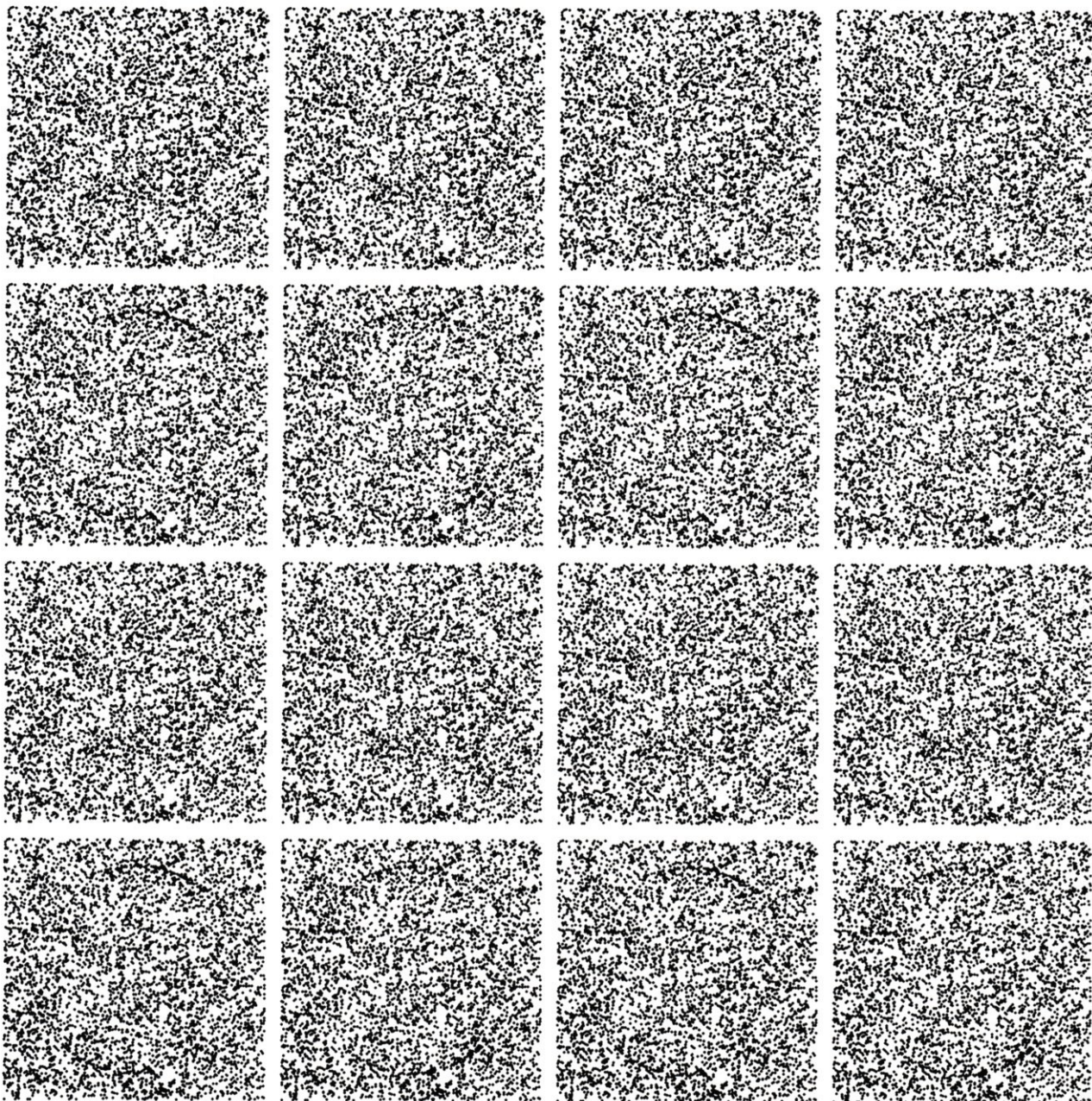


JOURNAL OF THE INSTITUTE FOR ADVANCED SPACE ACTIVITIES

宇/宙/先/端

宇宙先端活動研究会誌
NOV.1993 VOL. 9-NO.

IAA 6



1. 科学的立場から見た月基地建設の諸問題－その2－
(モスクワ国立大学で行われた会議での発表論文の紹介)
富田 信之・・・131

2. JUNK BOX
いくつかのデータ(21世紀の宇宙開発を考えるために)
福田 徹・・・159

宇宙先端活動研究会

代表世話人
五代 富文

世話人

石澤 禎弘	伊藤 雄一	湯沢 克宜	岩田 勉	上原 利数
大仲 末雄	川島 鋭司	菊池 博	櫻場 宏一	笹原 真文
佐藤 雅彦	茂原 正道	柴藤 羊二	鈴木 和弘	竹中 幸彦
鳥居 啓之	中井 豊	長嶋 隆一	長谷川秀夫	樋口 清司
福田 徹	松原 彰士	森 雅裕	森本 盛	岩本 裕之

事務局連絡先

〒105 港区芝大門1丁目3-10 コスモタワービル7F
(財)科学技術広報財団 宇宙プロジェクト室
櫻場 宏一(事務局長)
佐伯 邦子

TEL 03-3459-8115 FAX 03-3459-8116

入会案内

本会に入会を希望される方は、本誌添付の連絡用葉書に所定の事項を記入して本会まで送付するとともに、本年度の年会費を支払って下さい。なお、会費は主に会誌の発行にあてられます。

年会費： 3,000円(1993年6月～1994年5月)
会誌(年6冊)は無料で配布します。

(年会費の支払方法)

1. 財務担当に直接払う

財務担当：岩本 裕之 [宇宙開発事業団宇宙環境利用システム本部
宇宙環境利用推進部(筑波宇宙センター内)]

2. 郵便振替

口座番号：東京2-21144、加入者名：宇宙先端活動研究会

3. 銀行振込

富士銀行浜松町支店 普通3167046

科学的立場から見た月基地建設の諸問題－その2－

(モスクワ国立大学で行われた会議での発表論文の紹介)

富田信之

1 まえがき

前号に引き続き1991年2月モスクワ国立大学シュテルンベルグ記念国立天文学研究所で行われた「科学的立場から見た月基地建設の諸問題」と題する会議の報告論文集の中からГ. А. レイキン、А. Н. サナビッチ、В. В. シェフチェンコによる「月基地の建設について」、В. И. サトニコフ、Г. М. バイダール、Г. А. シゼンツェフによる「既存の技術水準での月基地の実現の可能性について」の2編を紹介する。レイキン等の述べる月基地は最初につくる半永久的の基地では月面下の洞穴の中に居住空間を置くことを考えている（もちろん多重の安全性を考慮してこの中に月面居住モジュールを置くことになるであろう）。月には、そのような目的に合った洞穴があるであろうと彼は想定している。サトニコフ等は、エネルギー、プランを主力とする宇宙輸送システムを用いて月基地の建設を行う具体的な提案をしている。前号で予告したもう一つの論文「長期滞在月基地」は歴史的叙述が中心であり、紙数の都合もあり割愛した。

以下、2章で「月基地の建設について」、3章で「既存の技術水準での月基地実現の可能性について」を紹介する。内容はほぼ原文の全訳であるが、不要と思われるところは削除したり、原文のわかりにくかったところは文章の順序の入れ替えをしたり、原文にはない項立てをしたりしたところがある。また、略号が使っていてその意味が不明のものが、特に3章の表の中にいくつかあったが、これらはロシア文字のまま残してある。おわかりの方はご教示戴けると幸いである。前号、今号に載せた紹介記事を通じて、人類にとっての次の目標の本命は月基地であるという認識を新たにした。地球周回の宇宙ステーションが本当に生きるのは、月への中継基地（将来は火星への中継基地もありうる）、すなわち本来の言葉の意味そのままのステーション（駅）としてであろう。また、月基地を作り、自ら推進薬を製造したり資源を採取したりし始めると月面上に大規模な人工的な手加わることになり、後になって月面の環境破壊をしたと騒がれないような配慮が前もって必要だということもこれらの論文は示唆している。

2 月基地の建設について*1

(1)基本要素

月面上の基地建設の際に考慮されなければならない3つの要素がある。第1に、その施設は人間の日常の生活々動と生命の安全とを保障するとともに作業性と機器類の保全性を保障するものでなければならない。第2に、施設の建設工事はできるだけ安く上げるとともに地球からの大量の物資のみちこみは必要としないものとしなければならない。第3に、施設を建設することによって周囲環境を汚染してはならない。

