



太陽光励起レーザーで水素をつくる

カーボンニュートラル社会を実現するためにはクリーンな水素が不可欠である。水素製造では、再生可能エネルギーである太陽光による電力を使用した水の電気分解がよく知られている。そのほかにも、太陽光から直接、レーザーを発振し、水素を製造する方法が提案されている。

太陽光励起レーザーによる水素製造のイメージ画像。

注目される太陽光励起レーザー

再生可能エネルギーの代表ともいえる太陽光から水素を生成する方法には、ソーラーパネルにより発電した電力で水を電気分解する方法が一般的だ。そのほかにも、光触媒を用いる方法や、反応容器にフェライトを用いた高温太陽集熱による水熱分解ソーラー水素製造システムや、フェムト秒レーザーを用いた海水からの直接水素製造方法など、さまざまな方法が提案、研究されている。

太陽光エネルギーを利用する上で課題となるのが、天候に左右される点だ。そこで、天候の影響のない宇宙空間において、太陽光エネルギーをマイクロ波またはレーザー光に変換して地球に伝送し、電力や水素などに変換して利用する宇宙太陽光発電システム(SSPS:Space Solar Power Systems)が提案されている(図1)。

宇宙空間から地上へのエネルギー輸送の手段としてのマイクロ波に対するレーザー光のメリットとしては、波長が短いため、ビームの広がり角が小さく長距離を伝送させやすいことや、装置やシステムを小型

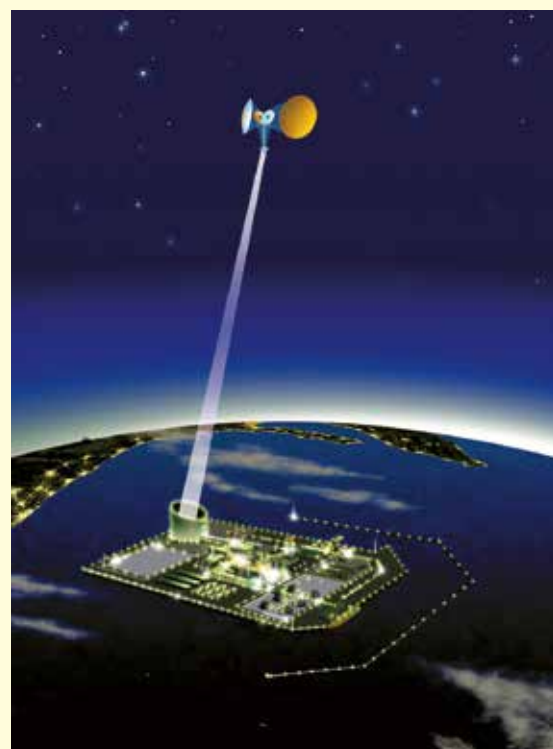


図1 宇宙太陽光発電のイメージ

資料提供: 宇宙航空研究開発機構(JAXA)

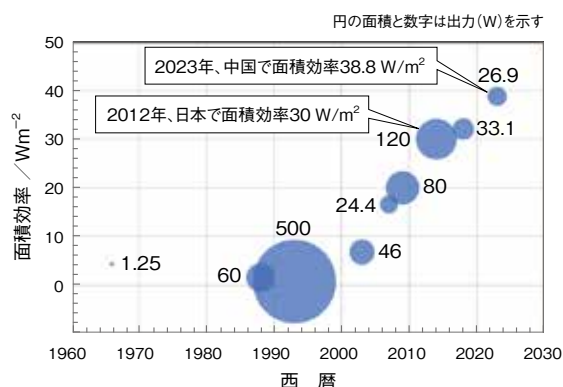


図2 太陽光励起レーザーの面積効率と出力の推移

東京工科大学 大久保友雅教授の資料を元に作成。

化しやすいことが挙げられる。さらに、レーザー源として、太陽光励起レーザーを用いれば、変換ロスを最小限に抑えることが可能になる。

太陽光励起レーザーは、太陽光を励起光源として利用する固体レーザーである。レーザー (Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (誘導放出による光増幅放射)) が開発されたのは1960年で、その6年後の1966年には太陽光励起レーザー (SPL: Solar-Pumped Laser) が開発されている。1966年の発振では直径61 cmのパラボラミラーで太陽光を集光し、レーザー出力は1.25 Wであったという。

