

■ 展望・解説 ■

月における資源

Lunar Resources

稗 田 浩 雄*

Hiroo Hieda



1. 21世紀の宇宙活動

90年代に入り、世界は半世紀に及ぶ冷戦構造から地域紛争のきしみの陣痛を伴いつつ新たな枠組みを構築しようとしている。グローバル化の波は『惑星地球』へ向かって人類共通の理解と協調へ歩み始めている。90年代の宇宙活動は衛星利用による通信・放送等から更に国際宇宙基地の建設、宇宙環境利用へ活動量を飛躍的に増大させ、同時に21世紀に向けて人類が宇宙空間で活動領域を拡大するための基盤形成を軸として展開されてきている。将来の宇宙活動は地球低軌道から月・火星へと太陽系惑星に向けてその活動領域を拡大することが中心課題となってきた¹⁾²⁾。

1989年7月ブッシュ米大統領が月面基地をステッピングストーンとする有人火星探査を宇宙活動目標に掲げて以来、NASAを始めとする関係機関は様々な具体案を提案しつつあり、米国は2019年までに有人火星探査の達成を骨子とする宇宙探査構想(SEI)をとりまとめ予算的な裏付けを議会に求めている³⁾⁴⁾⁵⁾。

またソ連は94年以降、欧州・日本(民間)等の諸国と協力して無人火星探査を行う計画を進めている。

ロケットや衛星に見られるような優秀な宇宙技術を積み上げてきた日本も宇宙科学研究所による月の探査機「LUNAR-A」の開発や科学技術庁・宇宙開発事業団による「月・惑星の開発利用」の研究に平成3年度予算の概算要求を行い、国際的な宇宙研究に貢献すべく準備を行っている⁶⁾。

水中から陸上へ生息圏を移動し、更に密林からサバンナへと活動領域を拡大したことが人類史の必然であったことと同様に、人間が宇宙へ向けて活動領域を拡大することは人類史の必然であると考えられる。また大航海時代が近代文明を作り上げたように、太陽系惑星に向けた来たるべき宇宙大航海は新たな人類の文明

形成の出発点として位置づけられよう。

このように将来宇宙活動によってもたらされる成果は、将来の人類の方向に計り知れない影響を及ぼそう。1988年、当研究所が我が国の200名を越える研究者によびかけて『月面基地と月資源開発』研究会(以下月研究会と略称)を発足させ、宇宙資源利用から月・火星を含む将来宇宙活動に関連した共同研究を進めており、一部では米国の研究者との交流もすすめている。本文ではその成果の一部を含め月の資源とりわけ地球に持ち帰りできる資源を中心に紹介したい⁷⁾。

2. 宇宙資源

現在我々が享受するエネルギーは全て宇宙に起源を持つことは言うまでもなく、特に太陽系活動に依拠する。また人類の宇宙活動の進展は地球外資源・太陽系宇宙資源の利用を可能とする展望を示すものである。

宇宙資源の中には地球に持ち帰り利用するに値する価値の大きいものから、宇宙での活動に利用するものまで2大区分が必要である。それは地球からの打ち上げは多大な費用がかかるため宇宙での活動に必要な資材は宇宙で自給するほうが容易であるからである。

多くの宇宙資源の中でその利用が検討されているのは鉱物資源に富んだ小惑星、地下に多量の水が凍結しているとみられる火星、将来の核融合燃料として期待される³Heを大気中に多量に含んだ木星や土星、等がありその他本文の主題である月が挙げられる。

木星の³He利用について最もよく知られた構想としては1973年イギリス惑星間協会が発表した『ダイダロス』計画がある。これは惑星を持つ恒星と想定されるへびつかい座バーナード星の探査計画であるが、その宇宙船はD-³He核融合ロケットを用い、その燃料である³Heを木星から得る構想であった。

3. 月の資源

現在までに米国のアポロ計画やソ連のルナ計画さら

* 勸未来工学研究所宇宙研究グループ主任研究員

〒102 東京都千代田区北の丸公園2-1

に南極で発見された隕石などの月面資料を分析した結果、玄武岩が全体の21%、角れき岩が35%、表土が44%であることが山口大三浦保範助教授によって報告されている⁸⁾。

特に表土は平均粒径50~80 μmでありガラスに富んでいる。隕石の衝突時にできた岩片などがガラスにつつまれアグルチネートと呼ばれるものが半数で他は鉱物片や岩石片、ガラス片で構成されている⁸⁾。