第1の要素のうちで、人間の日常生活活動と生命の安全の保障に対する要求は作業性の確保の要求とか機器類の保全性の保障の要求に比べて格段にきびしく計画検討の初期段階では前者に要求をしぼることが可能である。人間の生活々動と生命の安全の保障を考える場合の月基地の施設に対する基本要素は、密閉性（シール性）、光と放射線照射からの保護、大幅な温度の変動からの保護、隕石からの防護となる。

月の土壌は、数十億年間にわたる隕石による直撃の結果としてある程度の深さまで細かく砕かれており、このために月面から1～2mの深さになると放射線、地表の温度変化、隕石落下などの外的影響からほぼ完全な隔離が可能である。月表面の温度変化の影響するのは深さ0.5m迄であり、放射線は 100 g/cm^2 のレゴリスの層で吸収されるので深さ0.5m以上になると影響を受けない。月面に直径1m、深さ0.5mのクレータがつくられる確率は1億年に1回であると推定されており、レゴリスの厚さが1～2mあれば隕石落下の影響から防護できる。従って、月に基地をつくる時、人間の居住する施設は1～2mの厚みの

*1 Лейкин Г. А., Санович А. Н., Шевченко В. В. "О создании лунной базы" АСТРОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОСВОЕНИЯ ЛУНЫ И ПОИСК ВНЕЗЕМНЫХ РЕСУРСОВ, ИМУ 1991 с.54~65

天井のある洞穴内につくるのが望ましいのである。

洞穴としては天然にあるものを利用する場合と人工的に掘る場合とがある。月の土壌の特性は洞穴を掘るには都合がよいが密閉性（シール性）と構造強度とを確保するために特別の配慮が必要である。以下、天然洞穴の場合と人工洞穴の場合についてそれぞれ述べることにする。

(2)月面にある天然の洞穴の利用

月面上には天然にできた洞穴があることが地形の形態的特色から指摘でき、これが月基地の施設として利用できる可能性がある。すなわち、月面下にはかなりの大きさと長さを持った、溶岩の中にできた洞穴が存在する可能性があり、このような地域の外的特徴の一つとしていくつかのクレータがつながって見えるということがある。地球上では、溶岩中の洞穴は、玄武岩の溶岩流を伴うハワイ型の火山ではふつうに見られる現象である。このハワイの地勢は月面に非常に近く、その対比から推測すると月面では曲がりくねった条溝（リル）のある地点で洞穴を見いだすことができる可能性がある。これらのリルは溶岩中の洞穴の天井部分が崩れ落ちたものと見なすことができるからである。

溶岩中の洞穴形成のメカニズムは図-1に示すとおりである。図には、2つの形成メカニズムが並べて書いてあるが、基本的には溶岩が溝の中を流れるとき表面が冷却されて天井部を形成し、溶岩の量に制限があるとその溶岩流が流れ去ったあとが空洞となり洞穴を形成するのである。天井部の形成は、図中左側のように端部から冷却固化してゆく場合と図中右側のように流れの表層全面にわたって一挙に固化する場合とがあるが月面で洞穴ができるときは右側のメカニズム（全面が一挙に固化）によるものようである。洞穴の天井部は内圧とか隕石落下等で崩れ落ちることもあるが、しかし、それでもリルが存在するということは崩れていない洞穴がまだ残っているであろうということを示唆している。溶岩中の洞穴の存在の可能性の兆候はクレータのつながりにある。というのは、小隕石群が溶岩中の洞穴の上に落ちてその天井部に穴はあけたが完全に崩壊にいたらなかったとき、外部の観測者には発達した（かなり大きい）クレータのつながりとして見えると考えられるからである。下に洞穴を持たないクレータの直径はもっと小さく目立たないであろう。特に注目すべきはディンプルクレータと呼ばれる小型のクレータである。ディンプルクレータは、レンジャシリーズの月探査ミッション

で発見されたが似たものは地球上にもある。例えば、カムチャッカのトルバチック火山の昔の噴出物のスラグ（溶滓）の広がりを撮った航空写真の中に直径80メートルの崩壊クレータが見いだされたが、これは月のディンプルクレータによく似ておりこの下に空洞が存在する可能性がある。

ディンプルクレータは、高速で落下してきた隕石が表面下比較的深いところで爆発し、そのエネルギーで空洞ができ、そこへ表面の粉碎された物質が落ち込んで生ずるものと説明されている。しかし、隕石が落下する前に存在していた空洞に落下の際にあけられた穴から表面の物質が落ち込んでつくられたものとも考えることもできる。溶岩中の洞穴とディンプルクレータの空洞部の壁とはその生成過程は似ており、そのシール性を居住施設に利用することは新たに人工の密閉施設をつくるよりはずっと簡単であろう。

特に興味があるのは、崩壊していない洞穴の中には噴火の際に発生したガスが保存されている可能性があることである。例えば玄武岩質で月に最もよく似ているハワイのキラウエア火口湖の噴出ガスは平均して容積で68%の水、13%の炭酸ガス、約8%の窒素ガス、7%の硫化水素を含んでいる。崩壊していない大きな洞穴を月面上に発見することは水とか酸素とかの採取に際して極めて経済的な手段となる。しかしこれらの洞穴は表面には必ずしも現れていない。そのような洞穴の発見にはデリケートな方法を用いる必要があり、月面上に人が行って直接調べる意外の方法はないであろう。崩壊した洞穴のある地域から採取した土壌の熱分解の結果に基づいて月面下の埋蔵ガスの存在を究明することもできるであろう。上に述べたことから明かなように月の表面下の天然の洞穴の探索を組織的に行うことは密閉性のよい生活空間を確保できるということと生活に必要な天然資源を直接得ることができるという観点から重要である。月の表面の有望な地域の写真を撮って分析することが必要になるであろうが地球上で空洞をもっている溶岩流に似た地域の調査を行うのが最も洞穴発見の可能性が高い。

具体的な活動に移行するためには高精度の重力測定、電波探知器、地震計などを利用した地下深くの断面計測などに基づく表面下地質構造の詳細な研究法の開発が必要である。特に有望なのは月面上に沿って移動できる手段（ローバーなど）の助けを借りて電波あるいは音波を用い月面下の構造のホログラフィックな画像を得ることである。

(3) 月面への人工の洞穴（導坑）の建設

次に月面に人工の洞穴（以下これを導坑と呼ぶ）を造る場合について述べる。月面上の重力は地上の約6分の1であるから月面下2.5～3mの深さにある地層が上から受ける圧力は地球上では地下0.5mの深さで受ける圧力に等しい。したがって、月面下にトンネル掘削器で導坑を掘ることはそう難しいことではない。掘削器で穴をあけたあとは長期間の使用に耐えるためのシール性と強度確保のための補強をしてやる必要がある。この補強法には結合剤の注入と洞穴の壁を形成するレゴリスの焼結との2種類がある。月面のレゴリスは機械的強度が少ないので導坑を掘るとき地球上で岩石を掘削してゆく方法を適用することは困難である。地上で掘削してゆくときは進行して行く掘削部をしっかりと支える支点がある。月では、土壌の特質上しっかりした支点が取りにくいので、小出力のモータで駆動されるフライホイールを用いた無支点方式の方がよいと思われる。また、掘削器などの動力源としては太陽電池を利用し、シールとか補強の原材料も現地で得られる酸素とレゴリスに浸透している水素を利用するのが得策である。

中心軸が地下約3.5mにある直径2.5mの水平な導坑は壁の材料強度がモノライトのものに近いとすると補強の壁厚は5cmあれば半永久的な使用に耐えるものとなる。厚いレゴリスの層の中に導坑を掘るには次のようにする（図-2）。

—円錐形のドリルを準備する。ドリルの溝は螺旋状でネジ山のようになっていて、先端に行くに従って溝は浅くなる。ネジ山の形状、ピッチ、円錐の角度はドリルが回転すると前進するように土壌の性質を勘案して決める。

—ドリルの回転モーメントは小型電動モータで駆動されるフライホイールから与えられる。このフライホイールは導坑の方向を一定に保つジャイロの役割も果たす。

—フライホイールは、継ぎ手で電動モータとドリルに交互に接続される。

—導坑は、ドリルの回転によりレゴリスを除去すると同時に壁を突き固めてゆく。

—ドリル面の潤滑には液体酸素を用いる。液体酸素は冷却効果を持つ一方、レゴリスの中に酸素を浸透させる効果も持つ。

—ドリルの刃の後ろにガストーチかプラズマ発生装置を置き、掘削された壁面を約1000kで加熱し、レゴリス中に含浸されていた水素と浸透させた酸素と

を爆轟させてレゴリスを溶融させる。トーチはドリルと共に回転するので導坑の壁面にガラス質の被覆が形成される。*2

(4)月のレゴリスの中の水素含有量の推定

月のレゴリスの中に含まれている水素の量の推定と採取法について述べておく。粒子が $1000\mu\text{m}$ 以下の大きさのレゴリス中の水素の含有量は $25\sim 60\mu\text{g/g}$ で平均 $50\mu\text{g/g}$ であることが知られている。平均して 1m^3 の成熟したレゴリスの中には 100g の水素がなければならないことになる。これを水に換算すると約 1kg となる。クレータの丘を覆っているレゴリスは場所によっては厚さ 2m 以上に達すると思われるので月の表面上をそれほど動き回らずに水素を組織的に採取することが可能であろう。

