

# 目 次

はじめに .....	1
<b>第 1 章 水素とはなにか .....</b>	<b>3</b>
1-1 水素とは .....	3
1-2 水素エネルギーを導入する意義 .....	6
<b>第 2 章 水素エネルギーに関連する日本の政策と取り組み .....</b>	<b>11</b>
2-1 水素エネルギーに関する日本の政策 .....	11
2-2 我が国の水素エネルギーに関する取り組み .....	17
<b>第 3 章 水素エネルギーに関連する各国の取り組み .....</b>	<b>55</b>
3-1 主要国の取り組み .....	55
3-2 国際協調の取り組み .....	66
3-3 水素エネルギーに係る国際会議 .....	71
<b>第 4 章 水素エネルギーの市場の現状と展望 .....</b>	<b>75</b>
4-1 水素市場の展望 .....	75
4-2 定置用燃料電池 .....	76
4-3 燃料電池自動車 .....	81
4-4 水素供給インフラ .....	83
4-5 水素ステーション .....	87
<b>第 5 章 水素エネルギーの社会受容性 .....</b>	<b>89</b>
5-1 水素の性質 .....	89
5-2 水素の安全利用のための規制 .....	90
5-3 水素に関する安全対策の現状 .....	93
5-4 水素の社会受容性 .....	97

<b>第6章 水素エネルギー技術</b> .....	101
6-1 水素エネルギー技術の全体像 .....	101
6-2 水素製造技術 .....	102
6-3 水素輸送・貯蔵技術 .....	118
6-4 水素供給技術 .....	138
6-5 水素利用技術 .....	142
<b>第7章 水素社会実現を目指して</b> .....	171
7-1 水素社会実現に向けた課題 .....	171
7-2 課題克服に向けた取り組み .....	174
7-3 まとめ .....	178
<b>用語集</b> .....	181
<b>参考資料</b> .....	191

■本書に記載されている会社名、ブランド名、製品名等は、各社の商標あるいは登録商標です。なお、®、©、TM は割愛しています。

■本書の情報の使用から生じたいかなる損害についても、小社および本書の編者は責任を負わないものとしします。

# 水素エネルギー技術

水素エネルギー技術は製造段階から利用段階まで多岐にわたる。本章では、水素エネルギー技術を俯瞰するとともに、その現状と課題、将来の見通しを解説する。

## 6-1 水素エネルギー技術の全体像

水素エネルギー技術は、水素製造技術、水素貯蔵・輸送技術、水素供給・利用技術に大別される（表 6-1）。

表 6-1 水素エネルギー技術の概要

水素製造	水素貯蔵・輸送	水素供給・利用
<p>水素を他のエネルギーから製造する過程である。ここには水素を純化する水素精製プロセスも含まれる。</p> <p>水素を国内で製造するとともに、長期的には水素を海外で製造し、CO<sub>2</sub>フリー化して輸入することも計画されている。</p>	<p>水素を製造地から需要地に輸送し、利用のために一定時間の貯蔵するための技術が必要である。</p> <p>現状では圧縮水素、液化水素にて供給されている。燃料電池自動車では水素の車載のため圧縮水素が用いられている。</p> <p>海外で製造された水素を輸入する場合には、有機ハイドライドや液化水素などの技術の適用が検討されている。</p>	<p>水素をエネルギーとして最終的に利用する。</p> <p>燃料電池自動車をはじめ、定置用燃料電池（純水素型）や燃料電池フォークリフトなどの用途がある。</p> <p>水素をこれらの最終用途に供給する技術（水素ステーションなど）も重要な要素である。</p> <p>将来においては、大量の水素を需要し、水素の低コスト化を促す利用技術として、水素発電も期待されている。</p>



図 6-1 水素の製造・貯蔵・利用に係る将来イメージ

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「水素・燃料電池について」  
第1回水素・燃料電池戦略協議会（2013年12月19日）【参考資料 [3]】

図6-1に水素の製造・貯蔵・利用に係る将来イメージを示す。短期的には天然ガスやナフサなどの化石燃料の改質や副生水素を用いることになるが、将来的には海外から大規模に水素を調達することで、低コスト化と供給量拡大を進め、本格的な水素社会を実現することが想定されている。

海外で水素を製造する場合は、まずは副生水素などの未利用エネルギーからはじまり、将来的には、化石燃料の改質で製造した後で二酸化炭素の回収・貯蔵（CCS）を適用し、事実上CO<sub>2</sub>フリー化することが考えられているほか、再生可能エネルギーが豊富な国や地域で水素を製造し、これをエネルギーとして最終利用することで、我が国の低炭素化に貢献することが期待されている。

水素の輸送・貯蔵では、有機ハイドライドや液化水素といった技術が適用され、国内輸送・貯蔵ではさらに、パイプラインや圧縮水素などの技術も利用されることになる。

水素の利用では、燃料電池自動車に加え、定置用燃料電池の普及も拡大し、さらに水素発電の本格化によって、水素の利活用が拡大していくことが想定される。

## 6-2 水素製造技術

水素は多様なエネルギーや資源から製造することが可能である（表6-2）。それぞれの水素製造技術は、安定性や環境性、経済性などの面でメリットとデメリットがあり、技術の実用化段階も勘案し、水素実用化のフェーズにあった展開を考える必要がある。

現在は化石燃料（天然ガス、ナフサ）の改質によって工業的に製造されているほか、製鉄所やソーダ工業からの副生水素が供給源になる。

表 6-2 水素製造技術のまとめ

	実用化段階	安定性	環境性 (CO <sub>2</sub> 排出)	経済性
副生水素	種類によるが既に導入されているものが多い。	本来の目的となる製品の生産量に左右される。	CO <sub>2</sub> は排出されるが追加的な環境負荷は無い。	福次的に生産されるものを活用するため経済的。
化石燃料改質	既に導入されており実用化段階。	安定的かつ大規模に生産が可能。	CCS 等を用いない限り、CO <sub>2</sub> が排出される。	技術的に確立しており、比較的安価に製造が可能。
水電解 (火力)	既に導入されており実用化段階。	安定的かつ大規模に生産が可能。	CCS 等を用いない限り、発電時に CO <sub>2</sub> が排出される。	改質に比べると高コストだが比較的安価。
水電解 (再エネ)	技術的には確立。再エネ発電の低コスト化が課題。	再エネの種類によっては出力変動が存在。	CO <sub>2</sub> は排出されない。	再エネ電力を活用するため一般的に高い。
バイオマス	技術的には確立しているが低コスト化が課題。	供給地が分散している。	CO <sub>2</sub> 排出量はゼロとみなすことができる。	現段階ではコストは高い。
熱分解	研究開発段階（一部実証も実施）。	安定的な供給が可能。	利用する熱を何から取るかによって異なる。	N.A
光触媒	基礎研究段階（現在の交換効率は 0.5% 程度）。	気象条件に左右される。	CO <sub>2</sub> は排出されない。	N.A

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「水素・燃料電池について」  
第 1 回水素・燃料電池戦略協議会（2013 年 12 月 19 日）【参考資料 [3]】

将来的には、火力や再生可能エネルギーからの電力を用いて製造されることが期待されるほか、長期的に実現が期待されるバイオマスガス化、水熱分解、光触媒などの低炭素水素製造技術が研究開発されている。

以下、それぞれの水素製造技術について解説する。

## 6-2-1 副生水素

### (1) 原理と特徴

副生水素は、多様な工業プロセスから副産物として生産される水素のことである。我が国では主に、(a) ソーダ産業から副生される水素、(b) 製鉄所からの副生水素がある。

ソーダ電解からの副生水素の量は、苛性ソーダの生産量に依存するが、現状で9万トン(10億Nm<sup>3</sup>)程度の水素が副生している。この水素は純度が高く、すでに外販されて水素として利用されている。

製鉄所からの副生水素は、コークス製造する過程で生産されるガスでコークスオーブンガス(COG)と呼ばれる。現状でCOGは、鋼材の焼鈍用や熱源、発電燃料など製鉄所内で利用されており、水素を外販する場合には代替燃料を確保する必要がある。

工場内における水素製造は、石油精製時の脱硫やクラッキング(重質油の軽質化)のために製造する目的生産水素がある。製油所における必要量に応じて、ブタンやナフサから水蒸気改質によって製造されており、現状では外販されていないが、製造施設の容量は余剰があると言われている。

## (2) 課題

ソーダ電解からの副生水素は純度が高いが、製鉄所からの副生水素と石油精製プロセスからの目的生産水素は純度が低いため、圧力変動吸着法(PSA: Pressure Swing Adsorption)を用いる必要がある。これは各物質の吸着剤(ゼオライトなど)に対する吸着力が異なる性質を利用し、高圧下ですべてを吸着させ、減圧とともに脱離してくる物質を分離していく技術であり、これにより水素では99.999%程度の純度を確保できる。

さらに副生水素を直接外販する場合には、出荷施設(圧縮機と出荷前の貯蔵設備)が必要となる。

また、将来的には水素製造の低炭素化が求められる。ソーダ電解自体はCO<sub>2</sub>を発生しないものの、製鉄所や製油所での水素製造プロセスではCO<sub>2</sub>を発生させるため、大規模プラントの利点を生かした炭素隔離の検討も必要になる。

## (3) 実用事例

ソーダ電解からの副生水素については、岩谷産業がこれを用いて液化水素や圧縮水素を製造している(図6-2)。

また、北九州水素タウンでは、新日本製鐵八幡製鐵所で発生する副生水素を、パイプラインで水素ステーションや付近の公共施設や集合住宅に供給して利用する実証実験が行われている(図6-3)。

過去のJHFCプロジェクト(JHFC-1、JHFC-2)では横浜・鶴見水素ステーションが鶴見曹達のソーダ電解工場からの副生水素を利用していた。また2005年の日本国際博覧会(愛・地球博)において運用された瀬戸北水素ステーション(2005年3月~9月)は、新日本製鐵名古屋製鐵所からのCOG由来水素を利用していた。

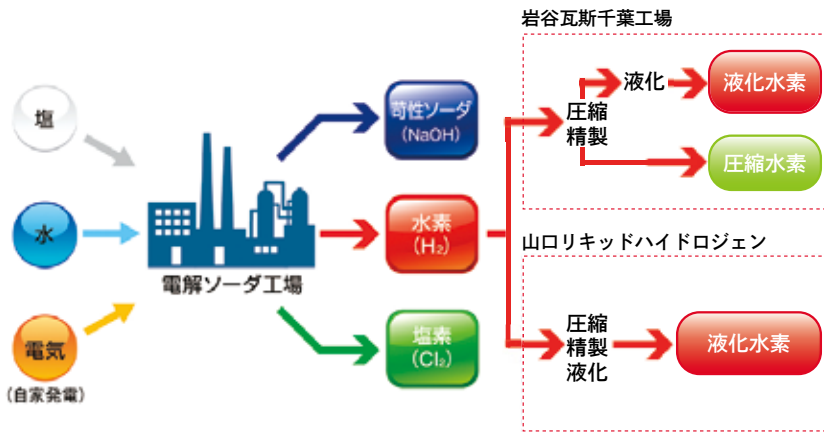


図 6-2 ソーダ電解からの副生水素：岩谷瓦斯千葉工場と山口リキッドハイドロジェン

出典：岩谷産業「水素エネルギーハンドブック 第3版」

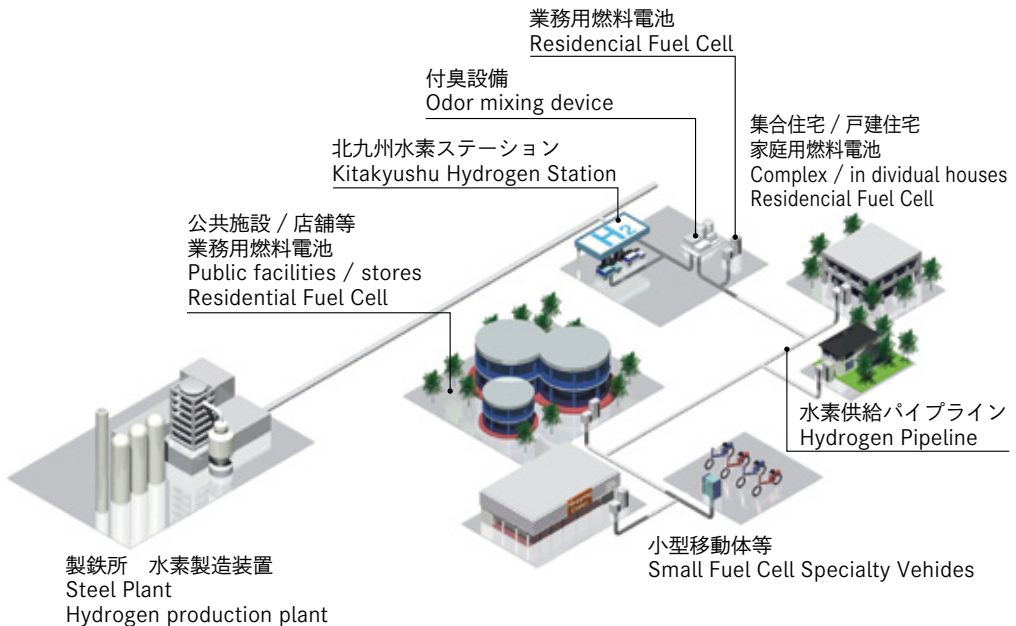


図 6-3 製鉄所からの副生水素：北九州水素タウン

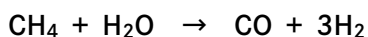
出典：水素供給・利用技術研究組合資料より NEDO 作成



## 6-2-2 化石燃料改質

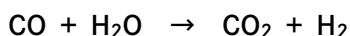
### (1) 原理と特徴

現状では水素の大部分は、天然ガスやナフサなどの化石燃料を改質して製造されている。改質には水蒸気改質法や、部分酸化改質法、その両方をミックスしたオートサーマル改質法があるが、現在主流なのは水蒸気改質法であり、特に天然ガス（メタン）を原料に用いるものを水蒸気メタン改質（SMR：Steam Methane Reforming）と呼ぶ。SMRの改質反応は以下の通りである。



改質反応は吸熱反応であるため、800℃程度の温度が必要である。通常は原料の一部をバーナーで燃焼して必要な熱量を得ている。また、反応上はメタンと水の比率は1：1であるが、実際には炭素析出を防ぐために1：3の割合にしている。

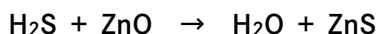
生じたCOに対してはさらに水を反応させ、水素と二酸化炭素を得る。この反応を特にシフト反応という。この反応を行うのがCO変成器である。



製造された水素の純度を高めるために、前述の圧力変動吸着法（PSA）を用いることが多い。

水蒸気改質は、大型プラントでの集中的に水素製造に活用されているほか、都市ガス（メタンが主成分で、熱量調整のためにプロパン、ブタンなどを含む）を原料とするオンサイト水素ステーションにも応用できる（図6-4）。

なお、都市ガスを用いる場合には添加されている硫黄系付臭剤を除去するために、脱硫装置が必要になる。一般的な水素製造プラントでは、水添（水素添加）脱硫方式を使用している。これは、Ni-Mo系やCo-Mo系触媒上で、原燃料中の硫黄化合物を水素と反応させて硫化水素化し、後段に配置した酸化亜鉛（ZnO）にてトラップ（350～400℃）させ、硫黄を除去するものである。



ただし、脱硫後の燃料中にも、一般的には0.1 ppm以下の硫黄成分を含有しており、この残留硫黄成分が改質触媒を被毒して触媒寿命に影響を与えてしまうため、高レベルの脱硫が要求される。

### (2) 課題

水蒸気改質は工業的に確立しており、技術的課題は少ない。

ただし、オンサイト水素ステーションへの適用では、コストのさらなる低減と高効率化、また、水素ステーションの運用に合わせた日間起動停止（DSS：Daily Start and Stop）への対応が求められる。

なお、大型プラントで余剰の水素製造能力があることが指摘されているが、その場合で



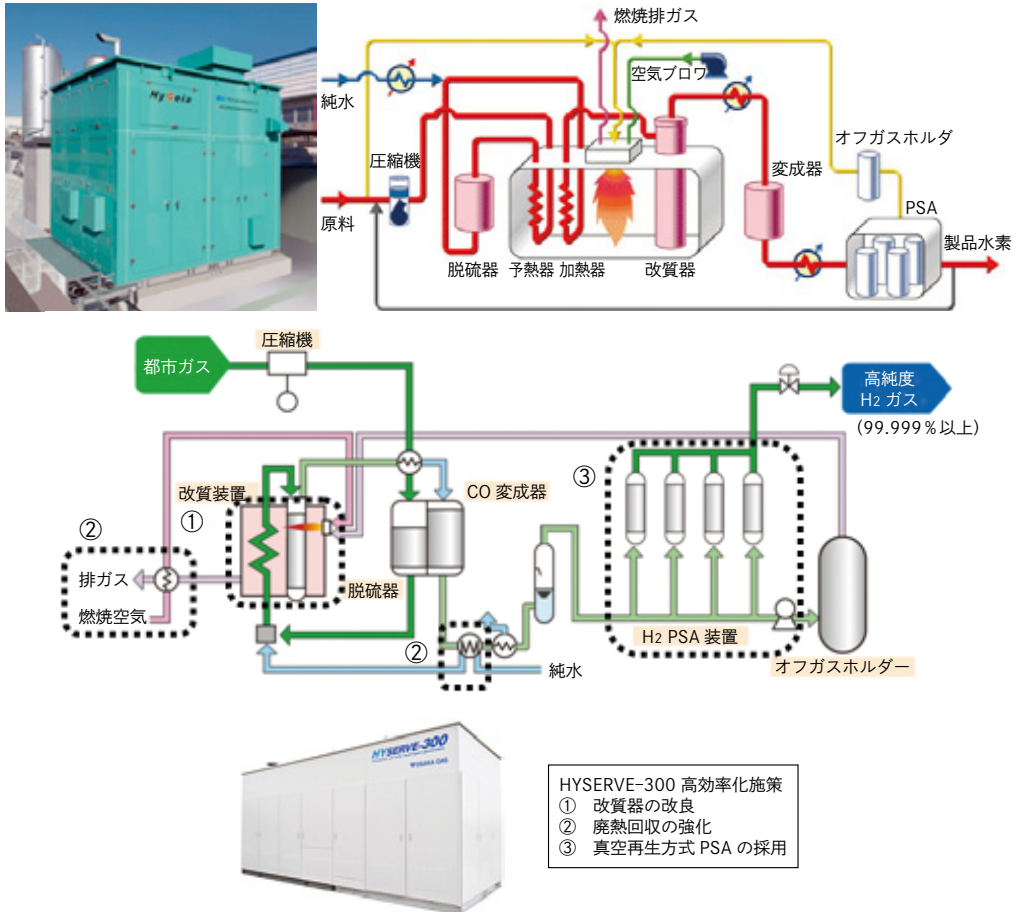


図 6-4 小型水蒸気改質装置の例（上：三菱化工機製 HyGeia 下：大阪ガス製 HYSERVE）

出典：三菱化工機「小型オンサイト水素製造装置 HyGeia（ハイジェイア）」  
 大阪ガス「コンパクトタイプ水素発生装置「HYSERVE」の新製品「HYSERVE-300」の発売について」より NEDO 作成

