

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560032

研究課題名（和文）太陽光励起レーザーを用いたMg燃料電池用Mgリサイクル方式

研究課題名（英文） Mg recycle method using Solar-pumped-laser for Mg fuel cell

研究代表者

矢部 孝 (YABE TAKASHI)

東京工業大学 大学院理工学研究科 教授

研究者番号：60016665

研究成果の概要（和文）：

フレネルレンズと Cr:Nd:YAG セラミックを用いた太陽励起レーザーと、それを用いたマグネシウム還元システムの開発を行った。従来レーザー媒質の破壊等が起こり定常的なレーザー出力が得られていなかったが、60Wの定常出力に成功した。また、そのビーム品質を測定し、光学系の設計およびマグネシウム還元チャンバーの設計、試作を行った。それらを組み合わせる事により、世界で初めて太陽励起レーザーでのマグネシウムの生成を実証し、太陽光エネルギーの0.05%をマグネシウムに貯蔵する事に成功した。

研究成果の概要（英文）：

Mg recycling system using Solar-pumped laser is developed. 60W of stable laser output is realized although laser medium was broken and stable laser output was impossible in previous study. Beam quality was measured and optical setup and Mg reduction chamber is designed and created. Mg production using Solar-pumped laser is realized and solar energy of 0.05% was stored into Mg. This is the world's first result.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：レーザー

## 1. 研究開始当初の背景

太陽光励起レーザーの歴史は古く、40年前にすでに1W級のレーザーが実証されている (Appl. Opt. 1966)。しかし、太陽光励起レーザーの使用目的が明確でなく、通常の電気を使用するレーザーと比較して優位性がないとする意見が多く、研究者人口は少なかった。

我々は、この太陽光励起レーザーの持つ高

品位の光源としての性質を有効に使うため、酸化マグネシウムMgOに照射してこれからMgを還元することを提案した。Mgは石炭と同程度の重量当たりの発熱量を持つため、リサイクル可能な石炭としてMgを位置づけることができる。これにより、24時間定常のエネルギー源として使用することの困難な太陽光をレーザーに変換してMg生成を行うことによりMgの化学ポテンシャ

ルの形でエネルギー貯蔵ができる。貯蔵されたエネルギーは必要なときにいつでもMgの反応熱として取り出すことができ、再生可能エネルギーサイクルが構成できることを2004年に提案した(AIP Conference Proc. No. 766, 2004, Appl. Phys. Lett. 2006)。これにより、年間平均で日照量が一日4時間しかないわが国の太陽エネルギーをMgの形で蓄積することができる。

従来の太陽光を用いた実験では、巨大な反射鏡から小さなレーザー媒質まで複数回の反射を経て行われているため途中のロスが大きく、全体の効率はわずか0.7%であった。我々は過去の太陽光励起レーザー実験を検討し、効率を劇的に改善する方法を見出した。太陽光からレーザーへの変換効率は30%以上が可能であるとの基礎実験と理論解析を元に、2005年よりフレネルレンズと二次集光系を用いた新型レーザーの実験を行っている。まだ予備実験の段階ではあるが、最近、効率2%という過去の記録を3倍近く上回る結果(Appl. Phys. Lett. 2007)を得た。千歳に4m<sup>2</sup>のフレネルレンズを備えた装置を3基建設し、さらなる実験を進めており、すでに1基当たり80Wの出力を得ている。

Mg還元についても、1kWcw炭酸ガスレーザーを用いて還元実験を行い、還元エネルギー効率42.5%を達成(Appl. Phys. Lett. 2006, J. Appl. Phys. 2007)した。従来のマグネシウム精錬では、フェロシリコン等の触媒を使用する技術や、電気分解などが知られているが、触媒を作るエネルギー、電気分解に付随するエネルギー等を考えると経済的に成立しない。レーザーを用いることにより、触媒の不要な新しい還元方法が実現した。

