

化石燃料からの水素—背景と展望

武松敏式

岩谷産業株式会社

105-8458 東京都港区西新橋 3-21-8

. Hydrogen from Fossil Fuels - Background and Prospect

Toshiichi TAKEMATSU

Iwatani International Corporation

21-8 Nishi-Shimbashi 3-chome, Minato-ku, Tokyo 105-8458 Japan

To find out the *raison d'être* of hydrogen from fossil fuels as an energy carrier in the future, a history of hydrogen development and utilization as an energy carrier including major hydrogen projects in the world were reviewed.

And in consequence, the fossil fuels were found to have still important role as the resources of hydrogen at least for some decades in the future.

Key words: Hydrogen, Fossil fuels, Reforming, Partial oxidation

水素は現に石油精製、化学工業、鉄鋼業、ガラス工業、食品工業、半導体工業等非常に幅広い工業分野で自家生産・消費も含めて使われている。しかし本特集で取り上げられた「化石燃料からの水素」は、これから来るであろう水素時代を展望したクリーンエネルギーとしての水素を指すとの前提に立ち、その中で化石資源が果たす役割を展望するとともに、そこに至る背景についてもレビューしてみた。

1. 日本に於けるエネルギーとしての水素

もともとエネルギーとしての水素が世の中に認識されるようになったのは、1970年代初めの2回にわたるオイルショックが世界を震えあがらせた直後からである。

この時、当時の通産省工業技術院は、石油一辺倒のエネルギー政策、しかも80%以上を輸入に頼る日本の脆弱なエネルギー体質をもっと強固なものに変えるため、つまりエネルギー安全保証の確立の観点から、1974年「サンシャイン計画」と「ムーンライト計画」を発足させ、石炭の液化、風力発電、燃料電池、太陽光発電等々の新エネルギー開発のプロジェクトを立ち上げた。その中の一つとして「水素製造技術の開発」のプロジェクトが取り上げられ

たわけである。

約16~17年後の1990年代初期まで続いた多様な新エネルギー開発も、石油の安定供給が続き、石油火力から石炭火力への燃転も進み、相対的に石油への依存度が低下したこともあってか、水素関連予算も最盛期は10億円近くもあったものが1億円ぎりぎりのところまで低下していた。

しかしこの頃から次第に大気汚染の問題が社会問題として取り上げられるようになり、今度はクリーンエネルギーという観点からサンシャイン及びムーンライトの各プロジェクトが見直され、水素も再度脚光を浴びることになった。これが1993年度に発足したWE-NET計画である。

WE-NETの第1期(1993~1998年度)では、太陽光、水力等の自然のエネルギーに恵まれた国で、水素を製造し、これを液化して日本に輸送するという構想に立脚した技術開発の検討を行ってきたが、諸外国が既に水素自動車や水素バスを走らせたり、水素供給ステーションを作ってデモを行っている状況を見、あまりにも原則にとらわれずきている日本の現状を反省して、第2期(1999~2003年度)では化石燃料からの水素製造も認め、ともかく形のあるものを作り、デモンストレーションを行うという方向に方向転換し、天然ガス改質型と水電解型の水素

供給ステーションをそれぞれ1基ずつ、大阪と高松に造ることになり、2002年2月頃には完成する予定である。

2. 世界に於ける水素エネルギー実用化の動き

水素のエネルギーとしての実用化の動きは、1980年代の米国のロジャービルングや武蔵工大の水素エンジン車の開発等、日・米・欧で単発的にではあったが始まっていた。企業レベルで本格的に動き出したのは、燃料電池が自動車の動力源として、環境上有効と認識されてからと言っても差し支えない。

世界的なレベルで水素の自動車へのアプリケーションのトリガーを引いたのは、90年代初期に制定されたカリフォルニア版大気汚染防止法で、当初予定では、1998年以後に生産する新車の2%を大気汚染物質を全く出さない車（ZEV）にするというものであったが、メーカーの猛反対でこの第1、2フェーズは施行猶予になり、2003年から始まる第3フェーズ（ZEV10%導入）を完全実施することになった。現在世界的に行われている燃料電池車の開発競争は、この2003年、カリフォルニアへの一番乗りを目指した競争でもある。

昨2000年11月にカリフォルニア燃料電池パートナーシップが始まり、米、独、加、日、韓等の燃料電池自動車やバスがサクラメント市の公道で走行テストを行っている。これらの車の大部分は高圧の水素タンクを搭載しているとのこと。

これ以外にも各地でデモ走行が行われている。例を挙げると、独オベルが昨年液体水素燃料電池車をオーストラリアオリンピックでマラソンの先導車として走らせ、そのしばらく後10月に北京でデモ走行を行った。又BMWは、今年液体水素エンジン自動車のワールドツアーを行い、本拠地ミュンヘンからアラブ首長国連邦のデュバイ、ブリュッセル、ミラノ、つくば、ロサンゼルスにてデモ走行を行った。