も、水素ステーション用として純度を高める必要があるほか、出荷のための輸送用トレーラーへの積み込みのための出荷設備（200 気圧級あるいは 400 気圧級の圧縮機と蓄圧器）の設置が必要となる。

将来的には小規模・大規模に関らず、CO<sub>2</sub> の隔離を考えていく必要があり、今後コスト検討が必要である。

### (3) 実用事例

水蒸気改質により、工業規模で水素が製造されている。

JHFC-3 として実証されている水素ステーションのなかでは、大阪水素ステーション（大阪）、千住水素ステーション（東京）、羽田水素ステーション（東京）、セントレア水素ステ

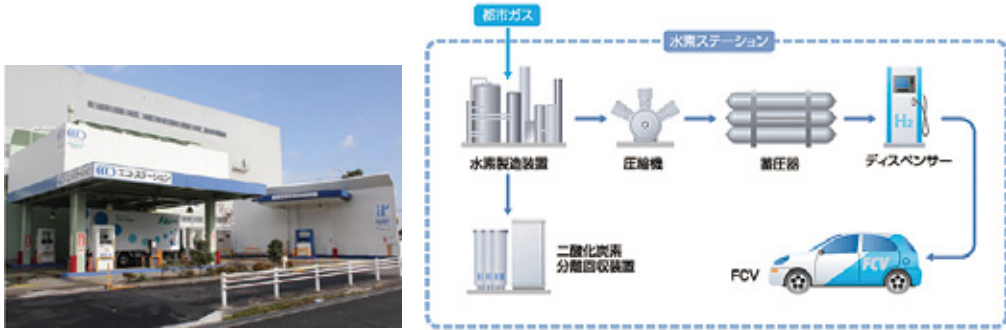


図 6-5 羽田水素ステーション

出典：水素供給・利用技術研究組合ホームページ「羽田水素ステーション」

ーション（愛知）、神の倉水素ステーション（愛知）、とよたエコフルタウン水素ステーション（愛知）が水蒸気改質により水素をオンサイトで製造している。

このうち羽田水素ステーションは、副生される  $\text{CO}_2$  を回収して工業利用しており、 $\text{CO}_2$  低減技術として注目されている（図 6-5）。

### 6-2-3 水電解（水の電気分解）

#### (1) 原理と特徴

水電解（水の電気分解）は、原理としてはよく知られており、実用技術としてはアルカリ水電解法と固体高分子形（PEM 形）水電解法がある。

アルカリ水電解法は、水酸化カリウムの強アルカリ溶液を用いて水電解を行うもので（図 6-6）、大規模水素製造用として工業分野で実績がある（図 6-7）。

固体高分子形（PEM 形）水電解法は 1970 年代初期に GE が燃料電池の技術を適用したもので、日本では 1975 年頃に大阪工業技術研究所（現 産業技術総合研究所）で膜・電極接合技術が研究され、現在は民間企業主体で研究開発されている。

アルカリ水電解法と固体高分子形水電解法の比較を表 6-3 に示す。あくまでも現状技術による比較であるが、一般に固体高分子形水電解は同じ面積に流す電流（電流密度）がアルカリ水電解に比べて高いため電解槽を小型化できるが、高価な材料を使用する。水素製造におけるコスト（設備費含む）に関しては、固体高分子形水電解はアルカリ水電解の 2 ～ 3 倍であるが、将来のコスト低減も期待される。

一般に水電解は、温度が高いほうが理論電解電圧は低くなるので高効率となる。よって、高温水蒸気を水電解する技術として水蒸気水電解（800 ～ 1000℃ レベル）が研究されている。熱源としては、過去には第四世代原子炉（高温ガス炉、900℃ レベル）が検討されてきたが、現在固体酸化物形燃料電池（SOFC）の排熱を有効活用し、これを電解時に活用する固体酸化物形水電解セル（SOEC：Solid Oxide Electrolyser Cell）の研究も NEDO プロ

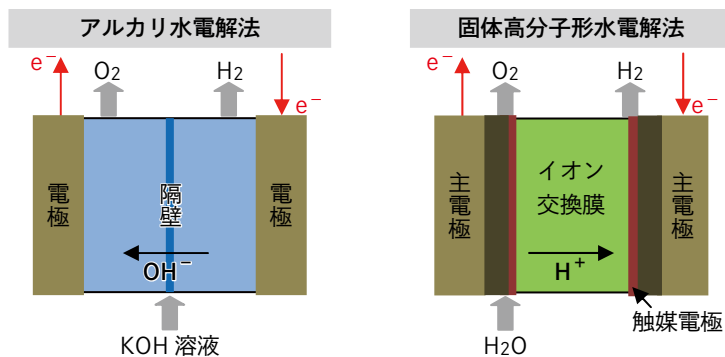


図 6-6 水電解の仕組み

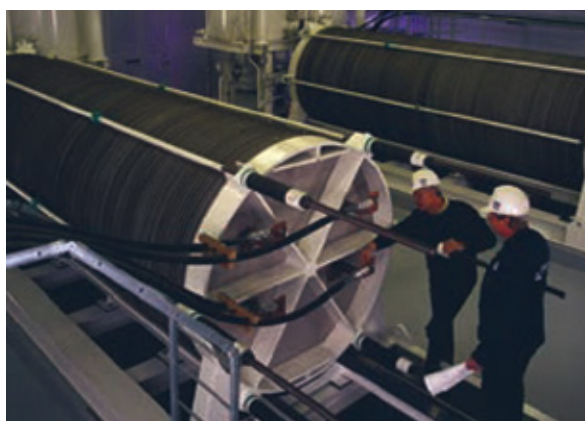


図 6-7 工業用アルカリ水電解の例 NEL Hydrogen (ノルウェー)

出典：NEL Hydrogen

表 6-3 アルカリ水電解と固体高分子形水電解の比較

	アルカリ水電解	固体高分子形水電解
フィード	KOH 溶液、NaOH 溶液	純水
必要電力	4.5 ~ 6.5 kWh/Nm <sup>3</sup>	5.0 ~ 6.5 kWh/Nm <sup>3</sup>
システム規模	大型化可能	50Nm <sup>3</sup> /h 程度
水素純度 (精製プロセス含む)	99.99%	99.99%

出典：各種資料より NEDO 作成

ジェクトとして実施されている (図 6-8)。

将来的な再生可能エネルギーの導入拡大が期待されるなか、余剰電力を有効に利用するために水電解技術の活用が期待されている。実際に欧州ではドイツを中心に、再生可能エ

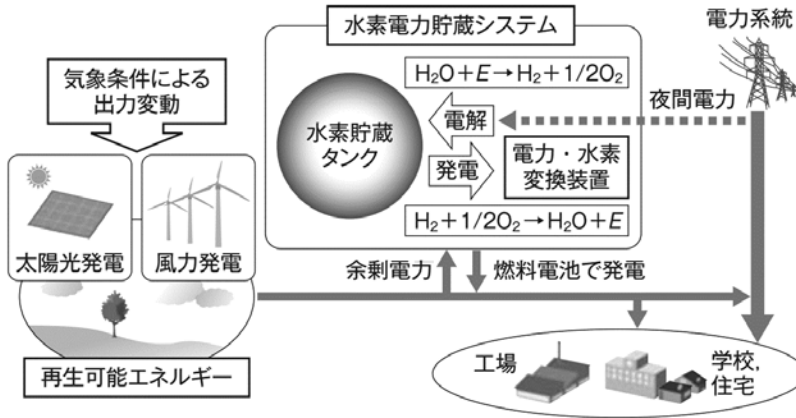


図 6-8 固体酸化物形水電解セル (SOEC) の例

出典：東芝

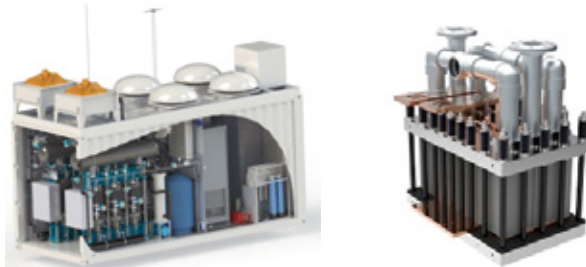


図 6-9 再生可能エネルギーのゆらぎに対応した水電解装置の例

左：ITM Power 製水電解装置 右：Hydrogenics 製水電解装置

出典：ITM Power, Hydrogenics

エネルギー（特に風力発電）からの余剰電力を水素やメタンに変換して活用するという Power-to-Gas プロジェクトが実施されている。このように再生可能エネルギーと組み合わせる場合は、発電量の変動への対応などが求められ、海外のメーカーではそれに対応したシステムも開発されている（図 6-9）。

## (2) 課題

水電解による水素製造では電力を利用するため、電気代が水素コストに直結する。そのため、まずは高効率化が最大の課題である。あわせて装置の低コスト化も必要である。

高効率化のためには固体高分子形水電解装置の高圧化も検討されているが、システムの耐久性の確保とともに、高圧で発生する水素・酸素を適切に制御する技術の確立が必要となる。高圧化による効率向上を図ると装置がコスト高になることも考えられるため、効率とコストのバランスを検討する必要がある。

再生可能エネルギー由来電力を直接利用して、低炭素排出の水素を製造することも期待

されているが、その場合は出力変動の大きい電力を使うことになるため、膜・電極の耐久性向上とともに、補機の定常運転を確保する必要がある。

水蒸気水電解では、固体酸化物形燃料電池（SOFC）と同様に高温耐久性、熱ショックなどの課題がある。また、まだ効率が低く（現状で47%程度）、向上が必要である。

水電解装置をオンサイト水素ステーションに応用する場合には、水素ステーションの運用に合わせてDSS運用させることが必要となり、それに適したセル及びシステムの耐久性が必要である。

### (3) 実用事例

過去のJHFCプロジェクト（JHFC-1、JHFC-2）ではオンサイト水電解ステーションが運用された事例がある（JHFC相模原水素ステーション、アルカリ水電解）。

また、九州大学水素ステーションは固体高分子形水電解装置を用いて水素を製造している（図6-10）。海外では、特に電気代が安価な北欧を中心に水電解ステーションが展開されている（図6-11）。



図 6-10 九州大学水素ステーションの構成

出典：九州大学



図 6-11 海外製水電解水素ステーションの例

左：H2 Logic 製 CAR-100、右：Hydrogenics 製 HySTAT-60

出典：H2 Logic, Hydrogenics

## 6-2-4 バイオマスの熱分解

### (1) 原理と特徴

バイオマス熱分解とは、多様なバイオマス（木材など）を乾留（無酸素化下で熱分解）させ、水素や一酸化炭素などの乾留ガスを得て、水素を分離精製するものである。

バイオマスは種類が多様であるが、一般には生産系（木質類、糖質類、でんぷん類、油脂系、海藻類など）と廃棄物系（農産物系廃棄物、畜産系廃棄物、間伐材・廃木材・建設廃材、水産系廃棄物、ゴミ、下水汚泥など）に分かれる。バイオマス熱分解による水素製造で主に使用されるのは、木質類や間伐材・廃木材・建設廃材である。

### (2) 課題

乾留技術自体は確立しているもの、利用するバイオマスの種類によって乾留条件が大幅に変わるので、材料ごとの最適化が必要であるとともに、材料に対してフレキシブルなシステムも望まれる。

バイオマスによっては、チャー（炭化物）が大量に発生し、装置内に残留してしまうために、その対応が必要となる。あわせて、分離・精製技術の開発が必要である。

また、本技術による水素コストはバイオマスコストに依存するため、収集コストを含めたコスト低減が必要である。

### (3) 実用事例

鳥栖水素ステーション（佐賀県鳥栖市）では、木材チップを用いた水素製造プラントがNEDO事業として実施され、現在も運用されている（図6-12）。

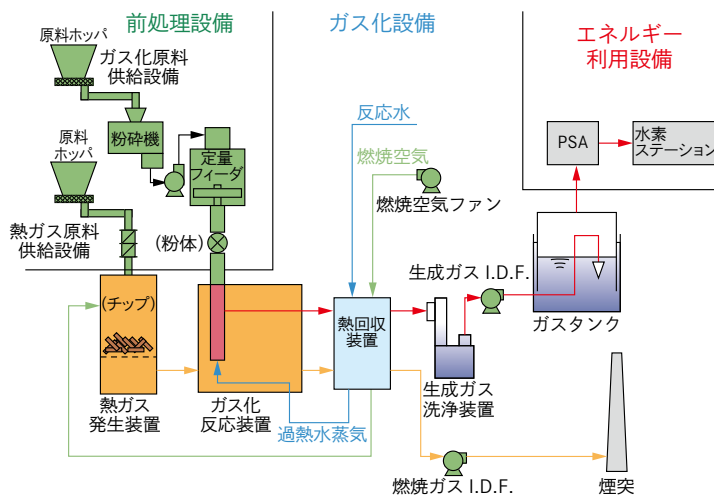


図 6-12 鳥栖水素ステーションでの木質チップによる水素製造

出典：鳥栖環境開発総合センター資料より NEDO 作成



## 6-2-5 水の熱分解

### (1) 原理と特徴

水は2,000℃以上で水素と酸素に分解するが、そのような高温を確保することは難しいうえ、その温度に耐えられる材料も限られる。よって多様な反応を組み合わせ、間接的に水を熱分解する方法（サイクル）が考えだされている。

そのようなサイクルの中でも有望と考えられているのが、我が国で研究されている硫黄-ヨウ素サイクル（ISサイクル）である（図6-13）。ISサイクルでは、水にヨウ素と酸化硫黄を反応させてヨウ化水素と硫酸を合成し、ヨウ化水素の熱分解で水素を、硫酸の熱分解で酸素を製造する。介在する物質であるヨウ素と硫黄はサイクル内で循環するので、このサイクルでの全反応は単なる水の熱分解反応（ $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$ ）となる。

このようなサイクルは他にも提案されており、UT-3サイクル（臭素、酸化鉄を用いたサイクル）やハイブリッドサルファーサイクル（硫化酸素、硫酸を用いたサイクル）などがある。米国エネルギー省は多様なサイクルをスクリーニングして、有望なサイクルの洗い出しを行っている。

熱源としては、我が国では第四世代原子炉の排熱を活用するアイディアが進められてきたが、欧米では太陽光集光装置（ヘリオスタット）を活用することが検討されている。欧州連合における第6次フレームワークプログラムのファンドで、太陽熱を用いた水分解による水素製造プロジェクトHYDROSOL II（Solar Hydrogen via Water Splitting in Advanced Monolithic Reactors for Future Solar Power plants）がスペインのアンダルシア地方で実施された（2005～2009年）。100 kWのソーラータワーパイロットプラントを建設し、2008年に水素発生を成功させている（図6-14）。また2010～2012年には後継プロジェクトHydrosol 3Dが行われた。



図 6-13 IS サイクル

出典：日本原子力研究開発機構

資源エネルギー庁 燃料電池推進室「水素の製造、輸送・貯蔵について」

第5回水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ（2014年4月14日）

【参考資料 [3]】



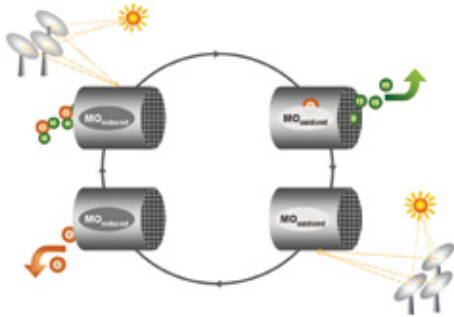
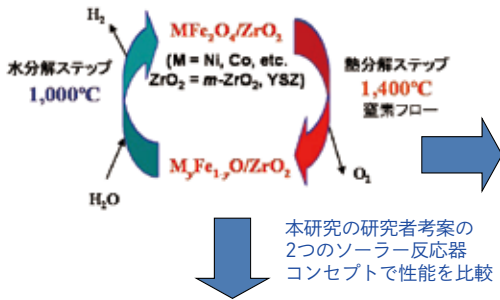


図 6-14 HYDROSOL II

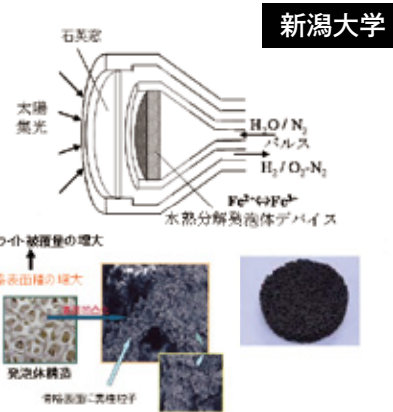
出典：Final Report - HYDROSOL II

フェライト（鉄酸化物）による二段階水熱分解サイクル

▶反応性セラミックを使った二段階水熱分解サイクルで水素を製造

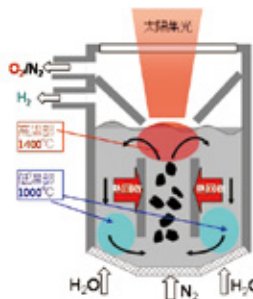


本研究の研究者考案の  
2つのソーラー反応器  
コンセプトで性能を比較



新潟大学

発泡体デバイス式ソーラー水熱分解器



粒子内循環流動層式ソーラー水熱分解器

有望なソーラー反応器を  
大型化、大型太陽光集光  
システムで水熱分解による  
水素製造を実証試験する

本研究で開発した  
ソーラー反応器を設置

大型集光システム

図 6-15 新潟大学による太陽光集光システムを用いた水素製造実証

出典：新潟大学資料より NEDO 作成

また、我が国は新潟大学が、太陽光集光システムとフェライト系の水熱分解プロセスを用いて、水素を製造する実証を行っている（図 6-15）。

内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）のエネルギーキャリア研究開発

では、上記 IS サイクルに分離膜を組み合わせることで、従来約 900℃で行っていた水素製造を、より低温で行える新 IS プロセスの開発が進められており、熱源として太陽熱 (650℃) の利用が想定されている。

