

Preliminary Study on Reduction of Metallic Oxide by Laser Plasma for Lunar Resources Use

Makoto Matsui*, Naohiro Fukuji*, Masakatsu Nakano**, Yoshiki Yamagiwa*,
Kimiya Komurasaki*** and Yoshihiro Arakawa****

*Shizuoka University

3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu, Shizuoka

**Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology

8-17-1 Minamisenju, Arakawa-ku, Tokyo

***The University of Tokyo

5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba

****The University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Abstract

For construction of a lunar base, huge amounts of building supplies are necessary. However, since it costs too much to bring all building supplies from the earth, it is desirable to use lunar resources for the construction. The surface of the lunar is covered with “regolith”. The regolith is sand of many kinds of metallic oxide such as SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , FeO etc. Then, we can get metallic building supplies by reducing the regolith.

The conventional electrolysis method (i.e., the Hall-Heroult process) is widely used in industry, but it is not suitable for application on the moon, as it requires carbon electrodes as the reducing agent, which does not exist on the lunar surface. In this study, we employed a laser plasma wind tunnel to reduce Al_2O_3 . The use of stationary plasma for alumina reduction enables a higher processing capacity than direct heating by a focused laser beam. As a reducing agent, hydrogen is mixed with the working gas of argon because the hydrogen derived from solar wind exists on the lunar surface.

The system consists of three parts, which are involved in thermal dissociation, frozen flow and Al collection. First, the Al_2O_3 powder was fed into the laser-sustained plasma at atmospheric pressure. The produced Al was accelerated to supersonic speeds by a convergent-divergent nozzle to prevent Al from recombining with oxygen. From the Al and argon line distributions in the flow direction, it was found that Al remained in the dissociated state. A water-cooled copper tube was inserted in the flow to collect Al. X-ray analysis indicated that elemental Al was observed on the surface of the tube. The maximum value of the estimated reduction efficiency was 5.5 %.

月資源利用のためのレーザープラズマを用いた金属酸化物還元法の基礎研究

静大・工 松井 信
静大・院 福路 直大
都立産業高専 中野 正勝
静大・工 山極 芳樹
東大・新領域 小紫 公也
東大・工 荒川 義博

1. 研究背景

NASA, JAXA, ESA において, 2030 年前後をめどに月面基地の建設が検討されている. 将来, 月面基地の建設, 月面での活動を本格的に展開するには大量の建設資材, 酸素, 水などが必要となるが, これらすべてを地球から輸送するにはコスト・時間の問題から困難となっており月面上でのこれらの資源の確保が必須になると考えられる. そこで月面上での資源の供給源として月面レゴリスの利用が注目を浴びている. レゴリス中には酸化アルミニウム, 酸化鉄, 酸化マグネシウムなどの金属酸化物及び二酸化ケイ素を多く含んでいる¹⁾. このように多くの酸化物を含む月面レゴリス中を還元することで月面基地建設に必要なアルミニウム, 鉄などの金属材料, 半導体や太陽パネルの原料となるケイ素を月面上で獲得することが可能となる. しかしながらレゴリスを還元する際に地上で広く用いられている電気分解による還元法を用いると還元時に炭素電極を必要とするため大量の炭素が必要となり, 炭素の供給源が問題となる. この問題を解決するため月面上の資源のみで可能な還元法の開発が求められている. そこで本研究では炭素の代わりにレゴリスに付着している太陽風由来の水素を還元剤としたレーザープラズマ風洞による新たな還元法を提案し実験的に検証した.

2. レゴリスを用いたエネルギーサイクル

月面上での還元サイクルを図 1 に示す. レザープラズマ風洞によりレゴリスを水素還元する. ここで水素はレゴリスを加熱することにより生成する. 還元したアルミや鉄などは資材として, 水の一部は生命維持用, 残りを電気分解により水素と酸素に電気分解し, 酸素は生命維持, 水素は還元剤として再使用する. このサイクルにより月面上で発電する電気のみで建設資材だけでなく生命維持に必要な酸素, 水の生成が可能となる.

