

月・惑星における水素製造の検討

小林弘明（宇宙科学研究所）、成尾芳博（宇宙科学研究所）

Sudy on hydrogen production on the moon and the planet

Hiroaki Kobayashi* and Yoshihiro Naruo

* Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)

Abstract: A preliminary study was conducted on the process of producing hydrogen for supplementing rocket propellant and energy storage on the lunar surface. We looked at the unique issues on the moon while referring to the present state of hydrogen production process and utilization technology on the earth. On the moon, although hydrogen atoms are always supplied to the surface soil (regolith) by the solar wind, the content is small and hydrogen recovery from regolith is expected to be very difficult. If we can recover water that is expected to exist in polar regions and hard holes, we can apply water electrolysis and liquefaction techniques, and it becomes possible to manufacture liquefied hydrogen as a propellant and use hydrogen as an energy medium. In the hydrogen production process on the lunar surface, the ground will be used as a cold sink for waste heat. If the ground temperature is maintained at low temperature as well as at night surface temperature (-200 deg C) there is a possibility that the total energy efficiency of the process can be greatly improved. On the other hand, in the oxygen production process from regolith, a heat source of 1000 deg C class is required. Therefore, it is considered effective to introduce the heat mass temperature control technology in the range from cryogenic temperature to 1000 deg C by aggregated sunlight and heat insulating structure.

Key Words: Hydrogen, Renewable Energy, In Situ Resource Utilization

1. はじめに

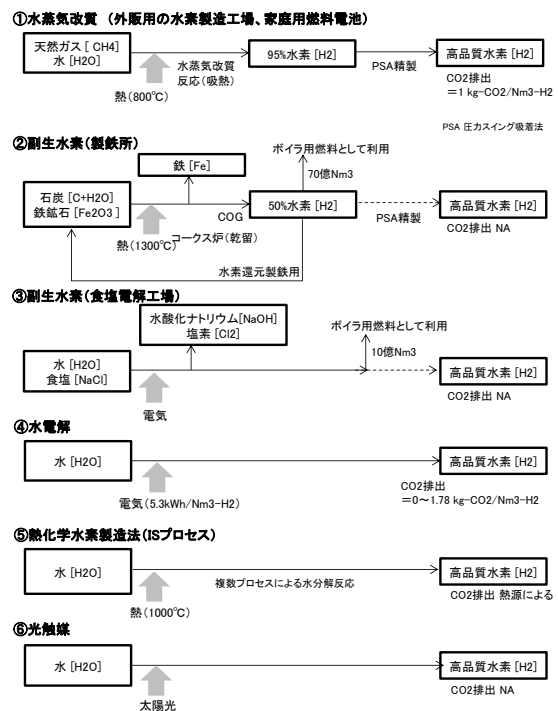
宇宙科学研究所では、宇宙輸送コストの大幅な低減を実現することを目的として、従来より、民間の水素エネルギー技術開発との相互交流を積極的に行っている。技術交流の短期的な狙いは、民間技術導入によるロケット開発・運用コストの低減。長期的には、水素社会実現への積極的貢献による燃料・機器コストの低減を目指している。本稿では、地球における「水素技術」と、月・惑星における「地産・地消型探査技術」の接点について、予備的な調査検討した状況を紹介する。

2. 地球における水素製造技術

日本における水素エネルギー関連技術開発には2つの動機がある。第1は、エネルギー自給率の向上、第2は、地球温暖化の防止である。第1次石油ショック（1973年）を契機に、石油代替エネルギー開発の一環として、水素エネルギー技術開発が1974年より開始された。また、気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書（1997年）を契機に、温室効果ガスの中で、最も大きな割合を占める二酸化炭素の排出を抑制する「低炭素：カーボンフリー社会」を構築するための活動が本格化した。こうして、水素をエネルギー媒体とする低炭素社会構築を目指した各種の国家プロジェクトが進められている。

水素は2次エネルギーであり、石油、水力、太陽光などの1次エネルギーを変換することで得られる。地球における主な水素製造方法について、第1図に示す。現在主流の水素製造方法は、天然ガスの水蒸気改質か、製鉄所や食塩

電解工場の副生水素を利用する手法である。水電解は技術確立しているが、系統電力を使用する場合はかえってCO₂排出が大きくなる。電解を用いない製造方法として、ISプロセスや光触媒があり、総合エネルギー効率を改善する将来技術として期待されている。他に、褐炭（低品位炭）からの製造とCCS（Carbon dioxide Capture and Storage）技術の組み合わせがある。



