

# 水素エネルギー



水素燃料ロケットの発射

光和商事(株) 荒木 巍

H17.9.16

# 水素の性質

元素: 元素記号はH、分子はH<sub>2</sub>、宇宙でもっとも豊富にある元素

物性: 地球上で最も軽い気体、密度0.0899kg/m<sup>3</sup>、対空気比重1/14.5

無色・無臭、常温・常圧で気体H<sub>2</sub>の形態をとる

燃焼: 燃え易い、燃焼温度は3000°C、炎は無色、発火点は570°C（酸素との爆発燃焼による発生温度は4710°C）

爆発: 水素と空気の混合気体は下限4.1～上限74.2%の範囲で引火爆発する

液化: 融点14.02K(-259.2°C)、沸点20.27K(-252.6°C)、液体水素比重70.8kg/m<sup>3</sup>(水の1/14)\*

-253°Cで液化すると保有エネルギーの30%が損失となる

\*燃料タンクに詰めるとき体積が大きくなる

発熱量LHV 120MJ/kg(重量あたりで軽油の3.3倍)

## おもな化合物

水	H <sub>2</sub> O	過酸化水素	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	メタン	CH <sub>4</sub>
エタノール	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	DME	CH <sub>3</sub> -O-CH <sub>3</sub>	プロパン	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
ベンゼン	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	アンモニア	NH <sub>3</sub>	弗化水素	HF
シラン	SiH <sub>4</sub>	リン化水素	PH <sub>3</sub>	硫化水素	H <sub>2</sub> S
塩酸	HCl	炭酸	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	硝酸	HNO <sub>3</sub>
硫酸	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>				

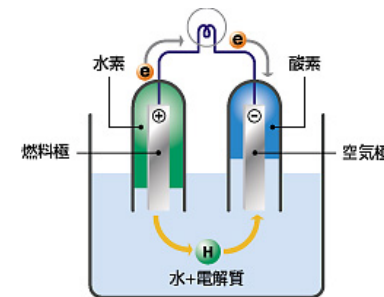


図5-1 水の電気分解と水素の発生

エネルギーの比較

**自動車ーガソリンエンジン**

排気ガス  
化石燃料依存脱却  
騒音・振動  
軽量

水素燃料の各種規制緩和  
寒冷地対策  
2桁のコストダウン  
水素燃料タンクの容積大

**用途**

水素の利点

水素の欠点

**風力・太陽光発電**

安定電力  
設置場所の制約が少ない  
出力密度大  
給熱併用

燃料費  
燃料供給ライン

**水素エネルギー**

**天然ガス**

CO<sub>2</sub>の発生なし

安定供給  
ガスシール  
長期使用停止時の保管

**家庭用電カライン**

電熱バランス上完全自立は困難  
大停電の問題は少ない  
電源の分散化

水素の保安、各種規制  
燃料の定常的供給  
燃料価格

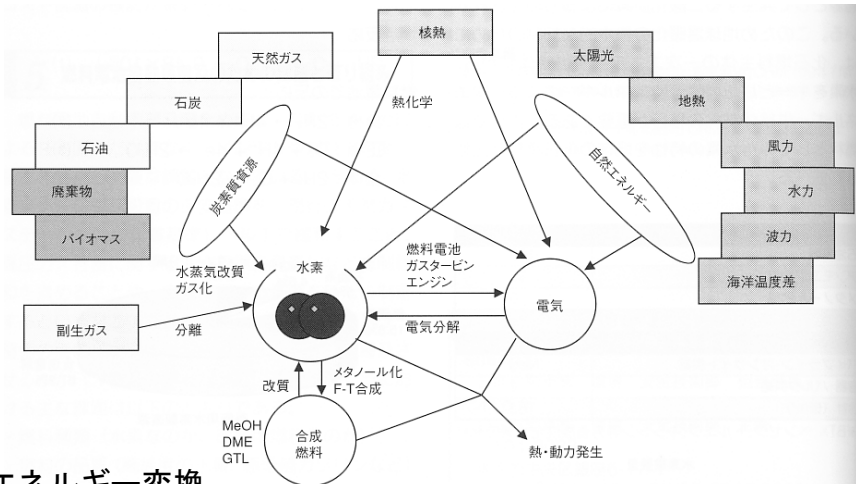


図5-1a 水素エネルギー変換

クリーンエネルギー	水素を燃料として使用するとき生成物として水が発生するがCO <sub>2</sub> は発生せず、クリーンエネルギーといわれる。ただし、生成水は湿気の原因となるので排出方法に工夫を要する。
軽量	水素は発熱量当たりの重量が石油系の1/3と軽いので移動体燃料としての利点を持っている。ただし、発熱量当たりの容積が4倍となるので、タンクの容積は大きくなる。
極低温	大気圧中-253℃以下で造られる液体水素は極低温科学で不可欠の物質。超電導、低温断熱、他の低温物質の製造、実験環境などに利用される。
炭化水素	水素は炭素と種々の形で結合して化学物質を作る。メタン系、エタン系、ベンゼン系など多くの石油化学の原料となり、また石油・天然ガスの主要素となっている。
浸透性	水素原子はもっとも単純な構成で浸透性が高い。メタンなどがシールできても、水素は隙間からリークして引火したり、金属の結晶に入り込んで金属脆化を生じさせる。

### 水素の燃焼特性

- |                            |                                      |
|----------------------------|--------------------------------------|
| 1. 燃焼速度が速い(メタンの10倍)        | 6. 輻射強度が小さい(炎は無色)                    |
| 2. 予混合した場合は可燃範囲が広い         | 7. 理論燃焼空気量が少ない(メタンの1/4)              |
| 3. 最小着火エネルギーが小さい(メタンの1/15) | 8. 触媒燃焼温度が低い(常温域まで可)                 |
| 4. 消炎距離が短い(メタンの1/4)        | 9. クリーンである(燃焼生成物はH <sub>2</sub> Oだけ) |
| 5. 火炎温度が高い(メタンより+170℃)     | 10. 拡散し易い、漏れ易い(拡散速度はメタンの3倍)          |



