マグネシウムと太陽光励起レーザーによる新エネルギーサイクル

矢部 孝

東京工業大学 機械物理工学専攻 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

A New Energy Cycle Utilizing Solar Pumped Laser and Magnesium

Takashi YABE

*Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550*

(Received November 11, 2009)

Securing energy storing media is an essential factor for utilizing solar power that needs to be leveled out for its spatial and temporal variation. Magnesium is the most promising material as an energy storing medium and carrier for an energy cycle, owing to its abundance, compactness, compatibility and versatility compared to other energy medium candidates such as hydrogen and biomass as well as other metals. Essential and unique technology for the energy cycle is the reduction process of magnesium from its oxidized form that requires four thousand degrees that is inaccessible merely by focusing natural sunlight. An energy qualifying process from solar to laser radiation, solar pumped laser, plays an essential role in the cycle. An overview of key technologies consisting of the energy cycle is given.

Key Words: Solar pumped laser, Magnesium fuel, Seawater desalination, Metal oxide reduction

1. 緒 言

太陽光のエネルギーは無尽蔵である。世界中の電力使用量は、わずか数万 km^2 の面積に降り注ぐ太陽光のエネルギーでまかなえる。サハラ砂漠の面積が860万 km^2 なので、そのエネルギーの巨大さが想像できるであろう。それでは、現在非常に性能が上がってきている太陽電池によってこの太陽光を利用することで十分なのであるか？ 困ったことに、曇りや雨を考慮すると、我が国の年間平均日照時間は4時間/日しかない。太陽光だけで、日本全体のエネルギーをまかなうには、国土の60%にものぼる太陽光受光面積が必要となる(太陽利用効率30%と仮定し、リスク回避で10日分の貯蔵を念頭においている)。

世界中には、年間平均日照時間が10時間/日を越す国があるが、そこからエネルギーを輸送してくる方法がなければ他の国がこれを利用することはできない。即ち、エネルギー貯蔵ができ、移動可能な媒体が必要となる。年間100億トン消費している石油・石炭をこのエネルギー貯蔵でまかなおうとすると、当然数十億トン規模の媒体が必要となってくる。その媒体を製造するエネルギーも考えなければならないので、候補となる物質はほとんど限られる。

著者は、マグネシウム(Mg)を用いたエネルギー貯蔵

を提案した^{1,2)}。Mgを酸素や水と反応させてエネルギーを取り出し、反応生成物である酸化マグネシウムを太陽光や風力などの自然エネルギーを用いてMgに戻すことができれば、このMgがエネルギーの貯蔵、輸送媒体となることが期待できる。このサイクルには一切、化石燃料は関与せず、地球温暖化の危険因子となるものが介在しない(Fig. 1)。以下では、Mgを媒体とした再生可能エネルギーに関する研究開発の現状と将来への展望を述べる。

2. なぜマグネシウムか

Mgの資源量は海水中でナトリウムに続いて2番目に多く、地球の海水中に1800兆トンあると言われている。また、ゴビ砂漠やアリゾナの砂漠にはかなりの量のMgが含まれている。亜鉛の埋蔵量4億トン、アルミ150億トン、鉄8千億トンに比べても桁違いに大きい。

エネルギー貯蔵能力を考えると、単位体積当たりで発生できる熱量は液体水素の5倍であるので、コンパクトなエネルギー源でもある。100万kWの発電所のわずか一日分の燃料を蓄えるためだけでも、1気圧水素だと、高さ10 mで1 km四方のタンクが必要である。Mgだと、高さ10 mで15 m四方と桁違いに小さい。ここで、1気圧の水素としたのは、1気圧の圧力差では1 m^2 の面積に10ト

Fig. 1 Energy cycle using magnesium and solar pumped laser.