日本に於いては、北九州でマツダが昨年公道走行を行っている外、ダイムラークライスラーのネカー5が、今年横浜、東京にて公道をデモ走行した。

BMWは、公道での許可がとれなかったこともあるが、むしろ水素エンジン車のガソリン車並のスピードを披露するため、つくば市にある（財）日本自

動車研究所のテストコース（1周5.5km）にて、乗客を乗せてデモ走行を実施した。

マツダ以外の日本車については、トヨタ及びホンダが今年ナンバープレートを取得し、公道走行を開始した。

先にもふれたように、来年初期には、大阪、高松にWE-NETの水素供給ステーションがオープンすることになるので、日本車による両市内での公道走行が実現する見込みである。

関西に2ヶ所のステーションが誕生して、首都圏に全く無い（メーカーがもつ専用のものは除く）というのはまずいという話が資源エネルギー庁内にもち上り、今年度首都圏にまず1ヶ所作り、来年度さらに数ヶ所建設すべく予算要求が行われるとのこと。これは昨年設置された「燃料電池自動車の導入目標（2010年度5万台、2020年度500万台）の達成を年頭に入れての措置と思われる。

ここ1～2年の間に国プロとして建設されるステーションは全て純水素を供給するもので、2002年度から3ヶ年に亘り、各種水素燃料電池自動車の公道でのテスト走行に供される。

On-board改質型の燃料電池自動車用のステーションは、2005年度からになる予定。

3. 現在の水素実用化の問題点

水素自動車実用化の鍵を握っているものは、車に搭載する水素タンクであると言われる。今考えられている車載水素の形態は、高圧水素ガス、液体水素及び金属水素化物である。

一方On-board改質型の燃料電池には、メタノール、ガソリン等が有力な候補燃料となっている。

純水素の場合は、直接燃料電池の燃料として使えるが、現状ではインフラがないことと、エネルギー密度の大きさに比して、タンクの嵩又は重量が大きいという欠点がある。一方ガソリンやメタノールは、現行のガソリンスタンドそのものあるいは簡単な増設で対応できること、エネルギー密度が高いこと等有利な点がある反面、水素を発生させる改質器を車に搭載しなければならないということ及びCO₂を排出するため完全なZEVにならないという不利な点もある。

このようなことから、現在どのタイプの燃料に絞
り込むか、各社とも頭を痛めているのが現状である。

先に述べたように、カリフォルニア燃料電池パー
トナーシップに参加している燃料電池車は、殆ど高
圧水素タンクを搭載しており、日本のWE-NETや首
都圏でのデモ走行も当面は純水素タンクを搭載す
ることになっている。これらのことから、ここ当分
の間は、燃料電池の耐久性試験等を純水素で行い、
かつこの間ガソリン、メタノール等の改質器の早期
立ち上げ、負荷追随性、長期間の熱サイクルに対す
る耐久性等の確認を行い、両者の信頼性が確認され
た段階で順次炭化水素系の燃料に切り替えていく
ものと考えられる。そしてまたこの間、純水素の最
適貯蔵形態についての検討を進め、高密度の水素貯
蔵技術が確立した段階で再度燃料を純水素に戻す
というのが一般的な見方である。

もし、2020年度に500万台の燃料電池車が走り、
これらがすべて純水素を積むと仮定すれば年間約
140億Nm³程度の水素が必要となる。

このように大量の水素を何から供給するのか、こ
れからの大きな課題である。

4. 水素資源の選択

現在日本で生産されている水素の量は130億Nm³
程度であると推測される。その約99%が石油精製、
製鉄、化学工業等で自家生産され自家消費されてお
り、残りの1%程度が外販水素として流通し、半導
体工業、ガラス工業、食品工業等で消費されている。
これらの数字を見ると、500万台の自動車に供給さ
れる水素量140億Nm³が、いかに大きな数字である

かお分かり頂けると思う。2020年には、現在の全生
産量以上の水素が新たに必要となるわけである。

大量の水素の調達方法を検討した最初のものは、
1980年代後半から1990年代初頭にかけて、ヨーロッ
パとカナダのケベック州との間で検討されたEQHHP
(Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project)である。
これはケベック州の水力発電所で生産された電力で
水を電気分解し、水素を製造し、これを液化してヨー
ロッパに船で運んでくるというもので、1991年に
Phase IIの報告書を出し、事実上終了し、Phase III
の国レベルの実証テストは資金不足で行われてい
ない。

このプロジェクトが終了して以来、アイスランド
から電解水素をヨーロッパ大陸に輸送するという
構想が出されたが、具体的な進展はない。

現在のドイツの水素自動車燃料に対する考え方は、
昨年9月ミュンヘンで行われた「HYFORUM 2000」
でのTESの検討結果から判断する限り、天然ガス
改質水素とメタノールのOn-board改質が有力
であり、現在のBMW及びダイムラークライスラー
の考え方を追認するかっこうになっている。