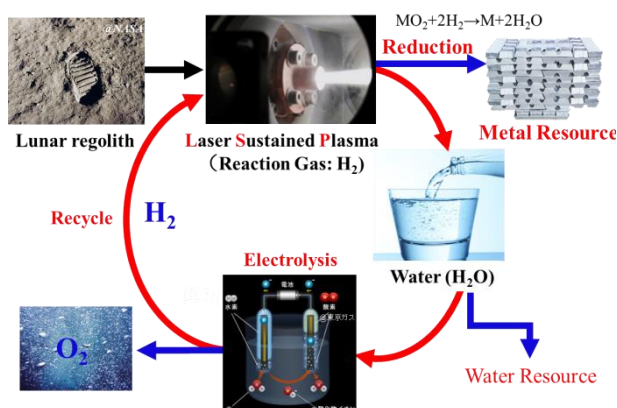


図 1. レゴリスを用いたエネルギーサイクル

2. レーザープラズマ風洞を用いた還元システム

2.1 還元システム

超音速プラズマ流を用いた金属酸化物還元システムの概念図を図2に示す²⁾。連続発振レーザー光をレンズにより集光することで高圧・高温のレーザー維持プラズマ（LSP: Laser Sustained Plasma）を定常的に生成・維持する。その周辺に作動ガスを流し加熱し、ノズルによって加速膨張することで超音速プラズマ流を生成する。このLSP中に作動ガスと共にレゴリスの代価としてアルミナ粉体を供給することで熱分解または水素還元を引き起こし、還元を行う。圧力が高く熱化学平衡を維持したまま冷却するとGibbsの自由エネルギーの関係から再び金属酸化物に戻るだけであるが、超音速流れを生成することで、解離した状態の化学組成が維持される凍結流を作り出し、酸素とアルミニウムの再結合を防ぐ。この超音速気流を水冷した銅管回収部により金属の凝固点以下に冷却することで、アルミニウのみを凝固させ回収する。

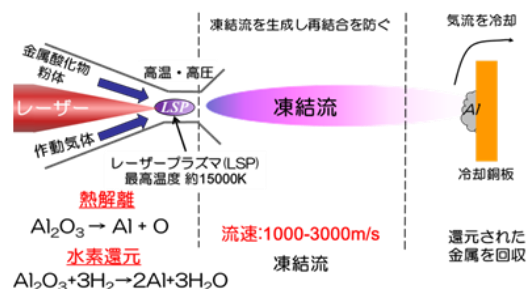


図2. 還元システム概略図

2.2 還元装置

図3に還元装置の概略図を示す。還元装置はレーザー導入窓、作動気体供給ポート、粉体逆流防止オリフィス、アルミナ供給ポート、LSP 点火ロッドポート、超音速ノズル、真空チャンバーから構成される。レーザー光は ZnSe 製のレンズにより集光され ZnSe 製の窓を通しアルミナ還元装置内へと導入される。そして集光されたレーザー光を点火ロッドに照射することで初期電子を発生させ LSP を生成する。点火ロッドは LSP 生成後に抜き出し、レンズを前方に動かすことで LSP をスロート近くまで動かす。LSP 周りを流れるガスは高温となり、ノズルにより加速され下流の真空チャンバーに超音速プラズマ流を生成する。レーザー発振には最大出力 2 kW の炭酸ガスレーザー（ビームモード：TEM10，発振波長：10.6 μm）を使用する。集光レンズの焦点距離は 127 mm，ノズルはスロート径 1.0 mm，ノズル出口は 10 mm である。真空チャンバーは油回転ポンプ（排気速度 40 m³/h）とメカニカルブースターポンプ（排気速度 500 m³/h）を直列に接続した物を 2 系統並列で同時に使用し排気を行っている。アルミナ粒子はテクノサーブ社製のファイダーを用いてキャリアガスと共に LSP 生成部の上部から、高温高圧となる LSP 生成部へと供給される。またこの際、アルミナの粉体が ZnSe 窓側への逆流し、窓への付着を防止するため供給ポート上部部に粉体逆流防止オリフィスを設置

