

レゴリスからの金属回収を目指した
CW レーザーアブレーションによるアルミナ還元

田中聖也¹ 山田慎² 小紫公也¹ 小泉宏之¹ 川嶋嶺¹

Alumina reduction by CW laser ablation towards metal recovery from regolith

Seiya Tanaka¹, Shin Yamada², Kimiya Komurasaki¹, Hiroyuki Koizumi¹, Rei Kawashima¹,

¹ Graduate school of Engineering, the University of Tokyo 7-3-1 Hongo, bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033 Japan

² Department of Aeronautics and Astronautics, the University of Tokyo 7-3-1 Hongo, bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033
Japan

E-mail: tanaka-seiya990@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

Abstract

The performance of alumina reduction using CW laser ablation was evaluated experimentally for developing a novel method of metal recovery from lunar resources. A kW-class CW CO₂ laser beam was focused on a sintered alumina rod. Ablation of alumina could be occurred at the surface to occur the ablation of alumina from the surface. Ambient pressure in a test chamber was varied from 0.40 atm to 1.2 atm by supplying Ar gas. As a result, an ablation plume was ejected from the sintered alumina rod while the laser beam was irradiated. From the emission spectra, the existence of Al atoms in the ablation plume was detected, and this shows alumina was reduced to aluminum by CW laser ablation. The molar reduction percentage was calculated from the temperature and ambient pressure, and increased with ambient pressure and laser intensity: 1.6%-13%. The maximum energy conversion efficiency was 0.7%, and further improvement is needed to be applied to an operation on the moon, considering the transportation cost.

Keywords: In-situ resource utilization (ISRU), Plasma application, Aluminum, Moon, Ablation plume

1. 緒言

月はこれまでの探査結果から水の存在が示唆されており、水の存在を検証するための月探査衛星打ち上げから月面基地建設に至るまで、月面での水の利用を含めた長期的滞在についての議論が近年活発になされている。しかし長期滞在には生命活動に必要な酸素及び基地建設用建築資材の継続的供給が必要不可欠であり、ロケットによる地球からの輸送では膨大なコスト及び時間がかかり、大きな問題となっている。そこでその場資源利用(ISRU: In-situ Resource Utilization)の概念に基づき月鉱物であるレゴリスの利用が提案されている。

レゴリスの中でもアルミナ (Al_2O_3) は月全体で 10%程度、特に月の高地においては 23%程度存在することが確認されており、月鉱物の代表的物質の一つである[1]。このアルミナを還元しアルミを生産することが可能となれば、大量の酸素及び建築資材の獲得だけではなくアルミ合金の生産やそのほかの還元が難しい金属への応用など、月面での資源利用の幅が大きく広がると考えられる。しかし現在アルミニウムの工業的製法として用いられているホールエルー法においては炭素が消費されており、アルミ 1 t の生産に対して地球からの炭素輸送費として 400 億円がかかる。これは ISRU の概念に反しており、月面での手法として適していない。この問題点を解決するために、従来の溶解塩電解の炭素アノードに代わって不溶性アノードを用いた手法が研究されているが、アノードの腐食問題が解決されおらず実用化には至っていない[2-5]。また溶解塩電解を用いずレーザー維持プラズマ(LSP)でアルミナ粉末を加熱し還元する手法も研究されてきたが、投入したアルミナ粉末のアルミへの還元割合を示す還元率は $\eta_{re}=5.5\%$ と低く、実用化には至らなかった[6-8]。

そこで我々は、新たな手法として CW レーザーアブレーションを用いたアルミナ還元を提案している。レーザーをアルミナに直接集光することで、加熱し還元する。温度圧力の条件ごとに系のギブズエネルギーを計算することで平衡下での還元率は求めることができ、その結果が Fig. 1 の還元率マッピング図である。ここから 1 atm におけるアルミナの沸点 3250K 程度においても還元率が数%程度は見込まれ、還元が生じることが予想される。本稿においてはアブレーション速度及び還元率の測定結果から、エネルギー変換効率を式(1)にしたがって計算し、還元性能の評価を行なった。ただし、 η_{en} はエネルギー変換効率、 \dot{m}_{ab} はアブレーション速度(kg/s)、 M は式量または原子量、 η_{re} は還元率、 E_{Al} はアルミニウムの燃焼熱(kJ)、 E_{laser} はレーザーエネルギー(Ws)である。

$$\eta_{en} = \frac{\dot{m}_{ab}}{M_{Al_2O_3}} \eta_{re} (2M_{Al}) E_{Al} / E_{laser} \quad (1)$$

