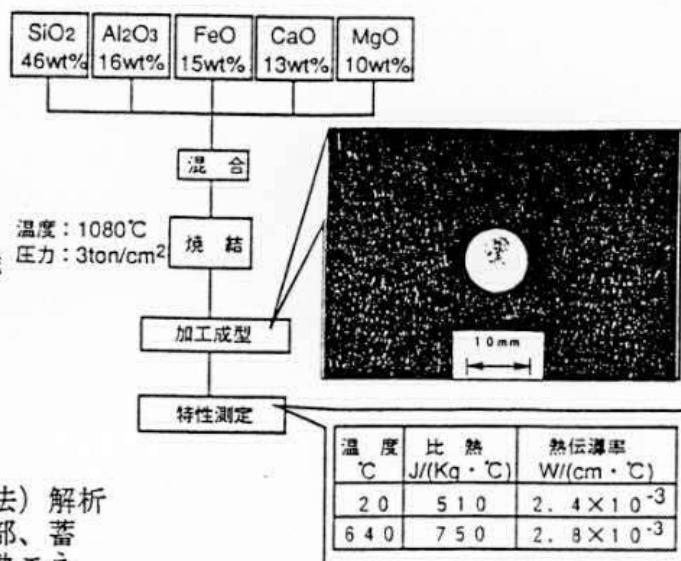


図 4 レゴリス焼結体の製造方法

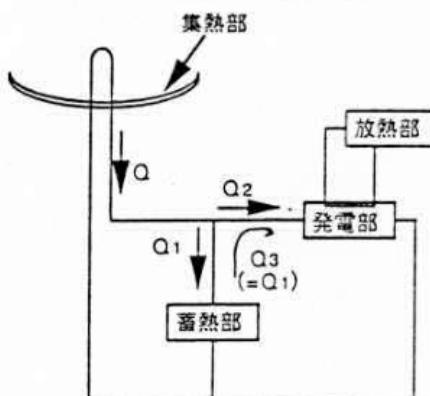


図 5 解析体系

$\rho$ ：レゴリス焼結体の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\lambda$ ：熱電素子の熱伝導率 (W/(m·°C))

$L$ ：熱電素子の長さ (m)

$T_c$ ：熱電素子の低温端温度 (°C)

## 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た場合に、月の夜間に100kW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。

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

ただし、

We: 14日間で必要な総電力量 [ $1.21 \times 10^{11}$  (J)]

$\eta$ : 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を求めるとき約1980 (ton) となる。ガラスの海の密度を2.5 (g/cm³) とすると、体積は約792 (m³) となり、一辺が約9.25 (m) の立方体となる (図5)。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。

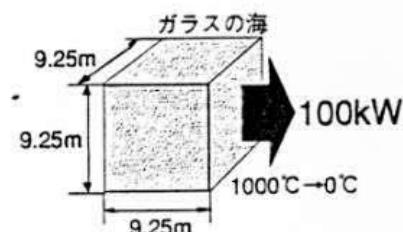


図5 ガラスの海の大きさの算定

## 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6に世界人口<sup>(5)</sup>と電力需要の増加の予測を示す。

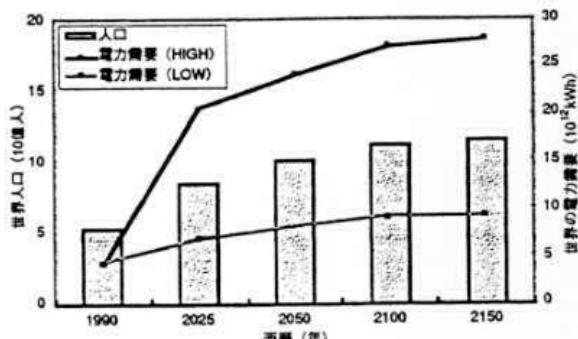


図6 世界人口と電力需要の予測

世界人口は約半世紀後には現在の2倍に達する。

個人の電力消費量<sup>(6)</sup>が現在の世界平均レベルであるとすると、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、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) をはるかに上まわ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長いものと考えられ、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5GW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7に伝送システムの概要を示す。