表土からは後に述べる³Heが得られる。玄武岩や角れき岩などを分析した月面の鉱物資源の主要なものを表1に示す。

表1 普通に見られる月鉱物

鉱物名	化学式
主な鉱物 カンラン石 olivine 斜方輝石 orthopyroxene 単斜輝石 clinopyroxene ビジョン輝石 pigeonite オージャイト augite 斜長石 plagioclase アノサイト anorthite (アルバイト albite)	(Mg, Fe) ₂ SiO ₄ (略号 Fo, Fa) (Mg, Fe)SiO ₃ (Ca, Mg, Fe)SiO ₃ Caに乏しいもの Caに富むもの (Ca, Na)(Al, Si) ₂ O ₆ CaAl ₂ Si ₂ O ₈ (略号 An) NaAlSi ₃ O ₈ (略号 Ab)
主要な副成分鉱物 ニッケル鉄 カマサイト kamacite トロイライト troilite スピネル鉱物 クロム鉄鉱 chromite ウルボスピネル ulvöspinel クロム・プレオネースト Cr-pleonaste チタン鉄鉱 ilmenite トリディマイト tridymite クリストバライト cristobalite アーマルコライト armalcolite ウィトラコイト whitlockite カリ長石 K-feldspar トランキリティアイト tranquillityite	(Fe, Ni) Niの少い αFe FeS FeCr ₂ O ₄ Fe ₂ TiO ₅ Crを少し含む MgAl ₂ O ₄ FeTiO ₃ SiO ₂ SiO ₂ (Fe, Mg)Ti ₂ O ₆ Ca ₂ MgNa(PO ₄) ₂ KAlSi ₃ O ₈ (略号 Or) Fe ₂ (Zr, Y) ₂ Ti ₂ Si ₂ O ₁₄

出典：久城育夫ほか『月の科学』⁹⁾より抜粋

月の資源には貴金属や重金属は少なく地球に持ち帰り利用するに値する資源は極めて少なく、大半は月の重力が地球の1/6である利点から宇宙活動に利用される。地球に持ち帰る資源は³Heが第一にあげられる。

4. 21世紀の地球で利用できる月の資源

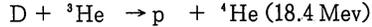
月-地球間の輸送コストが高価である点から考えて地球上に持ち帰り利用できる月の資源は価値の高いものしか意味を持たない。現在考えられている資源としては³Heがあげられる¹⁰⁾ また一部では地上では得られない高強度の点から無水ガラスなどの持ち帰りを検討しているグループもある。

4.1 ³He 資源

(1) ³He核融合

³Heは核融合の燃料として高い価値をもつものであ

り、月面基地を建設し月面活動を行う意義の一つでもある。³He核融合は中性子による誘導放射能がDT核融合炉の数%以下でクリーンであり、かつ反応生成物としては荷電粒子が殆どであるため発電効率70%以上の直接発電が可能である。このように工学的には優れた核融合形式であるが、9億度で10²¹/m³程度の密度のプラズマを1秒程度の閉じ込め時間で保持せねばならず、DT核融合よりも1桁上のプラズマ閉じ込めの厳しい条件を達成せねばならない。



³He核融合とDT核融合の特徴を比較整理した表を表2に示しておく。

表2 ³He核融合とDT核融合の特徴比較¹⁾

	DT反応	³ He反応
プラズマ閉込め容易さ	容易	DT反応より約1桁厳しい条件
燃料入手性	重水素とリチウム	³ Heは地上に殆ど存在せず(宇宙には豊富)
発生エネルギー形態	高エネルギーの中性子が主	高エネルギーの陽子が主
放射性廃棄物	中性子による誘導放射能が問題	DT炉の数%以下
エネルギー利用方法	従来同様のタービン発電	直接発電 発電効率70%以上

月研究会では³He核融合の概念設計をすすめている。³He核融合の特徴に原理的に適したのとして、レーザ核融合とFRC(Field-Reversed Configuration:逆磁場配位)核融合の2通りの方式がある。月研究会でレーザ核融合は中井貞雄阪大レーザ核融合研究センター長が中心となり、FRC核融合は百田弘核融合科学研究所教授が中心となり、炉概念、炉心設計さらに工学的検討を進めている。それぞれに特徴があるが図-1に研究会が行ったFRC核融合炉の概念を示す¹¹⁾。

