


# Hirao School of Management Review

---

 CUBE 西宮 マネジメント創造学部  
Hirao School of Management

## 本文情報

---

出版物タイトル： Hirao School of Management Review  
巻： 第5巻  
開始ページ： 37  
終了ページ： 42  
原稿種別： 論文(Article)  
論文タイトル： “水素エネルギー社会”を考える際に知っておくべきこと  
第一著者： 寺内衛  
第二著者： 寺内かえで  
第一著者所属： 甲南大学マネジメント創造学部 准教授  
第二著者所属： 奈良女子大学理系女性教育開発共同機構 特任講師

Hirao School of Management Review 第5巻

“水素エネルギー社会”を考える際に知っておくべきこと

寺内 衛\*・寺内かえで<sup>ψ</sup>

【要旨】

水素 (H<sub>2</sub>) は、地球上には単体としてはほとんど存在しておらず、生産するために他のエネルギー資源から得たエネルギーが不可欠な物質である。加えて、沸点が 20 K (氷点下 253°C) と極めて低く、かつ、常温では液化できないため、ガソリンや灯油などの常温で液体であるような化石燃料 (炭化水素) と比較して、運搬や貯蔵に関しても、より多くのエネルギーが必要とされる。このような水素の基礎的な特性は、“水素エネルギー社会”を考える際には必ず考慮されなければならない。

【キーワード】

燃料電池, 水蒸気改質, 電気分解, 化学反応式, 熱化学方程式

---

\* 甲南大学マネジメント創造学部 准教授

<sup>ψ</sup> 奈良女子大学理系女性教育開発共同機構 特任講師

## 1. はじめに

トヨタ自動車の（水素を原料とする）燃料電池車（FCV ; fuel cell vehicle）の発表<sup>1</sup>以降、マスメディアは“究極のエコカー”として FCV を大々的に扱っている。読売新聞は 2014 年 8 月 18 日付社説“燃料電池車 エコカーの選択肢が広がる”で『電気自動車（EV）と同様、走行中に二酸化炭素を排出しない。／火力を含めた発電所で作った電気を使う EV より、さらに環境への負荷を小さくできる。』と主張しており、朝日新聞も 2015 年 1 月 13 日付社説“水素エネルギー 社会を支える新たな力に”において『水素エネルギーの利点は、なんといっても無尽蔵にあることだ。化学プラントなどの副産物として発生するほか、化石燃料にも含まれている。木材や汚泥などからも取り出せる。』と主張している。しかし、いずれの社説においても、水素が単体としては地球上にはほとんど存在していないこと<sup>2</sup>、今日の工業的な水素の製法が炭化水素の水蒸気改質<sup>3</sup>であることに言及しておらず、ガソリンや灯油などの身近な液体化石燃料の運搬・貯蔵などの取扱いと水素のそれとの本質的な差異についても触れていない<sup>4</sup>。

本小文は、“水素エネルギー社会”（hydrogen economy）を考える前提として知らなければならぬ「水素という元素の有する性質」についてまとめたものである。

## 2. 水素のもつ性質

水素は、既に日本語版 Wikipedia<sup>5</sup>にも明記されているように、工業的にはメタンなどの炭化水素の水蒸気改質によって製造される。以下に、原料としてメタン（CH<sub>4</sub>）を用いた場合の化学反応を示す：

---

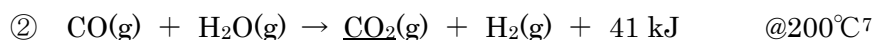
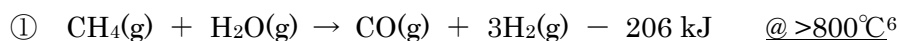
<sup>1</sup> [http://www.nikkei.com/article/DGXNASDZ250EE\\_V20C14A6MM8000/](http://www.nikkei.com/article/DGXNASDZ250EE_V20C14A6MM8000/)（日経電子版 2014/6/26 0:33 付記事）

<sup>2</sup> 例えば、佐野博敏他による高等学校「化学 I」教科書（第一学習社，2002 年 3 月検定済）p.114 には『水素は、水や生命体を構成する元素として、地球上に広く分布している。しかし、単体としては、ほとんど存在しない。』という記述があり、野村祐次郎他による『【新課程】チャート式シリーズ 新化学 化学基礎 + 化学』（数研出版，2014 年 4 月）p.325 には『地球上では、水などの化合物として多量に存在するが、単体は天然にはほとんど存在しない。』という記述がある。

<sup>3</sup> 上記第一学習社「化学 I」教科書の同一ページには『工業的には、石油などからつくられる。』という記述があり、上記『【新課程】新化学』の同一ページには『工業的にはニッケル触媒のもとで、炭化水素（天然ガス中のメタンやナフサ）と水蒸気を高温（650～800℃）で反応させ、さらに銅触媒のもとで、CO を水蒸気と反応させたのち、水素だけを分けとる。』という記述があって、二段階の化学反応式（本文 2 節①式及び②式を参照）まで明記してある。