Gibson、Bustin によれば*3、 1g のサンプルの中に含まれている水素の量は試料の粒子の最大直径の関数となっている(図-3)。図-3において縦軸 $Q(D)$ は直径が D より小さい試料 1g の中の水素密度($\mu\text{g/g}$)、横軸のスケールは $\log D$ である(D の単位は μm ; ミクロン)。図-3の①~⑥は月から持ち帰った試料の番号で、各試料とも $D=\lambda$ (λ は太陽風の主成分である陽子の平均自由行程で約 $100\mu\text{m}$)の付近で交差する直線を表している。全てのレゴリスの粒子が球形で一様で有るとするとレゴリス中の水素の表面密度を求めることができるが、このグラフは直径が λ 以下のレゴリスでは太陽風の高エネルギーのために中まで水素が入り、 $40\sim 70\mu\text{g/g}$ の割合で水素を含んでいるが、直径が陽子の平均

*2 レゴリスの熱伝導度が低いので、ただトーチで炙っただけでは必要な厚さの壁ができない。また、結合剤を含浸させようとする高い圧力が必要となる。酸素を含浸させて、爆轟波で高い圧力と温度とを作り出すのがこの方法の特色である。レゴリスの主成分は珪素であるため、できた皮膜はガラス質となるのである。

*3 Gibson E.K., Bustin R. LPSC 18, pt.1 1987

以下の記述は多分図-3のみからはでてこない。理解するためには、Gibson等の論文の参照が必要であろう。

自由行程を越えると厚さλの表層に含まれるもののみとなることを示している。レゴリス表層の水素密度は $0.2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ でこれは10単分子層に相当する。なお、図-3は太陽風に二つの要素があることを示している。一つは太陽活動が静かなときの太陽風で平均自由行程は $1 \mu\text{m}$ 以下であり、もう一つは太陽活動が活発なときの突風的な比較的大きなエネルギーの太陽風で平均自由行程は数十 μm である。

水素を得るのは高温分解法によるが、つぎの二つのやり方がある。

(7)大量のレゴリスを比較的低い温度で加熱するか、またはレゴリス粒子を酸素環境の中で燃焼させて出来た水分を採取する。

(イ)レゴリスの微粒子を 700°C 以上に加熱して、含浸されていた大量の水素を追い出す

レゴリスを溶解するのが水素を得る最も完全な手段である。溶解することによって、酸素、鉄等の試料の採取が同時にできるならば非常に効率がよく、その観点から粒子が微細でイルメナイト*4を含むレゴリスは資源として非常に興味を引くものである。

*4 イルメナイトは、月の岩石を構成する4つの主要な鉱物の一つで、化学式は FeTiO_2 。他の3つは、単斜長石、斜長岩、カンラン岩。(現代天文学講座 2 「月と小惑星」 恒星社 1979 P.90)

3 現有の技術レベルでの有人月基地の実現性について*5

(1)ロシアの現有ロケットとその派生型ロケットを用いて有人月基地を造ることについて述べる。月基地建设で大切なことは長期的な視点、即ち当面の基地の展開をすると同時に将来の能率的な稼働の最初の布石となるものを展開するという視点を失わないことである。

しかし、なによりもまず基地の展開に必要な全てのもの（居住施設、研究施設、生産施設）、そして実際に人類の月面上での生存を保障するに必要なもの全てを最初地球から運び出してやらなければならないのである。これらを月システムと呼ぶことにすると、このシステムの核心は打ち上げロケットである。現在、ロシアが持っている打ち上げロケットを表-1に示す。最大の打ち上げロケットはエネルギーで地球周回低軌道に約 100 ton のペイロードを投入できる。

エネルギーを原型にして超重量級の打ち上げロケットや中量級の打ち上げロケットを造ることが可能である。超重量級のロケットは特に重いペイロードあるいは大規模な分解できないペイロードに、また中量級ロケットは交替要員の派遣あるいは月基地の拡大展開の際に用いることができるであろう。

月基地を現有技術レベルで実現しようとするとき基本的には再使用を考えない方式と再使用を前提とする手段を用いる方式とに分かれる。前者を方式-1、後者を方式-2と呼んで(2)、(3)項にその構想の概略を示すことにする。

*5 Сотников Б. И., Байдал Г. М., Сизенцев Г. И., "О возможности практической реализации проекта лунной базы при современном уровне технических средств" АСТРОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОСВОЕНИЯ ЛУНЫ И ПОИСК ВНЕЗЕМНЫХ РЕСУРСОВ, ИМУ 1991 с 21~37

(2)再使用しない手段を用いる方式による月基地の建設（方式-1）

最も簡単な月面基地でも最低限必要なものは月面居住モジュール、月周回軌道と月面間の輸送手段としての月離着陸船、地球周回軌道と月周回軌道とを結ぶタグロケット*6である。月離着陸船とタグロケットには有人と無人のオプションがある。有人月離着陸船には地球から月への飛行の全期間を通じて乗員の船室となる乗員カプセル*7が付属している。

方式-1の展開は図-4に示すようであって、まず2回のエネルギーロケットの打ち上げ（1、2機目の打ち上げ）でもって地球周回軌道上に推進ブロック*8、月面居住モジュール、月離着陸船などを打ち上げる。地球周回軌道上でこれらをドッキングしてタグロケットで月へ向けて加速してやる。月近傍に到着すると制動減速し、月面居住モジュールと月離着陸船とをタグロケットから切り離して月面上の基地建設予定地へおろす。次にエネルギーをもう2回打ち上げて（3、4機目の打ち上げになる）、タグロケットを軌道上に組み上げる。このタグロケットは月周回軌道に到達するための推進機関に加え、地球への帰還の際使用する推進機関を持つ。他に、月離着陸船（カプセル部分なし）もこのエネルギーで打ち上げる。最後にゼニートロケットで3人の乗員を乗せた乗員カプセルを打ち上げ（通算5機目となる）、タグロケットにドッキングした後、全体をタグロケットで月に向けて加速してやる。月周回軌道に到着したら月離着陸船とカプセルとを切り離して乗員を月面上の基地建設予定地におろす。かくして、4機のエネルギーと1機のゼニートロケットの打

*6 原文は、ракетный буксир。直訳すると「ロケットタグボート」。本資料ではタグロケットと訳す。地球近傍～月軌道間の軌道変換機のことである。

*7 原文では、возвращаемый на землю аппарат。直訳すると「地球への帰還装置」。本資料では、以下単に乗員カプセルと訳す。

*8 原文は、разгонно-тормозной блок。直訳すると「加速-制動ブロック」。前出のタグロケットに比べると簡単なもので加速・減速を行うための推進系のみから構成される。一種の軌道変換機であるが、完全装備のタグロケットとは区別して用いられている。

ち上げで最も簡単な形での月面基地稼働を始めることができる。月面上の科学者たちは移動用に月面ローバを持ち、地球からの補給は3ヶ月毎、人員の交替は1年毎となろう。その後の物資の補給にはプロトンロケットが、施設・設備の補給にはエネルギーロケットが用いられることになろう。

方式-1では、輸送に用いられた手段の全ては原則として再使用しない。

(3)再使用型輸送手段と使い捨てあるいは一部再使用型輸送手段との混合使用方式による月基地の建設(方式-2)

(3-1)一般

方式-2で用いられる輸送手段は、地球～地球周回軌道間でエネルギーと再使用型宇宙輸送システムであるブラン*9、地球周回軌道～月周回軌道間では再使用型タグロケットである。タグロケット用推進薬は使い捨てのタンカーロケット*10で地上から地球周回軌道上に打ち上げられる。月周回軌道～月面間は再使用型の月離着陸船が用いられている。(方式-2における再使用型輸送手段は、以後、文中で特に再使用型と断らない場合がある)タグロケットは、地球帰還時は地球大気の抵抗を利用し跳ね返りながら減速してゆく制動方式をとる。また、タグロケットが有人ミッションで使用されるときには乗員カプセルがタグロケットと月離着陸船間で受け渡しされる。