## 歴史的経緯

- 1777 水素を発見ーキャベンディッシュ(英)
- 1781 酸素と水素の爆発で水を合成するーキャベンディッシュ(英)
- 1783 水の熱分解で水素を分離、水が酸素と水素の化合物であることを確認ーラボアジェ(仏)
- 1783 水素ガスを詰めた気球が始めて空を飛ぶ
- 1896 水素の液化に成功ーデュワー(英)
- 1936 飛行船ヒンデンブルグ号就航ー1937年同船は爆発事故
- 1974 工技院の研究スタート、水素吸蔵合金を用いた水素の貯蔵、輸送技術の研究
- 1974 水素燃料自動車 武蔵工大武蔵1号車(日産2tトラックベース) 東京環状8号線走行
- 1993 WE-NETがスタート
- 1994 H-Ⅱロケット初打ち上げ成功(第2段エンジンが液体水素燃料)
- 2001 H-ⅡAロケット初打ち上げ成功(第1段エンジンが液体水素燃料)
- 2001 固体高分子形燃料電池/水素エネルギー利用技術開発戦略とりまとめ(日本政府)
- 2002 水素エネルギーロードマップ(アメリカ政府)
- 2003 大統領一般教書演説にて水素に関する新たなプログラムを発表(アメリカ政府)
- 2003 水素経済のための国際パートナーシップ閣僚級会合(日・米ほか13カ国)
- 2005 (8月24日)日本水素エネルギー産業会議発足(会長:平田賢芝浦工大学長)



図5-1b 武蔵工大武蔵2号車(1975年)

工業的利用

アンモニア製造、水素添加による油脂の製造、メタノール生成  
水素脱硫、塩酸の製造  
金属鉱石の還元

燃料

ロケット、燃料電池、水素エンジン自動車

極低温

超電導現象など低温学の調査

水素爆弾

原子炉内で三重水素を生成し、水爆、熱核爆弾の製造に使用

浮揚用ガス

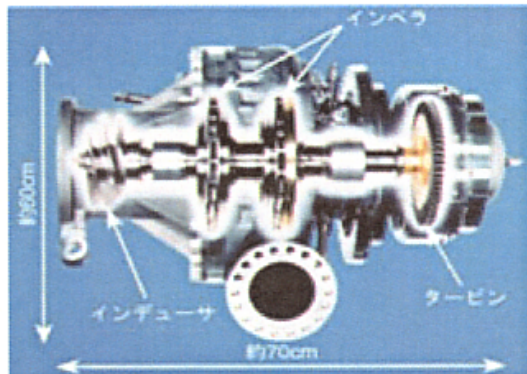
気球、飛行船—対空気比重1/14.5を利用

生体科学

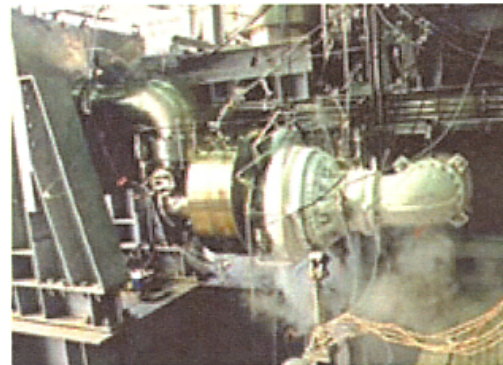
重水素、三重水素を生体科学の同位体として利用

都市ガス

アメリカでは1800年代初期から都市ガスとして、水素52%、メタン31%、石炭ガス7%の混合ガスが供給されてきた。飛行船ヒンデンブルグ号の事故で中止（但し、同事故は外面塗料が燃えたもの）



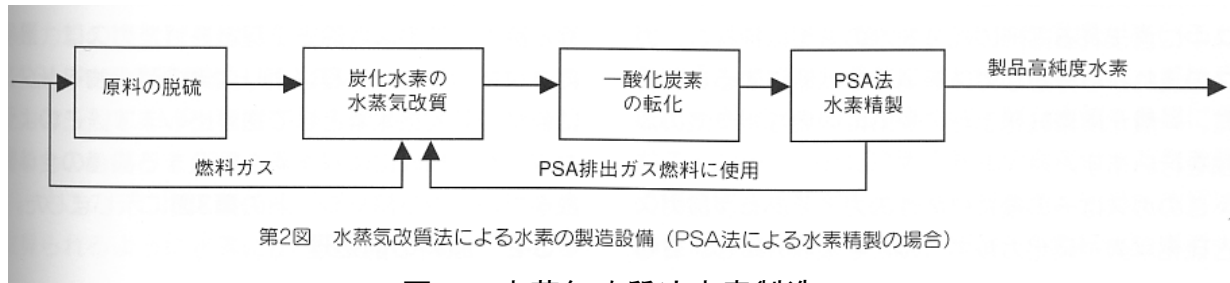
LE-7A液体水素ターボポンプ



試験前の液体水素ターボポンプ

図5-2 宇宙ロケット用水素燃料ポンプ

生産・貯蔵・輸送



第2図 水蒸気改質法による水素の製造設備 (PSA法による水素精製の場合)

生産: 炭化水素の水蒸気改質および部分酸化(メタンなど)

水の電気分解、固体高分子膜に高圧水+通電

(将来)再生可能エネルギーによる高効率電気分解

核熱を利用した熱化学サイクルによる水分解(高温ガス炉)

光触媒による直接水分解、廃棄物・バイオマスの改質

貯蔵: 圧縮水素、液化水素、メタノール等化学製品

水素吸蔵合金(MH)、カーボンナノチューブ、

水素化物

輸送: 小規模パイプライン(ガス)

液体水素タンクローリー、

液体水素タンカー(WE-NET)