³Heを用いた核融合としては他に³He-³He核融合もあり、³He核融合よりも更に実現性に困難がある。

³He-³He核融合については東芝の深井祐造氏などが一部検討を進めている。

(2) 太陽系における³He資源

³Heは太陽系においては表3のように存在している。木星や土星といった巨大惑星には豊富な³Heが存在するが、現在の宇宙活動の展望から見て、まず21世紀中

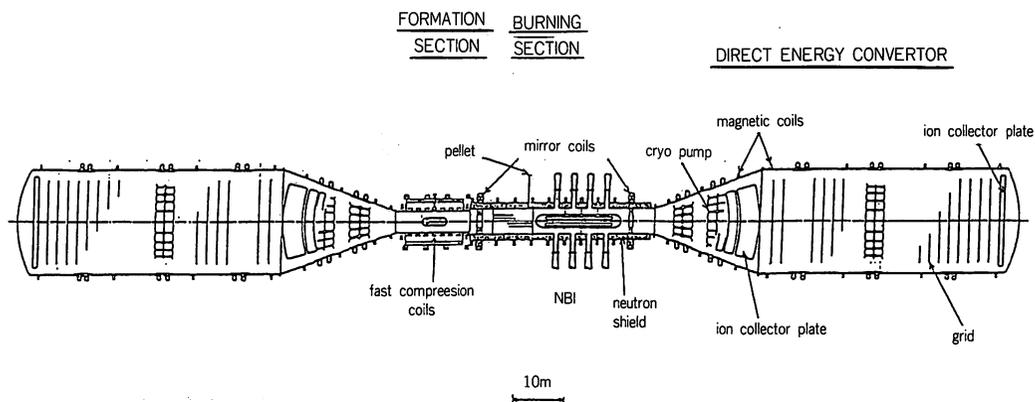


図-1 FRC D³He核融合炉

葉に地球に最も近い月の³He資源の利用が可能となろう。

なお海王星も木星とほぼ同等の³Heを含有しており重力からの脱出速度は木星の30%程度であるが、地球から20AUも離れている。無人宇宙活動の進展によっては木星よりも先に利用される可能性もある。

表3 太陽系内の³He存在量

	³ He (kg)
太陽風	(3 × 10 ⁷ ion/m ² · S)
月面	1.1 × 10 ⁹
(海)	(6 × 10 ⁸)
(高地)	(5 × 10 ⁸)
木星	7 × 10 ²²
土星	2 × 10 ²²

L.J.WITTENBERG et al¹⁰⁾

(3) 月面における³Heの存在状態

月面のレゴリス（表土、細かい土壌はソイルという）は岩石が破碎したもので、もともと隕石の衝突によって生成したものである。月の³Heは低エネルギーの太陽風に由来する。表面エッチング分析やレーザープローブガス抽出分析などの結果、ソイルの表面より0.1~0.2ミクロンの領域に濃縮されている。粒子径と表面積の関係から、ヘリウムの80%以上は全体の30~50%を占める粒子径50ミクロン以下の粒子に吸着している。

³Heの存在量は照射された太陽風の総量と粒子の³He保持力による。照射された太陽風の総量を計るものとして還元鉄と酸化鉄の比(Is/FeO)があり、ソイルの熟成度を意味している。Is/FeOをリモートセンシングで測定する方法は現在ない。ソイルの光学スペクトルに影響を与えるアグルチネート含有量測定も代

替方法として検討されているが物理的性格が異なり代替方法として充分ではない。

ヘリウムの拡散速度は鉱物学に強く依存しチタンの濃度に依存する。チタン鉄鉱の多い地域は³Heが豊富である。チタンのリモートセンシングはγ線スペクトロメーターなどの方法で可能である。

現在³Heリッチなマイニング適地の一つには静の海があげられている¹¹⁾。

月の³Heの存在量はウィスコンシン大学のクルチンスキー教授らはギブソン(1971)の論文¹²⁾をもとに10ppbと試算したがアリゾナ大学のスインドル等は3~5ppbと低めに試算している。サンプルによって違いがあり、山口大三浦助教授は月の³Heの存在量については慎重に算出すべきであると述べている。