方式-1と異なり、方式-2では重量の大きなユニット(タグロケット、月面で用いられる各ユニット、推進薬など)のみが使い捨てのロケットで打ち上げられる。これらの大きなユニットは、主として(タグロケットではなく)推進ブロックで加速されて月周回軌道上に運ばれる。ブランでは、基地の装備品、資材、乗員等を打ち上げる。当然ながら、方式-1に比べて方式-2の方がより多くの資材・施設を打ち上げることができる。

*9 ブランは完全再使用型ではなく一部再使用型である。

*10 原文は、ракет-носитель-танкер。推進薬輸送用打ち上げロケットあるいは油槽ロケットとも訳せる。推進薬輸送専門のロケットで、実際にはエネルギーロケットを主として用いる構想になっている。

以下、定常状態に入ったときのタグロケットと月離着陸船の運用について述べる。タグロケットが有人で運用されているときには、乗員カプセルがタグロケットと月離着陸船との間で受け渡しされる。タグロケットが地球周回軌道に帰還してくるタイミングを見計らってタンカーロケットが打ち上げられ、タグロケットが地球周回軌道に戻ってくると、軌道上でタグロケットへの推進薬の補給が行われる。

一方、地上から資材・乗員を積んだプランが打ち上げられ、給油（推進薬移送）の終了したタグロケットにドッキングし、タグロケットに資材・乗員を移す。準備のできたタグロケットは月に向かって出発、月近傍に到着したら制動して月周回軌道に入る。このときにタイミングを合わせて月離着陸船が月面上を離れ月周回軌道に入りタグロケットとドッキングする。月離着陸船はタグロケットから資材・乗員を受取り推進薬の補給を受けた後月面上に降下してゆく。

このような運用法では各輸送手段の出発・到着時刻は厳密に管理してやる必要があるが地球周回軌道上のステーション（地球周回ステーションと呼ぶ）と月周回軌道上のステーション（月周回ステーション）とを用いると出発・到着時刻管理の必要性はなくなり計画のフレキシビリティが増すとともに信頼性・安全性の向上がはかれる。また、推進薬、資材などを蓄えることができ、柔軟かつ能率的な荷捌きができ、予定外の事態への対応、緊急時の避難などのときにも役立つ。月周回ステーションはエネルギーロケットで推進ブロックとともに打ち上げられる。月で製造した産物を月周回ステーションに保管しておいてタグロケットで地球に輸送してやることも考えられる。特に、液体酸素などの推進薬を月面上で生産し、これを地球周回ステーションに送ることはメリットが大きい。地球周回ステーションを中継基地として用いるときにも、乗員、貴重な器材、精巧な器材の地球周回ステーションへの輸送には月への出発前に確認・組立・整備などが必要になるのでプランを用いるかあるいはそのための打ち上げロケットを仕立てるのが望ましい。

以下、再使用型輸送手段を用いた、方式-2による月基地建設の展開を段階を追って述べる。

(3-2)第1段階：再使用型タグロケットの始動と使い捨て型の月離着陸船による月面居住モジュールの輸送

この段階では、地球周回軌道にタグロケット（20,000kg）、月面居住モジュール

(14,680kg)、使い捨て型月離着陸船(12,000kg)ならびにタグロケット用と使い捨て型月離着陸船用の推進薬を2機のエネルギーと1機のプランとで次の如く打ち上げ、ドッキング後、タグロケットで月に向けて打ち出す。(図-5)

—第1回打ち上げ(エネルギー)

燃料を一部搭載したタグロケット(計76,310kg)の打ち上げ

—第2回打ち上げ(エネルギー)

ドッキング機能なしのタンカーロケット*11としてエネルギーを打ち上げ、有人月居住モジュール(14,680kg)と推進薬(64,440kg)とを軌道に投入する。タグロケットはタンカーロケットにドッキングして推進薬の給油を受ける。

—第3回打ち上げ(プラン)

ドライの(ペイロードも推進薬も入っていない)使い捨て型月着陸船の打ち上げを行い、軌道上でタグロケットから21,800 kgの推進薬を給油する。

—月基地の各要素全体をまとめて月に向けて発進。月付近に到着したら制動し、月居住モジュールを使い捨て型月着陸船で月面に下ろす。

—タグロケットは地球に向けて帰還

第1段階におけるタグロケットの運用中の質量構成を表-2に、タンカーロケットの質量構成を表-3に示す。

(3-3)第2段階：再使用型月離着陸船の稼働開始と要員の月への輸送

この段階では、地球周回軌道に再使用型有人月離着陸船と基地稼働に必要な推進薬および要員(3名)を打ち上げ、月へ要員を送り届ける。各イベントのステップは次の通りである。(図-6)

—第4回打ち上げ(エネルギー)

再使用型有人タグロケットの給油のためのドッキング装置なしのタンカーロケットとして82,500 kgの推進薬を打ち上げる。

*11 原文は、танкер пассивный。直訳は「受動型タンカー」

簡単な姿勢制御システムしか持たず、軌道上でのランデブドッキングのとき受け身側になることを示している。

－第5回打ち上げ（エネルギー）

推進薬（76,950kg）と乗員カプセル（乗員なし；2,500kg）を地球周回軌道に打ち上げる

－第6回打ち上げ（プラン）

再使用型有人月離着陸船（ドライ；12,000kg）と要員（3名；500kg 宇宙服込み）を地球周回軌道に打ち上げ。再使用型月離着陸船へ推進薬（33,980kg）給油。

－乗員のカプセルへの搭乗。タグロケットの加速。月近傍で制動。タグロケットと有人月離着陸船・乗員カプセルを切り離し、タグロケットは地球へ帰還。月離着陸船は月の有人月居住モジュール着地点に乗員を下ろす。

－月基地活動開始

(3-4)第3段階；月周回ステーションの活動開始

この段階では、月周回ステーション（20,000kg）を月周回軌道に投入し、乗員（3名；500kg）とタグロケット1サイクル分の推進薬を送り届ける。ステップは次の通りである。

－第7回打ち上げ（エネルギー）

ランデブドッキング機能無しの特種タンカーロケットとしてのエネルギーで推進薬（82,500kg）を打ち上げる

－第8回打ち上げ（プロトン）

月周回ステーション（20,000kg）を地球周回軌道に打ち上げタグロケットとドッキングする。

－第9回打ち上げ（プラン）

推進薬（14,450kg）と月周回ステーション乗員（3名；500kg）の地球周回軌道上への打ち上げ

－推進薬のタグロケットへの給油と乗員の移乗。タグロケット加速。月周回ステーションを月周回軌道に投入。タグロケットは地球へ帰還して地球周回ステーションとドッキングする（地球周回ステーションは既存のものを用いる）

－月周回ステーション活動開始

(3-5)第4段階；月基地と月周回ステーションの要員交替と物資補給

月基地、月周回ステーションへの資材・推進薬・交替要員の補給を行うときのやり

かたは次の通りである。要員の交替は3ヶ月毎、資材の補給は1年毎であるので物資のみの補給の場合と要員の交替も併せて行う場合とは方法が異なり、ここでは要員交替を併せて行う場合について述べる。

補給の全サイクルに要する推進薬量は 174,040 kg で、推進薬の打ち上げをランデブドッキング機能付きのタンカーロケットで行うとすると1回の輸送量は 79,670 kg であるので、2回の打ち上げでまず 159,340 kg の推進薬を軌道に打ち上げる必要がある。不足分の推進薬 14,730 kg は、交替要員とともにプランで打ち上げる。打ち上げのステップは次の如くである。(図-8)

ー第10回打ち上げ(エネルギー;ランデブドッキング機能付きタンカーロケット)
推進薬 79,670 kg を地球周回ステーションまで打ち上げる

ー第11回打ち上げ(エネルギー;ランデブドッキング機能付きタンカーロケット)
推進薬 79,670 kg を地球周回ステーションまで打ち上げる

ー第12回打ち上げ(プラン)

交替要員と推進薬の不足分 14,730 kg を地球周回ステーションまで打ち上げる。

ータグロケットへの推進薬給油。交替要員の移乗。タグロケットを地球周回ステーションから切り離して月に向けて加速。月周回ステーションへの到着

ータグロケットの地球周回ステーションへの帰還・ドッキング

以下、補給・要員交替の場合には第4段階の各ステップを繰り返すことになる。

このシステムが、最も効率的な形で稼働を始めるのは月面と月周回ステーションに推進薬の貯蔵ができるようになってからであろうが、これは月面上での推進薬製造が組織化されて始めて可能となる。