図5-3 水蒸気改質法水素製造のフロー

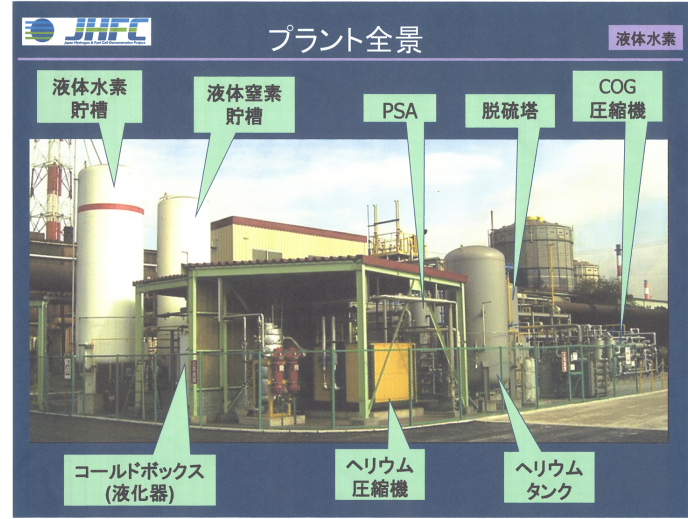
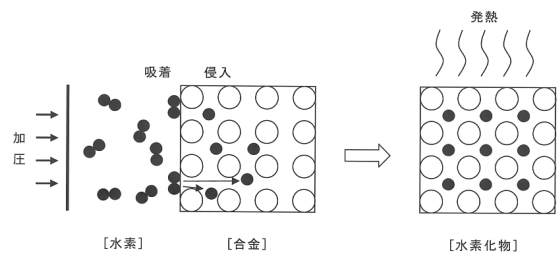


図5-4 液体水素製造プラント⑤

図 1.1.2-1 水素の吸着、侵入、水素化物形成過程の模式図



(独)工業所有権情報・研修館

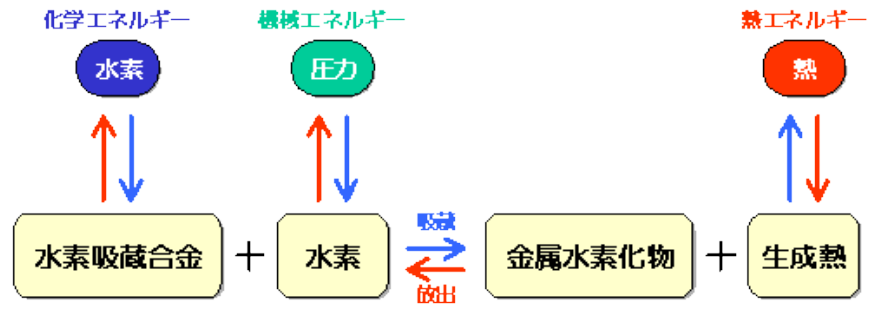


図5-5 水素吸蔵合金の原理

## 関連企業

製造、貯蔵、輸送、利用、その他で多くの業界・企業が開発に取り組んでいる。

製造・輸送

イワタニ産業、IHI(タンカー)

貯蔵

新日本製鐵(MH)、大阪ガス(カーボンナノチューブ)

水素ステーション

日本酸素(高松)、出光興産(秦野)、東京ガス、三菱化工機、東邦ガス(愛知万博) ほか

同デスペンサー

トキコ、日本酸素

水素センター

凸版印刷

1000気圧昇圧設備

神戸製鋼所(充填用)

水素利用FCカー

トヨタ、ホンダ

日本水素エネルギー  
産業会議参画

東京ガス、JFE、明電舎、西濃運輸、三菱商事、  
青森県、豪州大使館

業界	参入分野
石油業界	石油系燃料からの水素生産、ガソリンスタンドの活用
都市ガス業界	天然ガス利用水素生産
産業ガス業界	プロパン利用水素生産、水素の流通
電力業界	オフピーク電力利用水素生産
鉄鋼業界	副生水素の卸売り
ソーダ業界	副生水素の卸売り
その他の産業	遊休土地利用水素生産、水素の流通
商社	資金援助、資本参加、水素の流通、水素輸入

図5-8 水素エネルギービジネスの出現



図5-6 水素ステーション(昭和シェル石油)



図5-7 水素ディスペンサー(JHFC)



# 水素自動車

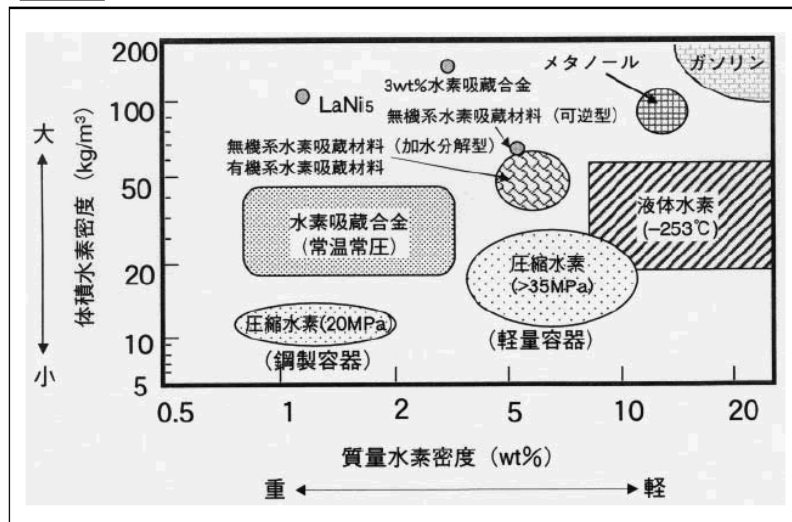
水素自動車:水素燃焼内燃機関方式と水素燃料電池方式が開発中  
水素ステーションの普及がFCカー普及の絶対条件。燃料は高圧水素が主流

水素生産の効率(~58%)を勘案すると現時点ではFCのメリットはない。“脱石油”が狙い

普及のために解決すべき技術課題—システム効率の向上、コストの低減、水素貯蔵技術、小型化、安全性、信頼性、サービス性、リサイクル性の向上

普及のために必要な法整備、規制緩和—水素供給ステーション建設、FC車への水素燃料充填、水素高圧ガス容器、車両搭載タンクの再検査、燃料装置の車両適合、燃料ステーションの併設