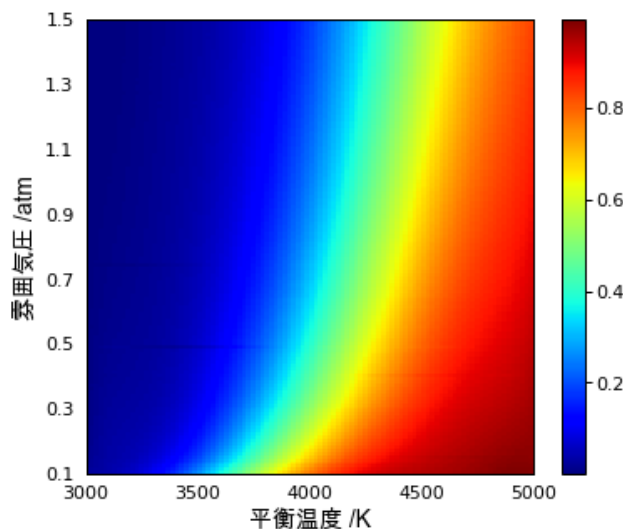


Fig. 1 還元率マッピング図.

2. 実験系

定格出力 400-2,000 W, 波長 10.6 μm の CW CO₂ レーザーを用いアルミナ焼結体のレーザー加熱実験を行なった。レーザーはビームエキスパンダーを通してビーム径が拡大され, ZnSe 凸レンズを通してチャンバー内に設置された径 4 mm のアルミナ焼結体表面に集光される。レーザースポット径は 1 mm である。レーザー強度は 0.51 GW/m², 1.3 GW/m², 2.5 GW/m²、チャンバー内雰囲気気圧は 0 atm (50 Pa), 0.40 atm, 0.65 atm, 1.2 atm, とし, 条件ごとにそれぞれ 3 回測定を行なった。レーザー照射時間は 1 s とした。チャンバー内雰囲気気圧はチャンバー内に導入するアルゴンガスの流量を調整することにより制御した。熱破壊を防ぐため, 焼結体は銅ホルダーに挿入された状態でチャンバー内に設置された。還元されたアルミニウムの検出には発光分光器を使用し, 焼結体表面から高さ 5 mm の位置の発光スペクトルを計測し, Al I の線スペクトル(396 nm, 394 nm, 309 nm [9])からアルミニウム原子の存在を検証し, 還元の有無を確認した。実験前後の質量減少量は電子天秤により計測した。

3. 結果及び考察

3.1. アブレーション速度測定

レーザー照射により強い発光を示すアブレーションプルームがアルミナ焼結体表面から定常的に生じた。アブレーション速度はアブレーションプルームが生じている間の質量減少量と定義し, 実験前後での質量減少量を計測し, アブレーション速度を計算した。Fig. 2 にチャンバー内雰囲気気圧及びレーザー強度とアブレーション速度の関係を示す。アブレーション速度はチャンバー内雰囲気気圧によらず一定であったが, レーザー強度に対して単調増加で変化し, レーザー強度 2.5 GW/m² においてアブレーション速度 9.5 kg/s m² であった。

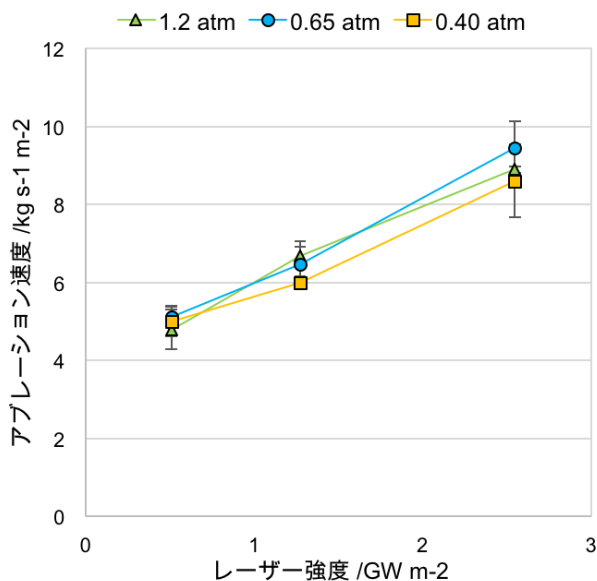


Fig. 2 アブレーション速度のチャンバー内雰囲気気圧, レーザー強度依存性.