## (2) 課題

熱源の確保 (数百～1,000℃) が必要となる。太陽光集光装置 (ヘリオスタット) を利用するのが一つの方法であるが、その場合では適切なロケーションを選定する必要がある。また、数百～1,000℃の熱に耐えられる容器や材料が必要となり、そのメンテナンスコストも大きくなると予想されている。

さらにプロセスフローの最適化やリアクタのコスト低減など、研究開発すべき項目は多い。

## (3) 実用事例

基礎研究段階で、実用事例はまだない。

## ■ 6-2-6 光触媒による水分解 (人工光合成)

### (1) 原理と特徴

光触媒による水分解とは、酸化物や窒化物などの半導体粒子の光触媒を利用し、光によって水を直接分解する方法である。

これは光触媒の表面に太陽光があたることで電子が価電子帯から伝導帯へと励起され、励起された電子が水を還元し水素を発生させ、価電子帯に生じたホールが水を酸化して酸素を発生させるものである (図 6-16 左)。

我が国では、経済産業省の二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発において

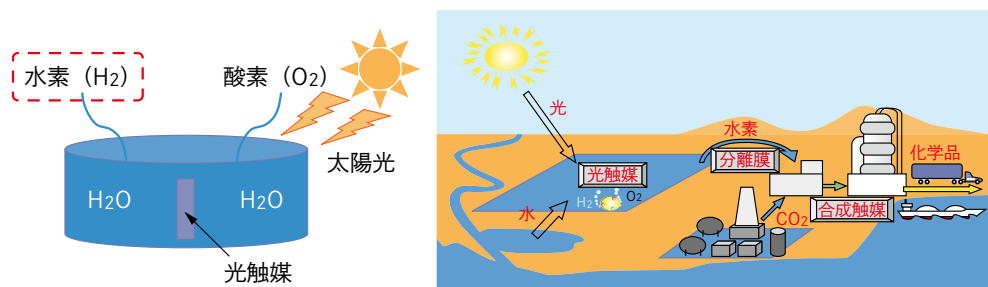


図 6-16 光触媒による水分解の観念 (左) と人工光合成プロジェクト (右)

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「水素の製造、輸送・貯蔵について」

第 5 回水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ (2014 年 4 月 14 日)【参考資料 [3]】より NEDO 作成

人工光合成プロジェクトが進められており、光触媒から水素を製造し、産業セクターから排出される CO<sub>2</sub> を水素化することで基幹化学品を製造することを目指している（図 6-16 右）。

また、文部科学省の新学術領域でも、人工光合成の基礎的な研究が行われている。光触媒水分解は、太陽光発電と同様に天候に左右されるものの、実用化されれば CO<sub>2</sub> フリーで水素を製造できる技術となる。

米国国立科学財団（NSF）は、太陽光から燃料（水素）を生産する CCI Solar（Center for Chemical Innovation : Solar Fuel）プログラムを実施している。中心研究機関はカリフォルニア工科大学である（図 6-17 左）。

米国エネルギー省も光触媒からの水素製造に熱心であり、PEC（photoelectrochemical）ワーキンググループを設置し、国立再生可能エネルギー研究所（NREL）やローレンスリバモア国立研究所（LLNL）、スタンフォード大学などを中心に多様な材料系について検討を行なっている。米国エネルギー省傘下のローレンスバークレー国立研究所（LBNL）のヘリオス太陽エネルギー研究センター（Helios Solar Energy Research Center）も人工光合成の研究を進めている（図 6-17 右）。

さらに、米国エネルギー省は、カリフォルニア工科大学と LBNL の研究を統合的に進めていくために、人工光合成ジョイントセンター（JCAP : Joint Center for Artificial Photosynthesis）を 2010 年に設置している。

## (2) 課題

現状で基礎研究開発レベルである。特に紫外光域で高活性を示す光触媒は多いが、可視光域で高活性を示す光触媒はまだ少なく、さらなる材料探索が必要と思われる。

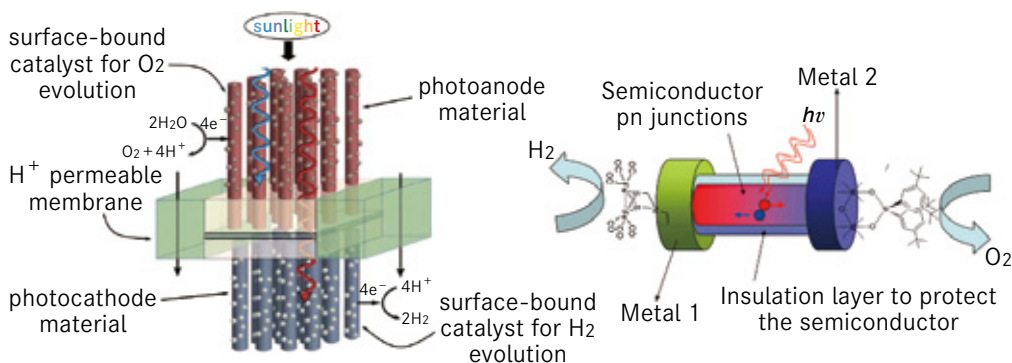


図 6-17 米国における人工光合成の研究例

左：カリフォルニア工科大学、右：LBNL

出典：米国エネルギー省

現状では変換効率が0.3%程度と低く、我が国では人工光合成プロジェクトで2021年度末までに10%前後にする目標がある。

また、水素と酸素が混合して、再反応（爆発）することを避けるために、直ちに分離することが必要となるが、図6-17に示すように2つの材料を組み合わせることで水素・酸素の分離を同時に実現する方法や可視光域での水分解を実現する研究も行われている。

### (3) 実用事例

基礎研究段階で、実用事例はまだない。

## ■ 6-2-7 バイオプロセス

### (1) 原理と特徴

ある種のバクテリアは、特殊条件下で糖類を代謝・発酵し、水素を生産する。利用する糖質としては、単糖類（グルコース、フルクトース、マンノースなど）、二糖類（スクロースなど）、多糖類（でんぷんなど）など多様である。細菌は嫌気性細菌が多く、暗反応とも呼ばれる。

また、シアノバクテリア（藍藻類）は光合成プロセスの一環として水素を生産する。水から直接水素を作る場合と、二酸化炭素・でんぷんを介して水素を作る場合がある。光合成の一種であるため明反応とも呼ばれるが、反応が緩慢（暗発光の1/1000程度）で、また受光面積を大きくとる必要がある。

### (2) 課題

大量に水素を発生させるにはかなりの技術的革新が必要である。まず、効率のよいバクテリアの発見とともに、収率向上のために遺伝子改変が必要である。また、バクテリアの耐熱性、耐酸性、耐窒素性の向上が必要である。

暗反応では原料にグルコースなどの糖類を用いるが、低コストに糖類を入手するとともに、安価な糖類（セルロースなど）を効率よく代謝するバクテリアの特定が望まれる。また、有機酸などの副生成物が残るので除去が必要になる。

明反応の場合、光変換効率を向上させるため、複数の微生物を複合的に利用する方法も提案されており、その場合は同時培養技術の確立が必要である。

両反応とも、副生する有機酸やCO<sub>2</sub>などの不純物の除去技術が必要である。

### (3) 実用事例

基礎研究段階で、実用事例はまだない。

## 6-3 水素輸送・貯蔵技術

水素は体積当たりのエネルギー密度が低く（天然ガスの1/3程度）、これをどのような手段で高い密度に維持しつつ、輸送・貯蔵するかが課題となる。これに加え、水素の製造方法や利用方法、供給地と需要地の距離などによって、様々な方法が考えられる（図6-18）。

輸送分野では、すでに高圧ガス輸送、液化水素輸送が実用化されており、これに加えて新規の技術として有機ハイドライド輸送が実証されている。長期的には、国内でもエリアによっては水素パイプラインが施設されることも考えられる。

水素貯蔵技術のなかでも、燃料電池自動車のようなスペースに制限のある用途に対しては、体積エネルギー密度が高い水素吸蔵合金の活用も期待されるが、現状ではまだ研究開発段階であり、一層の低コスト化が必要とされている。

なお我が国は、将来において水素発電事業などの用途で大量の水素需要が生じることも想定されるため、有機ハイドライド技術や液化水素技術を用いた世界的な水素供給チェーンの構築・実用化が期待されている（図6-19）。

経済産業省の「水素・燃料電池戦略ロードマップ」では、このような水素供給チェーンの実用化（海外の未利用エネルギー由来水素や再生可能エネルギー由来水素の輸送・貯蔵）の本格化は2030年頃とされているが、同時に我が国におけるLNG導入の歴史を考えると、

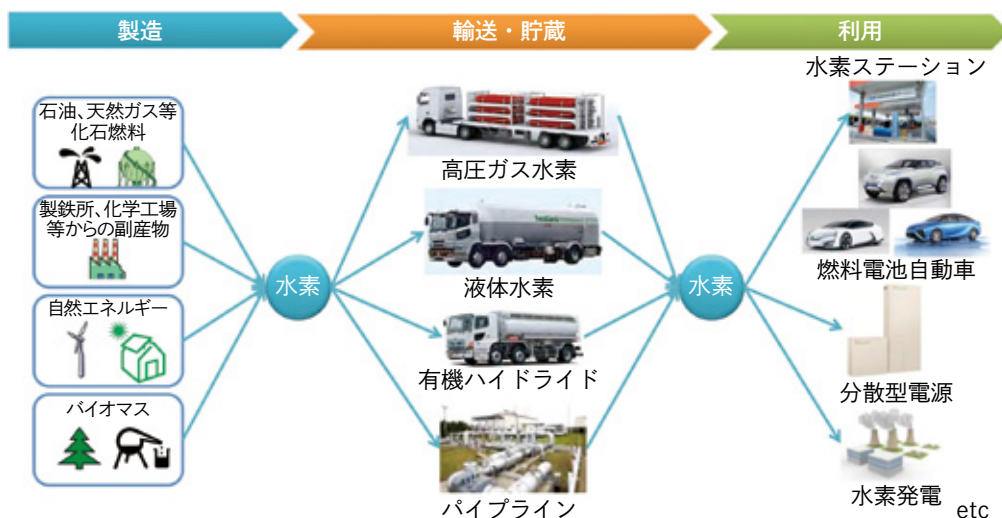


図6-18 水素の輸送・貯蔵方法

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「水素の製造、輸送・貯蔵について」

第5回水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ（2014年4月14日）【参考資料 [3]】より NEDO 作成



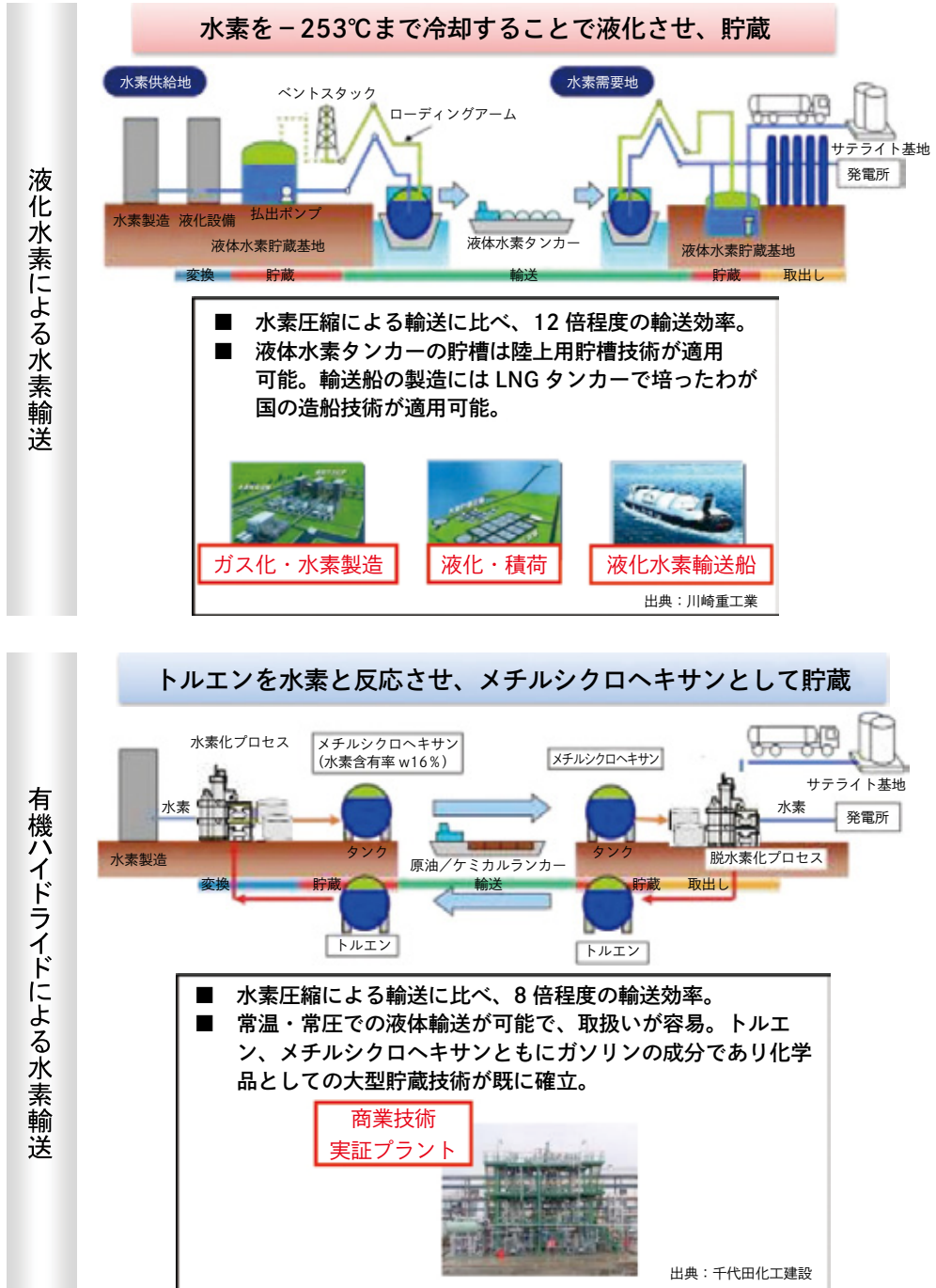


図 6-19 液化水素や有機ハイドライドによる水素輸送（海外からの水素輸入）

出典：経済産業省「水素・燃料電池戦略ロードマップ」（2014年6月）【参考資料 [1] [3]】より NEDO 作成

要素技術の確立から導入までに15年程度の準備期間を要したため、水素の輸入においても今から必要な取り組みに着手することを必要としている。

将来的に水素ステーションへの輸送・貯蔵が想定される高圧ガス、液化水素、有機ハイドライドについて比較を行うと、高圧ガスに比べて液化水素や有機ハイドライドが貯蔵性に優れると考えられる（図6-20）。他方で、液化水素の水素への変換までを含めた総合的なエネルギー効率は、現時点では高いものではなく、有機ハイドライドについても、现阶段で小型の脱水素装置が実用化していないため、将来に向けて技術開発などを行っていく必要がある（表6-4）。

本章では、実用化されている高圧ガス水素輸送や液化水素輸送、有機ハイドライド輸送について解説する。また、将来技術であるアンモニア、水素吸蔵合金、メタン化による輸送・貯蔵技術についてもふれる。

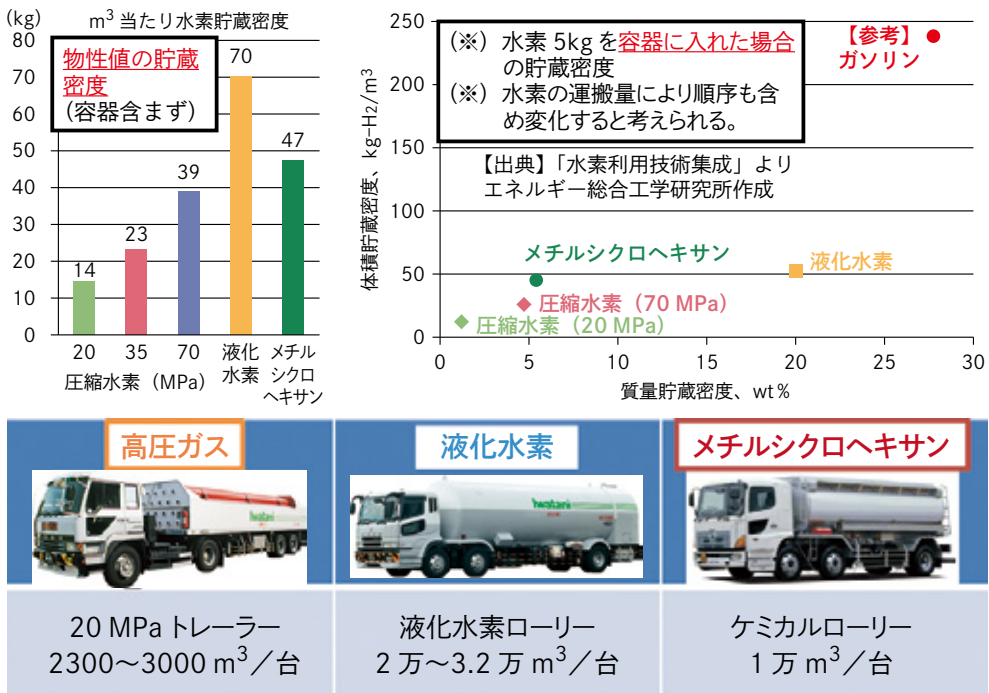


図 6-20 各水素キャリアの貯蔵密度の比較

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「水素の製造、輸送・貯蔵について」  
 第5回水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ（2014年4月14日）【参考資料 [3]】より NEDO 作成



表 6-4 水素ステーション供給時の各水素キャリアの比較

		高圧ガス	液化水素	メチルシクロヘキサン
エネルギー効率 (※ 1)	2015 年	52%	(※ 3)	(※ 4)
	2030 年	54.7%	55.7%	52.1%
CO <sub>2</sub> 排出量 (※ 2)	2015 年	1.87	(※ 3)	(※ 4)
	2030 年	1.70	1.16	1.72

(※ 1) チェーン全体（採掘・輸送・精製からステーションでの充填まで）の効率

(※ 2) チェーン全体（単位：kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>）

(※ 3) 技術的には実用化段階だが、2015 年時点では水素ステーションの稼働率が低水準にとどまるため、ボイルオフによるエネルギーロスが多数発生。

(※ 4) 水素ステーションで脱水素できるよう、脱水素装置の小型化が必要。

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「水素の製造、輸送・貯蔵について」

第 5 回水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ（2014 年 4 月 14 日）【参考資料 [3]】