図表2 各種水素貯蔵技術の質量水素密度と体積水素密度の比較



- ガソリン、メタノールはエネルギー密度で換算
- 質量水素密度、体積水素密度はいずれも容器を含む

出典：文献<sup>18)</sup>

図表3 自動車用高圧ガスタンクの例



(a)乗用車のトランクスペースに収納された350気圧高圧水素タンク



(b)天然ガス用FRP容器

図5-10 水素貯蔵容器

図5-9 各種水素貯蔵技術の比較



(燃料電池実用化推進協議会)

経済産業省の水素需要予測(WE-NET/H12年)

2010年度 73.0億Nm<sup>3</sup>/年  
 2020年度 386.7 億Nm<sup>3</sup>/年

- ②水素パイプ
- ④エネコがー運営者
- ③坂本水素配管システム
- ⑤水素ロケット
- ①水素管仁徳
- ⑥水素配管区
- ⑦水素配管区
- ⑧水素配管区
- ⑨水素配管区
- ⑩水素配管区
- ⑪水素配管区
- ⑫水素配管区
- ⑬水素配管区
- ⑭水素配管区
- ⑮水素配管区
- ⑯水素配管区

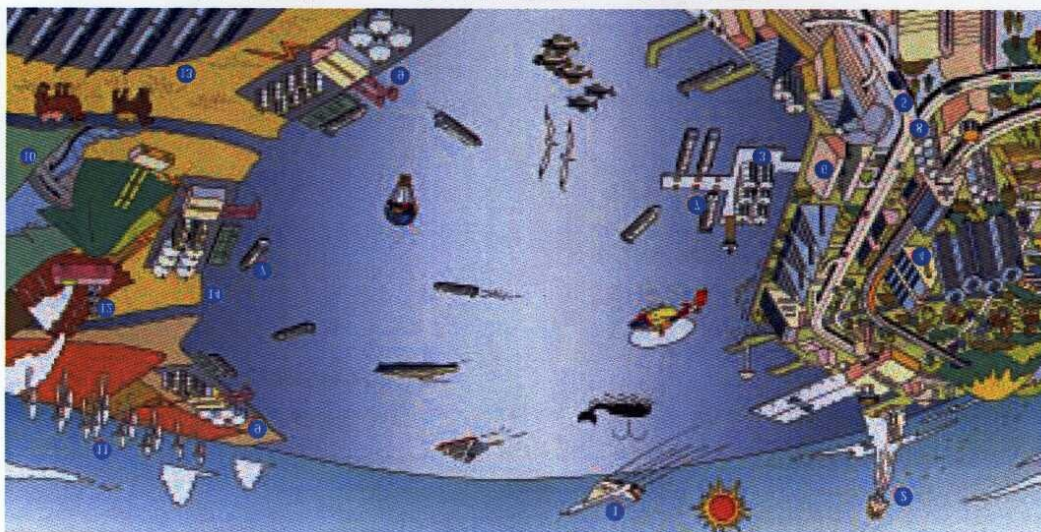


図5-11 WE-NET計画の水素社会 (イメージ) (NEDO)

表5-1 水素ステーションでの水素コスト  
 天然ガスの位置付けまとめ(普及期)

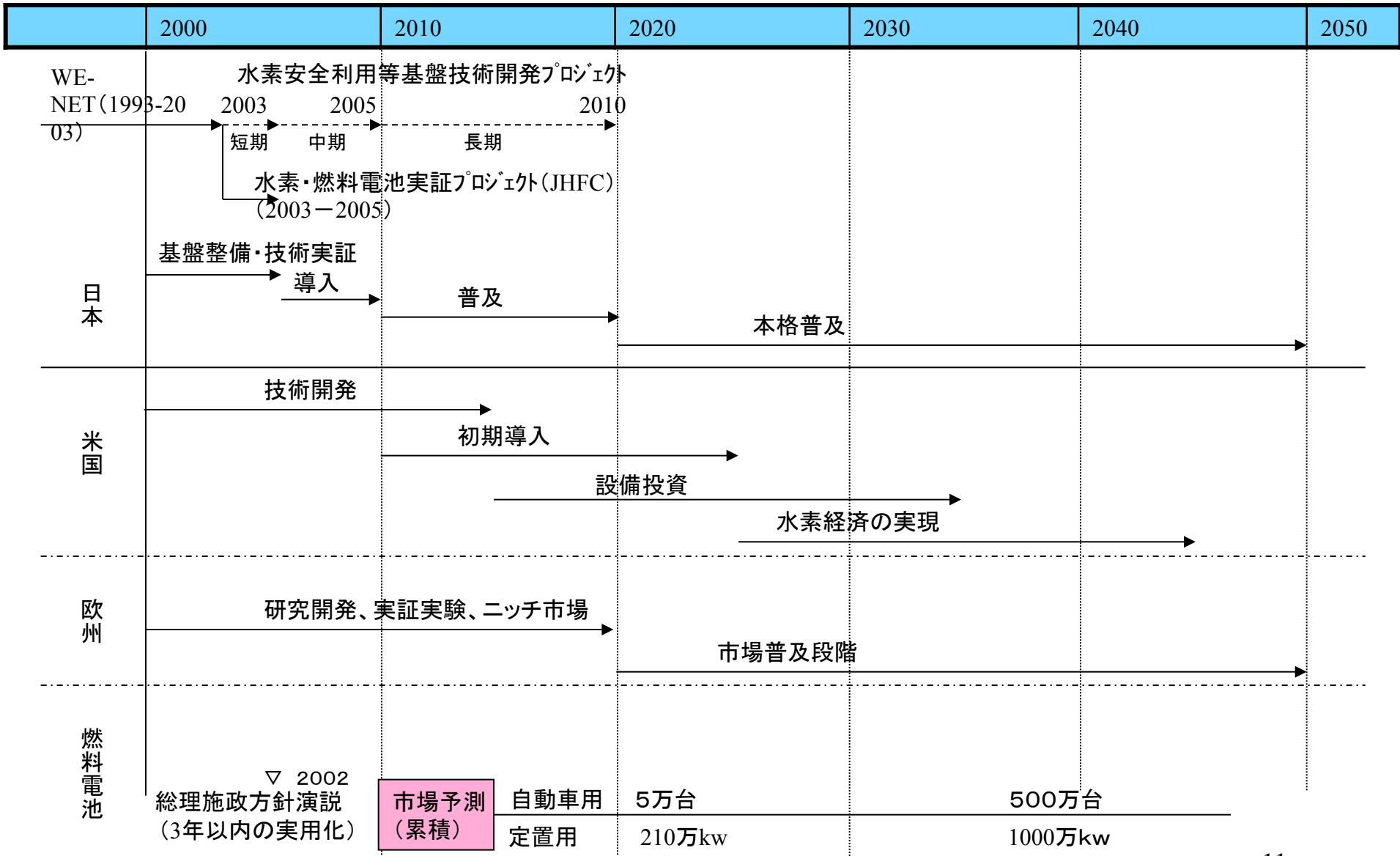
(カッコ内は運営主体)

