

月面環境利用技術ワーキンググループ活動報告

宇宙航空研究開発機構 高柳昌弘、足立聡、夏井坂誠、松本聡、山本和男、依田眞一
日本原子力研究開発機構 井岡郁夫、實川資朗、荒邦章

Activities of the utilization technology of the surface of the moon environment working group

Masahiro Takayanagi, Satoshi Adachi, Satoshi Matsumoto, Makoto Natsuisaka, Kazuo Yamamoto, Shinichi Yoda
Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
Ikuo Ioka, Shirou Jitsukawa, Kuniaki Ara
Japan Atomic Energy Agency (JAEA)
E-Mail: takayanagi.masahiro@jaxa.jp

Abstract: In our working group, we investigated the materials processing on the surface of the moon and a small nuclear reactor use on the surface of the moon.

1. はじめに

JAXA長期ビジョンでは2025年の月面拠点構築を目指した月面探査・利用を一つの柱としている。また、NASA、ESA等に於いても、国際宇宙ステーションの次世代国際協力計画の候補として、月面利用が検討されている。将来、月面での有人活動を本格的に展開するには、資源、エネルギーのその場での確保が必須となると考えられる。本、研究班ワーキンググループでは月面で得られる原料からの材料プロセッシングについて、また、エネルギーについてはエネルギー密度、寿命の点から原子力発電について調査・検討を実施した。

2. 本ワーキンググループの構成

本ワーキンググループはJAXAおよびJAEAのメンバーから構成されており、JAEAのメンバーは主に月面用小型原子炉の概念検討について、JAXAメンバーは主に月面環境がもたらす原子炉の開発要素技術の抽出およびその場材料プロセッシングの調査・検討について実施している。

3. 想定される必要資材、エネルギー量

100人の常駐フェーズ（2050年）で生命維持のために必要とされる電力量は約500KW、酸素：29トン/年、水：1900トン/年と、ISSでの有人活動での実績を基に算出されている¹⁾。さらに、居住施設および付帯設備等の建設のための資材として、鋼材：数100～数1000トン、Al（送電線、熱交換用Al管）：数100トンが必要であると見込まれ、

これらの資材を地球より輸送するのは不可能であり、その場での確保が必須となる。

4. 月面の地質

月面はほとんど砂状のレゴリスに覆われており、その厚さは薄いところで10m弱、厚い所で数10mとなっている²⁾。レゴリスの87%以上が1mm以下の粒状で、27%以上が25μm以下の微粉状で月面に無尽蔵に存在している。レゴリスの組成を図1に示すがFe、Al、Mg、Ti等を含む³⁾。主な岩石鉱物はカンラン石： $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ 、イルメナイト： FeTiO_3 などから構成されており僅かにテーナイト等の自然鉄も含まれている。これらの鉱物を水素還元することで金属資源が得られることが期待できる。

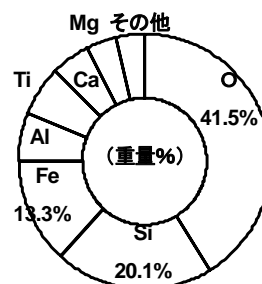


図1. レゴリスの組成（静かの海）

5. エネルギーの検討

少人数滞在のフェーズでは発電効率の優れた燃料電池も有効であると考えられるが、100人程度の常駐フェーズでは原子力発電がエネルギー密度、寿命の点で最も優れていると考えられる。

原子力発電は熱出力で300KWレベルの小型原子

炉（総重量：約5 t、原子炉容器径：Φ40 cm）について検討した。概念図を図2に示すが、発電が熱電変換による設計のため電気出力が20 KWと目標（500 KW）に対し低く、今後、タービン等による発電方式も検討し、高効率、高出力化を図ることを考えてゆかなければならない。