## 6-3-1 高圧ガス水素輸送

### (1) 原理と特徴

陸上で水素を輸送する場合、圧縮して輸送するのが一般的である（図 6-21）。通常は水素を 19.6 MPa に加圧してシリンダーに充填し、それを束ねてカードルとして運搬する。

大量に水素を輸送する場合は、長さ 6 m 以上の大型シリンダーを集結した水素トレーラーで搬送する。この場合の水素圧力は 19.6 MPa である。

水素ステーションに供給する場合、1 回の配送における水素供給量の増加と、水素ステーションでの昇圧の負担減のために、輸送時の高圧化が求められてきた。そのため NEDO では、45 MPa 級の水素トレーラーの実証を行った（図 6-22）。このトレーラーは、高圧化による重量化を避けるため複合容器製シリンダーを採用している。

また NEDO では、圧縮水素運送自動車用容器の最高充填圧力を 35 MPa から 45 MPa に引き上げるための技術基準の整備を実施し、経済産業省により 2014 年 4 月に技術基準の改正が発表された。



図 6-21 水素カードルと水素トレーラー

出典：岩谷産業「水素エネルギーハンドブック第 3 版」



図 6-22 NEDO プロジェクトで実証された 45 MPa トレーラー

出典：川崎重工業

## (2) 課題

高圧ガス輸送は技術的にも確立されている。圧縮にはエネルギーを要するものの、最終的には水素ステーションで 70 MPa 以上に昇圧されるため、圧縮に用いたエネルギーは無駄にならないといえる。

圧縮機や高圧貯蔵容器については、低コスト化に向けてさらなる技術開発が必要である。また、1 MPa 以上の高圧になると高圧ガス保安法の規制対象となり、関連法規への対応が必要となる。さらに、現状の道路法では危険物搭載車両とされ、海底トンネルや 5 km を超えるトンネルは通行できない。

## (3) 実用事例

圧縮水素は産業用・工業用として幅広く適用されている。

圧縮水素の生産能力シェアと用途シェアを図 6-23 に示す。圧縮水素の需要家としては、

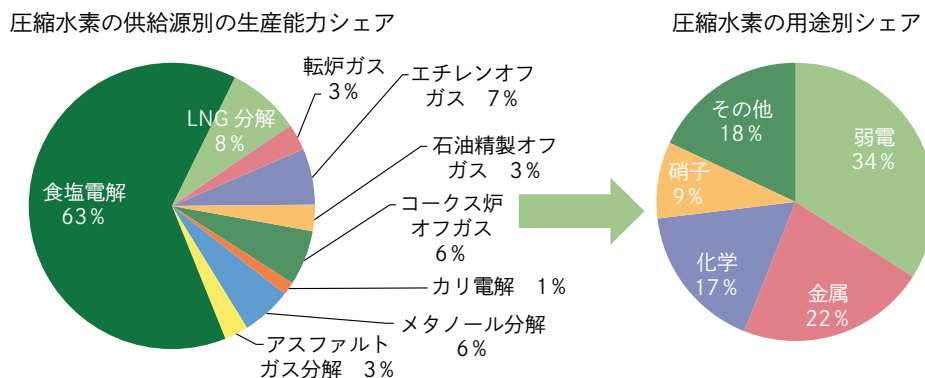


図 6-23 圧縮水素の生産能力シェアと用途シェア

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「水素の製造、輸送・貯蔵について」  
 第 5 回水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ（2014 年 4 月 14 日）【参考資料  
 [3]】より NEDO 作成

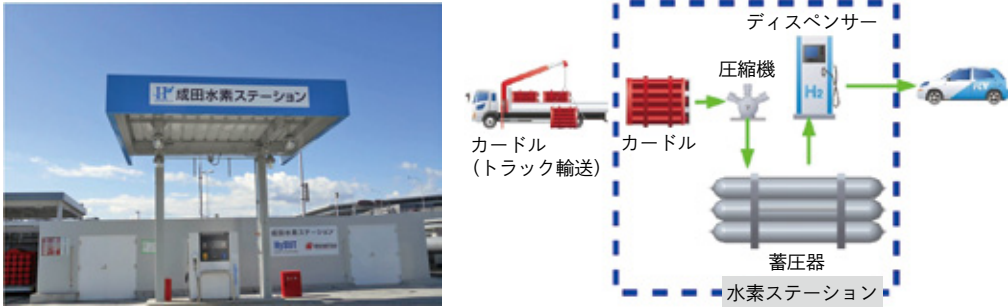


図 6-24 成田水素ステーション

出典：水素供給・利用技術研究組合

半導体、液晶、電子部品などの弱電と呼ばれる業界が最も多く、それに光輝焼鈍用や特殊溶接用などの金属、アンモニアやメタノール合成用の化学、雰囲気ガスや光ファイバーなどのガラス産業などが続いている。

JHFC-3 の枠で実証されてきた水素ステーションのなかでは、成田水素ステーション（千葉県成田市）が水素カードル供給によるオフサイト水素ステーションである（図 6-24）。

## 6-3-2 液化水素輸送

### (1) 原理と特徴

液化水素輸送も、大規模水素輸送では実績がある技術である。

水素は $-253^{\circ}\text{C}$ で液化し、体積は $1/800$ に減少する。液化水素輸送は、従来は航空宇宙用途が主であったが、岩谷産業などの企業が積極的に展開し、液化水素の導入を進める需要家が増えてきている（図 6-25）。

液化水素輸送には、可搬式超低温容器（ $145 \sim 350 \text{ L}$ ）、コンテナ（ $2 \sim 46 \text{ m}^3$ ）、ローリー（ $23 \text{ m}^3$ ）が使用されている。可搬式超低温容器とコンテナは、消費地に設置して利用可能である。液化水素ローリーは、NEDO 事業（WE-NET）において開発されたものである（図 6-26）。

液化水素用容器には、円筒積層真空断熱方式が採用されている。これはいわゆる魔法瓶のように二重構造となっており、内槽を真空で取り囲むことで熱侵入を防ぐもので、さらに金属反射膜と断熱シートを交互に多層化したものを真空層に適用することで、輻射熱と熱伝導を最小化している。それでも侵入熱があるために、時間とともにボイルオフガス（BOG）という気化ガスも発生するが、最新の容器のボイルオフ発生量は $1\%$ /日以下となっている。

水素の液化は、液体窒素で水素（循環水素）を $-190^{\circ}\text{C}$ 程度に予冷し、これを断熱膨張することによりさらなる冷熱を製造、これを原料水素に用いることで液化を行う（図 6-27）。

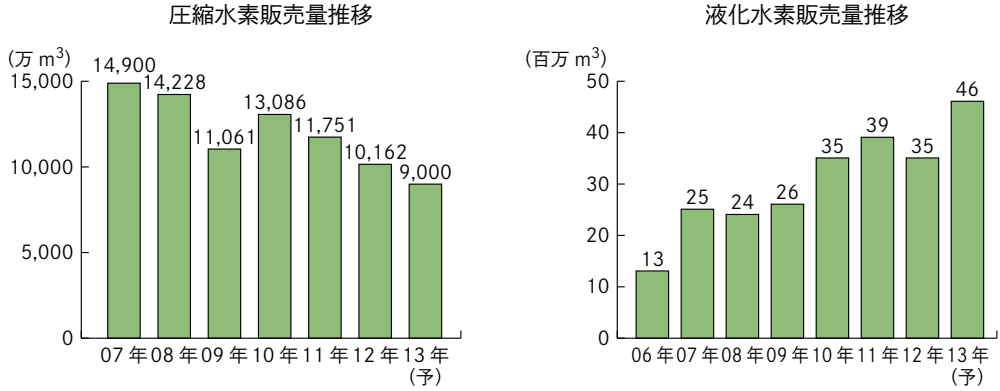


図 6-25 圧縮水素と液化水素の販売量の推移

出典：岩谷産業資料、ガスレビューより NEDO 作成



図 6-26 液化水素用可搬式超低温容器、コンテナ、ローリー

出典：岩谷産業

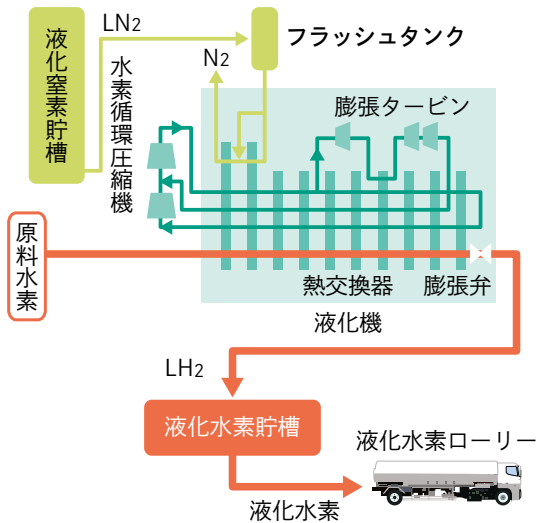


図 6-27 水素の液化

出典：岩谷産業「水素エネルギーハンドブック 第3版」より NEDO 作成

## (2) 課題

液化水素の輸送・貯蔵では、液化効率の向上（液化エネルギーの低減）とボイルオフガスの低減が課題である。

液化に要するエネルギーは、従来は水素が有する熱量の1/3程度の11.9 kWh/kgを要していたが、欧州のエネルギー企業・研究機関、川崎重工業を中心に現在6 kWh/kg程度への低減を目指した研究開発（IDEALHY）が行われている。

さらに、液化水素は $-253^{\circ}\text{C}$ という極低温であり、液化する際のエネルギーは冷熱として保存されていると考えられることから、その冷熱の有効活用が重要である。

また、経済産業省・文部科学省が連携して進めている未来開拓研究プロジェクトでは、2022年度に液化効率40%以上の液化システムと、ボイルオフ発生量0.1%/日（システム容量50,000 m<sup>3</sup>）程度の液化水素タンクシステムなどからなる液化水素供給システムの開発を目指している。

なお、法令上は液化水素も「高圧ガス」として取り扱われるため、高圧ガス保安法などの法規への対応も必要である。

## (3) 実用事例

JHFC-3の枠で実証されてきた水素ステーションの中では、有明水素ステーションが液化水素ローリー供給によるオフサイト水素ステーションである（図6-28）。

なお、海外から水素を液化水素として輸入する場合には液化水素運搬船が必要となる。川崎重工業は日本海事協会から液化水素運搬船の貨物格納設備の基本承認を取得し、世界初となる液化水素運搬船の2017年頃の実用化を目指している（図6-29）。本船は新たに開発した極低温蓄圧式液化水素専用貨物格納設備（容積2,500 m<sup>3</sup>）を搭載している。

経済産業省の「水素・燃料電池戦略ロードマップ」では、褐炭などの未利用エネルギー

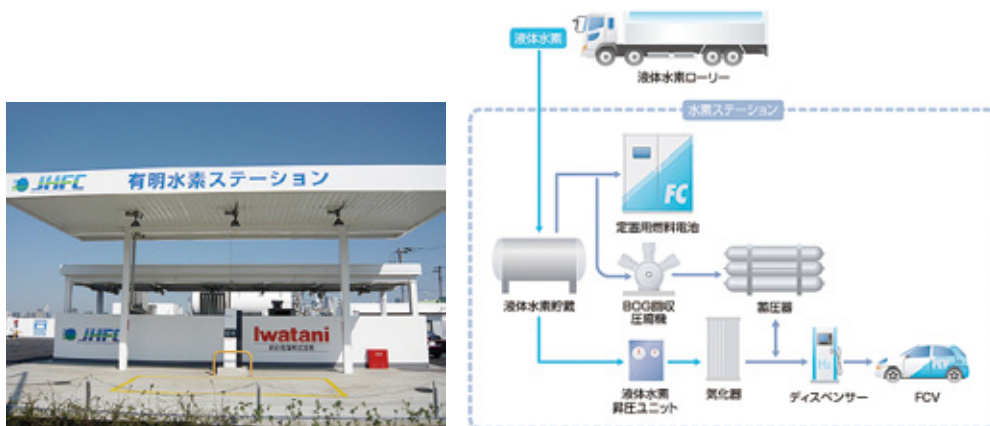


図 6-28 有明水素ステーション

出典：水素供給・利用技術研究組



図 6-29 液化水素運搬船のイメージ

出典：川崎重工業

を用いた、安価で安定的な水素の製造方法の確立に向けて必要な開発・実証などを行うとしている。また、液化水素の荷役を行うために必要となるローディングシステムについて超低温性などの特性に対応した要素技術（液化水素配管のジョイント、緊急離脱機構など）の研究開発を行い、併せて液化水素の荷役に関するルールを整備し、国際標準化を図っている。

### 6-3-3 有機ハイドライド

#### (1) 原理と特徴

有機ハイドライド輸送は、芳香族系有機化合物を水素キャリアとして用いるものである（表 6-5）。常圧状態に比べて体積は 1/500 程度となり、また、液体化するためケミカルタンカーやケミカルローリーを用いることができる。なお、水素付加（水素化）は発熱反応であり、水素脱離（脱水素化）は吸熱反応である。

複数の系があるが、安全性や利便性などの点からメチルシクロヘキサン＝トルエン系の実用化が進められている。ともに汎用化学品であり、既存の社会インフラが利用可能である。この系では、水素化反応段階と輸送の実績はあったが、脱水素化反応段階における転化率と寿命が問題であった。しかしながら、最近になり耐久性が高く、選択性に優れた脱水素触媒が日本で開発され、実用化の見通しが立った。

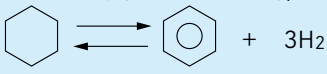
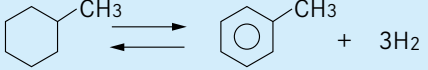
メチルシクロヘキサン＝トルエン系を利用した輸送システムを図 6-30 に示す。水素製造地において、トルエンを水素化してメチルシクロヘキサンとし輸送する。需要地でメチルシクロヘキサンを脱水素化し、トルエンは水素製造地に戻される。

#### (2) 課題

メチルシクロヘキサンやトルエンなどの物質は、本来的には水素キャリアとしての利用が想定されてこなかったため、各種規制（高圧ガス保安法、消防法、建築基準法など）に



表 6-5 水素輸送のための有機ハイドライドの種類

系	水素貯蔵量	安全性・利便性
シクロヘキサン=ベンゼン系 	7.19 wt% 0.62 Nm <sup>3</sup> /L	ベンゼンは発ガン性あり
デカリン=ナフタレン系 	7.29 wt% 0.71 Nm <sup>3</sup> /L	ナフタレンは通常固体であり、溶媒の使用が必須
メチルシクロヘキサン=トルエン系 	6.16 wt% 0.53 Nm <sup>3</sup> /L	常温常圧でともに液体

出典：各種資料より NEDO 作成

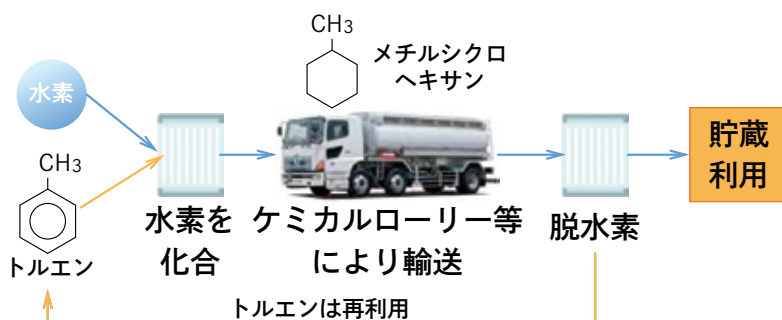


図 6-30 メチルシクロヘキサン=トルエン系有機ハイドライドを利用した輸送システム

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「水素の製造、輸送・貯蔵について」第 5 回水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ（2014 年 4 月 14 日）  
【参考資料 [3]】より NEDO 作成

ついて対応が必要となる。

将来的には、メチルシクロヘキサンを水素ステーションに直接輸送し、その場で脱水素を行って水素を得ることも考えられるが、そのためには脱水素装置の小型化や熱源の確保、法規制への対応が必要となる。

また、水素化設備や脱水素設備が必要で、一定の投資が必要となる。なお、脱水素化反応は吸熱反応であるため、400℃程度の熱源（排熱）の確保が必要である。



(3) 実用事例

千代田化工建設が耐久性に優れた脱水素触媒を開発し、2013年4月より実証プラントの実証を行なっている（図6-31）。

同様に、日立製作所は40kW級の小型高効率水素添加・水素分離装置の実証実験プラントを日立市に設置し、実証を行っている（図6-32左）。ベンチャー企業であるフレイシエナジーは、トルエンの一部を触媒燃焼させることで脱水素のための熱源とする方法を提案している（図6-32右）。

なお、千代田化工建設は川崎市と連携・協力包括協定を締結した。海外からの水素の調



■デモプラント  
装置性能：50 Nm<sup>3</sup>/h の水素貯蔵と水素発生



■タンク  
水素貯蔵能力：20 m<sup>3</sup>-MCH タンクに約 10,000 Nm<sup>3</sup>-H<sub>2</sub> 貯蔵（1週間分）