酸化剤の製造が月でできればそれだけ月面へ運べるペイロードの量を増やすことができ、月離着陸船で月面上に運べる資材の量は 12,300 kg となる。

もしも月面上で水素を製造することに成功すれば離陸のために必要な推進薬量のすべてがペイロード質量に移行しその総計は最低でも 15,500 kg となる。

(4)まとめ

方式-1では、使用する手段の大部分が既に充分詳細に検討されており、技術的にも今日の段階で既にテスト済みのシステムを利用するので基地の稼働開始までの打

ち上げ数は最小で時間的にも最短であるというメリットがあり、月基地のプロトモデルはエネルギー4機とゼニート1機の打ち上げで稼働開始可能となる。方式-1の本質的欠陥は、いずれの段階をとってみても全ての手段が使い捨てであることで、将来的な観点から見ると満足に行くものとは言えない。

方式-2は、その点、ずっと複雑であるが最終的に得るところはより大きい。

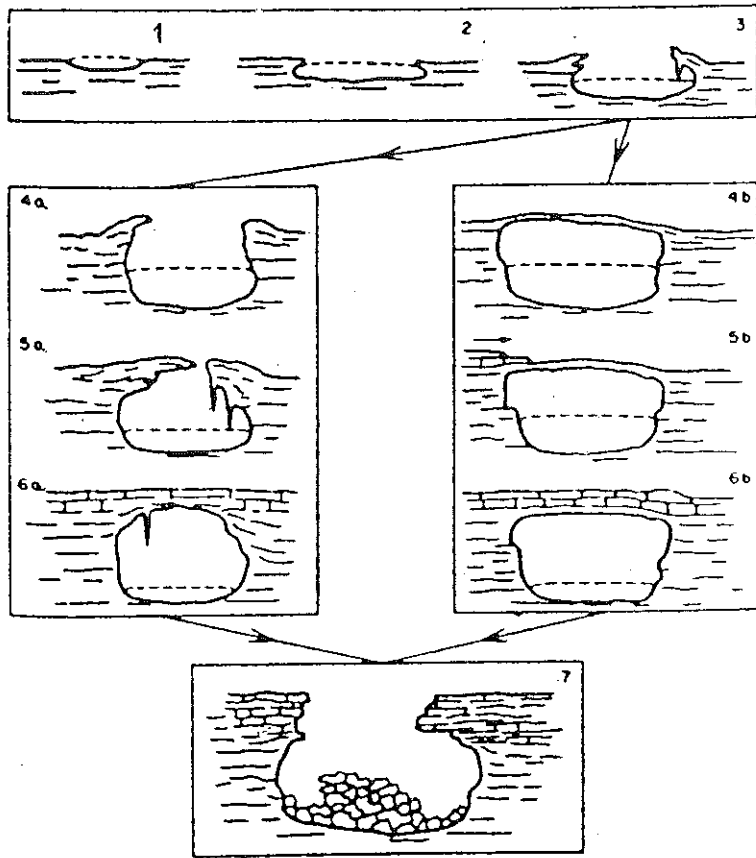
方式-2は再使用型輸送システムの利用を前提として最小の出費で与えられた課題を達成できるように考えたものである。月基地の実現は方式-1によった場合に比べると少し遅れるが、しかし方式-1とことなり継続性のある輸送手段を持つことができ、長期的に見れば損失は最小限にできる。(タンカーロケットのタンク部分は、プランにより地上に持ち帰ることも考えられる)

方式-1の欠点として宇宙ならびに地上におけるオペレーションの複雑さ、それによるペイロードの損失、沢山の重量級打ち上げロケットを狭い時間帯の中で連続して打ち上げなければならないこと、多くの回数のドッキングとそれに伴うペイロードの損失、信頼性の低下、損失推進薬を追加して打ち上げなければならないことなどが挙げられる。しかし、これらの欠点のうち幾つかは方式-2でも共通である。上述の問題点のほとんどは超重量級打ち上げロケットを開発し、月基地を構成するのに必要なシステム要素全体を1回の打ち上げで軌道に乗せることによって取り除くことができる。コストの比較分析の結果では、複数機の打ち上げで月基地を作る方法は超重量級打ち上げロケットにより1回で打ち上げる方法に比べて高価である。エネルギーの派生型として開発する超重量級打ち上げロケットの1回の打ち上げコストは～1億ルーブルであり、月基地の稼働までには、～2億ルーブルが必要である。(開発費を除く)

方式-1で月基地を展開するために必要な費用の総計は3.3億ルーブルである(これも、新しく開発する輸送手段の開発費は別)。一方、超重量級の打ち上げロケットの開発には～40億ルーブルの規模の資金投資が必要である。方式-1でも、ランデブドッキング、宇宙空間での物資の輸送、推進薬の移送、乗員の移乗のための技術手段の開発が必要なので実際にかかる費用は先の数字よりずっと大きくなる。もしも、検討の範囲を基地の運用段階ならびにその後の拡張段階まで広げると月基地の要員の交替、大量の物資の補給の定期化を考慮して超重量級打ち上げロケットの1回打ち上げによる基地展開で節約した費用は、その活動の5～7年分の経費を

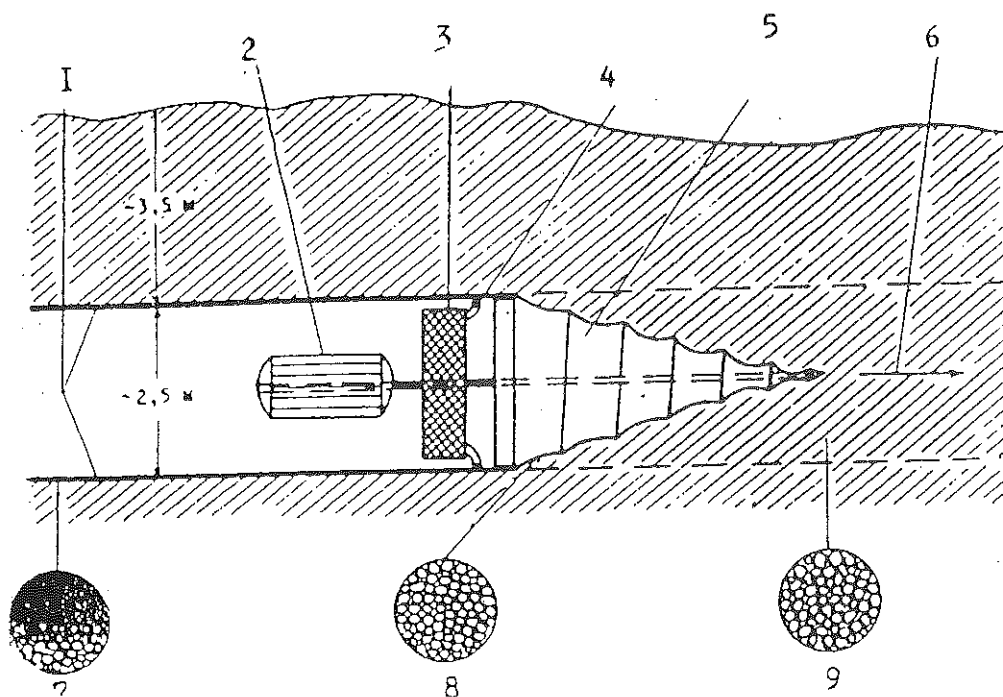
まかなうものである。

以上に述べた計画は、米国のスペースシャトル利用による月計画と比べても優位は明かである。例えば、月周回ステーション、再使用型月離着陸船の採用は、多数の月基地へのアクセスを可能とし、また、探検ミッションにも利用できる。この計画での新しい開発要素として、他に再使用型タグロケット、再使用型月離着陸船がある。タグロケットは、地球の静止軌道へのペイロード投入用の軌道変換機として、また、重量級の探査装置を太陽系の他の惑星に向けて送り出す手段としても利用できる。これらの装置類は、月計画で開発されるとしても、本来は汎用であって月以外の地域でも用いられるものである。そして、もし、今積極的に月基地建設へ向けて組織的な動きを始めれば、10～15年以内に稼働させることが可能であろう。



図は、洞穴の天井部の形成の仕方として考えられる2つの異なるメカニズムを示している。左側（4a～6a）は端部から冷却固化して行く場合、右側（4b～6b）は流れの表層全面で一挙に冷却固化がおこる場合である。

