

海水から生まれる新エネルギー通貨マグネシウム — 地球を救う循環型エネルギー社会構想 —

矢部 孝

東京工業大学 教授

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(図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 1,800 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、単位体積当たりに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 万キロワット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 平方メートルの面積に 10 トンの力がかかるため、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 33,000 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

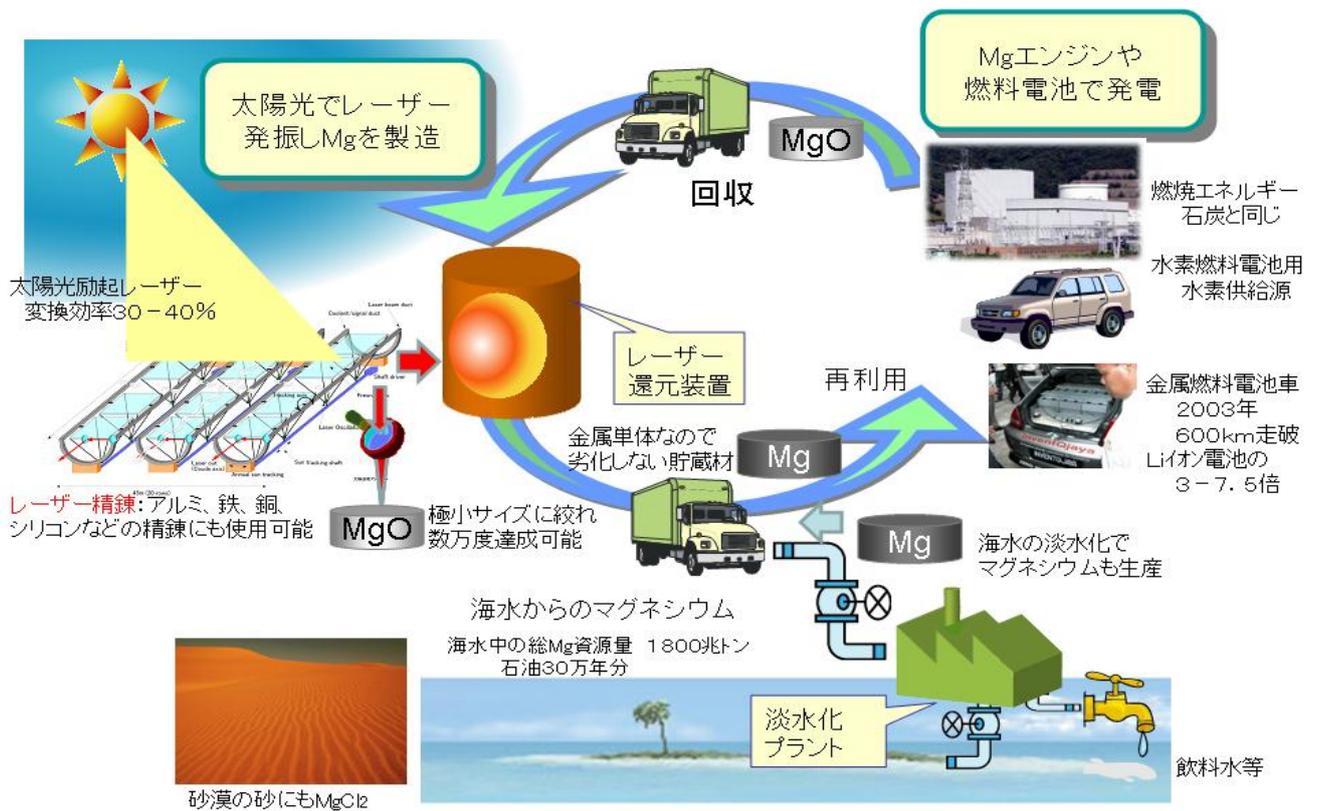


図1. マグネシウムと太陽光励起レーザーを用いたエネルギー循環システム

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 500 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。

我々は、すでに簡単な実験でマグネシウム空気電池により 1,300 Ah/kg を実現した(電圧を 1.96 V とすると、2,500 Wh/kg である)。これは、理論的なマグネシウムの容量 2,200 Ah/kg の約 60% である。これにより、スマートフォンを一日動かすに必要なマグネシウムは 1 g 程度となる。1ヶ月 30 g であるとする、現状のマグネシウム価格 300 円/kg としても、わずか 9 円である。

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。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 3.88 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 1,100 万トンあまりにも少ない。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必要がある。従来の Mg 精錬は、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、1,200-1,500 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ため、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 4,000 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、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 4,000 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