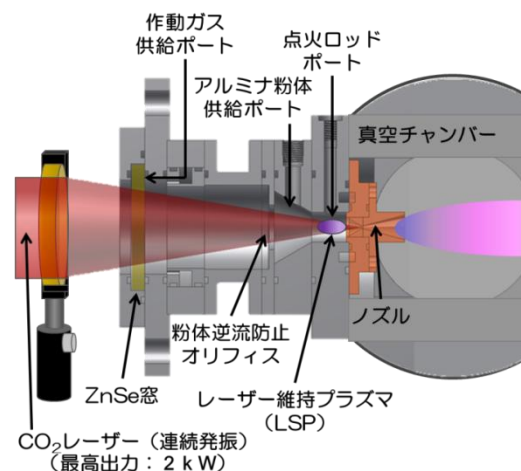


図3. 還元装置概略図

した。本研究では発光分光測定を超音速プラズマ流に適用し、超音速プラズマ流からの発光を測定することで、気流中の化学組成の診断を行う。

3. 実験結果

3.1 ノズル出口におけるアルミニウム還元効率の推定

図4にアルミナ粒子とアルミニウム粒子供給した時のノズル出口での発光スペクトルを示す。図よりアルミナを供給した場合でもアルミニウム原子の発光ライン Al I 396 nm のスペクトルが観測されており、これはアルミニウムが還元されていることを意味する。また発光強度は電子励起温度が同じ場合、基底準位の数密度に比例するため、両者の発光強度を比較することでアルミニウムの還元効率 η (LSP 生成器に供給したアルミナのうちアルミニウムが還元される割合) を推定することができる。その結果、アルミの還元効率は最大 $\eta=5.5\%$ となった。

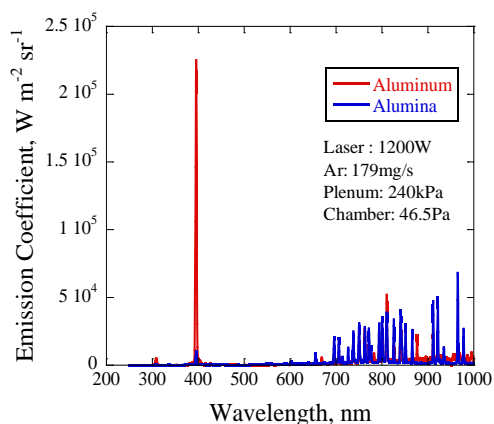


図4. ノズル出口における発光スペクトル

3.2 超音速気流中での凍結流維持の検証

LSP により解離されたアルミニウムと酸素が下流方向に向け凍結状態となっているかを調べるため、光学系をノズル出口から 5 mm 間隔で 0-45 mm の範囲で下流方向に平行移動させ発光分光系計測を行った。図5に Al I 396 nm と Ar I 912 nm の発光の空間分布を示す。図より Al I の発光は下流へ行くほど低下することがわかる。アルゴンの数密度は気流中でほぼ一様であるため、発光強度の低下は下流に行くに従い、電子励起温度が低下しているためだと考えられる。一方で、Al I の発光強度は電子励起温度の低下の他、再結合によるアルミ数密度自身の減少により低下することが考えられる。しかしながら図が示すように Al I の発光強度は Ar I と同程度の割合で下流に行くに従い低下していることがわかる。従って、アルミニウムの数密度はノズル出口から少なくとも 0-45 mm の範囲では大きな変化は無く、気流中ではアルミニウムと酸素の再結合反応が起こらない凍結状態となっていると考えられる。