3.2. 発光分光法による温度計測を用いた還元率測定

アブレーションプルームから観測された発光スペクトルにおいては Al I の 394 nm と 396 nm が合わさった線スペクトルが観測され, Al 原子の存在が確認された。よって, CW レーザーアブレーションにより Al への還元成功したことがわかった。また広波長わたる連続スペクトルが確認され, プランクの黒体放射の式をフィッティングすることによりプルーム内平衡温度を見積もった。その結果, プルーム内平衡温度はチャンバー内雰囲気気圧及びレーザー強度に対して単調増加し, 3100-3850 K にまで変化した。アルミナの 1 atm での沸点が 3250 K であること及び気体がレーザーを吸収しないことから, プルーム内平衡温度の計算結果, 3100-3850 K は妥当であると言える。

Fig. 1 の還元率マッピング図に計算された平衡温度及びチャンバー内雰囲気気圧を適用することで還元率を計算した。計算結果を Fig. 3 に示す。還元率はチャンバー内雰囲気気圧及びレーザー強度に

対して単調増加し、最大で 11%程度と計算された。これは LSP を用いた場合の 5.5%よりも高い値であり、CW レーザーアブレーション還元の優位性を示している。

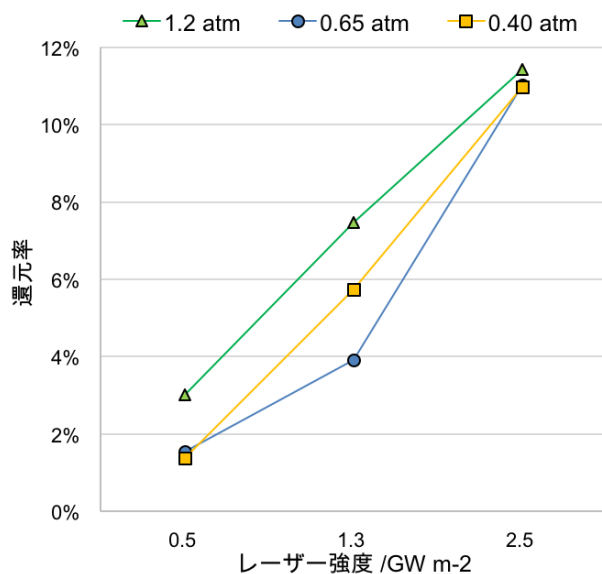


Fig. 3 還元率のチャンバー内雰囲気気圧，レーザー強度依存性。

3.3. CW レーザーアブレーション還元性能評価

式(1)より及び測定結果からエネルギー変換効率を計算した。結果を Fig. 4 に示す。エネルギー変換効率はレーザー強度に対して単調に増加し、0.65 atm, 2.5 GW/m² のときに最大値 0.68%であった。これに対して現在のアルミニウムの工業的製法であり炭素を消耗するホールエルー法においては、エネルギー変換効率は 60%である。

現状の結果を用いて、ホールエルー法と CW レーザーアブレーション還元の月面でのアルミ生産にかかる費用を比較した。ホールエルー法においてはランニングコストとして炭素を地球から輸送する費用を見積もり、CW レーザーアブレーション還元ではランニングコストがかからないがエネルギー変換効率が低い分初期費用として太陽光パネルを輸送する費用を見積もった。結果アルミニウムを 1 年間で 1kg 生産する状況を整えるとしたとき、ホールエルー法は炭素輸送費 0.5 億円/年 kg-Al にかかるのに対して、CW レーザーアブレーション還元は初期費用 8 億円/kg-Al にかかる計算された。よって CW レーザーアブレーション還元が優位となるのは 16 年後となり、さらなる性能向上が不可欠である。性能向上の案としてはレーザー強度の向上が考えられるが、レーザーによりプラズマが点火されプラズマによってエネルギーが吸収されることが予想されるため、検証が必要である。

