

マグネシウムとレーザーを用いた再生可能エネルギーサイクル

矢部 孝
東京工業大学

(原稿受付：2007年2月20日／原稿受理：2007年5月10日)

再生可能な燃料を用いたエネルギーサイクルを提案する。マグネシウムをエネルギー貯蔵媒体とし、水との反応でそのエネルギーを取り出す。反応生成物である酸化マグネシウムは、太陽光を直接レーザーに変換したレーザーによって元のマグネシウムに還元される。これにより、定常的でない太陽光を貯蔵することができる。レーザーによる還元効率42.5%を実現し、太陽光励起レーザーもスロープ効率14%を達成し、実用化が見えてきた。20年後に深刻となる水問題の解決法についても述べる。

Keywords:

renewable energy, solar energy, laser, magnesium, fuel cell, reduction, CO₂

1. 化石燃料を使わないクリーンエネルギー

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、わずか数万平方キロメートル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860万平方キロメートルなので、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ろうか？ 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。このままでは、残りの20時間は別のエネルギーを使用しなくてはならない。太陽光で24時間分のエネルギーをまかなうためには、エネルギーの貯蔵が必要となる。火力発電所規模のエネルギーを貯蔵するには、現在、揚水発電しかない。これも最早限界にあり、新たな大規模エネルギー貯蔵技術が必須である。

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、我が国がこれを利用することができない。ここでもエネルギー貯蔵ができ、移動可能な媒体が必要となる。

著者は、マグネシウムを用いたエネルギー貯蔵を提案した[1-4]。マグネシウムを水と反応させるとモルあたり86キロカロリーの熱と水素を発生する。この水素を燃料電池として使用したり、水素燃焼エネルギー58キロカロリーを使うこともできる。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、マグネシウムに戻すことができれば、このマグネシウム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(図1、本文末尾参照)。

以下では、マグネシウム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。こ

れと同時に、2025年には30億人分の水が不足するという問題とエネルギーとがいかに密接に結びついているかを述べ、水の問題抜きにエネルギーを語る危険性を指摘し、この解決策を提案する。

2. マグネシウムの加水反応

マグネシウムの重量あたりで発生できる水素の重量比は8.3%で、他の物質とくらべてもかなり大きな水素貯蔵能力を持っている。メタノールのように貯蔵能力が大きくても、反応速度が遅くて実用化ができないものと異なり、マグネシウムの加水分解反応



の反応速度は、マグネシウムの表面積を変化させることで、自由自在に変えられる。このように、マグネシウムの反応を制御できれば、燃料電池などの水素源として有望である。また、単位体積あたりに発生できる熱量は700気圧の水素の十倍であるので、コンパクトなエネルギー源でもある。図2は、マグネシウム100gの反応で1kW相当の水素を40分間定常的に発生させることに成功した反応試験装置である。白い部分が反応装置である。以上は最初からマグネシウムを100g入れたバッチ方式での結果であるが、さらに長時間の運転のためには、二重弁により圧力低下なしに手でマグネシウムを連続供給できる。燃焼後の酸化マグネシウムが増加すると、燃焼部のステージは下部に下がり、常に燃焼部の体積を一定にする。これが実用化すれば、ペットボトル2リットル程度の容器で家庭用水素燃料電池の水素供給源となるであろう。