図6-31 千代田化工建設による実証プラント（左：デモプラント、右：タンク）

出典：千代田化工建設

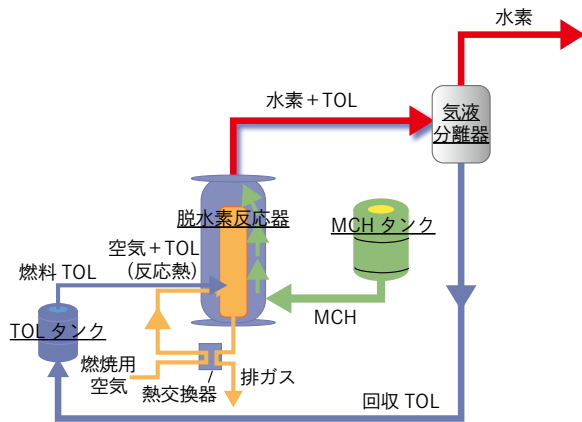


図6-32 日立製作所の有機ハイドライド実証プラントとフレイシエナジーの脱水素コンセプト

出典：日立評論 2012年9月号「循環型再生可能エネルギーシステム」  
フレイシエナジー ホームページより NEDO 作成

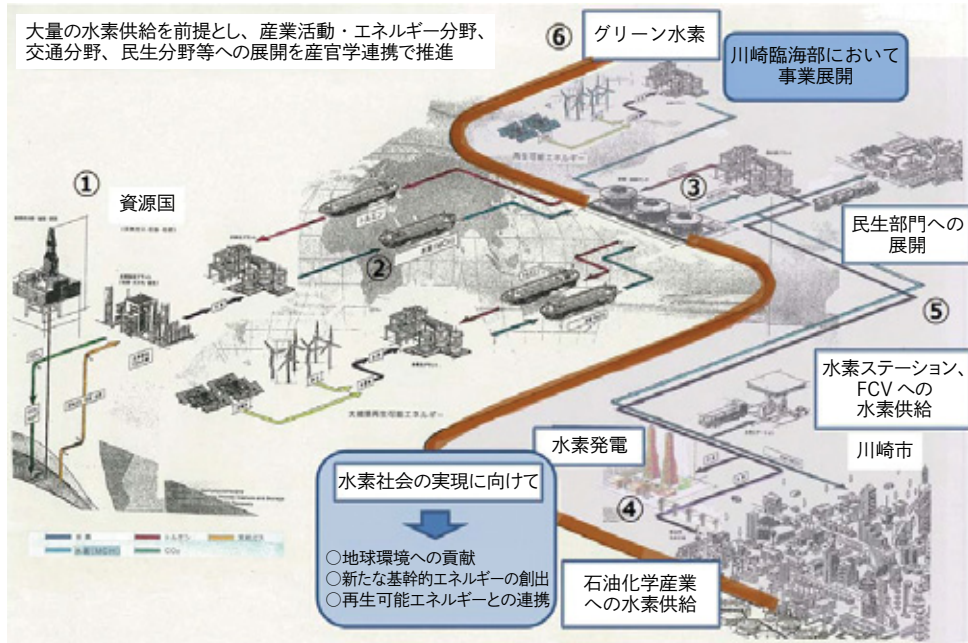


図 6-33 川崎市臨海部での水素ネットワークのイメージ

出典：千代田化工建設・川崎市「水素エネルギーフロンティア国家戦略特区による新たな成長戦略への提案」より NEDO 作成

達、川崎市臨海部での脱水素設備と 90 MW 商用水素発電所の建設、さらに水素ネットワークの構築を目指している（図 6-33）。

経済産業省の「水素・燃料電池戦略ロードマップ」では、有機ハイドライドによる水素海外輸送について、2020 年頃までにファーストチェーンの運用を開始し、実際のチェーン構築及び運用の中で制度的・技術的な課題を洗い出し、適時必要な対応を行うとしている。

## 6-3-4 パイプライン輸送

### (1) 特徴

大量の水素を陸上で輸送する場合には、パイプラインが用いられる。我が国でもコンビナート内では低圧の水素パイプラインが敷設されているが、欧米では大規模・長距離の水素パイプラインや高圧の水素パイプラインが敷設されている。

### (2) 課題

低圧での水素パイプラインはすでに工業的には利用されている。ただし、コンビナートなど保安規則などの安全規制を受けることになる。

水素を需要地まで輸送することを想定した本格的な水素パイプラインの整備には、かな

りのインフラ投資が必要となり、初期コストが大きくなる。また、水素パイプラインの設計、施工、維持管理に係る安全性確保については、検討が必要である。

なお、NEDOにおいては、2008～2009年に「水素ガス輸送用パイプラインの信頼性評価技術の研究開発」が行われ、パイプライン材料の水素脆化の影響や亀裂・破壊発生時の挙動などの信頼性評価を行った。

### (3) 実用事例

フランスの Air Liquide は、フランス、ベルギー、オランダの国境付近に全長 830 km の水素パイプラインを有し、また、ドイツのノルトラインヴェストファーレン州にも全長 240 km の水素パイプラインを有している（図 6-34）。圧力は 5 MPa 程度で、需要家に水素を供給している。

ドイツの Linde はライプチヒ付近に 140 km の水素パイプラインを有している。米国の Air Products and Chemicals は、ルイジアナ州、テキサス州、カリフォルニア州に水素パイプラインネットワークを有しており、その総延長は 560 km となっている。

これらの水素パイプラインは工業用であるが、水素ステーション用に敷設されたものもある。ドイツのフランクフルト水素ステーションは、隣接する工業団地内のソーダ電解プラントでの副生水素をソースとしているが、その間を 1.7 km の水素パイプラインでつないであり、その圧力は 90 MPa となっている（そのため水素ステーション側では圧縮装置は不要）。また、米国カリフォルニア州トーランスの水素ステーションは、同地域に敷設された水素パイプラインから供給を受けている。



図 6-34 水素パイプラインネットワーク

出典：DELIVERABLE 2.1 AND 2.1a “European Hydrogen Infrastructure Atlas” and “Industrial Excess Hydrogen Analysis” PART III : Industrial distribution infrastructure

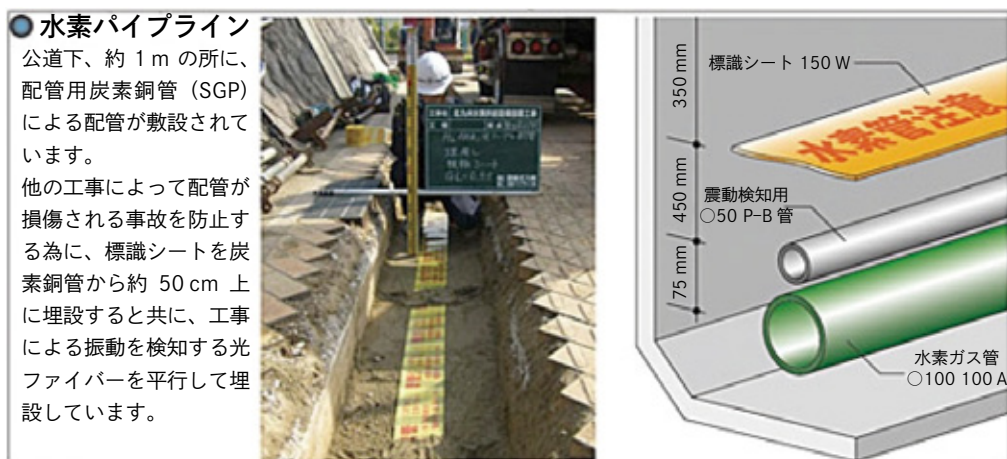


図 6-35 北九州水素タウンでの水素パイプライン実証

出典：水素供給・利用技術研究組合資料より NEDO 作成

我が国では「水素利用社会システム構築実証事業」（経済産業省）の一環として整備された北九州水素タウンにおいて、製鉄所からの副生水素を、実証住宅に設置された純水素型家庭用燃料電池と商業施設用リン酸形燃料電池に、1.2 km のパイプラインで供給している。このパイプラインは公道に埋設されており、その配管に使用されている炭素鋼管の耐久性の評価が進められている（図 6-35）。

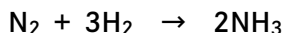
## 6-3-5 アンモニア

### (1) 原理と特徴

アンモニア（ $\text{NH}_3$ ）は水素を 17.8 重量%含んでおり、また容易に液化する（室温では 1 MPa 以下で液化）。液体アンモニアの体積水素密度は、液化水素よりも 50% 大きい。

アンモニアは基礎化学品で、肥料原料として大量生産されている。世界のアンモニア生産量は約 2 億トン／年であり、主に中国、インド、ロシア、米国などで生産されている。

通常、アンモニアはハーバーボッシュ法（水素と窒素を鉄触媒存在下で 10～25 MPa、570～820℃で反応させる）で合成されている。



アンモニアは安定な物質であるが、水素を脱離できれば、アンモニアを水素のキャリアとして利用できる。直接的に脱水素（クラッキング）するには、現状ではルテニウム系触媒を用いて 670℃ 以上の高温が必要である。その他には以下のような水素脱離方法がある。

- ・加分解 (水素放出)  $\text{LiH} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{LiNH}_2 + \text{H}_2$
- (水素付加)  $\text{LiNH}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{LiH} + \text{NH}_3$
- ・電気分解  $\text{NH}_3 (\text{l}) \rightarrow 1/2\text{N}_2 (\text{g}) + 3/2\text{H}_2 (\text{g})$  (図 6-36)

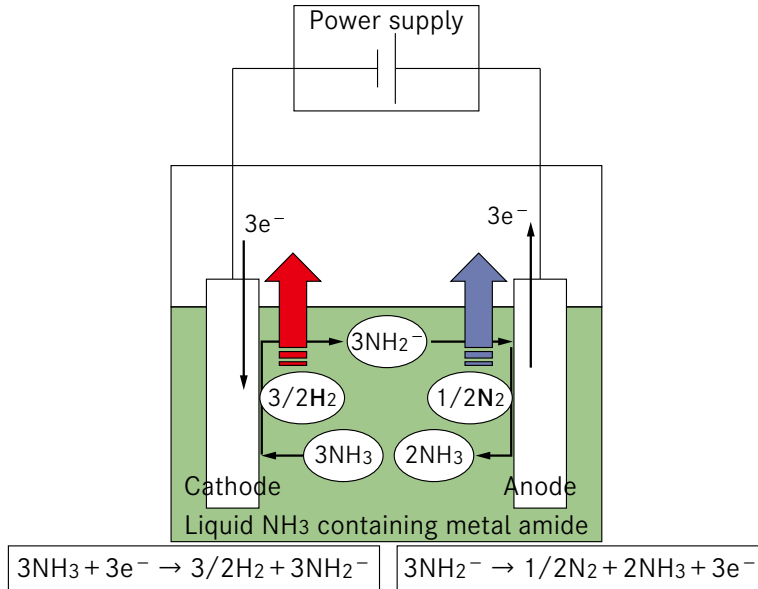


図 6-36 電気分解による水素脱離プロセス

出典：広島大学「アンモニアによる水素貯蔵」  
 高压水素貯蔵・輸送研究分科会（2013年11月29日）より NEDO 作成

アンモニア CIF 価格を基準にすると、それに含まれる水素コストは 20～35 円/Nm<sup>3</sup> となり、安価な水素の供給源としても期待される。

なお、アンモニアは可燃性であり、酸素と反応して窒素と水を生じる。

## (2) 課題

蒸気圧が高く、刺激臭があり、取扱いに注意する必要がある。特に強アルカリであるため、人の皮膚や粘膜に対して即時性の刺激と腐食性がある。

水素中にアンモニアが 1 ppm レベルでも含まれると燃料電池を劣化させるので、微量レベルにすることが必要である。

## (3) 適用事例

文部科学省・経済産業省が連携して進めているエネルギーキャリアプロジェクト（2013～2017 年度）では、アンモニア製造・利用技術の研究開発が進められている。

アンモニア（窒素）を核に水素を利活用するというアイデアはたびたび提案されてきた。これらは、水素脱離プロセスの技術革新とともに現実化する可能性もある（図 6-37）。



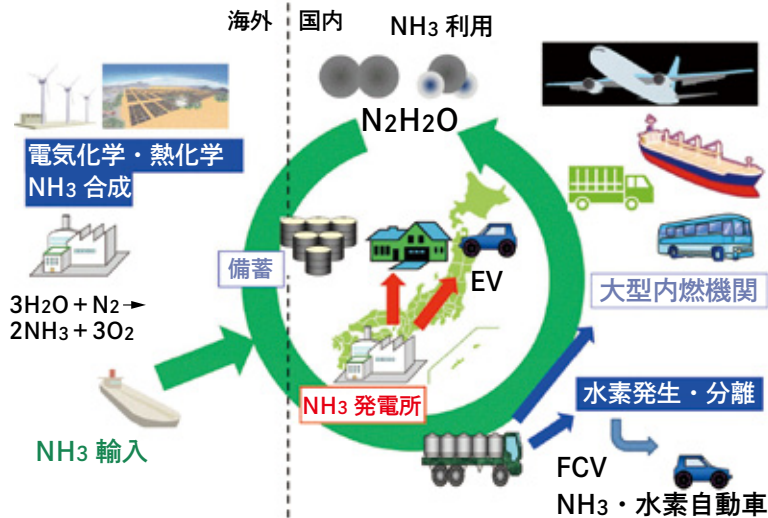


図 6-37 アンモニアによる水素の利活用のコンセプト

出典：広島大学「アンモニアによる水素貯蔵」

高圧水素貯蔵・輸送研究分科会（2013年11月29日）より NEDO 作成

## 6-3-6 水素吸蔵合金

### (1) 原理と特徴

水素吸蔵合金は可逆的に水素と反応して金属水素化物を生成する。金属水素化物中水素原子密度は概ね  $90 \text{ kg-H}_2/\text{m}^3$  以上であり、液化水素の密度 ( $70.8 \text{ kg-H}_2/\text{m}^3$ ) よりも高い値となるため、将来的にはスペースに制約のある車両や定置式エネルギー貯蔵装置への適用が期待される。

表 6-6 に主な水素吸蔵合金の種類を示す。重量当たりの水素吸蔵量は 4% 程度にとどまっており、さらなる研究開発が必要である。

### (2) 課題

体積当たりの水素吸蔵量は大きいですが、合金自体の重量が重いので、重量あたりの吸蔵量が小さい。なお最近では、軽量なアルミニウム銅合金 ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) が水素を可逆的に吸蔵放出することが計算科学により見いだされ、実際に合成された (図 6-38)。水素吸蔵量は 1 重量% 程度と小さいものの、このようなアプローチによって新規の系が発見される可能性はある。

車載用水素容器に適用するには、考えうる環境温度でも平衡水素圧が大気圧以上 (例 -30℃において 0.2 MPa 程度) であることが求められる。さらに水素放出のためには加温するなどの措置が必要で、熱交換器などを組み合わせる必要がある。その一方で、貯蔵圧力が

表 6-6 主な水素吸蔵合金の種類

種類	主な系	水素吸蔵量
AB <sub>5</sub> 型合金	LaNi <sub>5</sub> など	1 重量%
AB <sub>2</sub> 型合金	TiCr <sub>1.8</sub> 、ZrMn <sub>2</sub> など	～ 2 重量%
AB 型合金	TiFe など	～ 2 重量%
BCC 構造合金	Ti-Mn-V 系、Ti-Cr-V 系、V-Ti-Cr 系など	～ 3 重量%
Mg 系合金 (A <sub>2</sub> B 型)	Mg <sub>2</sub> Ni、Mg <sub>2</sub> Cu など	～ 4 重量%

出典：各種資料より NEDO 作成

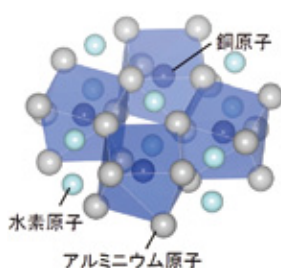


図 6-38 アルミニウム合金系水素吸蔵合金

出典：日本原子力研究開発機構、東北大学金属材料研究所、東北大学原子分子材料科学高等研究機構

低いため容器は金属製の安価なもので対応が可能という特徴もある。

コストは現状で 5000 円～1 万円/kg 程度である。さらなるコスト低減が求められる。

NEDO では 2007～2011 年に「水素貯蔵材料先端基盤研究事業」を実施し、水素吸蔵合金の吸蔵機構や、大規模施設（J-PARC、SPRING-8）などを用いて構造解明を行なった。

### (3) 適用事例

JHFC-1 では、水素吸蔵合金カートリッジを用いた小型移動体実証試験が栗本鐵工所によって実施された（図 6-39）。また、車両への適用では、水素ロータリーエンジンではマツダ（カペラカーゴ）、燃料電池自動車では本田技研工業（FCX-V1）とトヨタ自動車（FCHV-1、FCHV-3）に搭載された実績がある。

日本重化学工業、サムテック、産業技術総合研究所、佐賀大学は NEDO 「車載等水素貯蔵輸送容器システム技術に関する研究開発」（2008～2010 年）として水素吸蔵合金と高圧水素を複合したハイブリッドタンクを開発している（図 6-40）。





サイズ	356 mm (L) × 76 mm Φ
接続方式	ワンタッチ交換式専用カブラ
材料	水素吸蔵合金
安全機構	圧力逃がし弁



水素ポンベストッカーの一例

サイズ	1800 mm(L)×900 mm(W)×800 mm(H)
貯蔵元水素量	7 m <sup>3</sup> 、13 MPa 高圧ポンベ 2 本
最大充填本数	12 本まで同時充填可能、単独でも可能
充填圧力	1 MPa 未満
充填方式	自然冷却または外部電源による空冷
ポンベ交換	ワンタッチ操作で交換、専用カブラ使用
重量	約 220 kg

図 6-39 第 1 期 JHFC プロジェクトでの小型移動体実証試験

出典：大阪科学技術センター「JHFC 活動報告Ⅲ 燃料電池小型移動体実証事業」より NEDO 作成



図 6-40 NEDO プロジェクトで開発したハイブリッドタンク

出典：日本重化学工業「水素吸蔵合金を用いた水素貯蔵システム」  
(水素エネルギー製品研究試験センター 2011 年度第 1 回公開セミナー)

## 6-3-7 メタン化

### (1) 原理と特徴

水素を産業界が排出した CO<sub>2</sub> と反応させてメタン化し (図 6-41)、これを天然ガス網に注入すれば、既存のインフラが活用できる上、排出される CO<sub>2</sub> をエネルギーとして再利用できるため、CO<sub>2</sub> 排出量削減に貢献すると期待されている。

なお水素は、そのままでも数パーセント程度であれば既存の天然ガス網 (都市ガス網) に混入させることが可能と考えられているが、メタン化させれば無制限に注入できるとも考えられる。

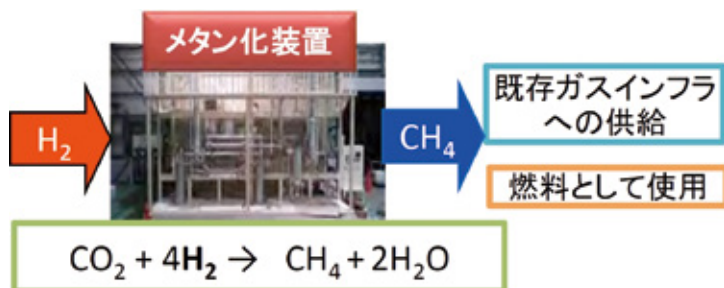


図 6-41 メタン化装置

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「水素の製造、輸送・貯蔵について」

第5回水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ（2014年4月14日）【参考資料 [3]】

## (2) 課題

水素のメタン化のためには、CO<sub>2</sub>が必要であり、低コストで効率のよいCO<sub>2</sub>分離技術が求められる。

また、メタン化のためにエネルギーロスがあるため、全体システムの経済性を検討する必要がある。

## (3) 適用事例

欧州では、風力発電などの再生可能エネルギー由来電力による水素を活用する Power-to-Gas プロジェクトが多く実施されている。特にドイツでは、北部に導入された風力発電からの電力を、南北間のグリッド接続が不十分であることから、需要地である南部地域に送電することができないという背景のもと、再生可能エネルギーの余剰電力の有効活用の観点から、政府としても実証研究を進めている。

