

Title	地域産業からみた水素社会の展望
Author(s)	常定, 健; 児子, 英之; 永山, 則之
Citation	年次学術大会講演要旨集, 31: 579-582
Issue Date	2016-11-05
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/14005
Rights	本著作物は研究・イノベーション学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Research Policy and Innovation Management.
Description	一般講演要旨

地域産業からみた水素社会の展望

○常定 健，兒子英之，永山則之（岡山県工業技術センター）

1. はじめに

資源エネルギー庁は、平成26年6月に策定した「水素・燃料電池戦略ロードマップ」の改訂に向けた議論を行い、平成28年3月、新たな目標や取組みを具体化させた「水素・燃料電池戦略ロードマップ[改訂版]」をとりまとめた[1]。そのなかに掲げられた「再生可能エネルギー由来水素の利活用」は地域振興策のひとつとして注目されており、水素社会の実現は、我が国のエネルギー資源調達における中東依存度の低下や、自動車・社会インフラ関連産業などにおける国際競争力の強化に寄与するだけでなく、地域産業の振興や地域活性化にもつながるものとして期待されている。

しかしながら、水素社会の実現に関しては、コストや安全性の面からその実現に懐疑的な声もある。特に、米国では、ブッシュ政権時代の2002年から燃料電池自動車の開発と水素社会の構築を目的として、政府が補助金を出して本格的な開発支援を行ってきたものの、大きな成果が上がりなかったという経緯もあり、燃料電池自動車に対するネガティブなイメージが一部にある。日本においても拙速に水素エネルギーの利用拡大を推進して失敗した場合、負の遺産が多く残ってしまい、2020年の東京オリンピック・パラリンピック後に、「水素ブーム」が終焉してしまうことも懸念されている。

したがって、水素社会の展開においては、経済合理性が成り立つ成功を積み重ねていき、利用者、事業者、国・地方自治体など、関係者全員にとって有意義となるモデルを構築すべきだとの提言がされている[2]。

水素社会を実現するうえで重要になる計画のひとつに、輸入水素のサプライチェーンに関するインフラ事業がある。海外からの輸送に関するプロジェクトは大規模になるため、事業開始後に問題が発覚しても、大きな変更が困難になるのではないかと懸念がある。水素・燃料電池戦略ロードマップ[改訂版]では、水素を液体水素または有機ヒドライド（メチルシクロヘキサン）の形で輸送することを基本としてお

り、水素供給コストについて、2020年代後半に30円未満/Nm³（プラント引渡しコスト）を目指している。しかしながら、原油、LNG（液化天然ガス）などの既存燃料と比較して、水素が経済合理性を持つ燃料として確立するまでの具体的な道筋については、水素・燃料電池戦略ロードマップが改訂版になっても示されていない。

コンビナートが立地する地域産業の視点からみると、さらに2つの懸念がある。ひとつは、水素の輸入関連コスト（液化などの輸送付随コストと輸入における直接の輸送コストの合計）である。仮に、海外で安価に水素が製造されるようになったとしても、水素の輸入関連コストがLNG以上に高ければ、水素関連の新産業は、国内ではなく、水素の生産地や水素をパイプライン輸送できる地域で発達する可能性が高くなるからである。石油化学工業はコンビナートにおける主要産業であるが、国内で石油化学工業が発達した理由のひとつに、原油価格に占める輸入関連コストの低さ（コスト全体の約7%）が挙げられる。一方、LNGでは、価格に占める輸入関連コストの割合（液化プロセスを含めるとコスト全体の約67%）が非常に大きい[3]。このコストは、天然ガスの産出地や天然ガスをパイプライン輸送できる地域では不要なため、日本は価格競争で不利な立場に置かれている。このことから、近年、LNGの輸入が増え続けているにもかかわらず、国内において、天然ガス化学工業は石油化学工業のように発達していないし、今後も発達しないだろうと予想される。