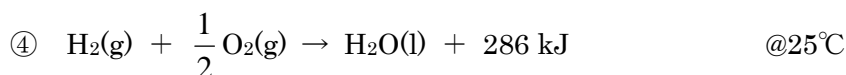
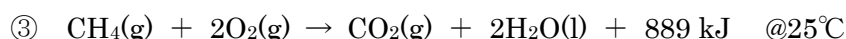
<sup>4</sup> 日本経済新聞 2014 年 11 月 21 日付社説“燃料電池車は水素社会の扉を開けるか”も基本的な論調は本文に引用した読売社説・朝日社説と同様であるが、『水素の利点の一つは製造方法が多様で、これまで未利用だった低質の石炭などからも生成できることだ。』『電気は貯蔵が利かず、太陽光のように発電量が乱高下する電源は扱いが難しいが、余った電気で水を電気分解し、水素をつくっておけば、有効活用の道が広がる。』とも述べている。

<sup>5</sup> <http://ja.wikipedia.org/wiki/水素>



①と②をまとめると  $\text{CH}_4(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 4\text{H}_2(\text{g}) - 165 \text{ kJ} (@>800^\circ\text{C})$  であり、物質質量 4 mol の水素を作るためには、800°C以上の温度を保つために必要なエネルギーに加えて、外部から 165 kJ のエネルギーを供給する必要がある。

炭化水素の水蒸気改質による製法で重要なことは、最終的な生成物に二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) が必ず含まれる、という点と、反応を行なわせるために 800°C という高温が必要である点、さらに、①の反応が吸熱反応であるため、外部からエネルギーを供給しなければならない点である。従って、水蒸気改質法によって製造された水素を使用する限り、地球温暖化ガスの排出という観点からは環境負荷は決してゼロではない。メタン及び水素の燃焼熱<sup>8</sup>は以下の通りであることを考慮すれば、メタンから水素を製造して FCV を動かす、ということは、メタン (=天然ガスの主成分) を直接燃焼させてそのときに発生する熱エネルギーを利用することと、二酸化炭素を放出する、という点も含めて原理的に何ら変わりが無い<sup>9</sup>：



最後の式に示した状態変化に必要な熱量 (蒸発熱) を考慮すれば、物質質量 1 mol のメタンを燃焼させたときに得られる熱量は、物質質量 4 mol の水素を燃焼させたときに得られる熱量から、先に示した吸熱反応に必要な 165 kJ を減じたものと同等である。

水素のもつ性質で重要なことは、沸点が 20 K (氷点下 253°C) と極めて低く、常温では液化することができないこと<sup>11</sup>である。このため、ガソリンや灯油などの常温で液体である炭化水素や、加圧することによって常温で液化可能なプロパンガスなどと比較して、運搬

<sup>6</sup> [http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat\\_detail.php?Title\\_No=01-05-02-18](http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=01-05-02-18)  
[http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat\\_detail.php?Title\\_No=01-05-02-19](http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=01-05-02-19)  
<http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/01/01050219/01.gif>

<sup>7</sup> <http://www.silp-technology.com/projects/wgsr.shtml>

<sup>8</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_of\\_combustion](http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_of_combustion)

<sup>9</sup> 現実には、各反応のエネルギー効率が 100 % ではないため、天然ガス自動車 (CNG; condensed natural gas を燃料としているバスやトラックなど) よりもエネルギー効率が劣る可能性すらある。

<sup>10</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Enthalpy\\_of\\_vaporization](http://en.wikipedia.org/wiki/Enthalpy_of_vaporization)

<sup>11</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen>

性・貯蔵性が極めて悪い<sup>12</sup>。液化水素として取り扱う方式<sup>13</sup>についてより明示的に述べれば、運搬の際のみならず貯蔵をするために 20 K 以下の極低温を保つことが可能な積層真空断熱容器の使用が不可欠であり、しかも、外部からの侵入熱を完全には防ぐことができないので、常に少しずつ漏洩してしまう（ボイルオフと呼ばれる）。ここで述べたような事実は、水素という物質そのものがもつ性質であって人為的に改変することが不可能である。すなわち、水素という物質の科学的性質そのものに起因しているために、技術的解決が本質的に不可能である。

水素は我々にとって入手が容易な水（H<sub>2</sub>O）を電気分解することによっても製造可能であるが、④式の逆反応なので大量のエネルギー（電気エネルギー）が必要になる。もちろん、2014年11月18日付NHKニュースウオッチ9<sup>14</sup>で紹介されたように、例えば苛性ソーダ（NaOH）を製造するプラントなどの副産物として生成される水素<sup>15</sup>を収集してFCVに用いるのであれば、水素の発生目的のみで新たなエネルギーは投入していないため、これまででは無駄にされてきた資源の活用にはなるが、前述の運搬・貯蔵に関する問題点は依然として解決されない。