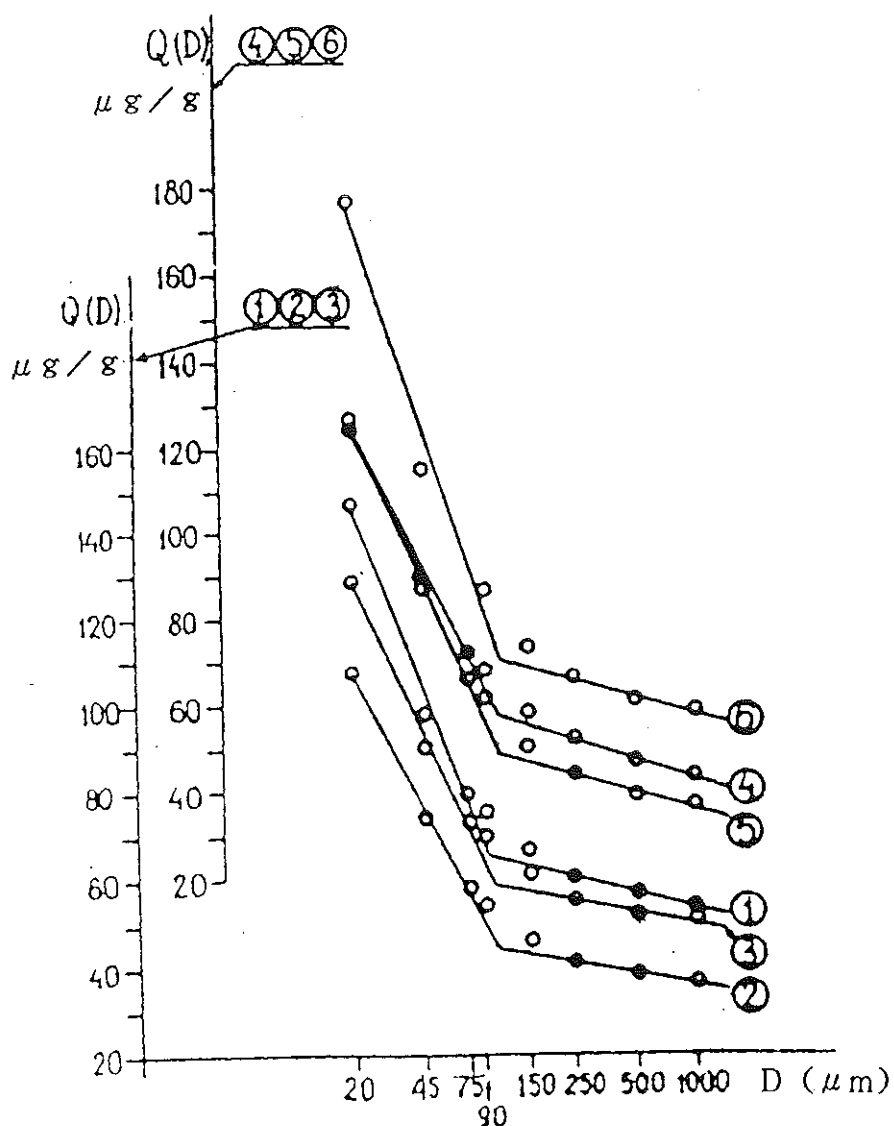
図-1 溶岩中の洞穴形成のメカニズム
 (Лейкин Г. А. et al. 1991)



1—厚さ5cmのガラス質強化壁を持った導坑； 2—電動モータ；
 3—フライホイール； 4—トーチ； 5—ドリル； 6—ドリル進行方向
 7—水素と酸素との混合爆轟・衝撃波の拡散で内壁が焼結したところの断面図；
 8—潤滑剤の液体酸素が気化浸透し、レゴリスが酸素と水素とで飽和した状態の断面図；
 9—天然の状態のレゴリスの断面図。単分子の水素を含浸している。

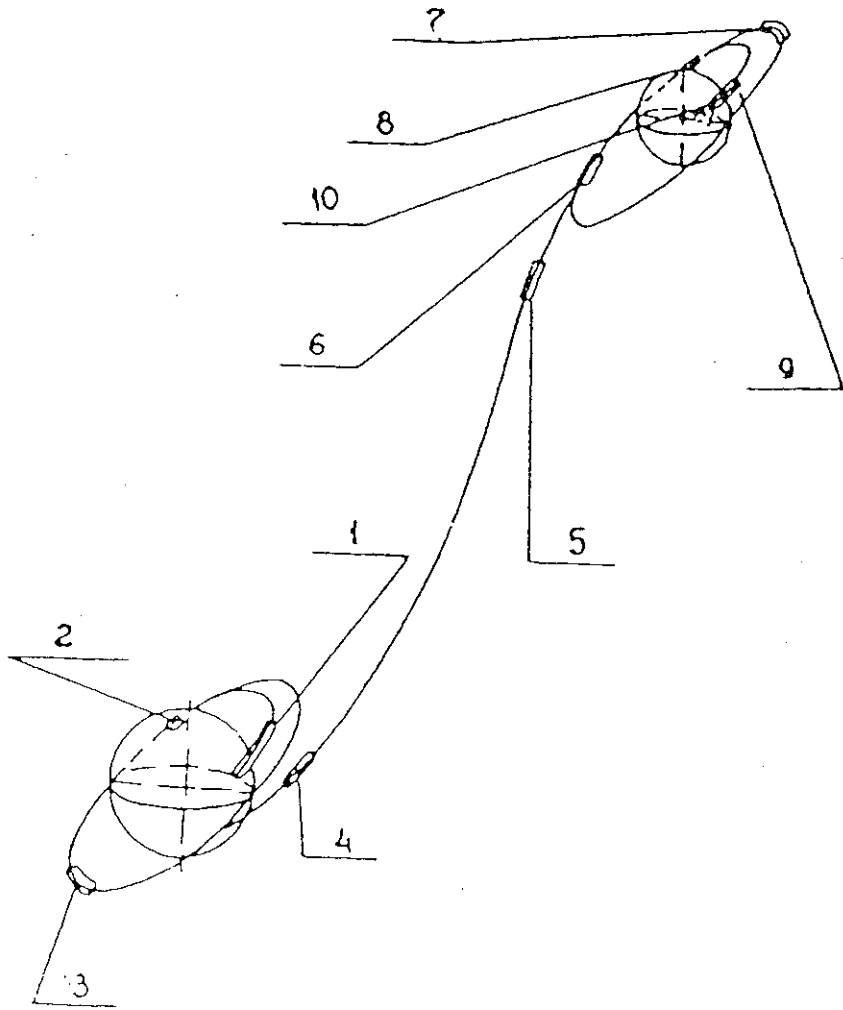
図-2 月面のレゴリスの中への導坑の造成

(Лейкин Г. А. et al. 1991)



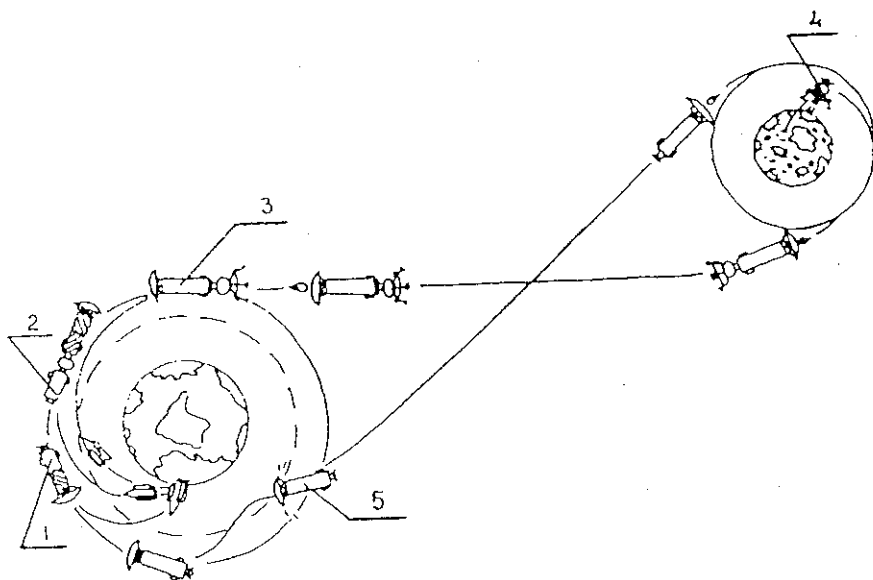
縦軸は、直径がDを越えない質量1gの試料中に含まれる水素量（質量）を試料の質量で割った比率（水素含有累積関数）。横軸は、直径D（ μm ）の対数表示。番号は、文献（Gibson E.K., Bustin R., LPSC 18, pt.1 p.326, 327）の試料番号。①-100084, 149；②-12070, 127；③-15021；④-60501, 1；⑤-71501, 138；⑥-15086, 202

図-3 水素含有累積関数 $Q(D)$
 (Лейкин Г. А. et al. 1991)