貯蔵式	東京・江東	液体水素(昭和シェル石油、岩谷産業)
	横浜市	高圧水素(鶴見曹達)
改質式	東京・荒川	液化石油ガス(東京ガス、日本酸素)
	横浜市	脱硫ガソリン(コスモ石油)
	横浜市	ナフサ(新日本石油)
	川崎市	メタノール(ジャパン・エア・ガシズ)
	神奈川県秦野市	灯油(出光興産)
移動式	東京・千代田	高圧水素(日本酸素)
	神奈川県相模原市	アルカリ水電解(栗田工業など)
	東京都青梅市	都市ガス改質(パブコック日立)

	天然ガス 改質	ガソリン 改質	ナフサ 改質	アルカリ 水電解	副生水素
エネルギー効率(%:LHV)	59	54	58	23	—
水素供給コスト(円/Nm <sup>3</sup> )	65.4	—	68.9	115.4	80
CO <sub>2</sub> 排出性(kg-CO <sub>2</sub> /kJ)	37	56	48	139	—
資源偏在性	○	×	×	△	○
供給制約性	○	△	△	△	×

図5-12 経済産業省が首都圏で整備中の水素ステーション

# 国家プロジェクト





# 課題

コスト	経済性が最も高いと考えられるナフサ水蒸気改質による水素製造コストは水素ステーションにおいて現在110~120円/Nm <sup>3</sup> 、普及時目標70円/Nm <sup>3</sup> で現行ガソリンに対して1.5~2.5倍
運搬	各方式で一長一短がある。高圧タンク;比較的小容量、圧縮エネルギーを消費。液化タンカー;大容量、液化エネルギーロス、ボイルオフロス。液化ローリー;近距離、ほぼ実用化段階。パイプライン;リーク対策が必要
貯蔵技術(自動車用)	水素吸蔵合金—重量当たりの吸蔵量小、高圧ガス容器—貯蔵量小(35MPaで300km分、目標は70MPa)、液体水素タンク—ボイルオフガスの発生、水素化物—再充填が困難
水素脆化	水素分子は分子あるいは原子の状態で金属の格子内に容易に進入する。このため、鉄などを水素に長期間触れさせておくと材料の強度を劣化する
水素インフラ	自動車用、家庭用などでPEFCが普及するためには、燃料としての水素の供給に支障をきたさないよう、水素の製造、貯蔵、輸送、安全確保など価格を含めた環境整備が必要
ソフトインフラ	水素燃料供給運用のため、高圧ガス保安法、消防法、道路運送車両法など安全基準、規制整備が急務。また最適運転制御方式の開発も課題
安全性・信頼性	FCはこれから普及するものであり、安全性、信頼性、運用方式などの基準・標準が未整備。現在進行中。パッケージ強制換気、水素漏れ検知、地震緊急停止システム、保安距離確保、ステーション内火気禁止、静電防止アース、雷雨時の充填作業禁止、作業員の教育 など