第1図 水素製造方法

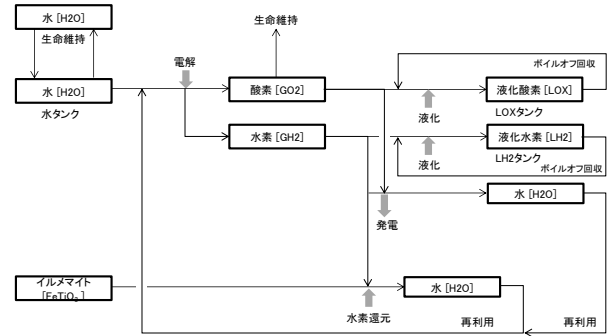
3. 月惑星における水素製造

月面の温度環境は、中低緯度地域において昼間 120℃、夜間-200℃、日照周期 708 時間である。表面物質（レゴリス）は金属酸化物（酸素 43%、ケイ素 21%、アルミニウム 10%、鉄 9%、カルシウム 9%）で、含まれる鉱物としては、イルメナイト(FeTiO₃)、灰長石 (CaAl₂Si₂O₈) などがある。酸素は、酸化物の形で豊富にあるが、還元を行うための水素や水素化合物がない。レゴリスには太陽風起因の微量の水素が付着しており、900℃までレゴリス加熱することで、ほぼ全ての水素を回収することができる¹。しかしながら文献によれば、レゴリス中の水素割合は 0.005%程度²で、一般的なポンペ 1 本(7 Nm³)分の水素を得るには 12.5 トンものレゴリスを熱処理しなければならない。レゴリスからの水素回収は、非常に困難を伴うと予想されるが、水素は酸素と異なり生命維持で失われることはなく、再利用することが可能である。従って、酸素生成用の水素還元ループを構成するのに必要な最小限の水素があればよい。NASA による検討例では、水素は着陸船の推進薬残量をかき集めて確保する³、とされている。

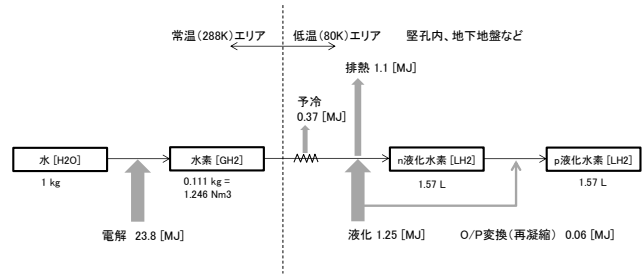
水素を、酸素生成用以外、例えば越夜用のエネルギー貯蔵やロケット推進剤として利用する場合には、レゴリスからの回収は総量的にも現実的ではなく、極域や縦孔にあるとされる氷の回収利用が不可欠の前提条件となる。月面における水素・酸素の製造系統を第 2 図に示す。ロケット推進剤としても利用するため、水素・酸素は液化して貯蔵するものと想定する。また、第 3 図に、水素製造におけるエネルギー収支の検討例を示す。検討条件を下記に示す。

- ✓ 低温ヒートシンク (80 K) への排熱が可能
- ✓ 電解に必要なエネルギー：5.3 kWh/Nm³⁴
- ✓ 液化におけるエンタルピー変化：1127 kJ/kg (40 kPaA で 80K→17K まで冷却し、液化)
- ✓ ヘリウム冷凍機効率：0.1 (低温 17 K、高温 80 K、% カルノー=0.3)
- ✓ オルソ/パラ変換エネルギー：527 kJ/kg

水 1 kg から液化水素を製造するために必要なエネルギーは 25 MJ で、大部分は電解プロセスで使用される。液化プロセスにおいて、1.5 MJ の余剰エネルギーが、低温エリアの 80 K ヒートシンクに排熱される。もし低温エリアのヒートシンクを利用できない場合、冷凍機効率が大幅に低下するほか、予冷も行えなくなるため、液化に必要なエネルギーは 22 MJ に大幅増となる。月では大気による対流熱伝達がないため、低温機器の断熱に有利である一方、プラント機器の排熱方法が課題となる。逆に言えば排熱回収はしやすく、コンバインドサイクルなど、地上用の優れた排熱回収技術が応用できると考えられる。もし地盤温度が越夜時の表層温度 (-200℃) と同様に低温で維持されているならば、プロセスの総合エネルギー効率を大きく改善できる可能性がある。一方、レゴリスからの酸素製造プロセスにおいて



第 2 図 月面における水素・酸素製造系統



第 3 図 水素製造のエネルギー・熱収支

は 1000℃クラスの熱源が必要となるため、集約太陽光と断熱構造による極低温～1000℃範囲でのヒートマス温度制御技術の導入が、効果的と考えられる。

4. 結言

月・惑星において水素を製造するプロセスについて、予備的な検討を実施した。地球における水素製造プロセスや、利用技術の現状を参照しつつ、月・惑星における特有の課題について考察した。月レゴリスからの水素回収は非常に困難と予想されるが、酸素製造プロセスの還元剤としての利用は期待できる。さらに、極域や堅穴内での存在が期待される水を回収できれば、電解や液化技術を適用し、推進剤やエネルギー媒体としての水素製造が可能となる。水素製造プラントの検討にあたっては、越夜中の極低温環境の積極利用や、日夜の大きな温度差を利用した発電なども考えられ、一般産業用として開発中の様々な省エネルギー技術が応用可能と期待される。

参考文献

1. Gibson, E. K., Jr., Thermal analysis-inorganic gas release studies of lunar samples, Proceedings of the Lunar Science Conference, vol. 2, p.1351, 1971
2. Erich Robens and Stanislaw Halas, Study on the possible existence of water on the moon, GEOCHRONOMETRIA 33 (2009), pp 23-31
3. Jerry Sanders, Lunar In-Situ Resource, Utilization: Development and Implementation, NASA, Dec. 13, 2007
4. 阿部勲夫、水電解法による水素製造とそのコスト、水素エネルギーシステム Vol.33, No.1 2008