の状態では物質を高温に保つことは不可能である。実際に見積もってみればすぐにわかるが、1 g の MgO を 4,000 度に加熱するエネルギーは 4 kJ である。しかし、実際のピジョン法では、10 g のコークスを使っている。これは、300 kJ である。この違いが分解エネルギー等であり、触媒を作るエネルギーでもある。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、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 1 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。

このようにして、マグネシウム生産効率 20 mg/kJ を実現した。これは、1 g の MgO を作るのに、50 kJ のエネルギーを使用したことになり、ピジョン法の6分の1のエネルギーである。

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⁾。

4 m²の集光系(図2)では、レーザー出力 120 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3%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 30%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。従って、集光効率の向上だけでも 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。

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。

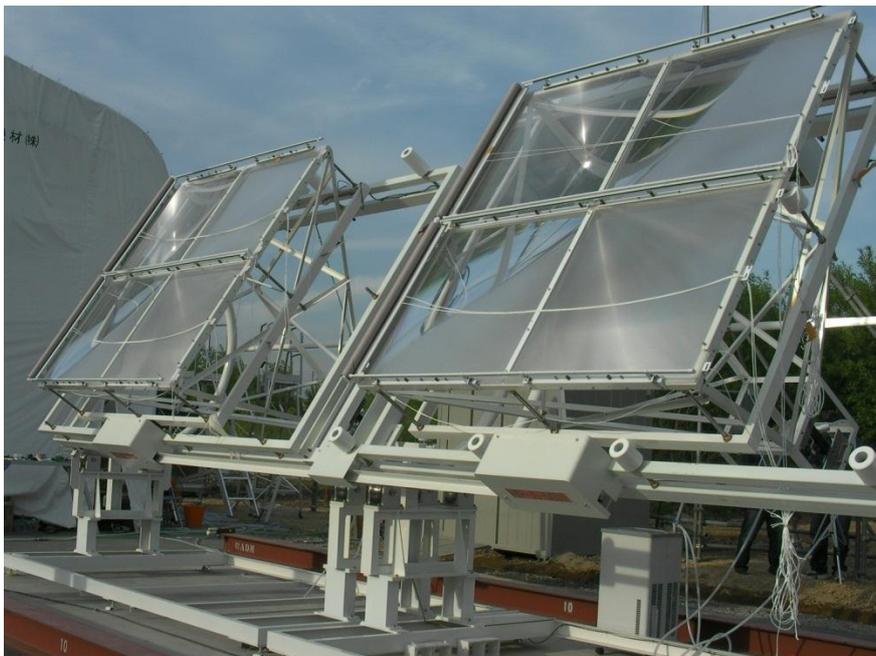


図2. 4 m²レーザー：一基あたり、1 kW のレーザー出力を目指す

5. おわりに

現状は太陽光励起レーザーではまだマグネシウム循環社会の実現には数年かかるであろう。現状の出力 120 W が 400 W になれば、普通乗用車を 500 km 走行するに要するマグネシウム電池の燃料価格が 8,000 円台となり、ガソリンに匹敵する価格が実現する。マグネシウム電池は、1 年以内に市場に投入されるであろうが、これは太陽光励起レーザーの効率向上を待つまでもない。実際には、風力、水力、原子炉余剰電力等を半導体レーザーに変換することで、全く同じことが実現できる。4 kW の半導体レーザーが 1,000 万円で製造できれば、太陽光励起レーザー 400 W と同程度のマグネシウム価格帯を実現できる。これは、現状でも可能である。今後、1 年程度で、マグネシウム電池がリチウムイオン電池に徐々に置き換わり始めるであろう。

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言われている。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(図3参照)。今後 1 年以内には、世界が驚くシステムが出現するであろう。