生成されたMgの利用には、Mg燃料電池やMgを石炭と同様に火力発電に使用することができる。すでに、Mg反応によるエンジンの実験にも成功した

(Appl. Phys. Lett. 2006)。亜鉛燃料電池に関しては、現在共同研究中の米国 Sadeg Faris 氏がすでに開発済みで、一回の燃料充填で普通乗用車の600km走行を可能とし(ギネス認定記録)、燃料充填も100回以上の繰り返しを検証している。金属燃料電池は金属電池と全く異なった発想で、水素燃料電池と同様に金属が燃料として逐次注入される。亜鉛をマグネシウムに変更することで、効率は2倍以上上昇することが分かっている。問題は、反応後の水酸化マグネシウムを元の燃料であるマグネシウムに戻す過程である。

## 2. 研究の目的

本研究では、この水酸化マグネシウムまたは酸化マグネシウムを太陽光励起レーザー

で還元する技術を確立するために、太陽光励起レーザーを製作し、これを光導波路やファイバーを用いて還元炉まで導き、これを集光することにより、太陽光励起レーザーそのものを用いた還元方式を実証することを目指す。

ここで我々の提案する太陽光励起レーザーによる還元が適用できれば、まさに燃料が太陽から再生できる新しい燃料システムが確立される。

## 3. 研究の方法

フレネルレンズを用いた太陽励起レーザーを試作し、そのレーザー出力とビーム品質から光ファイバーでの伝送に必要な工学系の設計、製作を行う。

また、それに応じた酸化マグネシウムの還元チャンバーの設計、製作を行うと同時に、太陽励起レーザーから光ファイバーによって電送されるレーザーを酸化マグネシウムへと照射できる工学系の設計、製作を行う。

なお、では2×2[m]、焦点距離2[m]のフレネルレンズを一次集光系とし、太陽を追尾しながらレーザーを発振させる装置にレーザーを搭載する事により実験を行った。その装置の外観を図1に示す。仰角を合わせる回転軸と日周方向の回転軸を動かす事によって、時々刻々と移動する太陽に常に正対するようにフィードバック動作をする仕組みになっている。

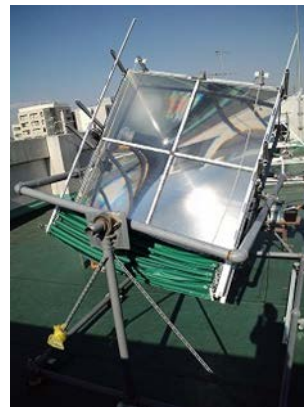


図1. 太陽励起レーザー装置

## 4. 研究成果

(1) 3×9×100[mm]のCr:Nd:YAGセラミックレーザー媒質と、反射率90%の出力ミラーとの組み合わせにより、定常的に60[W]程度のレーザー出力を得る事に成功した。以前の研究で最大出力80[W]を達成しているが、その時はレーザー出力が瞬時に低下し、30[W]以下まで落ち込んでレーザー媒質の破壊が起こったが、本研究では60[W]程度の長時間に渡る定常出力を実現した。その様子を図2に示す。青線で示した物が過去の研究の