水素エコノミーを積極的に推進しようとする人たちの中には、太陽光や風力・水力など、二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギーだけによって発電された電気のみを使って水を電気分解し、そこで得られる水素<sup>16</sup>のみをFCVに使うようにすればよい、という考えを有している人たちもいる。そのことが実現すれば（化石燃料の消費がその過程においてはなされないために）carbon-dioxide-emission freeな状況にはなるが、そのような場合には、EVの効率との比較になる。現時点においては、二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギーから得られた電気でEVのリチウム電池を充電する方が全体としての効率は遙かに高い<sup>17</sup>。

<sup>12</sup> 例えば、経済産業省水素・燃料電池戦略協議会

([http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy\\_environment.html#suiso\\_nenryodenchi](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment.html#suiso_nenryodenchi)) ワーキンググループ第5回配付資料2（資源エネルギー庁燃料電池推進室、平成26年4月14日付）によれば、水素の運搬・貯蔵には、大別すると①高圧水素を取り扱う方式、②液化水素を取り扱う方式、③トルエンに水素を付加し、メチルシクロヘキサンとして取り扱う方式（有機ハイドライドを利用する方式）、④パイプラインを利用する方式があるが、①及び②の場合には圧縮及び冷却（②のみ）に際して、また③では水素化と脱水素化の双方に際して外部からのエネルギー供給が必須となる。

<sup>13</sup> 岩谷産業『水素エネルギーハンドブック第3版』（2014.2）

([http://www.iwatani.co.jp/jpn/h2/pdf/hydrogen\\_handbook.pdf](http://www.iwatani.co.jp/jpn/h2/pdf/hydrogen_handbook.pdf)) p.13. なお、有機ハイドライドを利用する方式については、千代田化工建設が技術論文を自社HP内で公開しており

(<http://www.chiyoda-corp.com/technology/spera-hydrogen/spera06.html>)、また、液体水素コンテナに関しては、川崎重工業所属の著者による解説論文

([https://www.jstage.jst.go.jp/article/hpi/42/3/42\\_3\\_146/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/hpi/42/3/42_3_146/_pdf)) がある。

<sup>14</sup> [http://cgi4.nhk.or.jp/eco-channel/jp/movie/play.cgi?did=D0013773232\\_00000](http://cgi4.nhk.or.jp/eco-channel/jp/movie/play.cgi?did=D0013773232_00000)（燃料電池車発売 開発の舞台裏は）

<sup>15</sup> 前掲の経済産業省水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ第5回配付資料2 p.6 など。

<sup>16</sup> “Green Hydrogen”と呼ばれる：

[http://cleanenergypartnership.de/fileadmin/Assets/user\\_upload/Definition\\_von\\_Gru\\_nem\\_Wasserstoff.pdf](http://cleanenergypartnership.de/fileadmin/Assets/user_upload/Definition_von_Gru_nem_Wasserstoff.pdf)

<sup>17</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_economy#Use\\_as\\_an\\_automotive\\_fuel\\_and\\_system\\_efficiency](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy#Use_as_an_automotive_fuel_and_system_efficiency)

注目すべきは、EVを製造販売している米国テスラ・モーターズのCEOであるElon Musk氏が2014年9月に都内で行なった記者会見での以下の発言である<sup>18</sup>：

我々は、今まで様々な技術を実験的に試してきたが、燃料電池車に向かうべきではないと考えている。燃料電池車で必要となる水素ガスを作るのに要するエネルギーは、燃料電池から得られるエネルギーよりも多し、水素ガスの貯蔵や輸送も困難だ。信頼性の高い再生可能エネルギーで発電できるEVと比較すれば、燃料電池車にはエコカーとしての勝ち目はないと思う。

FCVとライバル関係にあるEVメーカーのCEOの発言であるからこそ、ということなのかもしれないが、経営者が自社製品の対抗製品に関する本質的問題点を正しく認識している、というところは、是非とも見習わなければならない姿勢であると筆者は考える。

### 3. メタンハイドレートに関する定量的な事実

“燃える氷”とよく言われているメタンハイドレート<sup>19</sup>は、日本近海に存在する資源として研究が進められている<sup>20</sup>。メタンハイドレートは、天然ガスの主成分であるメタン(CH<sub>4</sub>)分子が複数個の水(H<sub>2</sub>O)分子からなる“かご”の中に取り込まれた構造をしており、包接化合物(clathrate compound)<sup>21</sup>と呼ばれるものの一種である。理想的なメタンハイドレートの化学式は次のように表わされる： $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$ <sup>22</sup>。従って、メタンハイドレートの分子量は119.5(=12+1×4+5.75×(1×2+16))である。これは、メタンの分子量16(=12+1×4)の約7.4倍に相当する。