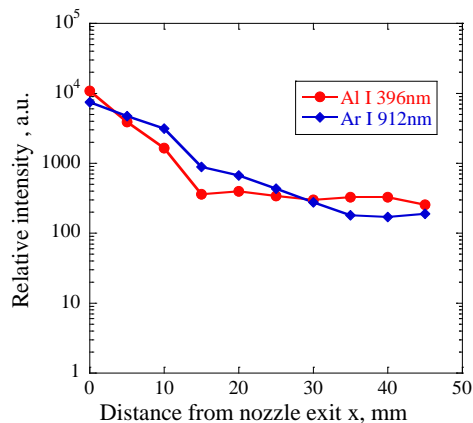


図5. 流れ方向におけるアルミ原子、アルゴン原子の発光強度分布

3.3 アルミニウムの回収

アルミニウムの回収は内側 1/2 inch, 外側 3/4 inch の水冷した銅製二重管を気流中に挿入する

ことにより試みた。銅管を5分間挿入後、銅管内壁を切り出し、その表面付着物のエネルギー分散型 X 線分光 (EDS) により元素分析を行った。図6にアルミニウムの分布と酸素原子の分布を示す。図が示す通り、大半の領域はアルミニウムと酸素原子の両方が存在しており、これはアルミナであることが予想される。しかしながら黄色で囲った部分に着目すると、酸素原子がなくアルミニウムのみが存在する領域があることがわかり、これはアルミニウムを回収できている証拠である。

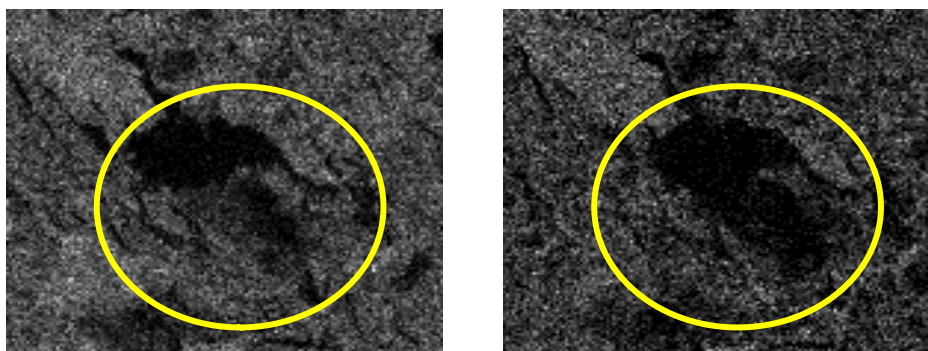


図6. EDSによるアルミニウム分布 (左) と酸素原子分布 (右)

4. 考察

アルミニウムの還元効率が低い理由として粒子径が考えられる。数値計算により粒子径が 10 μm 以下の場合、LSP へ供給直後に蒸発することが予測されている³⁾。今回の実験ではカタログ値 30 nm の粒子径のアルミナを用いたため、供給直後に蒸発すると考えられるが、実際に走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて粒子の状態を確認したところ、粒子同士が付着し粒子径が数十 μm 以上となっていることが判明した。従ってアルミナが蒸発し、還元に至る前にノズル外へと排出されている可能性が高い。よって還元効率を向上させるには粒子を付着させずに供給する方法が必要となる。

5. まとめ

レーザープラズマ風洞を用いて月面レゴリスを模擬したアルミナ粒子の還元を行なった。その結果、ノズル出口での還元効率は 5.5 % であり気流中はアルミニウムと酸素原子が解離したまま存在する凍結流を維持できていることがわかった。また回収部の表面の元素分析を行なった結果、わずかではあるがアルミニウムが回収されていることがわかった。

参考文献

- (1) 月面環境利用技術研究ワーキンググループ活動報告, Space Utilization Research. Vol. 24 (2008)
- (2) Yoshihiro ARAKAWA, et. al.: Research and Development of an Energy Cycle System Using Aluminum, Journal of IAPS, Vol.20 No.1 June 2012
- (3) Masakatsu NAKANON, et. al.: Numerical Simulation on Alumina Reduction Using Laser Plasma, Journal of IAPS, Vol.20 No.1 June 2012