もうひとつの懸念は、水素社会へのスムーズな移行に関する問題である。コンビナート内に立地する企業の多くは大企業であるが、コンビナート周辺には関連する多くの中小企業が存在する。中小企業にとっては、現時点での需要が大きい水素関連事業のために、長期間にわたって研究開発や技術開発に資金を投じ続けることは難しい。中小企業の参加を促すためには、現行のエネルギー産業のなかで取組みが可能な事業を進めて、そのなかに水素を加えていく仕組みづくりが求められる。

そこで本研究では、物質・エネルギー収支の観点から、水素の輸入関連コストを既存燃料との比較で相対的に見積もり、その結果をもとに、既存燃料からの円滑な移行も含めた水素社会の展望について考察を試みた。

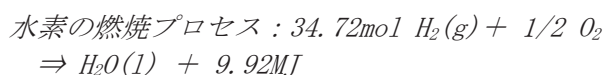
2. 物質・エネルギー収支の計算

本研究で行うエネルギー計算は熱化学方程式に基づいており、物質収支は化学量論的なものである。一般的に熱化学方程式が 1mol あたりの熱量を表記するのに対し、本研究では、化学式の冒頭にある化合物のモル数を必要に応じて変化させ、そのモル数に対応した熱量を式中に表記する。これを一般的な熱化学方程式と区別するために、左辺と右辺を「 $\Rightarrow$ 」で結ぶ。これにより、一般的な熱化学方程式で使用される「 $=$ 」と区別されるし、反応の進む方向も明らかにできる。また、化学反応式で使用される「 $\rightarrow$ 」とも区別できる。なお、化学式のなかにある (l) は液体、(g) は気体を意味している。

3. 水素の輸入関連コスト

物質・エネルギー収支論的手法を用いて、水素を海外から輸入するときに想定されている液体水素と有機ハイドライドについて、輸入関連コストを求め、比較する。

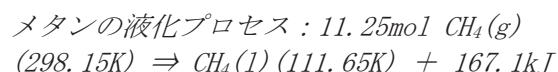
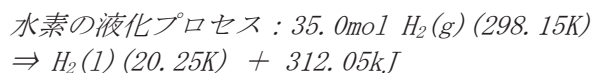
はじめに液体水素について検証する。水素の分子量は 2.016、液比重は 0.07 であるから、1L の $H_2(l)$ は 70.0g (34.72mol) である。水素の燃焼熱は 285.83kJ/mol だから、



LNG の成分をメタン 100% とみなして比較を行う。液体メタン 1L は 23.0MJ の熱量を持つので、液体メタン 1L と同じ熱量の液体水素は 2.32L である。メタンより沸点の低い水素を輸送することになる液体水素タンカーは LNG タンカーより高価になるだろうが、仮に水素と LNG の輸送コストが同じであるとしても、LNG の輸送コストが 1.2ドルのとき、同じ熱量を持つ液体水素の輸送コストは 2.8ドルとなる。

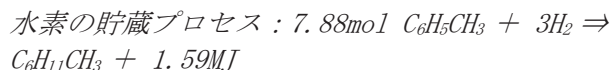
一方、液化の場合は、ガスを冷却するためのエネルギー投入が必要になる。メタンと同様、水素は常温圧縮で液化することができないので、液化には冷媒による冷却が必要になる。冷却に必要なエネルギーを物質・エネルギー収支で計算することはできないが、除去しなければならないエネルギーを算出することは可能であり、液化コストは除去しなければならないエネルギーに比例すると考えることができる。

熱量 10MJ に相当する燃料は、水素で 35.0mol、メタンで 11.25mol である。液化するときに除去しなければならないエネルギーは、ガス温度を下げるために取り去らなければならない熱とガスが液体になるときに発生する熱の合計である。熱量 10MJ に相当する水素、メタンについてこれを求めると [4]、

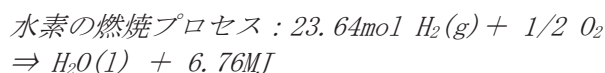
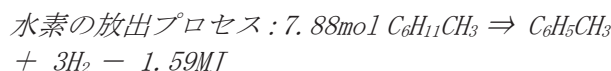