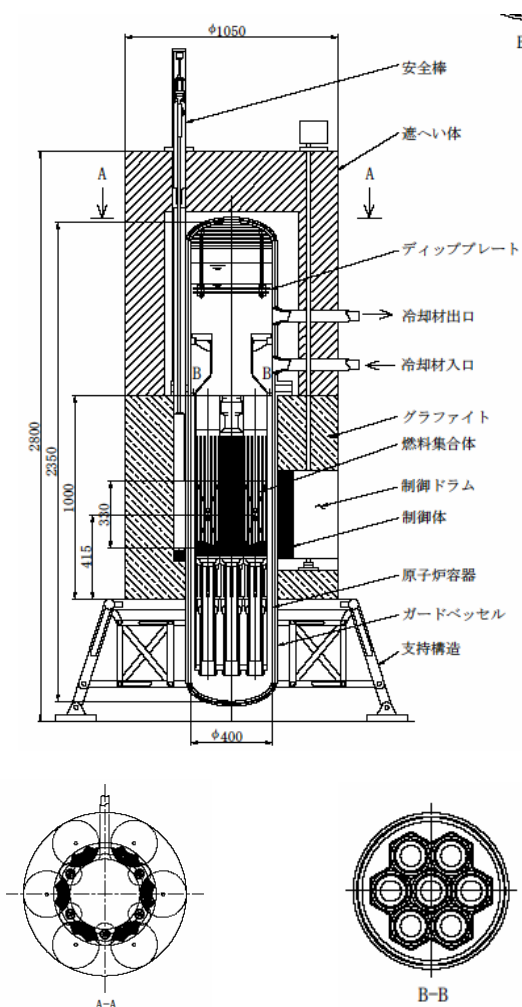


図2. 小型原子炉概念図

6. 材料プロセッシング

1) 酸素の製造

100人の常駐フェーズでは生命維持のために約29トン/年の酸素が必要である。酸素はレゴリス中のイルメナイトを水素還元することで生成する水の電気分解で得られる。還元温度は約850°Cで以下の反応式で記述でき、副産物として鉄、酸化チタンが得られる。



29トンの酸素を得るのに360トンのイルメナイト、6トンの水素が必要であり、約6000トンのレゴリスを選鉱して360トンのイルメナイトが得られる。水素は初期に水ないしは水素の状態地球より運ぶ必

要があるが、システムが稼動すれば水素を循環させれば良く、後はシステムからの漏れ分を補給すればよいと考えられる。

2) 金属 (Fe, Al, Ti 等) の製造

地上での現行の手法を基にそれぞれの金属について、レゴリスに含まれる鉱物の精錬を検討したが、それぞれにおいて大きな課題がある。鉄は自然鉄（テーナイト）からの製造を検討したが、Fe, Niの分離に金属カルボニルの熱分解を用いる上で炭素の供給源が課題となり、A1は現行のバイヤー法によれば10トンのA1を製造するために6トンの炭素電極が必要であり、これも炭素の供給源が課題となる。また、製造プラントも大掛かりなものとなり、月面での構築の困難さが想定される。

可能性についての技術的検証が必要であるが、レゴリスそのものを溶解し、融液の電気分解による酸素、金属の製造も検討されている。ただし、溶解温度が1500°Cを超える高温となり、炉材の耐久性、高温発生のための電力供給等々予察すべき技術課題は多くある。

7. 最後に

今回、原子力発電、レゴリスからの金属精錬および酸素の製造について調査・検討を実施した。今後、原子力発電については安全性、高効率化についてJAEAとの意見交換を進める中で更に具体化を進めていきたい。また、レゴリスからの金属精錬については①現行の各プロセッシングに関し定量的な見積もりおよびマテリアルバランスについて調査、②融液の電気分解による手法については基本的な技術検証（レゴリスと近似組成の玄武岩の融解、電気分解、浮遊炉の応用等）を実施し、その実現性について検討したい。

参考文献

- 1) 第2 (月資源工場システム) 分科会報告書
財団法人 未来工学研究所
月面基地と月資源開発研究会
- 2) アリゾナ大学レポート
Table2; Thickness of the lunar regolith より
- 3) 月の科学、表3. 3 静の海の基盤岩とレゴリス資料の化学組成より