アメリカの水素エネルギー開発のオフィシャル
な幕あけは、1990年に成立したスパークマツナガ
水素法 (Spark M. Matsunaga Hydrogen Research,
Development, and Demonstration Program Act of
1990) であるが、これには水素エネルギー資源に
ついての規程はない。ただこの法律に基づいてDOE
(米エネルギー省) が1992年に作ったHydrogen
Program Plan FY1993-FY1997によると、エネルギ
ー変換効率、設備コスト、汚染物質排出の度合い等
を総合的に判断すると、太陽光発電による水素製造

表1. US Hydrogen Meetingでの水素製造に関する発表件数

年	回目	水電解 水直接分解	バイオマス	炭化水素	副生水素	H ₂ 製造全件数	全発表件数
91	2	2	1	0	0	3	36
92	3	5	0	1		6	46
93	4	2	0	0	0	2	44
94	5	5	1	2	3	11	30
95	6	1	0	0	0	1	36
96	7	0	0	0	0	0	37
97	8	5	0	0	0	5	35
98	9	1	0	0	0	1	26
99	10	4	0	2	0	6	38
00	11	0	0	0	0	0	31
01	12	1	1	4	0	6	54

はコスト的にケタ違いに高く、天然ガス改質、バイオマス改質等が有利とする結論を出している。

ちなみに小職が1991年の第2回以来毎回出席している全米水素協会（NHA）のU.S. Hydrogen Meetingでの発表論文の内、水素製造に関する発表件数のみを抜き出し、その中の水電（分）解水素製造と炭化水素からの水素製造についての発表件数を調べた結果が表1である。

必ずしも傾向がはっきりしているとは言いが、水電解は前半により集中している傾向が視え、炭化水素は極最近に集中しているように思える。

このNHAの水素会議は、その時代の政策的な傾向を、アカデミックな学会に比べて、より強く反映している面があり、その意味である程度現在の傾向を反映しているのではないと思われる。

日本もアメリカもドイツも水素エネルギー時代の水素は、自然エネルギーを利用し、再生可能エネルギー資源から製造されるべきであると考えてきたが、水素エネルギー社会へのステップが予想より早いペースで進んでいるためか、ソーラーセルの効率向上とコストダウンが追いつかず、かつ新たな水力発電施設の建設による環境破壊の懸念等自然エネルギー利用の難しさもあって、なかなか計画通りに進んでいないのが現状である。従って、「もう少しばかりは化石資源に続投してもらわねば」ということに気がついたというのが表1の読み方ではないだろうか。

ヨーロッパ/ケベックのEQHHPPに対応する日本のプロジェクトがWE-NETである。これについて先にも述べたので繰り返さないが、このEQHHPPと同様、当初は自然エネルギーによる水からの水素製造を揚げたものの第2期からは天然ガスの改質も水素製造法の一つとして取り上げられている。

首都圏で行われる来年度からの3ヶ年の水素燃料電池自動車の公道走行の燃料水素は、現に外販水素として流通している水素の一部が供されることになると思われるが、これらのソースは食塩電解、石油精製等の副生ガスである。余剰設備能力からすれば、2010年度の5万台の自動車の必要量をかろうじて満たすことができるかどうかという程度であり、その先はコスト面から天然ガス等化石燃料の改質に依存する可能性が高いのではないかと考えら

れる。

5. 化石燃料改質水素製造の課題

本論の第2及び3項の石油及び天然ガスの改質では、都市部のガソリンスタンド等でのオンサイト水素製造は豊富なスペースと法律で決められた保安距離がとれれば、プラントの設置が可能であるが、現実には、スペースや保安距離、設備間距離がとれない場合が大部分であると推測する。又、一般的にも、燃料の供給源で一括して改質し、ステーションに運び込む方がコスト的にも安上がりであることも、我々の計算から分かっているので、都市部設置が不可能と思われる第4～第6項と同様ステーション外（オフサイト）での水素製造を念頭に置いて話を進める。

石油、天然ガス及び石炭からの水素を製造する技術は既に確立した技術であり、現にこれにより発電、メタノールやアンモニアの製造等が行なわれている。従って、本特集に於いては、いかに収率良く水素を製造するか、またいかにコストを下げるができるか、また環境への影響をできるだけ少なくするためにはどうすればいいのかが検討課題となると考えられる。この課題に対する一つの解決策と考えられるのが第4及び第6項の原子力からの高温排熱や太陽熱の利用であろう。