## Well to Wheel CO<sub>2</sub>排出量

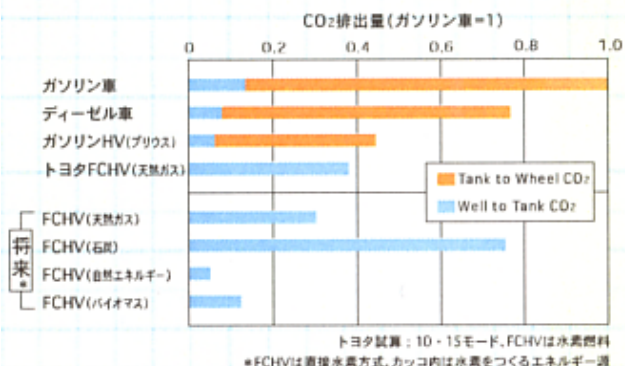


表3.4 トヨタ自動車による総合効率率(Well-to-Wheel)の計算

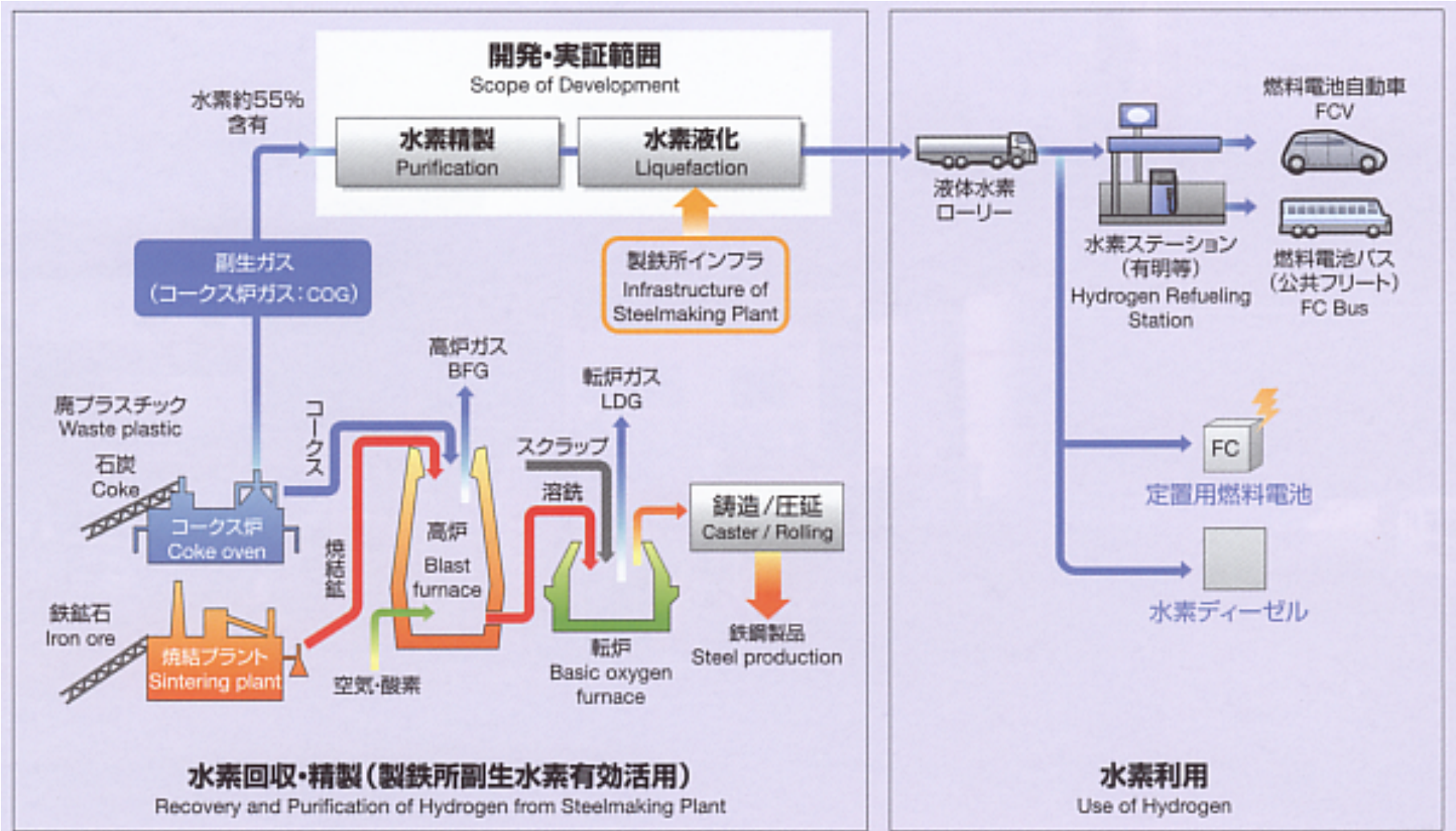
自動車の種類	燃料効率(%)	総合効率率(%)	総合効率率(%)
	Well to Tank	Tank to Wheel	Well to Wheel
現状のガソリンICEガソリン	88	16	14
ICE・蓄電池ハイブリッド	88	30	26
高圧水素ガス燃料電池自動車	58	38	22
高圧水素ガスFCハイブリッド	58	50	29
高圧水素ガスFCハイブリッド (将来の目標)	68	60	41

図5-12b 水素自動車と他燃料車との比較(Well-to-Wheel)



## キーワード

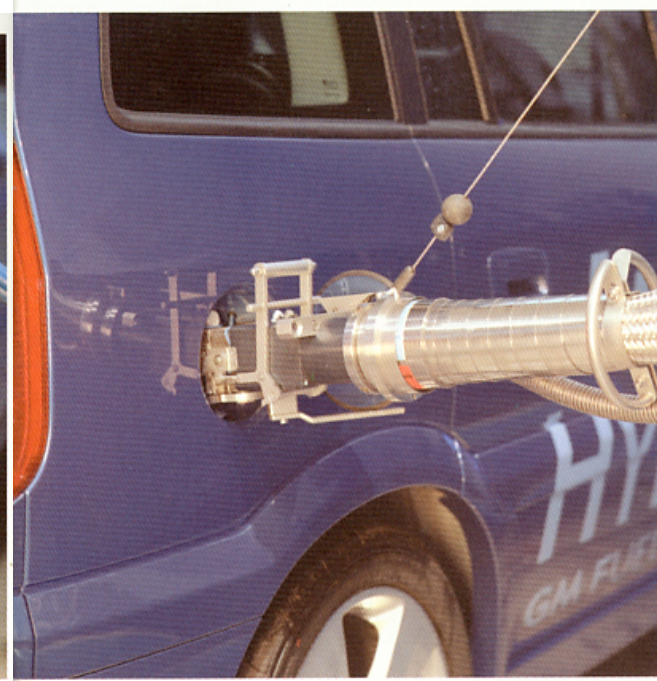
発熱量	燃料が燃焼して発生する熱量。水素は石油系に比べてkg当たりの発熱量は大きいですが、比重が小さいのでリッター当たりの発熱量は小さい
WE-NET	通商産業省主導。世界各地の再生可能エネルギー利用により、水の電気分解で水素を得てエネルギー消費地に輸送、中核的な要素技術を開発し、総合的なシステム設計を実施。要素技術、水素製造、大量輸送、貯蔵、材料、燃焼、利用技術ほか
水素ステーション	燃料電池自動車に水素燃料を供給するための施設。各種燃料をその場で改質して水素を作り貯蔵、供給するステーションと、外部から輸送した水素をその場で貯蔵し、供給するものがある
水素吸蔵合金 (MH)	MHは室温付近の温度条件で数気圧の水素の圧力操作を行うことによって可逆的に水素を吸蔵させたり放出させることが可能であり、その反応速度は速い。水素を吸収して水素化物となったMHは適度な加熱を行うことにより水素を分離放出する
重水素、 三重水素	水素の安定同位体。重水素Deuteriumの原子核は陽子1つと中性子1つから構成。元素記号は ${}^2\text{H}$ 、略号はD。地球上ではH1にたいして ${}^2\text{H}$ は0.00016の割合で存在し、化学・生物学で同位体効果の研究に使用。三重水素Tritiumは陽子1、中性子2、記号は ${}^3\text{H}$ とT。水素爆弾の製造に使用



参考図5-1 高圧水素貯蔵(新日本製鉄実証設備)