また、Mg燃料の形状を変えることによって、より高速でかつ水素燃焼も利用するエンジンが完成した。図3のように反応装置からの反応ガスにより風車を駆動する方式を



図2 白い部分(約2リッター)がマグネシウム反応装置。右は水素測定部。

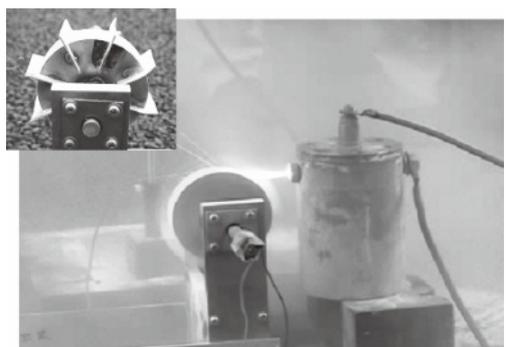


図3 マグネシウム反応装置から発生する蒸気と水素の燃焼により駆動されるタービン。

用いて毎分8000回転を実現した[4]。発電や放水実験にも成功している。マグネシウム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マグネシウムに替えることができれば、“リサイクル可能な石炭”としてマグネシウムを現システムに使うこともできるであろう。マグネシウムは、引火の危険がなく、反応エネルギーが同じ容積の700気圧水素の10倍であるので、大量のエネルギー貯蔵に向いている。

第3の利用方法はマグネシウム燃料電池である。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と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ので、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。米国の我々の共同研究者は、すでに亜鉛燃料電池を製作し、1回の燃料供給で普通

乗用車の600 km走行に成功している(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。これをマグネシウムに替えると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(将来はマグネシウム)燃料パックの交換はわずか3分で済むし、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。

3. マグネシウム還元

使用済みのマグネシウム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。従来のマグネシウム精錬は、ドロマイト($MgCO_3/CaCO_3$)を焼成して CO_2 を飛ばし、酸化マグネシウムにケイ化鉄 $FeSi$ という触媒を使用して1200-1500度という比較的低温で行われてきている。だが、触媒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らない。

触媒なしで、マグネシウムを還元することは、そう容易なことではない。酸化マグネシウムの還元は、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比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るであろうと考えた。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、効率のよい還元が可能となる。

著者らは、図4のような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時間以上連続的にレーザー発振に成功している。現在、効率はまだ約3%であるが、スロープ効率(入射太陽光と出力レーザーのグラフの傾き)は14%にまで達している。現在の太陽光レーザーは、500 W入力以上で初めて発振し始めるため、原点がずれている。現時点での集光系で集まる太陽光は800 Wまでなので、どうしてもこの影響がある。まもなく完成する4倍の集光系では、4 kWとなり500 Wのしきい値

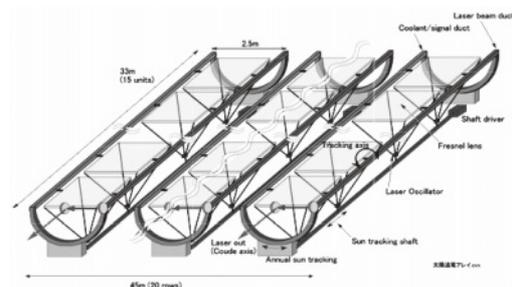
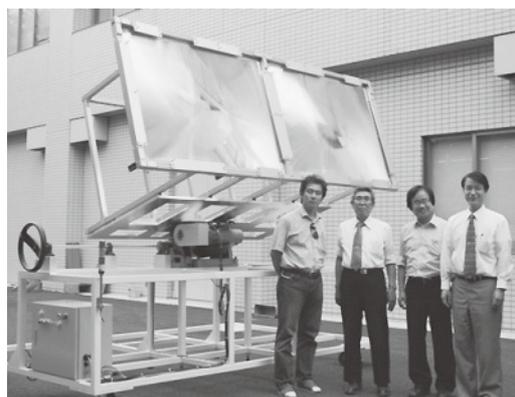


図4 写真(上)のような二連式集光装置により、二つのレーザーを並べ、レーザー発振・増幅実験を行う。将来は下図のように、多数のフレネルレンズを同時に動かす。このモデルは、現在千歳市に建設されつつある。

分が小さくなり、スロープ効率14%がそのまま効率(レーザー出力/太陽入力)になることは確実である。人工太陽光では、すでに42%の効率で発振しているので[5]、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。