ンの力がかかるが、大きなタンクでは気圧差をつけることができないので、大気圧で貯蔵するしかないからである。自動車の例で考えると、各ガソリンスタンドは車200台分のガソリン10 m³程度を蓄えている。これを水素と置き換えるとなんと28,000 m³のタンクが必要となる。日本中の地下が水素タンクになるであろう。

Mgの重量当たりの反応熱(水素燃焼も含めて)は25 MJ/kgであり、石炭30 MJ/kgとほぼ同程度である。現在の火力発電所の燃料をMgに替えることができれば、蒸気タービンで発電する現在の火力発電所の化石燃料の代わりに“リサイクル可能な石炭”としてMgを使うこともできるので、既存のシステムを継承することができる。Mgは、引火の危険がなく、大量のエネルギー貯蔵に向いている。

別の利用方法はマグネシウム燃料電池(空気電池)である。ちょっと聞きなれない言葉であろう。一般に、燃料電池というと水素燃料電池しか考えない人が多い。これは、水素を燃料として供給して、酸素との反応で電池になっている。燃料となる水素は常に外から供給されるので、効率が高くなる。一般に、電池の効率は容器全体を含めた電池の重量に対して、発生することのできる電力を言うが、金属電池は重量が重いために、効率が悪いと信じられている。そこで、重量の軽いリチウムイオン電池が現在よく使われている。この効率は最高650 Wh/kgであるが、定常的には200 Wh/kgと言われている。

ところが、燃料が外から供給される場合には、基本的には燃料は無限にあると考えられるので、容器の重さが無視できるようになる。そのため、水素燃料電池の効率も高くなるのである。そういう考えに立てば、金属も燃料として外から供給できれば、金属そのものが持つ純粋な能力を引き出すことができるようになる。米国の著者らの共同研究者は、すでに亜鉛燃料電池を製作し、1回の燃料供給で普通乗用車(ホンダ、インサイト)の

600 km走行に成功している(2003年、ギネス公認記録)。しかも、燃料を供給することで、100回以上もこれを繰り返せることを実証した。このときの亜鉛燃料電池の効率は500 Wh/kgであった。これをMgに替えると1500 Wh/kgとなることが分かっているので、今後が期待できる技術である。

リチウムイオン電池のように電気を使って充電するようなものは、普通乗用車にはあまり薦められない。充電が完了するまでドライバーが待てるかどうかは問題であろう。これに対して、上述の亜鉛燃料電池では、亜鉛(将来はMg)燃料パックの交換はわずか3分で済み、安全性も高いので、コンビニでも販売でき、新たなインフラも必要としない。将来的にはリチウム空気電池も有望だが、リチウム原子の性能が、比容量3.83 Ah/g、酸化還元電位3 Vであるので、最高11.5 kWh/kgが可能としても、500 km走行可能な100 kWhの電池を搭載する自動車が、現在世界中にある9億台に達するには、780万トンのリチウムが必要である。これに対してリチウム埋蔵量1100万トンはあまりにも少ない。また、現在年間リチウム生産量は2万5千トンしかなく、それでもリチウム争奪戦が繰り広げられている。大量にあるという海水資源でも、1 kg海水中に、0.1 mgしか含まれていないリチウムを石油に代わる燃料とするリスクを冒せるだろうか。

3. マグネシウムの還元

使用済みのMgは酸化マグネシウムMgOという白い粉末となって残るが、次はこれを元に戻すことが必要である。従来のMg製錬は、ドロマイト(MgCO₃/CaCO₃)を焼成してCO₂を飛ばし、MgOにケイ化鉄FeSiという還元剤を使用して1200–1500度という比較的低温で行われてきている。だが、還元剤を回収できないために、これを作る資源とエネルギーを考えると、これをそのまま模倣し

ても再生可能エネルギーとはなりえない。実際、世界のMgの7割を生産しているピジョン法(熱還元法)では、Mg 1トンの生産にコークス10トンを使用しているの、Mgを燃料にするくらいなら、石炭をそのまま使った方がはるかに環境にやさしい。

還元剤なしで、Mgを還元することは、そう容易なことではない。MgOの還元は、蒸発の潜熱や分解に要するエネルギーに打ち勝ちながら4000度という高温を実現しなければならない。このエネルギーを単純に温度に換算すると2万度近くにもなる。このエネルギーを太陽光で賄おうとしても、太陽光の表面温度は6000度程度なので、ただ太陽光を集めるだけでは、このような分解を達成できないことは明らかである。