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。

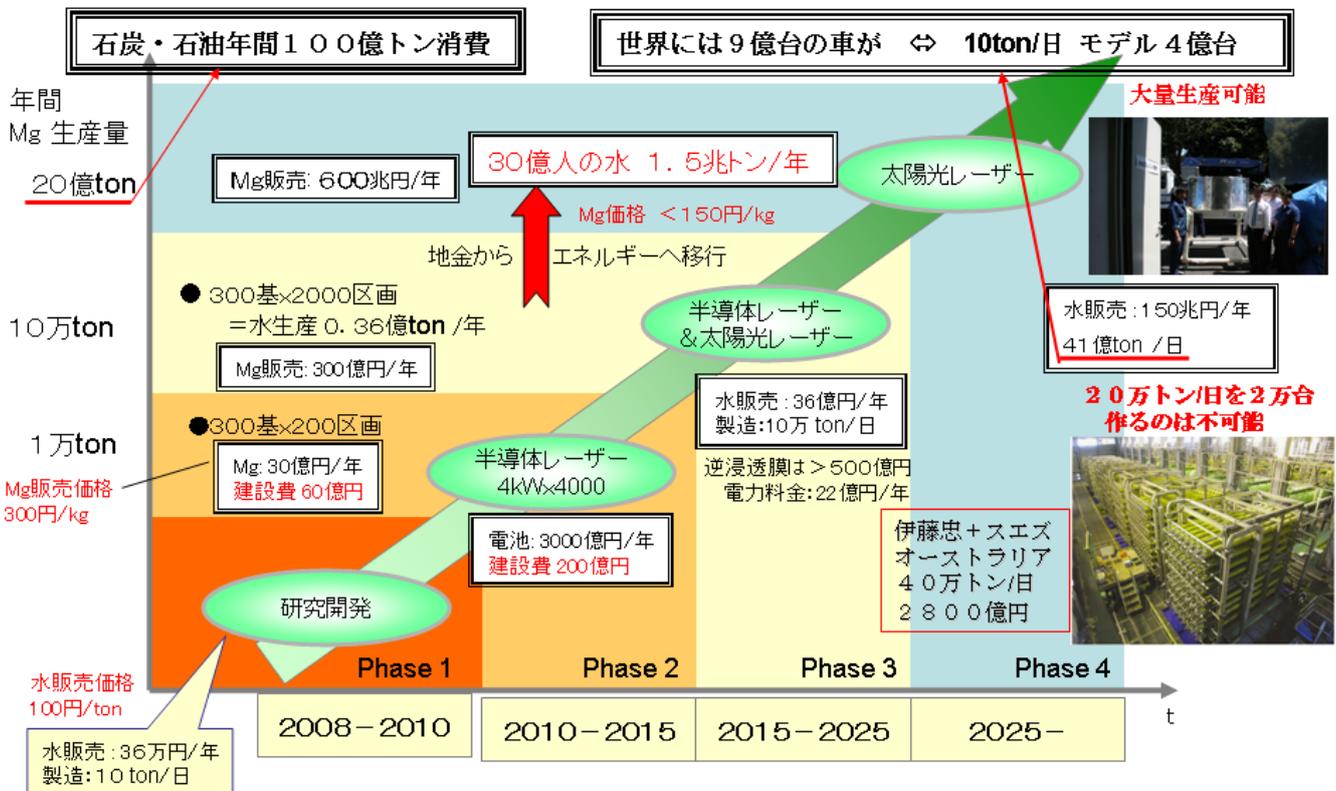


図3. 実用化に向けたロードマップ

参考文献

- 1) 矢部孝他: 太陽エネルギーと蓄積、学術月報 **59-2** (2006), 125
- 2) T.Yabe et.al. : Demonstrated Fossil-Fuel-Free Energy Cycle Using Magnesium and Laser, Appl.Phys.Lett. **89** , (2006), 261107.
- 3) T.Yabe et.al. : High-efficiency and economical solar-energy-pumped laser with Fresnel lens and chromium codoped laser medium, Appl.Phys.Lett. **90**, (2007), 261120.
- 4) O.Graydon: A Sunny Solution, Nature Photonics **1** , (2007), 495.
- 5) T. Ohkubo et.al. : Solar-pumped 80 W laser irradiated by a Fresnel lens, Opt. Lett., 34 , (2009) 175
- 6) 矢部孝: 太陽光レーザーが拓くマグネシウム社会、日経サイエンス 2007年11月号、30
- 7) 矢部孝、山路達也: マグネシウム文明論ー石油に代わる新エネルギー資源ー、(PHP新書、2009)

講演者略歴

1950 年生まれ。1973 年、東京工業大学工学部を卒

業。すぐに同大学助手に就任。その後、1981 年に大阪大学・レーザー核融合研究センター講師、85 年に同助教授、1995 年には東京工業大学・教授となり現在に至っている。

大阪大学でレーザー核融合研究に従事していたときに考案した計算手法 CIP は世界中に広まり、参照数は 2000 を超えている。この業績により 1999 年には英国王立研究所創立 200 周年記念招待講演を行なった。流体科学賞、日本機械学会・計算力学部門・業績賞および功績賞、レーザー学会賞、プラズマ・核融合学会賞、APACM Computational Mechanics Awards、IACM Computational Mechanics Awards など数多くの賞を受賞。現在、国際数値流体学会の名誉フェロー、計算力学国際連合の理事などを務めている。

最近、マグネシウムと太陽光レーザーによる新エネルギー資源の研究に取り組み、2009 年の米国 TIME 誌で、Heroes of the Environment に選ばれ、紹介されている。また、TIME 誌、CNN、Fortune 誌、サイエンス誌、NASDAQ、AAAS が合同で選ぶ 2010 年度 World Technology Award for innovation of "long-term, lasting significance."のファイナリストに選ばれた。