同じ熱量の燃料を液化させる場合、メタンより水素のほうが多くの熱を除去しなければならない。ガスの冷却に混合冷媒が使用できず、メタンのより沸点の低い水素は、天然ガスよりも液化のエネルギー効率が悪くなるものと考えられるが、これを無視しても、LNG の液化コストが 2.8ドルのとき、水素の液化コストは 5.2ドルになる。LNG の製造コストが 2.0ドル、液化コストが 2.8ドル、輸送コスト 1.2ドル (合計 6.0ドル) のとき、同じ熱量を持つ液体水素の輸入関連コスト (液化などの輸送付随コストと輸入における直接の輸送コストの合計) は 8.0ドルとなり、製造コストを含めていないのに、LNG の総コスト 6.0ドルを超えることになる。

次に、有機ハイドライド法を検証する。現在、メチルシクロヘキサン ($C_6H_{11}CH_3$) - トルエン ($C_6H_5CH_3$) 系の実用化が進められていることから、この系の検討を行う。メチルシクロヘキサン (分子量 98.19)、トルエン (分子量 92.14) の比重はそれぞれ、0.7737、0.8623 であり、比重の小さいメチルシクロヘキサンの輸送が律速になる。メチルシクロヘキサン 1L (7.88mol) を海外から輸送する場合、海外において、



このプロセスは発熱反応なので、エネルギー収支論的にはエネルギーの投入を必要としない。一方、国内に持ちこんで水素 (23.64mol) を取り出す際にはエネルギーを必要とし、その水素から得られる熱量を計算すると、それぞれ、



これは、メチルシクロヘキサン1Lでは6.76MJの熱量に相当する水素しか運べないうえ、水素を取り出すときには1.59MJのエネルギーが失われることを意味している。しかし、有機ハイドライドの場合、液化が必要ないうえ、通常のタンカー（石油タンカー）で輸送することが可能である。水素をLNGタンカーで、メチルシクロヘキサン（トルエン）を石油タンカーで運ぶものとし、輸送コストが船価（タンカーの価格）に比例すると考えて、LNGタンカーと石油タンカーの価格を比較する。船価は市場価格なので常に変動しているが、LNGタンカーの船価が比較的低価格で安定していた2000年のデータ（新造船契約船価）を参考にすると、積載容量138000m³のLNGタンカーの船価が165百万ドルだったのに対し、積載重量280000トンの石油タンカーは76百万ドルだった。これをもとにすると、液体メタン、メチルシクロヘキサン1Lあたりの船価は、それぞれ、1.2ドル、0.21ドルとなる。取り出される水素が液体メタン1Lと同じ熱量を持つメチルシクロヘキサンは3.4Lであり、これに相当する船価は0.7ドルである。したがって、LNG（≡液体メタン）の輸送コストが1.2ドルのとき、これと同じ熱量の水素を運ぶメチルシクロヘキサンの輸送コストは0.7ドルと見積もられる。

メチルシクロヘキサン3.4Lから水素を取り出すときに必要となるエネルギー5.41MJをLNGで賄うとすると、0.235LのLNG（≡液体メタン）が必要になる。LNG1Lの価格が7.5単位の時、メチルシクロヘキサン3.4Lから水素を取り出すときには、エネルギー代として1.8単位が必要になる。この結果、LNG（価格7.5ドル）の製造コストが2.0ドル、液化コストが2.8ドル、輸送コストが1.2ドルのとき、同じ熱量を持つ水素を運ぶメチルシクロヘキサンの輸入関連コスト（液化などの輸送付随コストと輸入における直接の輸送コストの合計）は2.5ドルとなる。これはLNGの輸送関連コスト4ドルより低くなるが、トルエンに水素を添加するプロセス、また、メチルシクロヘキサンから水素を取り出すプロセスに関する価格上乗せ分が加味されていない。つまり、このコストを低減できれば、有機ハイドライドの輸入関連コストはLNG並に抑えられるものの、大規模なプラントが必要になるため、設備費等のコストを削減することは容易でない。