(4) ³Heのマイニング方法

³Heのマイニング方法についてはレゴリスをその場で処理する方法と工場に集め処理する方法の2通りが検討されている。その場で処理する方法の中でもレゴリスを採掘する方法と採掘せずマイクロ波や核磁気共鳴などで直接³Heを抽出する方法などの構想が検討されている。図-2はウィスコンシン大学が提案する方法でモービルマイナーによってレゴリスを連続的に採掘しモービルマイナー中で³Heを抽出し残土を排出するシステムの概要図である。処理に必要なエネルギーは太陽熱を利用するもので、3mの深さまで採掘する。月の昼間のみ活動し年間33kgの³Heを得ようと計画している¹³⁾。

月研究会は大島榮次東工大教授や大内日出夫公害資源研究所部長などと共に複数の³He抽出方法を検討した。図-3はマイクロ波や核磁気共鳴などで直接³Heを抽出する方法の概念スケッチである⁷⁾。この方法は月

LUNAR BASE SELF-SUFFICIENCY

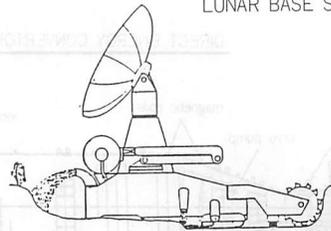


Fig. 1a. Side view of mobile miner.

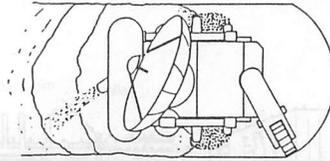


Fig. 1b. Top view of mobile miner.

図-2 ^3He 抽出モービルマイナー

面の形状に手を加えない長所があるが、 ^3He の抽出と誘導収集に多くの課題があり実現は難しい。

最も現実的な方法として検討しているものは図-4のようなレゴリス採掘車によって採掘・静電分離のうえ工場で運搬し集中して ^3He の抽出を行う方法である⁷⁾。

この場合 ^3He は表面に吸着しているため衝撃などによって流出し効率が悪くなる。また1kgの ^3He を得るためには100~300万トンの多量のレゴリスの処理が必要となる。抽出された ^3He は宇宙輸送され地球に持ち帰られる。月面資源としての ^3He の回収は採掘規模とコスト評価が重要であり、大規模になるといずれ月よりも木星大気から ^3He を得る方が合理的かもしれない。岩田勉宇宙開発事業団主任開発部員のグループや大内日出夫公害資源研究所部長のグループも一部検討を行っている。エアロブレーキ技術の進展によって新たな回収法も考えられているが巨大な重力から脱出する方法は極めて困難である。海王星からの回収も今後の課題として興味深いものがある。いずれにせよ月面資源の利用を待って太陽系へと領域の拡大がはかられるであろう。

4.2 無水ガラスほか

月面には水分が存在しないので月面のソイルのガラス質から製造されたガラスは加水分解的な強度低下が無く、地球上で製造されたガラスより1桁上の強度を持つ¹⁰⁾。地球上ではSi-O結合の加水分解作用による強度低下を避けることが難しい。

マグダネルダグラス社では月面でのガラス製造を模擬した大型の太陽集光実験設備をつくって地上試験を進めている。金属なみの高強度ガラスを特殊用途に利用しようと意図している。

5. 宇宙活動で利用可能な月の資源

5.1 金属

月面から得られる金属は主として月面基地や軌道上

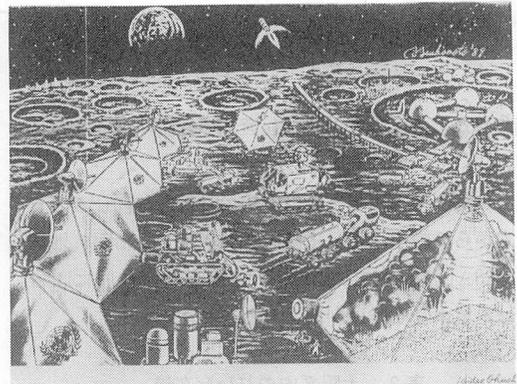
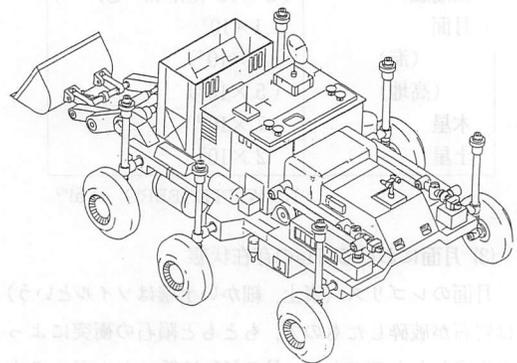
図-3 大規模 ^3He 抽出概念