実用的な太陽光励起レーザーの1ユニットは2m×2m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4kWであるので、20-30%の効率が実現すれば、1kW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、1kW炭酸ガスレーザーを用いた還元を実証した。蒸発したガス中の30%がマグネシウム原子であることを確認しており、0.2秒のレーザー照射時の蒸発量0.075g/secとの計算から、エネルギー還元効率*の目標値50%にかなり近い42.5%を達成した[4]。

〈*エネルギー還元効率〉入射したレーザーのエネルギーに対し、発生したマグネシウムの燃焼エネルギーの比。

図5のように僅か数秒の照射で大量の蒸気が発生し、その30%がマグネシウム原子であることを複数の測定により確認した。1mm径で照射された部分の熱は、周囲に広がらず、熱的に遮断されたまま瞬時に加熱されていることがわかる。将来は、300本のレーザーがそれぞれ異なった場所を1mm径で照射し、酸化マグネシウムの表面を掃引していくであろう。したがって、現在実験中の1本のレーザーによる還元が成功すれば、この方式がそのまま300本のレーザーに適用できる。

4. 水を抜きにエネルギーは語れない

現在世界中で精錬されているマグネシウムは約60万トン

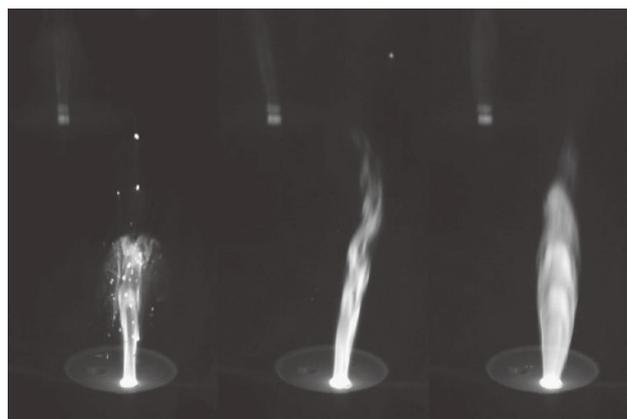


図5 高速度カメラによるマグネシウム蒸気発生の様子。

／年であり、そのうちの70%を中国が石炭の火力を用いて製造している。世界的なエネルギー問題と炭酸ガスの問題で、これ以上生産を増やすことは許されない状況になっている。石炭の年間使用総量が35億トンであることを考えるとあまりにも少ない。したがって、いくらマグネシウムサイクルが素晴らしいからといっても、原資がなければサイクルも成立しない。

こうした事情を考慮して、我々は後に示すような実用化ロードマップを考え、徐々にサイクルを実現させる方法を提案している。それを示す前に、エネルギー問題と同様に重要で、複雑に絡み合っているもう一つの問題に目を向けなければならない。

2025年には、世界人口の40%(30億人)が水不足になると予測されている[6]。農業や工業を含めて考えると人口一人あたり年間約500トンもの水を必要としている[6]。単純に計算すると、30億人分は年間1.5兆トン、一日41億トンである。これを解消するには、20万トン/日の淡水化プラントを2万基新たに作らなければならないことになる。現在、全世界の淡水化装置の80%は多段フラッシュ法と呼ばれるものを用いている。これは、原子炉や火力発電所から排出される高温蒸気によって低圧力中の海水を蒸発させるもので、新たな電力を必要としないという意味では環境にやさしい技術である。しかし、これから先必要とする淡水化装置が必ずしもこのような立地条件に合致するとは限らない。また、海水にさらされる真空容器の材質はチタンなどの非常に高価なものとなる。そこで、最近では、逆浸透膜法と呼ばれる淡水化設備が盛んに建設されるようになってきた。しかし、消費電力の少ないと言われる逆浸透膜淡水化プラントでさえも、60気圧の圧力で駆動するため、20万トン/日のプラントに要する電力は5万kWであり、これを2万基も新たに設置すれば、この使用電力は年間9兆kW時となり、2002年の世界電力使用量16兆kW時の56%にもなる。