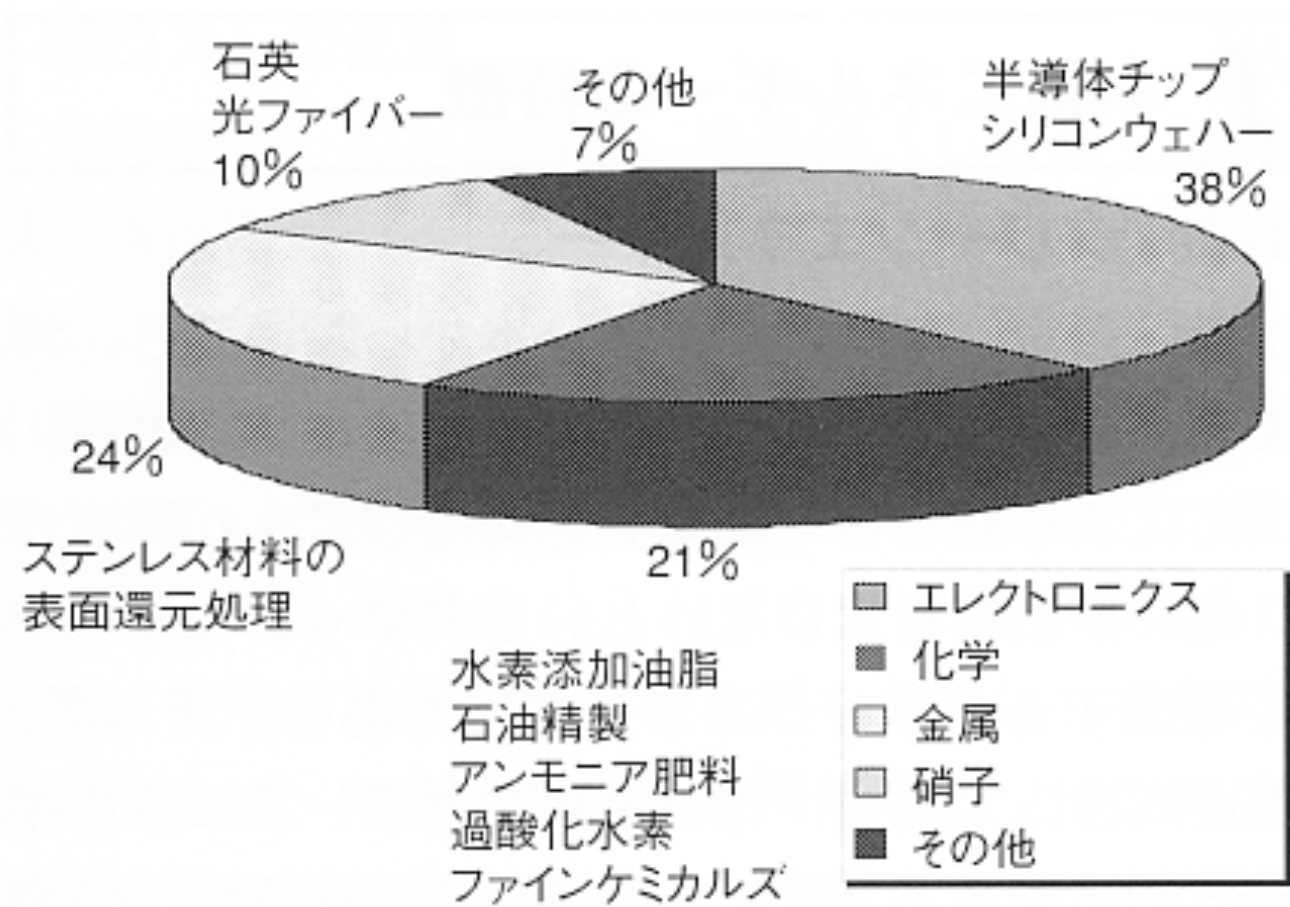
The Ford Focus Fuel Cell Vehicle's tank contains 350 bar compressed hydrogen and is being filled at the station in Berlin. The Ford, when filled with four kg hydrogen, offers a range of more than 300 kilometres.



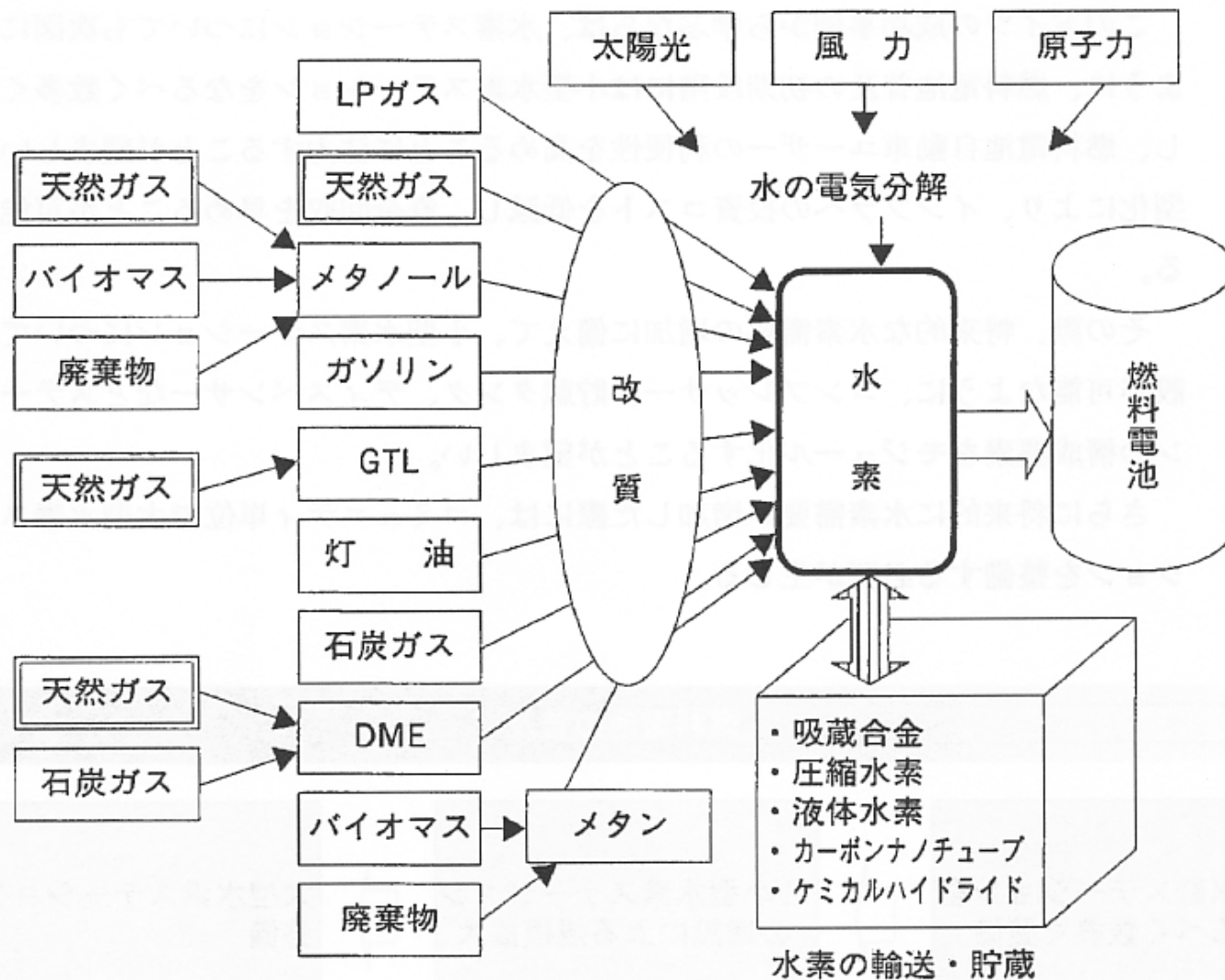
In terms of hydrogen storage, GM/Opel has developed two versions of the HydroGen3, one for gaseous and one for liquid hydrogen. In Berlin, the "HydroGen3 liquid" is being refuelled. It can cover some 400 kilometres with 4.6 kg of super-cooled liquid hydrogen in its tank.