ドイツの Power-to-Gas プロジェクトでは半数程度が水素をメタン化し、ドイツ全土に張り巡らされた天然ガス網に注入するプロジェクトとなっている（図6-42）。

なおドイツでは、CNG車に供給する天然ガス品質を維持するため、水素の天然ガスの混入は2 vol%までしか認められていない。このことも水素をメタン化させる意義の一つになっている。



図 6-42 ドイツの Power-to-Gas プロジェクト (▲がメタン化プロジェクト)

出典：ドイツ連邦交通デジタルインフラストラクチャー省

「Power-to-Gas (PtG) in transport – Status quo and perspectives for development」

## 6-4 水素供給技術

水素を最終利用用途に供給するためには、水素の特質と用途に適した水素品質・圧力などの定められたプロトコルに準じて、安全かつ確実に供給することが必要である。特に燃料電池自動車に対して水素を供給するには、通常は水素ステーションが必要である。

### 6-4-1 原理と特徴

#### (1) 水素ステーションの種類

水素ステーションの代表的な方式としては、水素を水素ステーション外で製造して、水素トレーラーなどで水素ステーションまで輸送してくるオフサイト型と、都市ガスやLPGなどを原料として水素ステーションに設置した水素製造装置で製造して供給するオンサイト型に分けられる。両方式は水素ステーションへの水素供給方法が異なるだけであり、その後の燃料電池自動車への水素充填までのフローは共通である。図6-43に両方式の水素ステーションの構成を示す。

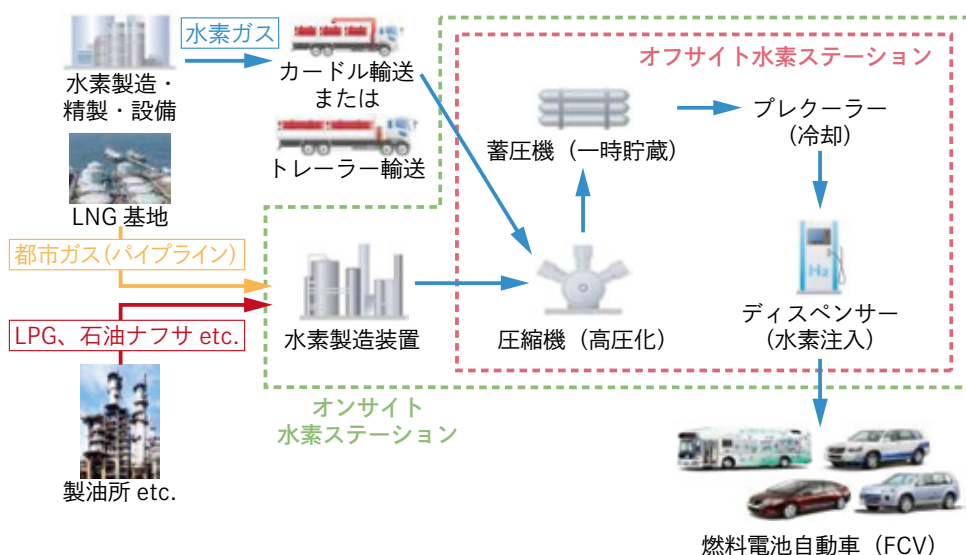


図6-43 水素ステーションの構成

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「燃料電池自動車について」  
第3回水素・燃料電池戦略協議会（2014年3月4日）【参考資料 [3]】より NEDO 作成

その他には、液化水素オフサイト型ステーション（例 有明ステーション）や移動式ステーション、簡易型ステーションなどがある。

## (2) 充填技術

水素ステーションにおける充填方式としては、従前より行われている水素ステーションの蓄圧器と燃料電池自動車の水素タンクの圧力差による差圧充填方式と、圧縮機で昇圧した水素を蓄圧器に貯めることなく直接に燃料電池自動車の燃料タンクに注入する直接充填方式がある（図6-44）。また、この2つを併用する充填方式も提案されている。

一般には直接充填方式が、高压蓄圧器（80 MPa 級）を不要化することができ、低コスト化につながると考えられるが、その場合は2台目の圧縮機をより大容量で高压吐出が可能な仕様にする必要があり、さらなる技術開発が必要と考えられる。

充填においては、最高充填圧力 87.5 MPa という高压でガソリン車と同等の3分程度で充填を行うと、燃料電池自動車の水素タンクの温度上昇が起きるため、車載タンクの許容最高温度（85℃）を超えないように水素ガスの温度を予め-40℃程度の低温にしてから供給を行うプレクールが必要である。

また、充填の際に、水素ステーションと燃料電池自動車との間で赤外線通信を行い、燃料電池自動車の水素タンクの状態を確認しながら、流量と圧力を制御しつつ充填を行う技術（通信充填、充填プロトコル）も必要である。

これらの充填技術については、ISO（International Organization for Standardization）などで世界的に標準化・基準化が行われている。

## (3) 計量管理技術

2015年からの水素供給インフラの先行整備にあたり、燃料電池自動車ユーザーに対する

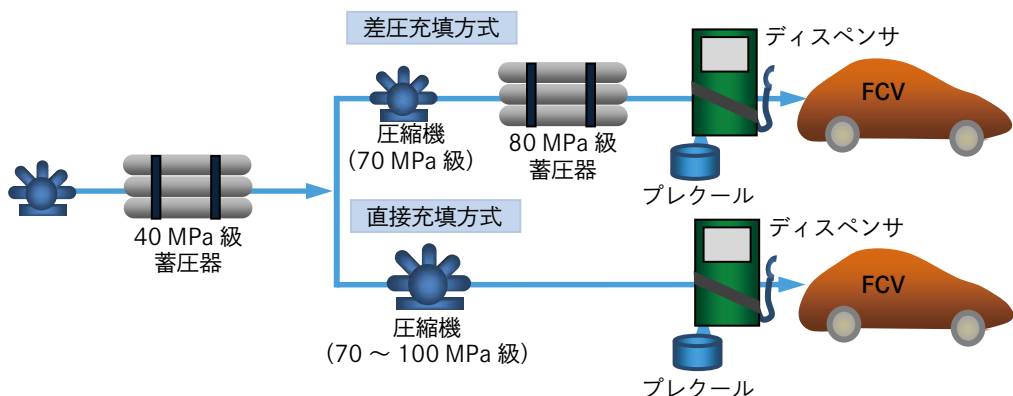


図6-44 水素ステーションにおける充填方式

出典：各種資料より NEDO 作成



公平・公正な水素販売取引を担保するため、水素流量計量の適切な管理が必要となっている。

そのためには、コリオリ式流量計単体のみならず、ディスペンサーを含めた計量システム全体の管理が必要である。また、近年 SAE (Society of Automotive Engineers) 国際規格で定められた充填プロトコル (充填手順) に準拠した充填に伴う流量をベースにすることが必要である。

重量 (質量) 法は、計量精度の評価を車両への水素充填の代わりに、試験容器に水素を充填して充填前後の重量差と、水素ディスペンサーで表示する充填積算量を比較する手法であり、今後整備される水素供給インフラに適用できる計量管理方法として期待される。

重量測定の特レーサビリティは既に確立しているが、70 MPa 級と高圧化して重量増加した試験容器への水素充填においては、充填する水素の重量比率が小さいこと、さらに屋外測定のため風などの影響があり、いかに高い検証精度を得られるかが課題である。

マスターメーター法は特レーサビリティの取れたマスターメーター (コリオリ式) を用いて、水素ディスペンサーが計測した水素充填量とマスターメーターの計測した水素充填量を比較する手法である。つまり、国家標準気体流量校正設備を水素ステーションでの高圧・大流量域まで範囲を拡大して校正可能なノズルを製作し、これによってマスターメーターを校正して、もって水素ステーションのコリオリ式水素流量計を校正する方法である。3%台の精度を確保することを目標に開発が進められている。

#### (4) 品質管理技術

水素供給インフラの整備にあたっては、高純度水素燃料の適正かつ安価・簡便な品質管理を実施し、トラブルなく安定した品質の水素燃料を燃料電池自動車に供給することが必要である。

水素燃料の品質標準として、ISO 国際規格 (ISO14687-2) が2012年12月に正式成立しており、日本の水素ステーションはこの ISO 国際規格を遵守して水素供給を行っていくことになる。

しかしながら、ISO 国際規格においては水素純度の規定や不純物濃度規定が定められているのみであり、水素品質測定の詳細、頻度などの品質管理に関する規定が記載されていない。また、我が国では水素・燃料電池実証プロジェクト (JHFC-1)、燃料電池システム等実証研究 (JHFC-2) 及び地域水素供給インフラ技術・社会実証 (JHFC-3) の実証研究において、水素燃料の品質分析を実施してきたが、あくまで実験的であり、水素分析に専門知識が必要であること、かつ分析コストが高いことから、実際の水素ステーションへの適用は現実的ではない。2015年以降の燃料電池自動車及び水素供給インフラの普及期においては、これらの実証における水素分析よりも、より低コストかつ簡便な品質管理方法の確立が必要である。

さらに、現在の ISO 国際規格は、黎明期の燃料電池自動車及び水素供給インフラを前提



に作成されている。ISO 国際規格は定期的に改訂が行われており、燃料電池自動車及び水素供給インフラの普及初期に合致した、新たな国際規格の策定が必要である。

## (5) 関連機器開発

水素ステーションの技術開発では、これまで 35 MPa から 70 MPa へと充填圧力の高圧化が進められてきた。水素ステーションの構成要素である配管、蓄圧器、圧縮機、ディスペンサー、ノズル、ホースなどの主要機器についても、高圧化とプレクールに対応した技術開発が行われてきた。現状の 70 MPa までの運用圧力においては、1 年間のノーメンテナンスタンス性が確認されている。

## 6-4-2 課題

水素ステーションの機器は、それぞれに個別の課題と研究開発要素があるが、いずれも、国際的な基準・標準の動きと足並みをそろえる必要があるため、積極的に我が国が基準・標準分野をリードしていくことが期待される。

また、水素ステーションに関しては、我が国独自の規制もあり、引き続き規制見直しの推進と、海外との技術的調和が求められる（図 6-45）（再掲）。

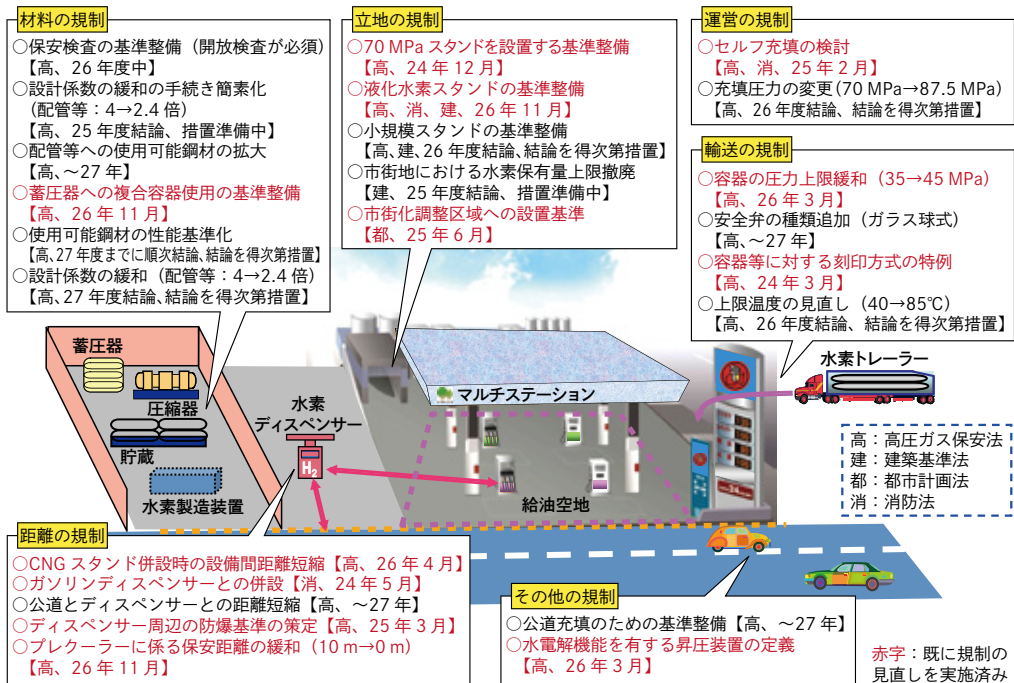


図 6-45 水素ステーションにおける各種規制の見直し（平成 26 年 11 月時点）（再掲）

### 6-4-3 適用事例

我が国では、水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発（WE-NET）、さらに水素・燃料電池実証プロジェクト（JHFC-1、JHFC-2）や水素供給・利用技術研究組合（HySUT）の実証研究にて、水素ステーションが建設・運用されてきた。

我が国では、2015年度までに100ヶ所の水素ステーションを、四大都市圏を中心に設置するという目標が打ち出されており、そのために商用水素ステーション（水素供給能力300Nm<sup>3</sup>/h以上）の展開が始まっている（「2-2-2 導入支援」参照）。

なお2014年7月中旬には、我が国で初めての商用水素ステーション（尼崎水素ステーション、オフサイト方式）が兵庫県尼崎市に完成している（図6-46）。



図 6-46 我が国で初めての商用水素ステーション（尼崎水素ステーション）

出典：岩谷産業ホームページ

## 6-5 水素利用技術

水素の利用技術としては、図6-47（再掲）に示すようなものが想定される。ここでは主要な水素利用技術について解説する。



図 6-47 水素利活用技術の適用可能性 (再掲)

出典：経済産業省「水素・燃料電池戦略ロードマップ」(2014年6月)【参考資料 [3]】より NEDO 作成

## 6-5-1 家庭用燃料電池

### (1) 原理と特徴

家庭用燃料電池システムは、都市ガスやLPG、軽油などを燃料として用い、改質装置により水素を発生させ、燃料電池スタックにて水素と酸素（空気由来）が反応することで発電を行うものである（図6-48）。

固体高分子形燃料電池（PEFC）システムの場合、改質装置は、水素製造で使用される水蒸気改質方式を使用して水素成分の多い改質ガスを生成し、含有するCOをシフト反応によってその濃度を低減する。さらに固体高分子形燃料電池（PEFC）の電極触媒のCO被毒による性能低下を抑制するために、CO選択酸化反応によって改質ガス中に含有するCOを選択的に二酸化炭素に酸化し、CO濃度を10ppm以下に低減した上で、燃料電池スタックに供給している。

固体酸化物形燃料電池（SOFC）の場合は、水素だけでなくCOも発電燃料として反応するため、改質装置としては改質器のみである。水蒸気改質反応で水素濃度が高くなった改質ガスを固体酸化物形燃料電池（SOFC）に供給している。

家庭用燃料電池システムの場合、水素製造プラントのように改質器内部の触媒のみを交換することは容易ではなく、燃料電池の触媒性能の低下をもたらす硫黄被毒を防ぐために高次に脱硫を行うことが必須である。プラントで使用されている水添脱硫方式を発展させ、水素添加量が少なく高深度の脱硫が可能な超高次脱硫方式や、ゼオライトなどに硫黄成分を吸着除去する吸着脱硫方式を採用している。

家庭用燃料電池システムでは、燃料電池ユニットでの発電の際に発生する熱を回収し、

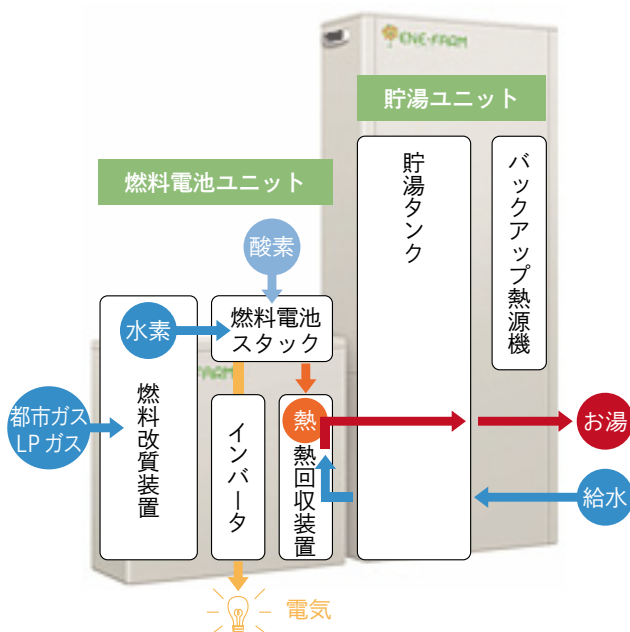


図 6-48 エネファームの仕組み

出典：燃料電池普及促進協会（FCA）「エネファームについて」  
より NEDO 作成

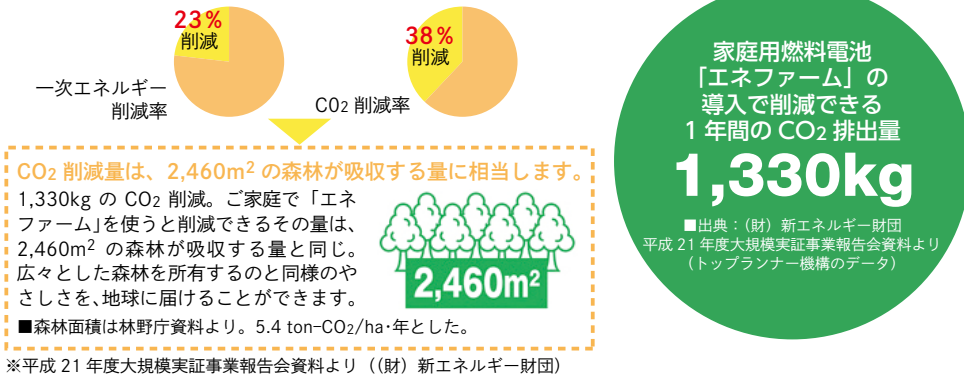
温水として貯湯槽に蓄え、家庭に電気及び温水の供給を行う、いわゆるコージェネレーション方式が採用されている。家庭用燃料電池で発電する電気と供給可能な温水熱量の比（電熱比）と、一般的な戸建て家庭における需要電力パターンと需要熱量のバランスを考慮し、国内においては、発電出力は 0.7 kW が適当とされている。しかし海外の多くの国においては、より大型の 1～3 kW クラスが適当とされている（ドイツなどでは、冬季における温水使用量が多く、ボイラー容量が大きいいため、日本国内向けに比較して大容量の貯湯ユニットを設置するシステム構成となる）。