図-4 レゴリス採掘ロボット

の構造物など宇宙活動に使用される。鉱物資源は表1に示されているが最も利用できるものは鉄、チタン、アルミなどである。鉄の精錬にはいくつかの方法があるが水素還元やカルボニル還元など現実的に月面で製造するために適した方法の選択が重要となる。宇宙活動においては重力が小さいので純度の高い鉄でなくとも構造物には充分である。

月面の輸送手段として将来的にはマストライバーなどの低コスト多量輸送システムが必要となってくる。アルミはコイル材料の一つとしても必要である。その

ほか構造材として重要な資源である。

アルミの精錬の一つに苛性ソーダを利用する方法などもあるが適した方法を検討中である。

チタンもアルミと同様であり、地上の大規模精錬方法とは異なった精錬法を月研究会で検討中である。

なお化学ロケットにはアルミなど金属を混入し燃料を減らす方法も検討されており、シランはその対象として有望である。エンジン設計上、高温対策など種々の課題が残されており、現在、シランの利用については評価が分かれている。このように金属資源はそのほか多くの利用が検討されている。

5.2 ガス

前項で述べた³He抽出に際して副生物として月面活動に有益なガスが得られる。³He 1kgに対し得られる量は表4の通りである。この中で月では稀少な水素が得られることが大きい。また窒素は生態系維持のために大きな役割を果たす。

³He抽出は³Heを地球に持ち帰る意義のほか副生物が宇宙活動にも活用できる意味は大きい。

酸素は宇宙活動に極めて重要なものであり、月面基

表4 ³He 1kgに対し得られるガス¹⁵⁾

ガス	(kg)
⁴ He	3100
H ₂	6100
H ₂ O	3300
CO	1900
CO ₂	1700
CH ₄	1600
N ₂	500
Ne	300

地活動の初期には植物プラントが準備され CELSS (閉鎖生態系維持技術) が完成するまで、生命維持用の酸素の補充とされる。また有人火星探査においては月で生産された酸素を液酸/ 液体水ロケットエンジンの酸化材として利用すべく期待されている。