これらの結果から経済合理性が成り立つ水素社会の実現を考えてみると、液体水素の場合、安価に水素が製造されるようになったとしても、輸入関連コストが高いために、LNGより価格が高くなるうえに、国際競争力を持つ水素関連産業を国内で振興させることも難しい。一方、有機ハイドライドの場合、水素を貯蔵するコストと

水素を取り出すコストを削減できなければ、LNGに価格面で勝つのは難しい。ただ、液体燃料の場合、LNGや液体水素の輸送では避けることのできない液化コストが要らないことは大きな利点であり、LNGでは困難な、国内における関連産業の振興への道を切り開く可能性を持っている。

この考察をもとにすれば、天然ガスの輸入についても、液化しないプロセスのほうが国内の産業振興に有利ではないかとの疑問が湧く。そこで、天然ガスからの合成が容易なメタノールについて、輸入関連コストをLNGと比較する。

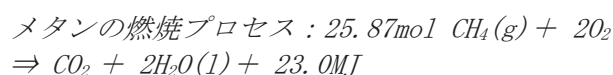
4. メタンとメタノールの輸入関連コスト

天然ガスを効率よく液体燃料に変換し、その液体燃料を輸入できれば、液化コストは必要なくなる。天然ガスを液体燃料に変換する技術（GTL）としては、FT合成（フィッシャー・トロプシュ合成）による合成油（GTL灯油やGTL軽油など）の製造が一般的に知られているが、工程が複雑でエネルギーロスも大きい。そこで、原理的には酸化反応だけで合成できるメタノールに着目した。メタンからメタノールを効率よく合成する方法としては、

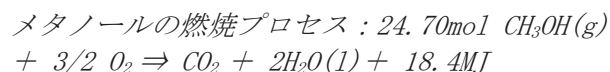


で示される合成ガス（CO+H₂）経由の2段階法が現実的であるが、研究段階としては、メタンからメタノールを直接合成することもできる[6]。

天然ガスの主成分はメタンなので、メタンとメタノールについて、輸入関連コストの比較を行う。液体メタン1Lを海上輸送する場合、メタンの分子量は16.04、液比重は0.415であるから、1LのCH₄(l)は415g(25.87mol)である。メタンの燃焼熱は890.31kJ/molだから、



一方、メタノール1Lを海上輸送する場合、メタノールの分子量は32.04、比重は0.7914であるから、1LのCH₃OH(l)は791.4g(24.70mol)である。メタノールの燃焼熱は744.04kJ/molだから、



エネルギーの輸送効率としてはメタンのほうがメタノールを上回っており、液体メタン1Lと同じ熱量を持つメタノールは1.25Lである。既述の船価[5]を用いれば、燃料1L当たりの船価はメタンが1.2ドルに対して、メタノールは0.215ドルである。よって、メタン1Lと同等の熱量を持つメタノール1.25Lの船価は0.27ドルとなる。

メタノールの場合、メタンのような液化コストはかからない。しかしその代わりに、メタンからメタノールを製造するときにコストがかかり、これをメタノールの輸入関連コストに含めなければならない。メタノールの製造コストは、余分に必要となるメタンの製造コスト(A)メタンからメタノールを製造するコスト(B)の合計である。メタン1molの熱量に相当するメタノールは1.2molであり、メタノールの製造にはメタン0.2molが余分に必要となる。LNG（≒液体メタン）の製造コストが2.0ドルのとき、余分に必要となるメタンの製造コスト(A)0.4ドルがメタノールの輸入関連コストに上乗せされる。これを加えた輸送関連コストは、LNG（≒液体メタン）が4.0ドルのとき、同じ熱量を持つメタノールは0.67ドルである。