エネファームの導入に伴う省エネ化と CO<sub>2</sub> 削減効果は、2009 年 1 月～12 月の大規模実証試験での通年データによると、一次エネルギー削減量は 12,230 MJ/年（18 L 灯油缶で 18.5 缶分）、CO<sub>2</sub> 削減量は 1,330 kg-CO<sub>2</sub>/年（2,460 m<sup>2</sup> の森林が吸収する CO<sub>2</sub> 量に相当）と見積もられている（図 6-49）。

2030 年に向けて、累計目標台数の 530 万台が普及すると、家庭部門における CO<sub>2</sub> 排出量を約 4%（年間約 700 万トン）削減する見込みである。

## (2) 課題

家庭用燃料電池システムのコスト低減は進んでいるが、国の補助金制度は 2015 年度で終了する予定のため、さらなる低コスト化が必要である。

●一次エネルギー削減率とCO<sub>2</sub>削減率図 6-49 エネファームによる一次エネルギー削減率とCO<sub>2</sub>削減率

出典：燃料電池普及促進協会 (FCA) 「エネファームについて」より NEDO 作成

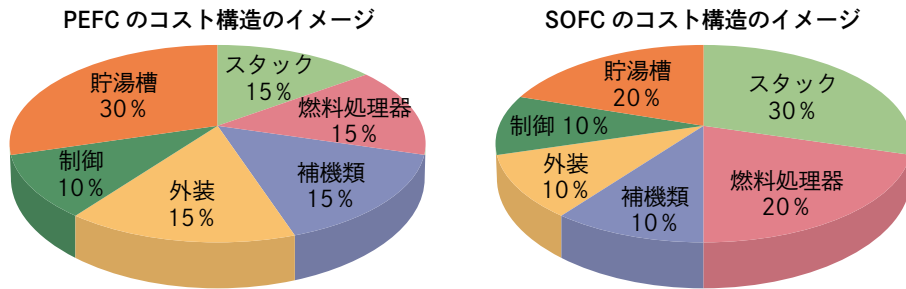


図 6-50 エネファームのコスト構造

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「家庭用燃料電池について」

第2回水素・燃料電池戦略協議会 (2014年2月3日より引用) 【参考資料 [3]】より NEDO 作成

固体高分子形燃料電池 (PEFC) システムについては燃料電池スタックの低コスト化が進んでおり、システム全体に占める燃料電池スタックの割合が15%となっているが、固体酸化物形燃料電池 (SOFC) システムでは燃料電池スタックのコストがまだ30%を占めており、コスト低減余地があると考えられる (図 6-50)。それぞれのシステムにおいてコスト低減効果が大きい分野、例えば固体高分子形燃料電池 (PEFC) システムにおける燃料処理機など、固体酸化物形燃料電池 (SOFC) システムにおける燃料電池スタックなどに集中して低コスト化の取り組みを進めることが重要である。

経済性を向上させるためには、対象ユーザーを拡大することで量産効果を高めることも重要である。現在は新築の一戸建てへの導入が多いが (図 6-51)、ユーザー拡大のためには、都市部に多い集合住宅への展開が必要であり、より小型・省スペースなユニット開発

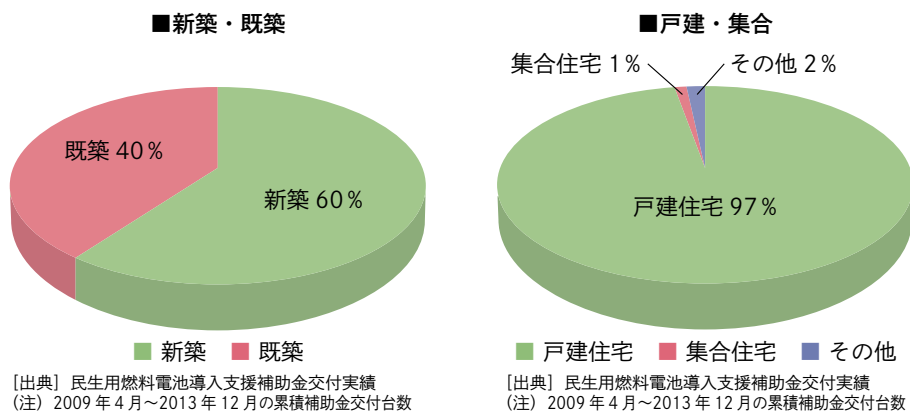


図 6-51 エネファームの設置状況 (民生用燃料電池導入支援補助金交付実績による)

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「家庭用燃料電池について」

第2回水素・燃料電池戦略協議会 (2014年2月3日より引用)【参考資料 [3]】より  
 NEDO 作成

が必要である。既存住宅への導入拡大も視野に入れると、導入した場合のユーザーメリットをより明らかにする必要もある。

さらに海外展開に向けての国際標準化対応、国内の組成と異なる海外のガス組成への対応なども必要となる。

現在の家庭用燃料電池システムは、ガスを改質して水素を生成させ発電する改質型が大部分であるが、直接、水素を燃料とする純水素型燃料電池システムとすることで改質部分が不要となり、大幅な低コスト化が可能と考えられる。今後、燃料電池自動車用の水素ステーションの整備に伴い、市街にも水素供給インフラが整うことにより、純水素型家庭用燃料電池の利用が広がる可能性がある。その場合は、不足するお湯を沸かすためのバーナーの組み込みなど、全体的なシステム最適化や改質型エネファームとの使い分けなどが必要となる。

また、燃料多様化の観点では、燃料に灯油を使用することも視野に入れ、灯油の脱硫技術及び改質技術の開発も必要である。海外においては軽油を燃料として使用することが多く、灯油脱硫及び灯油改質技術を活用した燃料処理技術開発の適用も考えられる。燃料多様化に対応することで、災害時にも有効に活用できる家庭用燃料電池の可能性も拡大する。



### (3) 実用事例

すでに我が国は2009年より家庭用燃料電池システムが市場導入されており、2014年9月には累計販売台数が10万台を突破した。2016年度からは補助金なしでも市場が拡大できるまでのコストダウンが期待されている。






欧州では実証段階で、欧州連合の実証事業である ene. field プロジェクトで、2012～



表 6-7 海外における家庭用燃料電池の開発状況

PEFC タイプ		Baxi Innotech 	Elcore 
商品化状況		実証試験中	実証試験中
仕様	発電出力	1.0kW	0.3kW
	発電効率・ 総合効率	発電 34% 総合 96%	総合 98%

SOFC タイプ		CFCL 	Hexis 	Vaillant 	Buderus 	Junkers 
商品化状況		発売中	実証試験中	実証試験中	実証試験中	実証試験中
仕様	発電出力	0.5 ~ 1.5kW	定格 1kW	定格 1kW	定格 0.7kW	定格 0.7kW
	発電効率・ 総合効率	発電 ≤ 60% 総合 ≤ 85%	発電 30 ~ 35% 総合 95%	発電 35% 総合 80 ~ 90%	発電 45% 総合 90%	発電 45% 総合 90%

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「家庭用燃料電池について」

第2回水素・燃料電池戦略協議会（2014年2月3日より引用）【参考資料 [3]】

2017年にかけて12ヶ国で1,000台規模の実証を行うことになっている。ドイツでは水素・燃料電池技術革新プログラム（NIP）の一環としてCalluxプロジェクトを実施しており、2008～2015年にかけて560台の実証を行う計画である。

現在、日本のエネファームメーカーは積極的に海外展開を行っている。パナソニックは、Viessmann（ドイツ）と共同で国内向けの固体高分子形燃料電池（PEFC）システムをベースに、現地のガス組成や規制に適合したコージェネレーションシステムを共同開発し、2014年4月から販売を開始している。東芝燃料電池システムもBaxi Innotech（ドイツ）と提携し、2014年度中の欧州への市場投入を行う予定である。

固体酸化物形燃料電池（SOFC）システムでは、アイシン精機がRobert Bosch（ドイツ）と組み、ene.fieldに参画している。

なお、海外における家庭用燃料電池の開発状況を表6-7に示す。

## ■ 6-5-2 業務用・産業用燃料電池

### (1) 原理と特徴

家庭用燃料電池と同様に、都市ガスなどを燃料として用い、改質装置により水素を発生させ、燃料電池にて水素と酸素（空気より）が反応することで発電を行うものである。家

庭用が1 kW 程度の発電容量であるのに対し、業務用では数 kW から1 MW、産業用では数～数百 MW の発電容量となる。

業務用・産業用システムでは、起動停止耐久性や負荷追従性は家庭用より制約が少なくなるが、より高効率で長期耐久性が必要となる。

燃料電池の種類としては、通常はリン酸形燃料電池（PAFC）や熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC）、固体酸化物形燃料電池（SOFC）が用いられる。我が国は、現在は熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC）の商用化の実績はほとんどない。

## (2) 課題

米国や韓国においては、熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC）、リン酸形燃料電池（PAFC）、固体酸化物形燃料電池（SOFC）を用いた100 kW～2 MW 級システムの導入が、政府や自治体の補助制度もあり進んでおり、導入容量ベースでは日本国内の家庭用燃料電池に匹敵する市場となっている。定置用燃料電池産業における我が国の産業競争力の維持発展のためには、可能な限り早期に中・大容量燃料電池システムを市場投入することが重要となっている。

一方、現在の中・大容量燃料電池システムは、インシヤルコストや燃料コストも含めたランニングメリットでは国内ユーザーへの訴求力が不十分であり、一層の経済性の向上が必要である。そのためには発電効率と耐久性の向上が必要であり、さらには補機部品（BOP：Balance of Plant）のコストダウンや各種規制緩和などの環境整備も重要である。

現在、開発が進められている固体酸化物形燃料電池（SOFC）システムに関しては、中・大容量のセルスタックの耐久性・信頼性の向上、低コスト化、負荷追従性向上などが重要な課題となっている。

## (3) 実用事例

現在、多様なサイズとシステムの業務用燃料電池が国内において開発・実証段階にある（表6-8）。海外においても種々の燃料電池システムが開発・実用化されている（表6-9）。


国内においては、富士電機が100 kW のリン酸形燃料電池（PAFC）システムを2008年から販売を開始している。

小型システムに関しては、NEDO 事業で三浦工業が5 kW 級固体酸化物形燃料電池（SOFC）システムの技術実証を進めている。2020 年頃の初期導入までに、発電効率50% LHV 以上、9万時間以上の耐久性、発電システム100万円/kW 以下を目指している（図6-52）。今後、システムの実現に必要な課題を抽出して、商品の改良につなげていく予定である。

三菱重工業（現三菱日立パワーシステムズ）は、250 kW の固体酸化物形燃料電池（SOFC）とガスタービンと組み合わせたハイブリッドシステムを2017年の実用化に向けて開発中である。

海外においては100～200 kW のリン酸形燃料電池（PAFC）システムがDoosan Fuel Cell から、また200 kW の固体酸化物形燃料電池（SOFC）がBloom Energy（米国）から

表 6-8 業務用燃料電池システムの例（国内）

名称	5kW 級業務用 SOFC (仮) FC-5	15 式 250kW 導入機 (ハイブリッドシステム)	15 式 1MW 導入機 (ハイブリッドシステム)	FP-100i	ES-5700 Energy Server
メーカー	三浦工業	三菱重工	三菱重工	富士電機	Bloom Energy
外観					
定格出力 (kW)	5	250	1350	105	200
発電効率 (%-LHV)	48	55	55	42	50—60
総合効率 (%-LHV)	90	73 (温水) 65 (蒸気)	76 (温水) 68 (蒸気)	62	—
ユニット寸法 / 設置面積 (m/m <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> /kW))	0.7 × 1.1 × 1.8 / 0.8 (0.15)	12.0 × 3.2 × 3.2 / 40 (0.15)	24.0 × 5.0 × 3.2 / 120 (0.09)	2.2 × 5.6 × 3.4 / 12 (0.11)	9.1 × 2.6 × 2.1 / 24 (0.12)
運用方法	ベースロード コジェネ対応 可	ベースロード コジェネ対応 可	ベースロード コジェネ対応 可	ベースロード コジェネ対応 可	ベースロード コジェネ対応 可
備考	SOFC 実証中	SOFC 実証中	SOFC 計画中	PAFC	SOFC 拡張性 が高い
市場投入予定 時期	2017	2017	2018	商用化済	商用化済

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「業務・産業用燃料電池について」

第 2 回水素・燃料電池戦略協議会（2014 年 2 月 3 日）【参考資料 [3]】より NEDO 作成

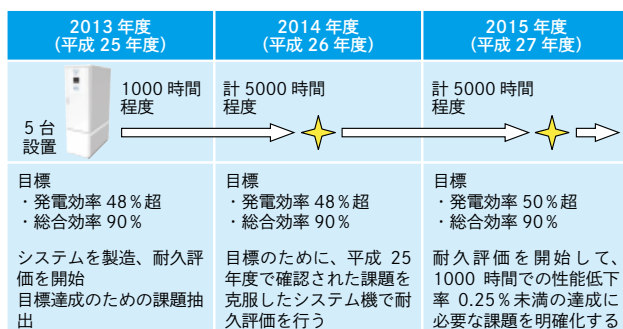
市場投入されている。Bloom Energy は、発電による電力のみを利用し、熱を利用しないモノジェネレーション型の固体酸化物形燃料電池（SOFC）で、北米で多くの企業に対して電力販売する形で 200 kW のシステムを市場導入している。2013 年 11 月には、日本のソフトバンクが Bloom Energy と合併会社を設立し、国内への導入を開始している。

表 6-9 業務用燃料電池システムの例（国外）

企業	Doosan Fuel Cell		Bloom Energy	Fuel Cell Energy	Ballard Power Systems	LG Fuel Cell Systems	GE
開発国	韓（米）		米（日）	米（韓）	加	米（韓）	米
形式	PAFC	PEFC	SOFC	MCFC	PEFC	SOFC	SOFC
発電容量	400 kW	5 kW	200 kW	300 kW 1.4 MW 2.8 MW	1 MW	—	—
現状	販売	販売	販売	販売	実証	開発	開発
タイプ	コージェネ	コージェネ	モノジェネ	モノジェネ	モノジェネ	—	—
発電効率 総合効率	41% 90%	40% 90%	50—60% —	47% —	40% —	—	—
備考	2014年に米 Clear Edge Power を買収		連結で拡張可 日本ではソフトバンクと合併	韓 Posco にライセンス	—	Rolls Royce と合併	ガスエンジン・ハイブリッド

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「業務・産業用燃料電池について」  
第2回水素・燃料電池戦略協議会（2014年2月3日）【参考資料 [3]】より NEDO 作成

実証スケジュールと内容



★最新スタック、補機類への交換と運転後分析（システムの増設も含む）

目標仕様

項目	2020年度 (平成32年度) 商品目標
燃料使用量	8.48 kW
スタック効率	59.0%
発電効率	50.0%
排熱回収効率	40.0%
総合効率	90.0%
耐久性	9万時間以上

図 6-52 5kW の SOFC システムの実証（NEDO 事業）

### ■ 6-5-3 ポータブル燃料電池

#### (1) 原理と特徴

携帯電話やスマートフォン、ワンセグテレビなどの移動体通信機器の普及が進むとともに、商用電源の確保が困難な停電時、災害時や非常時などでも、移動体通信機器への充電や電源供給の要求が高まっている。

ポータブル燃料電池は、これらの通信機器などのパーソナル機器への電源供給を想定した小型の燃料電池である。水素を含有する液体や固体を燃料とし、空気中に含まれる酸素と反応させることによって燃料電池発電を行なう。燃料電池の方式としては固体高分子形燃料電池（PEFC）か固体酸化物形燃料電池（SOFC）が用いられることが多い。多くの場合、燃料パックは水と反応して水素を発生させる粉末を固形化したものであり、燃料カートリッジは長期間保存可能なように設計されている。

二次電池に比較して長時間の連続使用が可能なことに加え、燃料供給をカートリッジ式などの交換方式にすることで、さらに長時間使用が可能になると想定される。また、ディーゼル発電機などに比較して静かであり、排気ガスがクリーンであるため、屋内での使用にも適しているといえる。

#### (2) 課題

燃料電池を発電するためには燃料供給が必要であり、燃料供給源を提案するとともに、既存の燃料を活用することの検討も必要である。

操作性を考え簡便でかつ高い安全性を確保しつつ、システムとして小型、低コスト化を実現する燃料供給方式を確立することが課題である。

#### (3) 実用事例

1990年代に、水素吸蔵合金を燃料タンクに使用した250W級リン酸形燃料電池（PAFC）や、カセットコンロ用ボタンポンペを燃料に用いた250W級固体高分子形燃料電池（PEFC）が開発された。2000年代には燃料にメタノール水溶液を用いた20W級ダイレクトメタノール形燃料電池（DMFC）も開発されている。

東芝は2009年10月に、燃料にメタノール水溶液を使用する2Wのダイレクトメタノール形燃料電池（DMFC）を発売した（図6-53）（2010年3月に販売終了）。

ローム、アクアフェアリー及び京都大学は、特別な加工を加えた水素化カルシウムに水を供給することにより水素を取り出す「固体水素源」を用いたポータブル燃料電池システム（出力200W）を開発している（図6-54）。

これらの企業・大学は、2013年度よりNEDO助成事業「固体水素源燃料電池を用いた充電機能付き非常用電源の開発と実証実験」において、実証試験を実施している。

産業技術総合研究所の先進製造プロセス研究部門 機能集積モジュール化研究グループは、固体酸化物形燃料電池（SOFC）の原理を活用し、電極の構造をナノレベルで制御す



図 6-53 ダイレクトメタノール形燃料電池 Dynario™ (ディナリオ)

出典：東芝ホームページ



**小型タイプ**  
出力:2.5W  
用途:モバイル機器の充電等

**高出力タイプ**  
出力:200W  
用途:災害用非常電源等

**長時間使用タイプ**  
出力:3W  
用途:地震・火山観測用電源等

図 6-54 固体水素源形燃料電池システム (ハイブリッド高出力タイプ)

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「燃料電池の新たな用途について」  
第4回水素・燃料電池戦略協議会（2014年3月26日）【参考資料 [3]】

ることにより、LPG（液化石油ガス）を直接内部改質可能な、マイクロチューブ SOFC を開発した（図 6-55）。このマイクロチューブ SOFC は、2005 年度から 2009 年度の NEDO 「セラミックリアクター開発」にて開発したものである。