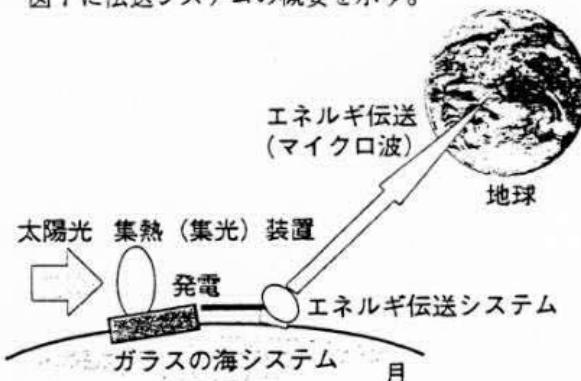


図7 月-地球エネルギー伝送システムのイメージ

## 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) NASA SP-330, Apollo 17 Preliminary Science Report, 1973
- (2) 国立天文台編, 理科年表、丸善
- (3) JPL D-8160, Thermal Environment, 1991
- (4) B. Tillotson, AIAA 91-3420, Regolith Thermal Energy Storage for Lunar Nighttime Power, 1991
- (5) World Resources, 1992-93
- (6) 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

レゴリスを構成する主な鉱物は、輝石、長石、カラン石、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）。

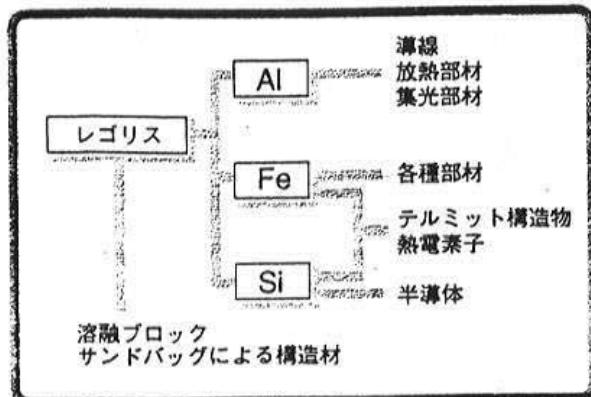


図2 ガラスの海における月資源の活用

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
- ・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。

#### 4. 蓄熱の概要

レゴリスの熱伝導率は、約 $0.01\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ <sup>(1)</sup>であり、ガラスウールや毛布、羊毛、石綿、コルクなどの $0.04\sim0.06\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ <sup>(2)</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。

ガラスの海の初期温度を $1000^\circ\text{C}$ 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>(3)</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 $1.0\text{m}$ のとき約 $23^\circ\text{C}$ 、 $0.3\text{m}$ のとき約 $43^\circ\text{C}$ 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3、図4）。

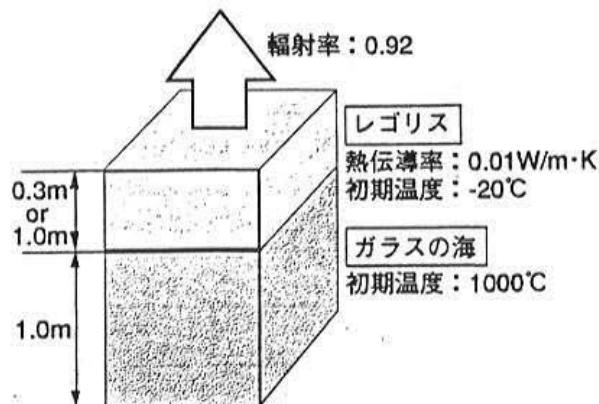


図3 解析モデル

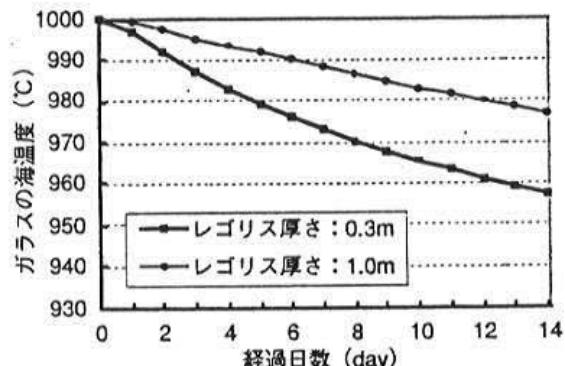


図4 ガラスの海の温度低下

次に、熱の蓄積について述べる。石英ガラスの熱伝導率は、 $2\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ <sup>(2)</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ことが予測される。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。

表1 各素材の熱伝導率

素材	熱伝導率 (推定値) $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
レゴリス	0.01
鋳造ガラス	$2\sim2.5$
テルミット材 ( $\text{SiO}_2+\text{Fe}$ )	$>1.6$
Heガスを混入したレゴリス	$0.84\sim1.76$ <sup>(4)</sup>