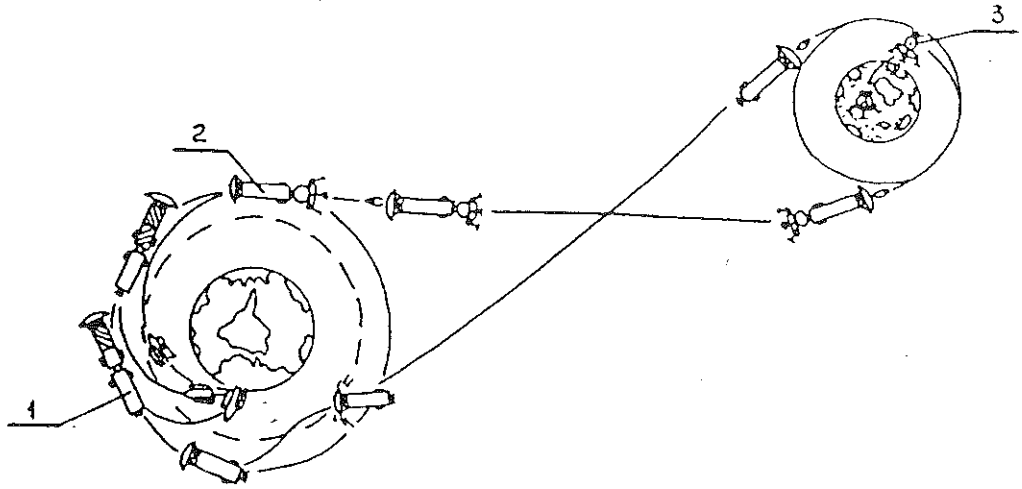
- 1 - パーキング軌道への打ち上げ； 2 - 円軌道への投入；
 3 - 地球から月への飛行軌道への軌道変換； 4 - 第1回目の軌道修正
 5 - 第2回目の軌道修正； 6 - 月周回軌道への移行； 7 - 軌道修正；
 8 - 月面への降下軌道への移行； 9 - 制動と降下；
 10 - 三次元マヌーバ（着陸のための）

図-4 方式-1による月への飛行プロフィール
 (Сотников Б. И. et al. 1991)



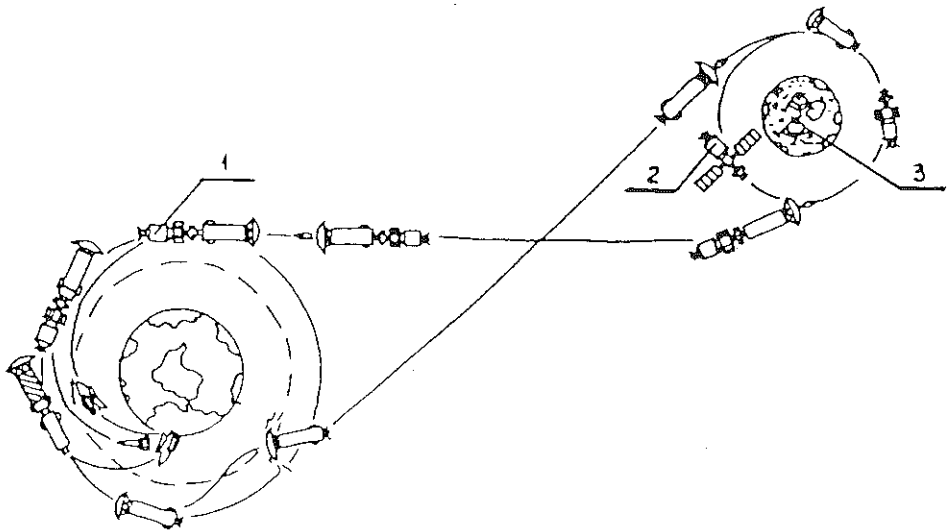
- 1- reusable tug rocket; 2- tanker rocket (docked to the tug rocket); 3- lunar system just before launch to the Moon; 4- lunar habitation module; 5- tug rocket return and atmospheric entry;

図-5 reusable tug rocketによる月面居住モジュールの輸送 (方式-2)
 (Сотников Б. И. et al. 1991)



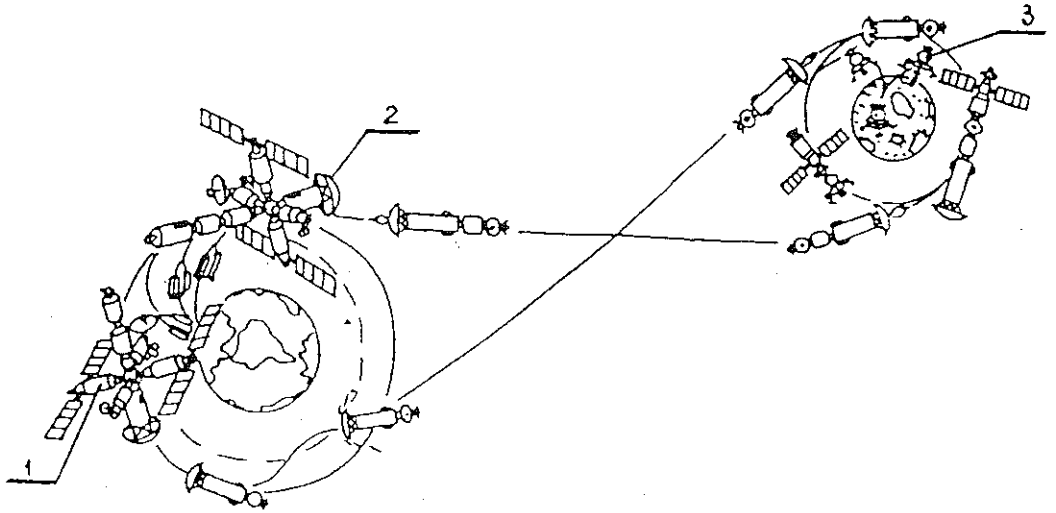
- 1- タグロケットへのタンカーロケットからの推進薬充填；
- 2- タグロケットと再使用型月離着陸船とのドッキングならびに乗員移乗；
- 3- 再使用型月離着陸船

図-6 再使用型月離着陸船の稼働開始と基地要員の月への輸送
 ミッションプロファイル (方式-2)
 (Сатников Б. И. et al. 1991)



- 1- 月周回ステーションとタグロケットとの結合；
- 2- 月周回軌道上に展開された月周回ステーション； 3- 月面基地

図-7 月周回ステーションの建造と稼働開始 (方式-2)
 (Сатников Б. И. et al. 1993)



1 - 地球周回ステーション；2 - 地球周回ステーション上での補給資材の整備・組立；3 - 月周回ステーションと月離着陸船の共同作業による資材補給・要員交替

図-8 月面基地と月周回ステーションの資材補給・要員交替
(Сатников Б. И. et al. 1991)

表-1 ロシアの打ち上げロケットの月へのペイロード輸送能力
(Сотников Б. И. et al. 1991)

ロケット名称	ソユーズ 「ルナ」	ゼニ ート	プロトン(#1)			エネルギー(#1)		
			A	B	C	A	B	C
LEO打ち上 能力 (ton)	—	13.3	20.0	35.0	97.0	99.9	200.0	
月への軌道上 質量 (ton)	—	4.2	6.3	11.0	27.6	33.0	76.0	
月周回軌道上 質量 (ton)	0.5	1.55	2.3	3.4	8.0	18.7	23.0	48.0
月面到達質量 (ton)	—	—	1.13	1.67	3.94	9.18	11.3	23.6

(注)

(#1)プロトンA、B、C、エネルギーA、B、Cは原文では次のようになっている(略号の意味不明)。

プロトン A; プロトン+タグロケット (KDYなし)

プロトン B; プロトン+タグロケット (KDYあり)

プロトン C; 打ち上げロケット「プロトン」+タグロケット

エネルギー A; エネルギー+タグロケット「Y」

エネルギー B; エネルギー+タグロケット「B」

エネルギー C; 超重量級打ち上げロケット+タグロケット

表-2 再使用型タグロケットの質量特性(#3)
(С а т н и к о в Б . И . et al. 1991)

構成要素	タグロケットのミッション		
	貨物輸送	片道有人 (地球→月)	往復有人 (地球→月 月→地球)
タグロケット本体	20,000	20,000	20,000
乗員カプセル (含乗員)	-	2,500	2,500
乗員関連器材(#4)	-	1,000	1,000
貨物	4,600	-	-
合計質量			
往路	24,600	23,500	23,500
復路	20,000	21,000	23,500
ドッキング用推進薬	551	578	647
ドッキング前質量 (地球周回軌道上)	20,551	21,578	24,147
地球への帰還用推進薬	6,564	6,892	7,712
地球への帰還前質量 (月周回軌道上)	27,115	28,470	31,859
ドッキング用推進薬 (月周回軌道上)	1,082	1,136	1,271
ドッキング前質量 (月周回軌道上)	28,197	29,606	33,130

注

(#3)単位 k g

(#4)原文は、乗員用 С О Ж および С Э П (詳細不詳)