こうした淡水化のもう一つの問題点がある。例えば逆浸透膜で淡水を作る場合、20万トン/日では、50万トンの海水を取り込み、その内の20万トンが淡水となる。残りの30万トンは再び海水中に投棄される。これによって、淡水化プラント周辺の海水の塩分濃度が上昇する。潮の流れにも

よるが場合によっては塩分濃度が高く保たれる場所も現れる。塩分濃度が上がれば浮力が増え、海流に影響を与えるし、漁業にも大きな影響を与える。現に、淡水化プラントの多いアラビア半島近傍の海水の塩分濃度が上がりつつあるという報告もあるそうである。

このように考えると、水は非常に貴重な資源であり、その生産には多大なエネルギーを必要とすることがわかるであろう。水が不足すれば食料が生産できなくなる。確かに我が国は水には恵まれてはいるが、食料の大半を輸入に頼っている現状では、水不足から発生する食料不足に一番大きく影響されるのは我が国であると言えよう。こうした状況で、サトウキビやトウモロコシを生産し、そこからバイオエタノールを作るという提案は、余程注意深く考える必要があろう。バイオエタノールよりも先に、人間の食料を生産することが急務となる可能性があるからである。実際、最近では、バイオエタノールの需要のせいで、穀物価格が急騰している。

もう一つの問題に水の輸送がある。海岸で淡水を作っても内陸部までパイプラインで運ばなければならないとすると、どうしても水の価格が高くなり農業用には使用できない。そこで、著者が提案しているのは、海水の水路を内陸部まで作り、その水路の沿岸で多数の小型淡水化装置を使うものである。このような水路の例は、全長160 kmのスエズ運河である。中国では、水不足のために、南京あたりから北京へ水路を作って水を持ってくるといった構想があるそうだが、これくらいのことのできるのであれば、海水を引いてくることも同じようなものであろう。

我々は、こうした問題にも取り組んでおり、消費電力が少なく濃縮海水を投棄する必要のない淡水化方式を提案しているが、特許に関わることであるので、現時点では公表できない。これとは別に現在の淡水化プラントの駆動力としてマグネシウムエンジンを使用すれば、新たな発電所建設に伴う二酸化炭素発生を抑制できる可能性もある。

6. 実用化ロードマップ

淡水化プラントはもう一つの恵みをもたらす。海水中には1800兆トンものマグネシウムが含まれている。これは、毎年35億トン使用されている石炭の5万年分にあたる。従って、20万トン/日の淡水化プラントからは、650トン/日のマグネシウムが生成でき、2万基のプラントからは、年間47億トンのマグネシウムが生産できる。この約4分の一で、逆浸透膜淡水化プラントの動力を提供できるであろう。残りは備蓄される。さらに、自然エネルギーによってマグネシウムの還元が行えれば、すべてのマグネシウムが回収できるであろう。これにより、淡水化プラントは水供給のみならず、マグネシウム生産・還元工場となる。

先に述べたように、あと20年後には水問題が深刻になってくる。これを睨みつつ我々の技術を浸透させるために、図6のようなステップでプロジェクトを進めてゆく予定である。2010年には、2 m×2 mのフレネルレンズを1基とするユニットを300基ドバイに建設し、太陽光励起レーザーの高効率化と還元のテストを行う。次の5年間では、これを

200区画、総計6万基の小型実用機を建設し、水1万トン/日、マグネシウム1万トン/年を目指す。2025年には、世界の水供給に必要な量の15%に相当する3000プラントを建設する。図中には、水を100円/トンで、マグネシウムを300円/kgで販売したときの売上と対応する設備の建設コストも記入している。わずか1年で建設コストが回収できると試算されている。