これまでの改質水素の工業的利用の分野は別として、これからの化石燃料改質水素製造技術の対象とする主な分野は次の3つであろう。

- ① 燃料電池自動車又は水素エンジン自動車燃料用大規模水素集中製造
- ② 燃料電池自動車用On-board改質
- ③ 家庭用、業務用燃料電池コジェネレーション

1) ①の大規模集中製造の対象となる化石燃料は、天然ガス、石油、石炭と本特集で取り上げられる燃料すべてになるであろう。そして、ここにおける課題は、コストダウンのための省エネ、プロセスの高効率化と、環境対策としての生成CO₂、SO_x、NO_x等の確実な系内処理である。

省エネの主な手段として高温ガス炉の1000℃近い高温が天然ガス、ナフサ等の水蒸気改質には有効と考えられる。

太陽熱により加熱された熔融炭酸塩浴中でメタン等の水蒸気又はCO₂改質はどの程度のスケールアップが可能か、これまで500kw程度迄の経験しかないので不明であるが、いずれにしろエンジニアリング上のバリアーはかなり高いのではないかと推測され、これをブレイクスルーしない限り実用化は難しい。

石炭の部分酸化による水素製造は、石炭が化石燃料資源の中では最も豊富、かつ地球上どこにでも賦存しているため、自国のエネルギー資源からの水素製造が可能という点で、将来のエネルギー安全保障を考える上で避けて通れないものではなかろうか。

石炭ガス化は技術的には確立しており、南アのサゾールをはじめ、欧米、日本等に多くの発電用、原料水素製造用、合成ガス製造用等として様々なタイプのプロセスが稼動している。これらの中で、水素の収率の高いプロセス（石炭の種類により収率は大きく変わるが、同一の石炭で比較した場合）を選び、更に収率を落とさず製造コストを下げ、かつ環境上も充分受容可能なものに改良を加えることが必要と考える。

2) ②と③は改質器が燃料電池と直結している場合の水素製造であり、本特集の目的に必ずしもそぐわないが、燃料電池用水素製造という点では共通しており、燃料電池の2大用途としてこれから実用化の段階に向いつつある技術として世の中の注目を集めていることから、一言ふれておきたい。

②のOn-board改質はダイムラー・クライスラーのメタノール、GM/トヨタのガソリンが世界の2大潮流として注目を集めており、初期の水素燃料に替わって、特に乗用車の分野でどちらかが主流になるのではないかと推測されている。

メタノールは改質温度が低く、車の始動を早くすることができ、ガソリンは改質温度が高く不利であるがどこにでもインフラがあり、実用化という点で一番有利と、それぞれ一長一短があるが、どちらも改質器そのものは乗用車の床下に納まる程度のコンパクトなもの。多分どちらもメンブレンリアクターを改質器として使っていると推測される。

しかし、最近GMが発表したガソリン改質車は始動時間が2分強と従来型に比べ1/10以下という。これは、改質器にオートサーマルリアクターを採用し

た結果とされている。おそらく、始動時間もメタノールの場合と殆ど変わらない所までできているものと思われる。

しかし、ここでどちらの場合も、改質温度の高いガソリンの場合は特に問題になるのが、運転時と停止時の間の温度差と、これの繰り返し、つまり熱サイクルである。これによる改質触媒の粉化、改質器溶接部の熱応力による損壊の危険性等があり、これらの問題の解決が実用化のためには必須条件となる。

次に③の家庭用、業務用燃料電池コジェネ用水素製造であるが、これは自動車搭載用改質器程究極的な小型化を目指すものではないが、小型化が可能であれば、小さい程利用できる対象が拡がり望ましいといえることができる。

対象となる燃料は地域のユーティティーの種類により、天然ガス、LPG、灯油等ということになる。従って、自動車用ガソリン改質器の技術が、ほぼそのまま使うことができる。しかし、自動車用の運転パターンと家庭用、業務用の運転パターンが異なっており、これを考慮に入れたシステムの設計、容量の選定、触媒や装置材料の耐久性の確認等が必要である。しかし、家庭用、業務用のコジェネの場合は自動車用と異なり、使用しない場合は最低負荷で運転し、温水として蓄えておくような、24hr運転も考えられる。系統連係ができていれば、むしろこのような運転モードが一般的であろう。従って、運転/停止による熱サイクルの触媒や反応器材料等への影響は家庭用、業務用の方が系統連係等が不可能な自動車用比べて大幅に緩和され、燃料電池も含めた設備全体のコストについても、そう遠くない将来、一般の人の手の届く範囲になることが期待される。

多少編集者の意にそぐわない面もあったかも知れないが、「化石燃料からの水素」が果たすべきこれからの新しい役割と展望についてふれたつもりである。どの化石燃料も、出番の順序は違うにしても、それなりの役割を果たす事になると思う。各論に於いて、ターゲットである「水素製造」へのそれぞれの最も理想的でありかつ現実的な道が示される事を期待する。