メタンとメタンハイドレートの分子量の比較だけから、

メタンハイドレートがエネルギー資源として利用可能であるためには、ある質量のメタンハイドレートを産出するために必要なコスト<sup>23</sup>が同質量のメタンの場合の7.4分の1未満(約13%未満)でなければならない

という明確な事実がわかる。メタンは油田あるいは天然ガス田で井戸を掘れば自噴するの

<sup>18</sup> <http://www.nikkei.com/article/DGXMZO76840640Z00C14A9000000/> (日経電子版 2014/9/9 23:00 付記事)

<sup>19</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Methane\\_clathrate](http://en.wikipedia.org/wiki/Methane_clathrate)

<sup>20</sup> 例えば、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構のHP

([http://www.jogmec.go.jp/oilgas/oilgas\\_10\\_000010.html](http://www.jogmec.go.jp/oilgas/oilgas_10_000010.html)) や、メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム(<http://www.mh21japan.gr.jp/>)が配布しているパンフレット「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」フェーズ2(<http://www.mh21japan.gr.jp/pdf/mh21panflet.pdf>)を参照。

<sup>21</sup> 『理化学辞典第5版 CD-ROM』岩波書店(1999)。

<sup>22</sup> 「メタンハイドレート研究開発」(資源エネルギー庁石油・天然ガス課, 2008年9月26日付) p.6 ([http://www.meti.go.jp/policy/tech\\_evaluation/c00/C0000000H20/080926\\_meta/meta-sanko5.pdf](http://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/c00/C0000000H20/080926_meta/meta-sanko5.pdf))

<sup>23</sup> 正しくは“エネルギー”と言うべきである。その場合には、上記は「メタンハイドレートがエネルギー資源として利用可能であるためには、その採掘に必要なエネルギーが採掘したメタンハイドレートから得られるエネルギーより少なくなければならない」と表現される。

に対し、メタンハイドレートは海底に表層型として、あるいは海底下の砂層中に砂質層孔隙充填型として存在している<sup>24</sup>ため、何らかの方法によって、水分子からなる“かご”が壊れてメタン分子が遊離する圧力が実現できる深度まで移動させる（すなわち、減圧する）か、加熱して氷を溶かす必要がある<sup>25</sup>。この際に大きなエネルギーが必要となるため、現時点ではメタンハイドレートからのメタンの商業的な生産は行なわれていない<sup>26</sup>。

#### 4. おわりに

本小論で採り上げた内容は、液体水素やメタンハイドレートに関する基本的な性質さえ知っていれば、すなわち自然科学に関する基礎的な素養があれば、誰でもが理解できるはずのものである。特に、メタンとメタンハイドレートとの比較のような「各種燃料の単位重量当たりを得られる燃焼熱」などは、物質量の概念と化学量論や熱化学方程式に関する（本来なら高等学校で履修してくるはずの範囲に収まる）基礎的な知識があれば、四則演算だけで数量的な比較まで行なえる。この意味で、本小論で採り上げた内容は万人にとっての「リテラシー」であるべきであり、このことを実現するべく、筆者の一人（MT）は、物質量の概念と化学量論や熱化学方程式に関する基礎的な知識の習得を担当科目である『リベラルアーツ入門』において履修生に課している。

#### 【参考文献】

Muller, R. A.(2010) “Physics and Technology for Future Presidents” Princeton University Press.

American Chemical Society(2012) “Chemistry in Context” 7th ed. McGraw-Hill.

岩谷産業『水素エネルギーハンドブック第3版』（2014.2）。

経済産業省水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ第5回配付資料2（資源エネルギー庁燃料電池推進室,平成26年4月14日付）。

<sup>24</sup> 前掲の「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」フェーズ2の p.6.

<sup>25</sup> 前掲の「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」フェーズ2の p.2.

<sup>26</sup> 経済産業省メタンハイドレート開発実施検討会第26回配付資料5「第1回海洋産出試験の結果報告について」（[http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004108/pdf/026\\_05\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004108/pdf/026_05_00.pdf)）（2013年12月16日）は、渥美半島から志摩半島の沖合（北緯33度56分，東経137度19分）でなされた砂質層孔隙充填型メタンハイドレートの減圧法による産出試験の報告書であるが、実験開始から6日間は大気圧下で計測して約20,000 m<sup>3</sup>/日のメタンの生産ができたことを確認した、とあるものの、その生産のために使用されたエネルギー量は明示されていない。また、この報告書の最終頁には、今後集中的な対応が必要な課題の②として「生産コストを飛躍的に引き下げる技術開発」が明記されている。