表-3 タンカーロケットの質量特性(#5)

(Сотников Б. И. et al. 1991)

構成要素	ミッション	
	ランデブ・ドッキング機能あり(#6)	ランデブ・ドッキング機能なし(#7)
LEO打ち上げ能力	98,000	98,000
パーキング軌道(200km)へ 遷移するに必要な推進薬量	1,690	1,690
ステーション軌道(370km)に 遷移するに必要な推進薬量	5,083	-
ランデブ・ドッキングで 消費される推進薬量	2,582	-
ドッキング(受け身)で 消費される推進薬量	-	522
エネルギーの空虚質量	13,228	12,788
パーキング軌道(200km)上 での質量総計	93,728	95,788
ステーション軌道(370km) 上での質量総計	62,917	-(#8)
パーキング軌道(200km)迄 運ばれる推進薬量	80,500	82,500
ステーション軌道(370km) 迄運ばれる推進薬量	79,670	-

注

(#5)単位kg

(#6)原文は、танкер активный。直訳すると「能動型タンカー」

(#7)原文は、танкер пассивный。直訳すると「受動型タンカー」

(#8)ステーションは自らランデブ・ドッキング機能を持っているタンカーロケット
でないとアクセスできない。

表-4 再使用型月離着陸船の各飛行段階での質量特性(#9)
(Сотников Б. И. et al. 1991)

項目	月離着陸船の利用ミッション		
	有人・再使用	貨物・再使用	貨物
月離着陸船本体	12,000	12,000	12,000
乗員カプセル(含乗員)	2,500	-	-
貨物ペイロード	-	4,600	14,680
月離着陸船質量合計	14,500	16,600	26,680
月からの離陸用推進薬	11,435	9,464	-
月離陸時質量	26,678	22,079	-
月近傍でのドッキング 用推進薬	743	615	-
月近傍でのドッキング 前質量	15,243	12,615	-
月着陸用推進薬	21,798	21,798	21,798
月着陸前質量	48,476	48,476	48,476
1サイクルで消費する 推進薬量	33,976	31,877	21,798

注

(#9) 単位 k g

表-5 再使用型システムの展開の際の質量特性(#10)
(Сотников Б. И. et al. 1991)

各構成要素の質量特性	展開の各段階			
	第1段階	第2段階	第3段階	第4段階
月離着陸船	12,000	14,500	-	14,500
月居住モジュール	14,680	-	-	-
乗員カプセル(含乗員)	-	2,500	2,500	2,500
月周回ステーション	-	-	20,000	-
タグロケット	20,000	21,000	23,500	23,500
月システム質量総計(#11)	46,680	35,500	43,500	35,500
月周回軌道上質量 (推進薬補給済み)	75,590	79,110	53,130	50,750
月周回軌道に送ら れる推進薬量	111,830	117,035	78,600	125,820
地球周回軌道上質量 1サイクルの運用に 必要な推進薬量	187,425	196,140	130,730	176,570
2機のタンカーロケッ トで輸送する推進薬量	140,750	156,780	94,200	174,070
推進薬不足量	156,230	162,410	82,500	159,340
	-15,480	-5,540	14,450	14,730

注

(#9) 単位 kg

(#11) 月システムは、3(1)項で定義されている。

JUNK BOX

いくつかのデータ

(21世紀の宇宙開発を考えるために)

福田 徹

1. 陸地の面積 (全世界計)

(単位: 百万Km²)

陸地全体	148.9		*1
うち			
耕地	14.8	[10%]	*2
牧場・牧草地	32.1	[22%]	*2
森林	40.5	[27%]	*2

→すでに 耕地+牧地 > 森林になっている。

∴ 農業の生産性を飛躍的に上げない限り、2倍の人口は養えない。

(近年、全世界の農業の生産性はわずかながら低下している。)

2. 人類の使用するエネルギー量

一次エネルギー消費量 (全世界) :

$$\begin{aligned} & \text{石油換算消費量} *4 \quad *5 \\ & 7.75 \times 10^9 \text{ t/y} \times 1.0 \times 10^7 \text{ kcal/t} \\ \approx & 7.8 \times 10^{16} \text{ kcal/y} \end{aligned}$$

太陽からの入射エネルギー :

$$\begin{aligned} & \text{太陽定数} *1 \quad \text{地球半径} *1 \\ & 1.96 \text{ cal/cm}^2 \text{ min} \times (6378 \text{ km})^2 \times \pi \times 10^{10} \text{ cm}^2 / \text{km}^2 \times 525600 \text{ min/y} \\ \approx & 1.3 \times 10^{21} \text{ kcal/y} \end{aligned}$$

太陽からの入射エネルギーのうち

直接反射	30%	
熱に変換	47%	
水の循環	23%	
光合成	0.2%	*3

地球内部からの熱： 2.4×10^{17} kcal/y程度 *3

潮汐エネルギー： 0.2×10^{17} kcal/y程度 *3

→現在、人類が使っているエネルギーは、
太陽からの入射エネルギーの 1万分の1以下
地球内部からのエネルギーの 約3分の1
潮汐エネルギーの 約4倍

∴ 現在の人類の使用エネルギー総量は、地球環境に直接影響を与えるレベルには無い。（むしろフロンガスの影響のように「増幅される」効果の方が深刻と考えられる。） 使用エネルギーの総量という観点からだけ考えれば、農業の生産性を上げるために（あるいは人口増の無い社会を作るために）ヘリウム3などの新エネルギーを地球上に新たに持ち込む余地はある。

*1：理科年表1993版

*2：世界国勢図会1992-1993、1988～1989のデータ

*3：エネルギー工学総論、エネルギー変換懇話会編(1979)

*4：エネルギー政策の歩みと展望、資源エネルギー庁(1993)、
1990のデータ

*5： 1.1×10^3 l/t、9250 kcal/l と仮定

(以上)

93年度年会費納入のお願い

宇宙先端の印刷と郵送の経費は会員の皆さんからの会費によって賄われています。（袋詰めや編集はまったくのボランティアです。）

下記のいずれかの方法により、93年度年会費（3,000円）を納入されるよう、よろしく願いいたします。

1. 財務担当に直接払う
財務担当：岩本 裕之〔宇宙開発事業団宇宙環境利用システム本部
宇宙環境利用推進部（筑波宇宙センター内）〕
2. 郵便振替
口座番号：東京2-21144、加入者名：宇宙先端活動研究会
3. 銀行振込
富士銀行浜松町支店 普通3167046

投稿募集

宇宙先端は会員の原稿によって成り立っています。軽重、厚薄、長短、大小を問わず奮って投稿を！（下記を参考にして下さい。）

会誌編集方針

- 1 『宇宙先端』は宇宙先端活動研究会の会誌で年6回発行される。
- 2 論文の内容は、全て著者の責任とする。
- 3 投稿資格：原則として本会会員に限る。
- 4 原稿送付：投稿する会員は、B5版横書きまたはA4版横書きでそのまま版下となるような原稿およびコピー1部を、宇宙先端研究会編集局宛送付する。原稿は返却しない。
- 5 論文は未発表の原著論文に限る。ただし、他に発表したものの要約、解説等は歓迎する。掲載論文に対する質疑、意見、提案等、誌上討論は大いに歓迎する。
- 6 A4で20ページを超えるものは掲載しないことがある。宣伝、中傷、その他本会の趣旨から極端に外れる投稿は掲載できない。編集人は会誌の整合のため、著者に改稿を求めることがある。

原稿送付先：〒105 東京都港区浜松町1丁目7番1号 平和ビル7階
（財）日本宇宙フォーラム 福田 徹

編集に関するお問い合わせは下記へ。

福田 徹（編集局長） TEL 03-3459-1651 FAX 03-5402-7521
岩田 勉（編集人） TEL 0298-52-2250 FAX 0298-52-2247

編集後記

今回の発行の大幅な遅れをお詫びします。

(福)

宇宙先端
宇宙先端活動研究会誌

編集人
岩田 勉

編集局長
福田 徹

編集顧問
久保園 晃 有人宇宙システム(株)代表取締役社長
土屋 清 帝京大学工学部教授
山中 龍夫 航空宇宙技術研究所宇宙研究グループ総合研究官

監査役
伊藤 雄一 日本電気エンジニアリング(株)

宇宙先端	第9巻 第6号	頒価 1,000円
平成 5年11月15日発行		編集人 岩田 勉
発行 宇宙先端活動研究会		
東京都港区浜松町	世界貿易センタービル内郵便局私書箱 165号	

無断複写、転載を禁ずる。

宇/宙/先/端

宇宙先端活動研究会誌
NOV. 1993 VOL. 9-NO.

IAA 6