結果であり、緑色の線で示した物が本研究での成果である。

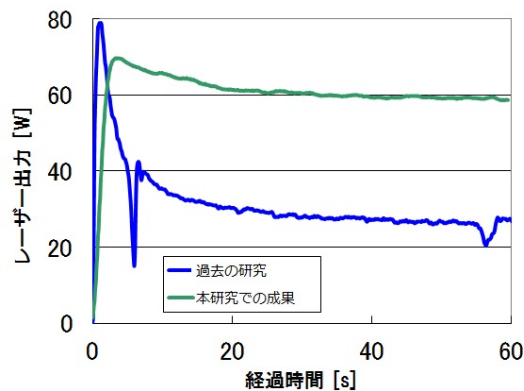


図2 レーザー出力の時間変化の比較

(2) 上記レーザーについて、光ファイバーでの伝送を行う光学設計を行うために必要となるビーム品質の測定を行った。ファーフールドでのプロファイルを図3に示す。

この計測の結果から、厚さ方向、幅方向の $M^2$ はそれぞれ 67, 215 と求まり、この値を元に光学系の設計を行った。

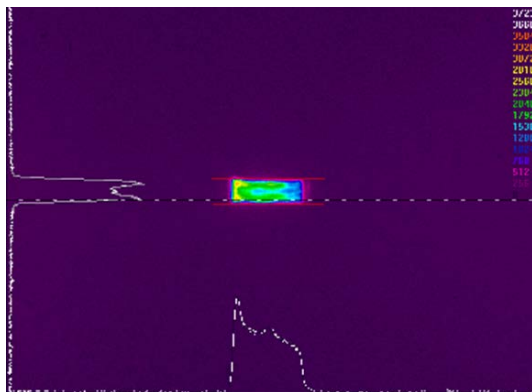


図3 ファーフールドでのビームパターン

(3) 本レーザー装置によって得られたレーザーを(2)で述べた結果から設計した光学系を通し、光ファイバーに入射する実験を行った。その結果、反射ロス等を除いた伝送効率は91%となり、妥当な値を得た。なお、用いた光ファイバーは長さ5m、NA0.4のPCMファイバーである。

(4) (2)で述べた結果から、得られたレーザーを酸化マグネシウムへと照射出来るマグネシウム還元チャンバーの試作を行った。その試作チャンバーの外観を図4に示す。

レーザー入射窓には石英ガラスを用い、ロータリーポンプによって真空排気を行う。また、マグネシウムを銅製のコレクターに蒸着する事によりマグネシウムを得る。

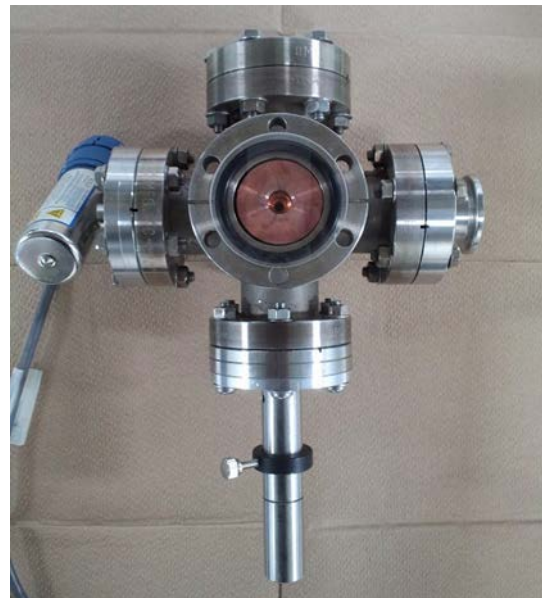


図4 試作したマグネシウム還元チャンバー

(5) 上記で述べた太陽励起レーザー、伝送光学系、マグネシウム還元チャンバーを組み合わせる事により、実際に太陽励起レーザーによるマグネシウムの生成を行った。銅製コレクターに付着したマグネシウムを図5に示す。

このマグネシウムを塩酸に浸し、反応して得られた水素量からマグネシウムの量を算出した所、最大で0.65[mg]のマグネシウムを得る事に成功した。この時のレーザー出力は55[W]、太陽光入力3500[W]であった事から、0.05%の太陽光エネルギーをマグネシウムに貯蔵した事になる。



図5 コレクターに付着したマグネシウム

(6) 以上の結果により、太陽光レーザーによって太陽光のエネルギーをマグネシウムに貯蔵出来る事を実証した。現在効率は0.05%と低いが、これはマグネシウム還元チャンバーに伝送した後の集光系の設計が足りなかった事が考えられる。図6に、商用レーザーを用いたマグネシウムの還元の結果を示す。