確かに太陽炉内で4000度近い高温を実現したという報告はある。しかし、これは単に加熱して到達した温度(顕熱)だけである。先に述べたように、蒸発・分解に要するエネルギーは顕熱にくらべ桁違いに大きいので、その状態で物質を高温に保つことは不可能である。著者は、この太陽光をレーザーに変えることができれば、さらにエネルギー集中を高め、超高温を実現することができであろうと考えた。さらに、レーザーでは容器全体を暖めずに局所的に高温を実現できるので、炉壁が超高温となることはない。

例えば、太陽光が1 cm径の円状に集光されたと考え、その際に到達する温度が100度であったとしよう。レーザーによって同じエネルギーが1 mm径に集光できれば面積が100分の一となるので、1万度の高温が達成できる。太陽は、光源が有限の大きさであるため、集光サイズの下限はこの光源の大きさで決定される。太陽をレーザーという別の光に変換できればこの限界を超えることが可能となる。

面白いのは、1 mm径の局所的な部分だけが高温となるので、そこから噴出して1 cm径まで膨張すると、100度まで温度が低下する。元々のエネルギーが1 cm径を100度にする能力しかないのが当然であろう。従って、集光点から1 cm離れたところは低温となる。しかし、1 mm径の小さな領域だけでは生産量を増やすことができないので、実際には何100本のレーザーを1 cm間隔で照射することになる。

熱伝導によってMgO中を熱が伝わると思う人が多いが、レーザーアブレーションの知識がある人はそうでないことが理解できる。レーザーエネルギーのほとんどは噴出する蒸気によって持ち去られるので、内部にはほとんど伝わらない。このときに持ち去られるエネルギーは、蒸発の潜熱であり、運動エネルギーである。

我々のプロセスでさらに重要なことは、こうした相変化を起こす領域を利用していることにある。通常、入射エネルギーが増大すると温度が上昇する。輻射損失は温度の4乗に比例して増大するので、このままでは、どこかで輻射損失が優位となり、入射エネルギーがほとんど外部へ放出され利用できない。しかし、蒸発・分解する温度では、蒸発が継続している間温度上昇が停止するので、すべての物質が蒸発してしまうまで、温度は沸点に

保たれる。これは、水の蒸発を思い出せば理解できると思う。いくらエネルギーを注入しても温度が増大しないため、輻射損失も増大しなくなる。このような状況を利用すれば、入射エネルギーが有効に蒸発・分解に費やされる。

4. 太陽光励起レーザー

著者らは、フレネルレンズと二次集光系、レーザー媒質の一体型システムを用いることにより、一度集光位置を合わせれば後は再調整なしで太陽光を追跡しつつレーザー発振することに成功した。実際に、2時間以上にわたって連続的なレーザー発振に成功している³⁻⁵⁾。

2007年7月25日に完成した4 m²の集光系(Fig. 2)では、レーザー出力80 Wを得た。これは、フレネルレンズに入力した太陽光4 kWの2%に当たる。まだまだ、小さいと思われるかもしれないが、作成したフレネルレンズに気泡が入っていたため設計の集光効率の半分40%となっていたこと、二次集光系でのレーザー媒質への吸収が25%であったことを考えると、吸収太陽光に対してレーザー出力は20%を実現しているので、フレネルレンズと二次集光系の改良で、十分な効率を達成できることが明らかとなった。さらに実験を元にしたレーザー理論解析によると、現在0.1%しかドープしていないクロムを0.3%に変更するだけで、2倍以上の出力を得ることができると予測されている。従って、レーザー媒質の改良と、集光効率の向上によって20から30%の効率は現実の世界に入ってきていると言っても過言ではない。

実験室内での実験と実際の太陽を用いた屋外実験とは本質的に違うことをここで強調しておきたい。実際の太陽光を用いない実験なのに、太陽励起レーザーと称している論文は、問題の本質を全く理解していないと言わざるを得ない。防振台の上に組まれたシステムと違い、装置全体が風に揺られているので、入射太陽光の集光も完全ではないことがほとんどである。こうした中で、ステンレス板を切断できる出力を確保したことの意義は大きい。

Fig. 2 A solar pumped laser system designed for one-kilowatt laser output with 4-m² Fresnel lens solar concentrator (Chitose experimental site, Hokkaido).