当然であるが、これは非常にラフな試算であり、今後、企業と一緒にプロジェクトを進めつつ、より詳細な将来設計図を描いてゆく予定である。

7. さらなる夢

太陽光励起レーザーと共に、半導体レーザーも本システムに有効である。現在、電気から半導体レーザーへの変換効率の世界記録は85%にもなっている。このレーザーとマグネシウム循環サイクルを利用すれば既存の発電所の季節変動をなくす（例えば、春の電力を夏に使う）電力貯蔵が可能となる。また、風力、潮汐、地熱などの安定供給の難しい電力も、半導体レーザーによるマグネシウムの還元で蓄積されてゆく。

さらに面白いことに、反応によって生成された酸化マグネシウムは炭酸ガスを吸収して、炭酸マグネシウムになる。マグネシウムを含む鉱石のほとんどが炭酸マグネシウムであることから納得できるであろう。炭酸ガスを吸収し、太陽の光（太陽光励起レーザー）によって酸素も発生する様子は、まさに植物の葉緑素の働きに似ている。私の話を聞いたノンフィクション作家の山根一真氏は、これを「マグネシウムの森」と呼んだ。

余談ではあるが、この記事がどうしてプラズマ・核融合学会の招待講演となり、こうして学会誌に掲載されるのかといふ向きもあろう。これには主に二つの理由がある。著者はレーザー核融合の分野でエネルギー問題を解決しようと考えてきた。30年前のオイルショックで、「何とかして核融合でこの状況を打破せねば」という動機に突き動かされて研究してきた。この記事でもおわかりのように、世界は待たなしの状況に立たされている。プラズマ・核融合に携わる者として、この分野からこの危機を乗り越える何かをできるだけ早く出さなくてはならないという意識を会員の皆様に持っていただきたいとの願いが一つの理由である。

もう一つの理由は、ここで使用されているレーザー、アブレーション等はすべてレーザー核融合から派生してきたものであり、このような話題もプラズマ・核融合学会として受け入れられる寛容さがあってもよいのではないかと思っただけである。

最後に今回の招待講演を企画してくださった大阪大学・大学院工学研究科の田中和夫氏に感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] T. Yabe, S. Uchida, K. Yoshida, K. Ikuta and T. Okamoto, An overview of Entropia Laser Initiative (Keynote lecture); AIP Conference Proceedings 830 pp.21-30 (2006).

Proc. 4th International Symposium on Beamed Energy Propulsion (ISBEP4), Nara, Japan, November 15-18, 2005.

- [2] 矢部 孝, 内田成明, 生田一成, 吉田國雄:「太陽エネルギーと蓄積」学術月報 59, 125 (2006).
- [3] 矢部 孝, 内田成明: レーザー研究 34, 408 (2006).
- [4] T. Yabe *et al.*, Demonstrated Fossil-Fuel-Free Energy Cycle Using Magnesium and Laser, Appl. Phys. Lett. 89,

261107 (2006).

- [5] T. Saiki *et al.*, Development of Solar-Pumped Lasers for Space Solar Power Station, Proc. Int. Astronautical Congress 2005, (2005), IAC-05-C3.4-D2.8.09.
- [6] 日経サイエンス編集部: 特集「しのび寄る水資源危機」日経サイエンス2001年5月号 pp.25-45.