参考図5-2 水素燃料自動車の燃料補給と水素タンクローリー



参考図5-3 外販用水素ガスの用途

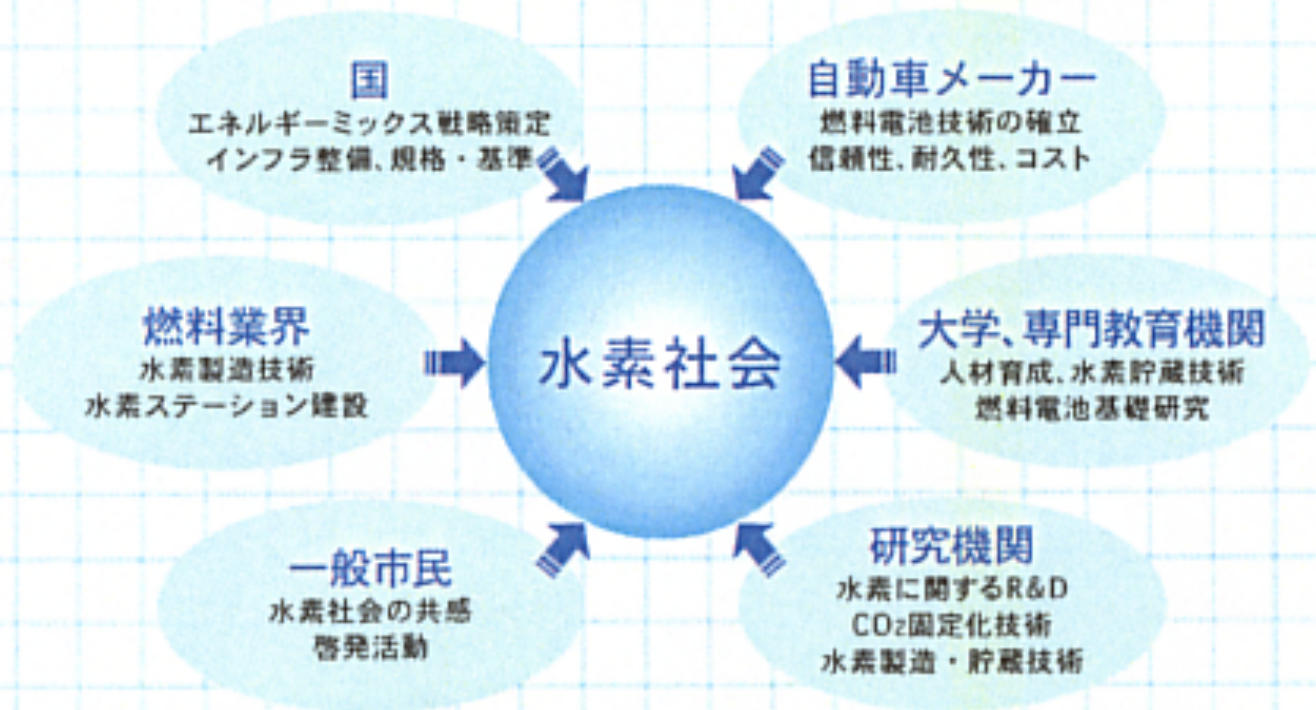


出所：柏木孝夫、橋本尚人、金谷年展『マイクロパワー革命』  
 (TBSブリタニカ 平成13年6月)

参考図5-4 水素エネルギーの燃料選択



## ■水素社会へのスムーズな移行



参考図5-5 水素社会への課題（トヨタ）

## 参考資料

1. 燃料電池2005 日経BP社 2005.1.1
2. 燃料電池に関する政府の取り組み 2004.3.12 資源エネルギー庁
3. 水素エネルギー最前線 文部科学省科学技術動向センター 2003.7.25 工業調査会
4. 水素社会に向けたビジネスシナリオ 2004年7月 知的資産創造
5. 最新の水素技術 日本工業出版 2003.6.30
6. (社)日本ガス協会フォーラム資料「燃料電池と水素を考える」 2005.4.27
7. 日本ガス協会 HP－燃料電池
8. 各HP － JHFC、JAXA、イワタニ、トヨタ、日本酸素、NEDO