この結果から、レーザーのパワー密度を $500[W/mm^2]$ 程度まで集光する事により、レー

ザーのエネルギーからマグネシウムへのエネルギー変換効率は25%程度が期待出来ると考えられる。

今後更なる太陽励起レーザーの効率向上、光学設計の最適化を行う事により、太陽光エネルギーを効率良くマグネシウムへと貯蔵する事が可能となると考えられる。

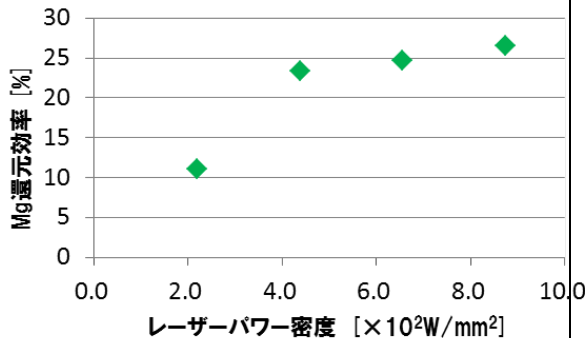


図6 商用レーザーによるマグネシウム還元効率のレーザーパワー密度依存性

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① S. H. Liao, T. Yabe, M. S. Mohamed, C. Baasandash, Y. Sato, C. Fukushima, M. Ichikawa, M. Nakatsuka, S. Uchida, T. Ohkubo, “Laser-induced Mg production from magnesium oxide using Si-based agents and Si-based agents recycling”, Appl. Phys., 109, (2011), 査読有り
- ② Shi-Hua LIAO, Takashi Yabe, et.al., “Laser Induced Magnesium Production Using Silicon as A Reducing Agent towards Sustainable Energy Cycle”, レーザー研究, 38, p202-206, (2010), 査読有り
- ③ Behgol BAGHERI, Takashi Yabe, et.al., “Power analysis of a cw solar pumped laser for magnesium energy cycle”, レーザー研究, 38, p213-218, (2010), 査読有り
- ④ 船津貴行, 矢部孝, 他, “新エネルギーサイクルに向けた高効率太陽励起レーザーの開発”, レーザー研究, 37, p131-138, (2009) 査読有り
- ⑤ Tomomasa Ohkubo, Takashi Yabe, et.al., “Solar-pumped 80 W laser irradiated by a Fresnel lens”, Opt.Lett., 34, p175-177, (2009), 査読有り
- ⑥ Takashi Yabe, et.al, “100 W-class solar pumped laser for sustainable magnesium-hydrogen energy cycle”, Appl. Phys., 104, p083104-1-083104-8(2008), 査読有り

[学会発表] (計6件)

- ① 中野潤一, 矢部孝, 内田成明, Baasandash Chojjil, 佐藤雄二, 大久保友雅, 松永栄一, 福島知佳, 廖世華, 市川雅士, 中塚雅, 丸田裕典, 鶴瀬忠, “クリーンエネルギーサイクル実現のためのレーザーによる酸化マグネシウムの還元”, レーザー学会学術講演会第31回年次大会, 2011年1月9日, 電気通信大学
- ② 久保山裕己, 矢部孝, 内田成明, 大久保友雅, 田辺和慶, Dinh Thanh Hung, 岡本康太, “MgO還元のための太陽励起レーザーのパルス化に関する研究”, レーザー学会学術講演会第31回年次大会, 2011年1月9日, 電気通信大学
- ③ Takashi Yabe(Invited), “Solar-Pumped Solid-State Lasers for Magnesium-Based Energy Cycling”, Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO) 2009, 14-19 June 2009, Munich, Germany
- ④ デン タン フン, 矢部孝, 他, “フレネルレンズを用いた高効率太陽励起レーザーに関する研究”, 2010年春季 第57回応用物理学関係連合講演会, 2010/3/17, 東海大学
- ⑤ 市川 雅士, 矢部孝, 他, “クリーンエネルギーサイクル実現のためのレーザーによる酸化マグネシウムの還元”, レーザー学会学術講演会第30回年次大会, 2010/2/2, 千里ライフサイエンスセンター
- ⑥ 田辺 和慶, 矢部孝, 他, “太陽光直接励起レーザーの高効率化を目的とした研究”, レーザー学会学術講演会第30回年次大会, 2010/2/2, 千里ライフサイエンスセンター

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.titech.ac.jp/~ryuutai/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

矢部 孝 (YABE TAKASHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：60 016665

### (3) 連携研究者

佐藤 雄二 (SATO YUJI)

東京工業大学・イノベーション研究推進体・特任助教  
研究者番号：40422547

吉田 國雄 (YOSHIDA KUNIO)

東京工業大学・イノベーション研究推進体・特任教授  
研究者番号：70029338

大久保 友雅 (OHKUBO TOMOMASA)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：50431995