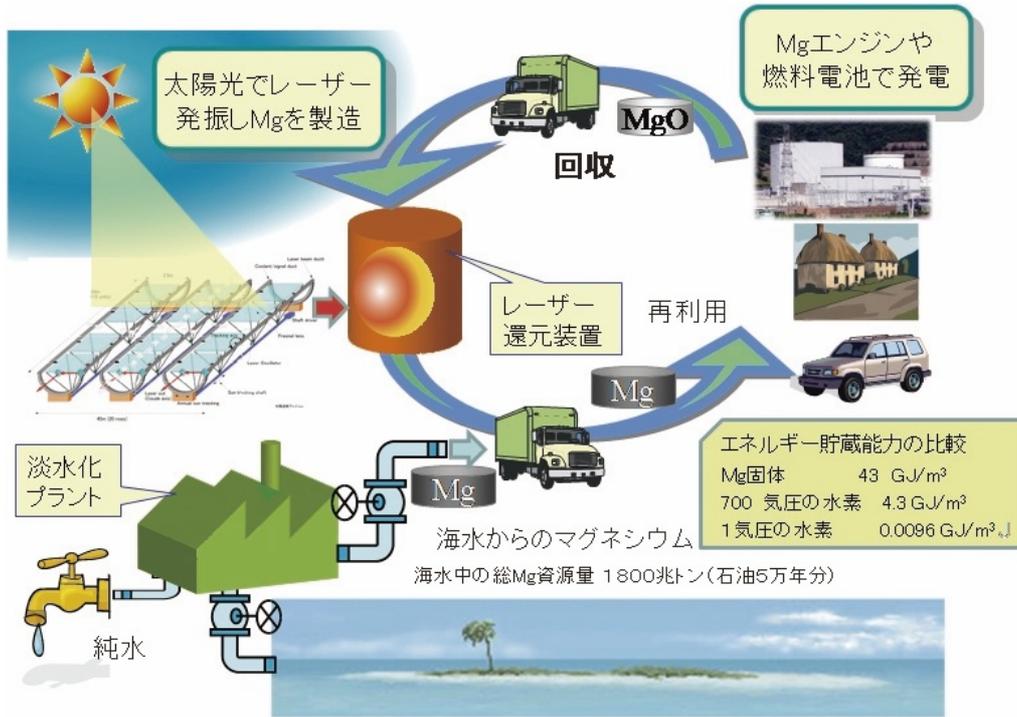


図1 マグネシウムと太陽光励起レーザーを用いたエネルギー循環システム.

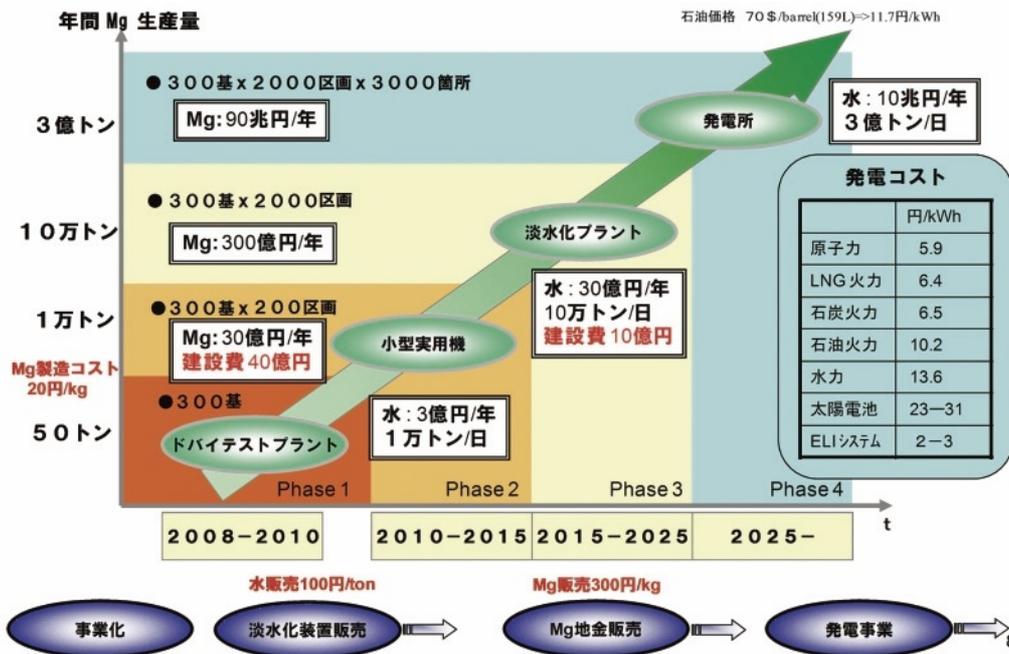


図6 実用化に向けたロードマップ.