Fig. 3 Load map towards magnesium energy cycle and desalination plants.

実用的な太陽光励起レーザーの1ユニットは2 m×2 m のフレネルレンズを用いたものとなるだろう。この面積に降り注ぐ太陽光は4 kWであるので、20-30 %の効率が実現すれば、1 kW級のレーザーが発生する。このレーザーによる還元を模擬するために、1 kW炭酸ガスレーザーを用いた還元を実証した。すでに、70 %の純度でマグネシウムを生産することが可能となっており、大きなハードルは越えたと確信している。

5. おわりに

我々は、地上での太陽光励起レーザーにこだわっているが、これには理由がある。宇宙でのレーザー発振を目指すのも夢はあるが、限られた予算をこれに費やすのは無駄としかいいようがない。全世界で使用している電力は年間18兆kWhである。100万kWの発電所にして2000基分である。100万kWのレーザーが宇宙に浮かぶ姿を想像しよう。30 %の効率と考えると、太陽受光面積は、2 km四方必要となる。市販のフレネルレンズはピッチ幅が0.1から0.5 mmの間なので、厚さも同程度以上必要となる。また、ピッチ幅が小さいと散乱が増え集光効率が低下するために、避けなければならない。そうすると、厚さはどうしても1 mm以上は必要であろう。

レンズの厚さを1 mmとすると集光レンズだけで4000 トンの重量となる。現在、作られている国際宇宙ステーションが500トン程度であり、この建設に10年を要している。それでは、4000トンの集光系を2000基作るのに何年とどのくらいの予算が必要なのだろうか。一步譲って、200基としても無理であろうが、これでも世界中の10 %分のエネルギーしか供給できない。

それでは月の資源を取り、そこで生産すれば良いのはないかという反論もあろう。では、38万kmの彼方から

地球に到達する世界中の電気に匹敵する20億kWのレーザーを受けるスリリングな世界に貴方は住みたいでしょうか？

地球温暖化、化石燃料の枯渇は、まだ相当先の話とと思っている人が多いであろう。しかし、今から20年以内には、30億人分の水が不足するとされている。これは、農業、工業用水を含めた量であるので、まもなく、人類は深刻な食糧危機に見舞われることとなるであろう。食料の60 %を輸入に頼っている我が国も深刻な打撃を受けるであろう。この水不足に対して、逆浸透膜がそれを解決するかのような報道が目立つが、逆浸透膜で、30億人分の水を作るには、9兆kWhの電気が必要である。これは、世界中で使われている電気18兆kWhの50 %である。

我々は、この水を太陽熱で海水から精製する装置を完成させた。1年間必要な30億人分の水は1.5兆トンであるが、この中には、20億トンのマグネシウムが含まれている。世界で年間使用されている石炭・石油が100億トンなので、5年でこれに匹敵するリサイクル燃料が手に入ることになる (Fig. 3参照)。

さらに詳しい解説は、日経サイエンス⁶⁾とPHP新書⁷⁾をご覧ください。

参考文献

- 1) 矢部 孝, 内田 成明, 生田 一成, 吉田 國雄: 学術月報 **59-2** (2006) 125.
- 2) T. Yabe et. al.: Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 261107.
- 3) T. Yabe et. al.: Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 261120.
- 4) O. Graydon: Nature Photonics **1** (2007) 495.
- 5) T. Ohkubo et. al.: Opt. Lett. **34** (2009) 175.
- 6) 矢部 孝: 日経サイエンス 2007年11月号, p. 30.
- 7) 矢部 孝, 山路 達也: マグネシウム文明論 - 石油に代わる新エネルギー資源 - (PHP新書, 2009).