その後、集光面積を拡大することで、出力の向上が図られ、1988年には60 W (集光面積: 38.5 m²)、1993年には500 W (集光面積: 660 m²) を達成しているが、集光面積に対してレーザー出力が低いことが課題であった (図2)。

2000年代に入り、面積効率が徐々に向上し始め、2007年には集光面積1.47 m² でレーザー出力24.4 W、2009年に4 m² で80 W、2012年には4 m² で120 Wが日本の研究により実現している。

レーザー出力120 Wのときの面積効率は30 W/m² であるが、その後、2023年に中国で38.8 W/m² が達成されている。

太陽光励起レーザーの光-光変換効率の理論限界は約40%といわれ、実現

すれば、太陽光発電と半導体レーザーの組み合わせよりも高効率になることから、太陽光励起レーザーへの期待が高まっている。

効率向上を実現するための3つの課題

太陽光励起レーザーは、太陽光を集光する1次集光系、集光した光をレーザー媒質に集める2次集光系 (太陽光キャビティ)、レーザー媒質などから構成されている (図3)。

太陽光励起レーザーの効率向上には3つの課題があると指摘されている。その1つ目は大面積で集光した光を、小さなレーザー媒質に照射する必要がある点だ。レーザー出力120 Wを達成した太陽光励起レーザー装置では2 m×2 mのフレネルレンズで集光し、直径約1 cm、長さ約10 cmのレーザー媒質に照射している。

2つ目の課題が集光した光の「閉じ込め」である。通常のレーザー発振では、光源とレーザー媒質を閉鎖空間に配置し、光を効率的に利用できるが、太陽光励起レーザーの場合は、太陽光を取り入れるための開口部が必要になる。開口部は太陽光の入口になるだけでなく、レーザー媒質に吸収されなかった光が出