この結果には、メタンからメタノールを製造するコスト(B)が含まれていない。エネルギー収支論的にはメタンからメタノールを製造するのに必要なエネルギーは0である。しかし、現行の製造法では多くのエネルギーを消費している（合成ガスの製造における水蒸気改質法では、900℃程度の高温を必要とする）ため、現状では、天然ガスはメタノールに変換されるより、液化されることのほうが多い。しかし、メタノール製造コストの低減（直接接触部分酸化法による合成ガスの製造など）が進めば、輸送物質をメタンからメタノールに替えることで、天然ガス資源の輸入関連コストは大幅に削減されることになる。このことは、国内のコンビナート等における天然ガス資源を用いた地域産業に道を開くものになる。

5. 輸入水素に関する第三の道

天然ガス資源の場合、メタンからメタノールを合成することで液体燃料化できるが、水素の場合は事情が異なる。有機ハイドライドのような形で水素を液体燃料化すると、二酸化炭素排出量を増加させないという水素社会の目標を実現させるために、水素を取り出すプロセスが必ず必要になる。しかし、このプロセスがコストアップの原因になるため、液体燃料をそのまま利用したいところである。そこで考えられるのが人工光合成である。太陽光エネルギーを用いて、水（の電気分解で得られる水素）と二酸化炭素から液体燃料を合成すれば、液体燃料をそのまま燃焼させても、二酸化炭素排出量を増加させることはない。2016年6月、「太陽光変換効率10%での人工光合成を達成」という研究成果が報告された[7]。この研究によると、水の電気分解で発生させた水素と微生物が吸収する二酸化炭素により、2-プロパノール（IPA）などの液

体燃料が選択的に製造できるとしている。このシステムでは、低濃度の二酸化炭素を酸素存在下で利用できる。広大な面積と十分な太陽光を得られる適地は砂漠なので、人工光合成に関する大規模な工業的プロセスが実用化した場合、日本は、海外で生産される人工光合成由来の燃料を輸入することになるだろう。この輸入燃料がIPAであった場合、液化コストは不要である。IPAはそのままガソリンに添加することもできるし、IPAを水素とアセトンに分解させ、水素を水素ステーションに供給し、アセトンをコンビナートで化学原料として利用することもできる。勿論、IPAをそのまま化学原料として利用することも可能であり、これらの原料を用いても二酸化炭素の排出量を増加させることにはならない。

IPAは水素の液体燃料化に関する試みの一例であるが、水素社会を実現していくうえでは、地域産業に有利なイノベーションとは何かを理解したうえでの戦略が求められる。

参考文献

- [1] 水素・燃料電池戦略協議会：“水素・燃料電池戦略ロードマップ[改訂版]” 平成 28 年 3 月 22 日改訂，経済産業省（2016）
- [2] 遠山浩二：“水素エネルギーの利用拡大を目指して～ Hydrogen Hype（一時の盛り上がり）に終わらせないために～”，マネジメント・ニューズレター 視点，99，ローランド・ベルガー（2014）
- [3] 平成 28 年 5 月 2 日 G7 エネルギー大臣会合発表資料：“LNG 市場戦略（概要版）～「流動性の高い LNG 市場」と「日本 LNG ハブ」の実現に向けて～”，経済産業省（2016）
- [4] 常定 健，兒子英之，永山則之，名取 隆：“物質・エネルギー収支からみた輸入水素の輸送効率に関する比較研究”，研究・技術計画学会年次学術大会講演要旨集，30（2015）
- [5] 財団法人海事産業研究所：“新造船船価の変化要因の分析—船価決定のメカニズム—平成 14 年度”（2003）
- [6] 野崎智洋，湯澤修平，Agiral Anil，森山翔太，岡崎 健：“大気圧プラズマによる常温メタン部分酸化とメタノール直接合成”，石油学会年会・秋季大会講演要旨集 2010f(0) p.24（2010）
- [7] Chong Liul, Brendan C. Colón, Marika Ziesack, Pamela A. Silver, Daniel G. Nocera: "Water splitting-biosynthetic system with CO2 reduction efficiencies exceeding photosynthesis.", Science 352 (6290) p.1210 (2016)