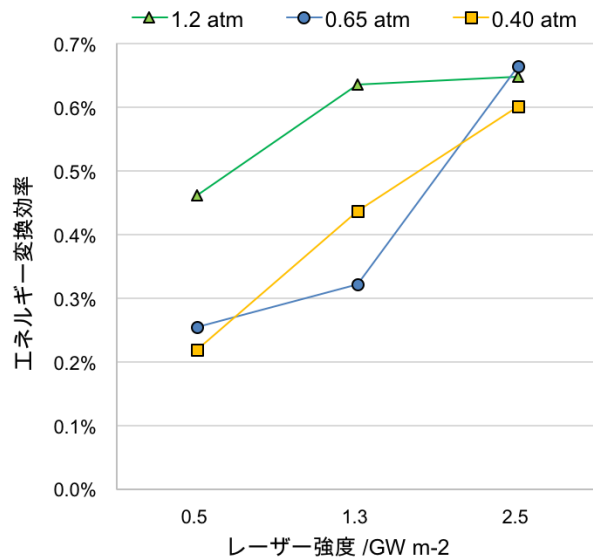


Fig. 4 エネルギー変換効率のチャンバー内雰囲気気圧，レーザー強度依存性．

4. 結論

CW レーザーアブレーションによるアルミナ還元のパフォーマンス評価を行った。結論を以下にまとめる。

- ・レーザーをアルミナ焼結体に集光することでアブレーションプラズマが生成しアルミナの還元が成功した。
- ・アブレーション速度はチャンバー内雰囲気気圧には依存しなかったがレーザー強度に対して単調増加し、1.2 atm, 2.5 GW/m² のとき最大値をとり 9.5 kg/s m² であった。
- ・還元率はチャンバー内雰囲気気圧及びレーザー強度に対して単調増加し、1.2 atm, 2.5 GW/m² のとき最大値をとり 13% であった。
- ・エネルギー変換効率は 0.65 atm, 2.5 GW/m² において最大値をとり 0.68% であった。レーザー強度をさらに高めることによりアブレーション速度、および還元率が向上しエネルギー変換効率が増加すると予想される。

文 献

- [1] Grant H. Heiken, David T. Vaniman, Bevan M. French, "Lunar Sourcebook," Cambridge University Press, pp. 357-371, 1991.
- [2] KAIYU XIE, ZHONGNING SHI, JUNLI XU, XIANWEI HU, BINGLIANG GAO, and ZHAOWEN WANG, "Aluminothermic Reduction-Molten Salt Electrolysis Using Inert Anode for Oxygen and Al-Base Alloy Extraction from Lunar Soil Simulant," JOM, Vol. 69, No. 10, pp. 1963-1969, 2017.
- [3] S. Helle, B. Davis, D. Guay, and L. Roue, "Ball-Milled (Cu-Ni-Fe+Fe₂O₃) Composite as Inert Anode for Aluminum Electrolysis," Journal of The Electrochemical Society, Vol. 160, No. 6, E55-E59, 2013.
- [4] S. Helle, B. Davis, D. Guay, and L. Roue, "Electrolytic Production of Aluminum Using Mechanically Alloyed Cu-Al-Ni-Fe-Based Materials as Inert Anodes," Journal of The Electrochemical Society, Vol. 157, No. 11, E173-E179, 2010.
- [5] V. A. Kovrov, A. P. Khramov, A. A. Redkin, Y. P. Zaikov, "Oxygen Evolving Anodes for Aluminum Electrolysis," ECS Transactions, Vol. 16, No. 39, pp. 7-17, 2009.
- [6] M. Matsui, N. Fukuji, M. Nakano, K. Komurasaki, Y. Arakawa, T. Goto, H. Shirakata, "Alumina reduction by laser sustained plasma for aluminum-based renewable energy cycling," Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 5, No. 3, 2013.
- [7] N. Fukuji, M. Matsui, Y. Yamagiwa, "Evaluation of Flow Characteristics and Alumina Reduction Efficiency in Laser Plasma Wind Tunnel Flows by Emission Spectroscopy," Applied Plasma Science, Vol. 21, No. 1 pp. 47-50, 2013.
- [8] K. Tanaka, M. Matsui, M. Nakano, Y. Arakawa, et al., "A Preliminary Study of Alumina Reduction in a Laser Sustained Plasma Flow," Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, Vol. 21, pp. 19-20, 2012.
- [9] Yu. Ralchenko, A.E. Kramida, J. Reader, Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/index.html>