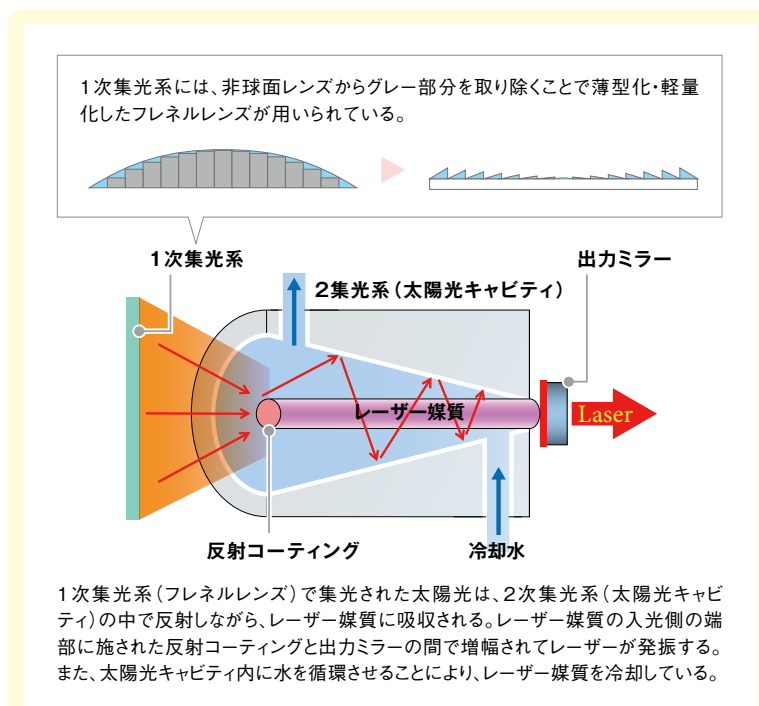


図3 太陽光励起レーザーの仕組み

資料提供: 東京工科大学 大久保友雅教授



円錐形の内側にはミラーが貼られ、入射した太陽光を何度も反射させてレーザー媒質に吸収させる仕組みだ。中央に見える緑色の円柱がレーザー媒質。

図4 太陽光キャビティ



装置右側に太陽光キャビティ①が見える。太陽追尾センサー②や、それに連動する駆動系③などから構成されている。

図5 太陽光励起レーザーシステム

資料提供：東京工科大学 大久保友雅教授

ていく出口にもなり、効率を低下させる原因になる。

この2つの課題を同時に解決するのが、太陽光キャビティだ(図4)。太陽光キャビティは内側が円錐形の鏡になっているので、入射した太陽光は、キャビティ内を何度も反射するうちにレーザー媒質に吸収される。これにより、吸収されずに開口部から出ていく光の量を最小限に抑えている。

3つ目の課題は、太陽光の一部しかレーザーに変換できない点である。従来使用されていたレーザー媒質はNd:YAG(Yttrium・Aluminum・Garnet)であったが、極一部の可視光や近赤外線しかレーザーに変換することができず、効率向上を妨げていた。新しく開発されたCr/Nd:YAGセラミックスでは、Cr³⁺を添加することにより、より広い波長の可視光もレーザーに変換できるようになっている。

これらの工夫に加え、集光効率の高いフレネルレンズや、レーザー媒質への光の吸収を増加させ、冷却効率も向上させる3次集光系などの採用により、当時、世界最高の面積効率である30 W/m²が実現された。

2 m×2 mのフレネルレンズをはじめとした太陽光励起レーザーシステムは、太陽自動追尾装置の上に搭載されるがシステム全体のサイズは3 m以上の高さになり、扱いやすいとはいえなかった。現在、フレネルレンズを0.85 m×0.85 mにした装置の小型化が

行われている(図5)。新しいシステムでは1次集光系の光を鏡で反射させることで、横向きにレーザーが取り出せるなど、実験のしやすさなどにも配慮されており、今後の研究の加速が期待されている。

パルスレーザーにより高出力を実現

レーザーにはレーザー出力が一定のCW発振(Continuous wave: 連続波)と時間的にレーザー出力を変動させるパルス発振がある。ここまで紹介してきた太陽光励起レーザーはCW発振であるが、太陽光を増幅に用いたパルス発振によりレーザー出力を高める研究も行われている。

パルスレーザーをより高い周波数で照射することにより実現する高温によって、金属酸化物を還元することが可能になる。還元された金属を水と反応させることにより、水素を製造することができる。

Nd:YAGレーザー(波長1064 nm、パルス幅8 ns、強度110 mJ/pulse、繰り返し10 Hz)を用いた実験では、粒径約45 μmの粉末状酸化鉄(Fe₂O₃)の還元とナノ粒子化に成功している(図6)。

溶液中でレーザー照射を受けた材料は瞬時に蒸散(アブレーション)し、原子化、プラズマ化するが、ターゲットが酸化物である場合は、このときに酸素が脱離(還元)する。集光点近傍から離れたプラズマは溶媒により急速に冷却され、原子同士が凝集しナノ粒子を形成する。この方法は液相レーザーアブレーション法と呼ばれ、高効率で金属ナノ粒子を生成することができる。

生成した鉄ナノ粒子を加熱し、水蒸気と接触させることで水素を発生させる実験にも成功している(図7)。粉碎により生成した鉄ナノ粒子と比較して、液相レーザーアブレーションによる鉄ナノ粒子の方がより効率的に水素を発生できることも明らかになっている。

水素を発生させた後の鉄ナノ粒子は酸化鉄になるが、これを回収し、再び太陽光励起パルスレーザーによる液相レーザーアブレーションで還元すれば、エネルギーサイクルを構築することが可能になる。

鉄のほか、アルミニウムやマグネシウムでも、液中レーザーアブレーションで還元が可能だ。これらの金属を使用した新しいエネルギーサイクルが提案されている。また、液相レーザーアブレーションで製造された金属ナノ粒子は、粉碎や化学的方法により製造された金属ナノ粒子とは異なる性質を持つことが分