酸素はチタン鉄鉱であるイルメナイト (FeTiO₃) から得ることができる。水素還元による方法は極めて有望な一例である。

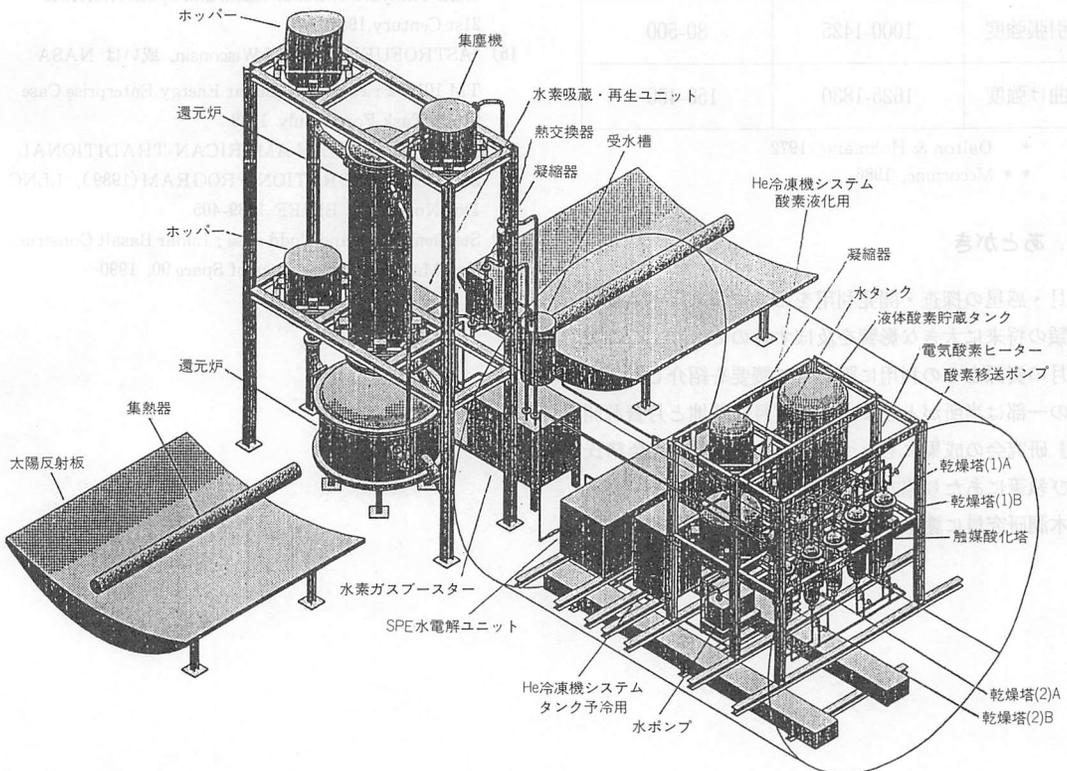


図-5 酸素製造プラント

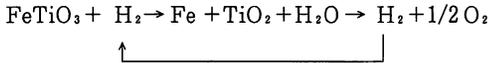


図-5は酸素製造プラントの一例である¹⁾。

米国ローレンスリバモア研究所のRod Hydeらは有人火星探査ロケットの液酸/液水ロケットエンジンに月の酸素を利用するため酸素製造プラントを組み込んだ移動車構想を提案している¹⁶⁾。

5.3 その他

月の玄武岩の組成は地球の玄武岩と殆ど同じであるので玄武岩質のレゴリスを1350度付近で溶融し攪拌の上鑄型に流し緩やかに結晶化させ冷却時のクラックを避けるため徐冷を行うことによって構造材を作ることが可能である。玄武岩鑄造は地上で既存の技術であるため良好な材料として利用可能である。強度を表5に示す¹⁷⁾。

表5 玄武岩鑄造とコンクリートの強度比較

	玄武岩鑄造* (N/cm ²)	コンクリート** (N/cm ²)
圧縮強度	16250-20350	725-3500
引張強度	1000-1425	80-500
曲げ強度	1625-1830	150-400

* Dalton & Hohmann, 1972

** McCormac, 1986

6. あとがき

月・惑星の探査・開発利用をめざす将来宇宙活動は人類の将来に大きな影響を及ぼすものであり、ここでは月の資源とその利用に限定して概要を紹介した。本稿の一部は当所がとりまとめた『月面基地と月資源開発』研究会の成果にもとづくものである。研究会諸氏及び執筆にあたり協力された当所神前康次主任研究員・鈴木潤研究員に謝意を表す。

文 献

- 1) NASA; Beyond Earth's Boundaries 1988
- 2) NASA, J.D. Rosendhal; Office of Exploration Overview
- 3) NASA, John Alred et al; LUNAR OUTPOST, NASA JSC-23614, 1989
- 4) NASA, Mark Crag; EXPRORATION STUDIES STATUS AND PLAN, 1990
- 5) NASA; Report of the 90-Day Study on Human Exploration of the Moon and Mars, 1990
- 6) 日経エアロスペース, 1990年9月3日号
- 7) 月面基地と月資源研究会; 月面基地と月資源研究会中間報告書, 1989, 12月
- 8) 三浦保範; 月面資料と南極の隕石, 応用物理学会結晶工学分科会年末講演会, 1987.12.8
- 9) 久城育夫, 武田弘, 水谷仁; 月の科学(1984), 岩波書店.
- 10) L.J. WITTENBERG et al.; ³He FOR COMMERCIAL FUSION POWER "FUSION TECHNOLOGY" vol.10 Sep. 1986
- 11) T.D. Swindle et al; Mining Lunar Soil For ³He 1990
- 12) Gibson, E.R., Jr., and Suzanna M. Johnson, 1971, proc. 2nd Lunar Science Conf. Vol.2, 1351-1366
- 13) I.N. Sviatoslavsky and M. Jacobs; Mobil Helium-3 Mining and Extraction System and Its Benefits Toward Lunar Base Self-Sufficiency, Proceedings of Space 88, 1988
- 14) J.D. Blacic; Mechanical Properties of Lunar Materials under Anhydrous, Lunar Bases and Space Activities 21st Century, 1984
- 15) "ASTROFUEL" Univ. of Wisconsin, 或いは NASA TM 101652; Report of Lunar Energy Enterprise Case Study Task Force, July 1989
- 16) Rod Hyde et al; AN AMERICAN-TRADITIONAL SPACE EXPLORATION PROGRAM (1989), LLNC Doc.No. PHYS. BRIEF 1989-405
- 17) Stephen Capps and Todd wise; Lunar Basalt Construction Materials, Proceedings of Space 90, 1990