かっており、この解明も待たれる。

月面開発での活用が期待される 太陽光励起レーザー

効率向上など、実用化への課題は少なくないが、宇宙太陽光発電のほかにも、近年、関心が高まっている月面開発においても太陽光励起レーザーの活用が期待されている。月面に豊富に存在するレゴリス（月の砂）は、酸化アルミニウムなどの金属酸化物が主成分である。レゴリスにレーザーを照射することで、金属と酸素に分離するレーザー還元の研究が進められている。酸化アルミニウムにレーザーを照射し、約4000 Kの高温にすることで金属アルミニウムを生成することに成功している（図8）。

生成した金属アルミニウムは月面開発の資材として活用できることに加え、水と反応させることで水素を生成することも可能だ。レゴリスと太陽光励起レー

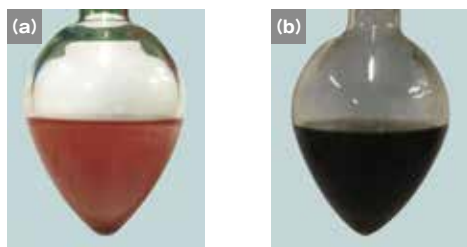
ザーによる月面での新しいエネルギーサイクルが提案されている（図9）。

さらに、レゴリスには酸化アルミニウムのほかにも、ケイ素、チタン、鉄、マグネシウムなどの酸化物が含まれており、これらもレーザー還元することが可能だ。

また、月面の南極や北極の日の当たらない場所では水の存在が有力視されており、レーザー還元によるエネルギーサイクルは月面開発を支える技術としても期待されている。

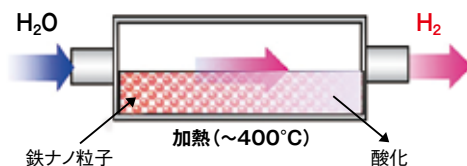
実はこのエネルギーサイクルは地球上でも実現可能で、アルミニウムのほかにも、海水中に豊富に存在するマグネシウムを利用したエネルギーサイクルも提案されている。

カーボンニュートラル社会を実現するためには、より効率的に水素を製造する技術の確立が不可欠であり、太陽光励起レーザーの今後の効率向上に大きく期待したい。



(a)は照射前の酸化第二鉄(Fe₂O₃)、(b)はパルスレーザーを15分照射後の様子。

図6 金属ナノ粒子のレーザー還元



液相レーザーアブレーション法で還元・ナノ粒子化して調整した100 mgの鉄ナノ粒子粉末と30 mLの水を反応させた結果、理想気体発生量(53.3 mL)に近い50 mLの気体が発生した。

図7 水素生成の原理

資料提供：関西大学 佐伯拓教授

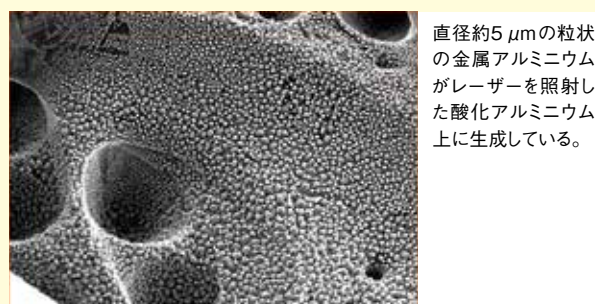


図8 レーザー還元で生成したアルミニウム

資料提供：東京大学 小紫公也教授

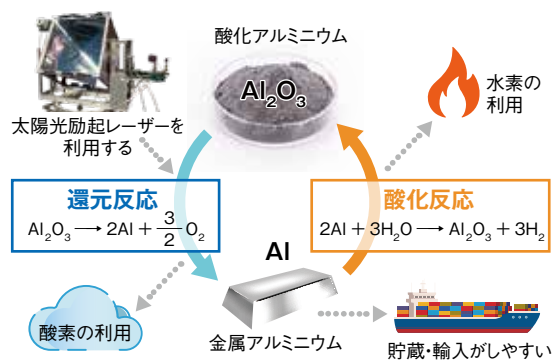


図9 レーザー還元によるエネルギーサイクル

東京大学 小紫公也教授の資料を元に作成。