産業技術総合研究所はこの技術を活用し、2013 年度から、岩谷産業、岩尾磁器工業とともに NEDO 事業において「マイクロ SOFC 型小型発電機」を開発中である。

海外においては、スウェーデンの myFC（水素含有固体燃料 2.5 W）、シンガポールの Horizon（水素吸蔵合金使用、2 W）、米国 UltraCell（メタノール燃料使用、50 W）などから製品が出ている（図 6-56）。



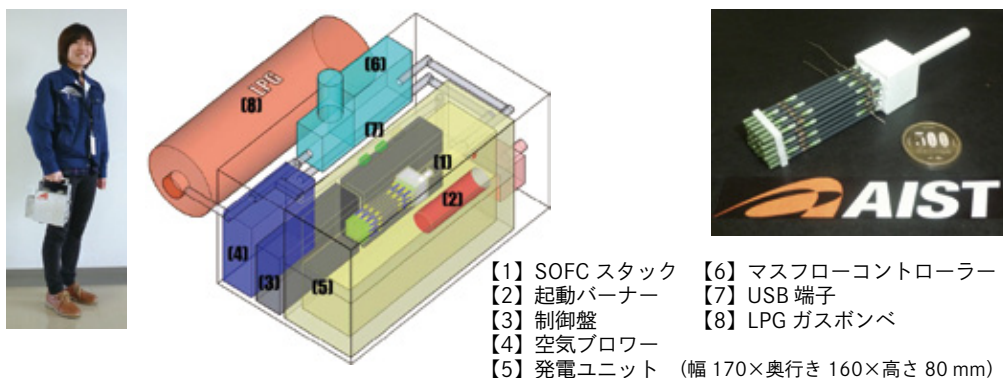


図 6-55 ハンディ燃料電池システム (出力 200 W) の外観と概念図、マイクロチューブ SOFC モジュール

出典：産業技術総合研究所資料より NEDO 作成



図 6-56 myFC charger

出典：myFC

## 6-5-4 燃料電池自動車

### (1) 原理と特徴

燃料電池自動車 (FCV) は、水素を燃料として車載し、取り入れた空気中の酸素と車載している水素により、燃料電池により発電を行い、それを動力源として走行する車である。モーターで走行するため、電気自動車の一種とも考えられ、欧米では FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) と呼ばれることも多い。走行時に排出されるのは水だけであるため、究極のエコカーとも呼ばれ、実際に走行する地域における自動車排気ガス低減と大気質改善に貢献すると考えられるほか、CO<sub>2</sub> フリーな水素で走行すれば、事実上、トータルでゼロエミッションな車両となる。

燃料電池自動車のシステムとしては、燃料電池スタック (出力 75 ~ 100 kW 程度)、高圧水素貯蔵タンク、コントロールユニット、空気取り入れコンプレッサーなどが組み合わ

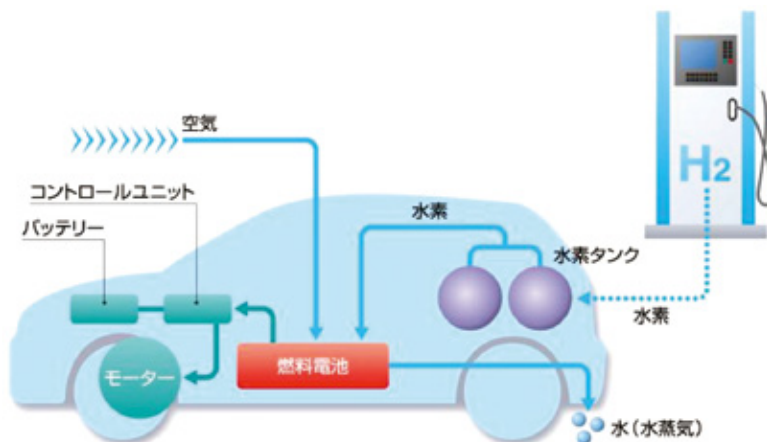


図 6-57 燃料電池自動車の仕組み

出典：水素供給・利用技術研究組合「燃料電池自動車」

されており、ブレーキ時のエネルギー回生及び加速時のアシストなどの目的のために二次電池も併用したハイブリットシステムが一般的である（図 6-57）。

自動車用には、車の限られた空間に搭載する必要があるため、燃料電池システムの小型化が必要である。そのため、単位容積あたりの出力（単位：kW/L）が大きい燃料電池である固体高分子形燃料電池（PEFC）が一般的に採用されている。

水素燃料としては、現在は高圧タンクに充填した水素を搭載する方式が一般的になっている。高圧タンクの充填圧力としては 35 MPa と 70 MPa の方式があるが、70 MPa の高圧タンクを搭載した車は、充填一回あたり 500 km 程度を超える走行が可能であり、現在は主流となっている。タンクは Type3（アルミライナーにカーボン FRP を巻いた複合容器）または、Type4（プラスチックライナーにカーボン FRP を巻いた複合容器）が使用される。

なお、固体酸化物形燃料電池（SOFC）は、起動のたびに高温にする必要があり、起動停止の使用回数が多い自動車用ではエネルギー効率の点から主動力源として用いるのが難しいが、セダンやトラックの補助電源としての応用が検討されている。

## (2) 課題

一般ユーザーに市場を拡大するためには一定の経済性を確保することが重要であり、そのためには燃料電池自動車の最大の課題は、コストの低減である。

車のコスト低減を図るには、燃料電池システム（燃料電池、補機部品、水素貯蔵システムなど）の大幅なコスト低減が必要である。また、車のコスト低減には量産効果の影響も大きく、市場の拡大を進めていくことも重要である。なお米国の試算では、現状技術でも 50 万台/年規模の量産があれば、燃料電池システムコストは 55 ドル/kW（75 kW システムの場合は 4,000 ドル）としており、量産が大幅にコスト低減に貢献することが示されている（図 6-58）。

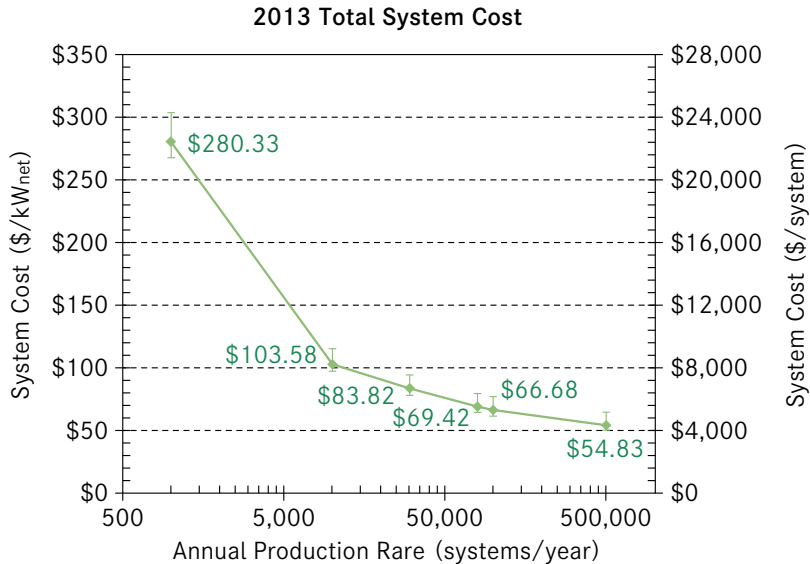


図 6-58 車両用燃料電池システムの量産時コスト試算

出典：Strategic Analysis, Inc. 「Fuel Cell Transportation Cost Analysis」  
(US DOE 2014 Annual Merit Review Meeting) より NEDO 作成

燃料電池のコスト低減には電極触媒の貴金属使用量の低減、高分子膜のコスト低減などの材料コスト低減と、燃料電池の単位容積あたりの出力を上げて燃料電池を小型化し、材料使用量を減らすという方策があり、それぞれの技術課題の解決が必要である。車載する高圧タンクについても使用する材料のコスト低減や製造方法の改良によるコスト低減が必要である。

燃料電池システムとしては、補機部品のコスト低減やシステムの簡素化によるコスト低減が必要である。燃料電池自動車に用いる固体高分子形燃料電池（PEFC）は 80℃程度の温度を上限として運転されることが多いが、この温度と外気温度との差で放熱を行う必要がある。この放熱条件は、従来の内燃機関を用いた自動車に比較して厳しく、放熱のためのラジエーターシステムが大型になってしまう。このため、ラジエーターシステムの小型化を狙って、より高い温度で燃料電池を運転することも課題となっている。100℃以上の温度で運転する場合は水の沸点以上の温度になってしまうため、燃料電池スタックにおけるプロトン伝導（H<sup>+</sup>）に必要な水をいかに保持するかが技術課題となる。

普及本格期においては、普通乗用車として消費者のニーズに合ったより小さな車種を拡大することと、タクシーや商用車など業務用車両への展開や、海外展開や認知度向上を通じて市場を拡大していくことが必要となる。タクシーや商用車などの業務用車両は一般乗用車に比べ生涯走行距離が長くなるため、より一層の耐久性、信頼性の確保も必要である。合わせて、車両としての魅力の向上（性能に加え、環境性能や新規性の PR など）が必要となる。

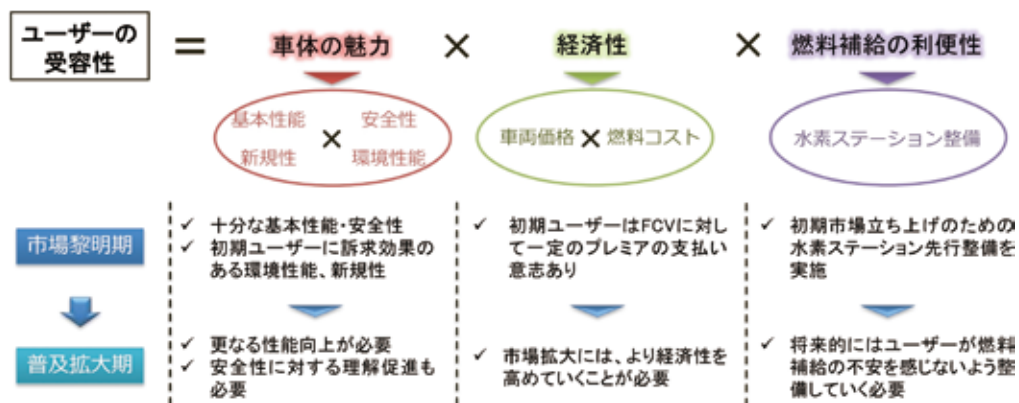


図 6-59 燃料電池自動車の消費者にとっての受容性

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「燃料電池自動車について」  
 第3回水素・燃料電池戦略協議会（2014年3月4日）【参考資料 [3]】

消費者は経済性についても敏感であり、車のインシヤルコストの低減とともに、運用コスト（燃料代）のレベルも重要な購買の検討要因となる。充填する水素についても、従来のガソリン車やハイブリッド車と遜色のない経済性（km 走行当たりの燃料代が同等、あるいは安価であること）が求められる。

また、多くの消費者はインフラの不足を懸念していると思われることから、確実な水素インフラ整備（水素ステーションの設置拡大）を進め、利便性を高めていくことが必要になる。

以上のような取り組みを総合的に進めることで、燃料電池自動車に対するユーザーの受容性も向上していくと思われる（図 6-59）。

### (3) 実用事例


すでに複数の自動車メーカーが燃料電池自動車の量産車やそのコンセプトカーを発表している（表 6-10）。トヨタ自動車は 2014 年 12 月 15 日に日本国内で“MIRAI”を発売し、2015 年夏には欧米で販売開始すると発表している。国内の販売価格は約 720 万円で日本国内の販売目標は年間 400 台と発表している（図 6-60）。本田技研工業も 2015 年度中の販売開始を発表しており、日産自動車は Daimler、Ford との共同開発を通じて、世界初の手ごろな価格の量産型燃料電池車を早ければ 2017 年に発売予定としている。

Hyundai は 2014 年 5 月にロサンゼルスで燃料電池自動車のリース販売を開始しており、頭金 3,000 ドル、月 499 ドル（水素価格込）としている。

普及台数に関しては、カリフォルニア州は 2015～2017 年において 5 万台を予想しており、ドイツでは 2023 年に 50 万台規模を、英国では 2030 年に 160 万台規模を予想している（表 6-11）。

また、災害時には動く電源車としての機能も期待されている。

表 6-10 燃料電池自動車量産車・燃料電池自動車コンセプトカー

トヨタ FCV “MIRAI”	ホンダ FCV CONCEPT	Hyundai Tucson FCEV
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2014 年 12 月 15 日 国内市販開始</li> <li>・ 水素：70 MPa 対応</li> <li>・ 航続距離約 650 km</li> <li>・ 4 名</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2015 年度市販開始</li> <li>・ 水素 70 MPa 対応</li> <li>・ 航続距離 480 km 以上</li> <li>・ 5 名</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2014 年に米国でリース開始</li> <li>・ 水素 70 MPa 対応</li> <li>・ 水素を無料提供</li> </ul>
		

出典：各種資料より NEDO 作成



図 6-60 トヨタ自動車の燃料電池自動車 MIRAI の記者発表

出典：トヨタ自動車ホームページ

表 6-11 各国・地域の燃料電池自動車普及目標・予測

国・地域	予想・目標	根拠
米国カリフォルニア州	2017 年：5 万 3000 台	自動車メーカーへのアンケートに基づく
ドイツ	2023 年：50 万台 2030 年：180 万台	次期 NIP 計画案「NIP 2.0」 (2013 年 6 月)
英国	2030 年：160 万台	UK H2 Mobility Phase 1 Report (2013 年 4 月)
韓国	2020 年：10 万台	グリーン成長委員会「世界 4 強への跳躍：グリーンカー産業発展戦略と課題」 (2010 年 12 月)

出典：各種資料より NEDO 作成



### 6-5-5 燃料電池バス

#### (1) 原理と特徴

基本的に燃料電池自動車と同じ仕組みであり、燃料電池としては固体高分子形燃料電池(PEFC)が用いられているが、より大きな出力が必要となる。また水素燃料についても、燃料電池自動車と同様に高圧タンクが用いられている。高圧タンクは一般的にCNGバスと同様に屋根の上に搭載されることが多い。

欧州・米国では、一般にバス車体メーカーが市販ディーゼルバスを燃料電池バスに改良して販売することが多く、燃料電池システムはBallard Power Systems(カナダ)のものを搭載している。

#### (2) 課題

燃料電池自動車と同様に、コストが課題である。初期のコストはかなり高いと思われ、燃料電池システムのコスト低減とともに、燃料電池自動車のシステムとの共有化によるコスト低減が必要である。燃料電池バスは防災対策・レジリエント化などの視点から、自治体主体での導入が望まれる。

また、高速バスなどの長距離の都市間輸送用のバスに適用を拡大していくためには、長時間連続での高負荷条件の使用や生涯走行距離がより長距離となることから、燃料電池システムのより一層の耐久性、信頼性の向上が必要である。

#### (3) 実用事例

欧米では、すでに日常の路線バスとして使用されている例が多い。例えば、AC Transit(米国、サンフランシスコ)、BC Transit(カナダ、バンクーバー)などの公共バス会社は数十台規模で日常の路線サービスを提供している。欧州では、燃料電池バス実証プログラムCHICを通じて、Daimlerの燃料電池バス37台が試験運行されている(表6-12)。

我が国では、日野自動車とトヨタ自動車が共同で2003年に燃料電池バス「FCHV-BUS2」を8台開発し、これまで多様な用途に利用されてきた。同バスは2003年8月から2004年12月にかけて、東京都の都バスで営業運行試験を実施、その後は2005年の愛・地球博で会場のシャトルバスとして利用され、会期中に延べ100万人を運んでいる。さらにJHFCプロジェクトの一環として中部国際空港にて営業運行を実施、羽田空港と東京都心(新宿)を結ぶ空港リムジンバスや新関西国際空港におけるターミナルバスとして活用されている(表6-13)。

JHFCプロジェクトの中部国際空港周辺地域実証試験の時に実施した利用者アンケートでは、多くの人が好意的な評価をしており、燃料電池バスが燃料電池技術・水素技術に対する社会受容性を高めることに貢献する可能性もある(図6-61)。

日野自動車とトヨタ自動車は、トヨタ自動車の燃料電池自動車技術を応用した新型燃料電池バスを2016年に販売する予定である。






表 6-12 海外の燃料電池バスの実証結果

	米国 (カリフォルニア州)	欧州 (ハンブルグ、ロンドン等)	韓国
プロジェクト名称	Zero Emission Bay Area (ZEBA) 	Clean Hydrogen In European Cities (CHIC) 	Fuel Cell Electric Vehicle demonstration and evaluation program 
内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2006年からサンフランシスコ周辺で実証を開始。</li> <li>・12台の路線バスが運行中。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2010年から欧州の各地で実証を開始。</li> <li>・37台の路線バスが運行中。2016年までに26台を追加予定。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2006年から2010年にかけて実証を実施。</li> <li>・4台のシャトルバスが運行。</li> </ul>
政府支援	<ul style="list-style-type: none"> <li>・連邦政府： <ul style="list-style-type: none"> <li>—資金支援（エネルギー省（DOE）、国家公共交通局（FTA））</li> <li>—データの分析支援（国立再生可能エネルギー研究所（NREL））</li> </ul> </li> <li>・州政府： <ul style="list-style-type: none"> <li>ゼロエミッション車導入の規制</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・欧州委員会 Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) がプロジェクト総額8200万ユーロのうち、2600万ユーロを補助。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・政府はプロジェクト総額4660万ドルの半分を補助。</li> </ul>

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「燃料電池の新たな用途について」  
第4回水素・燃料電池戦略協議会（2014年3月26日）【参考資料 [3]】

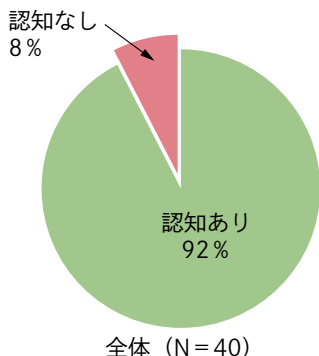
表 6-13 我が国の燃料電池バスの実証

空港リムジンバス	空港ランプバス	ターミナル連結バス
 東京空港交通（株）	 ANA 中部空港（株）	 新関西国際空港（株）
羽田空港⇄ 新宿駅西口／箱崎 (130 km/日)	旅客ターミナル⇄ 旅客機 (20～30 km/日)	エアロプラザ⇄ LCCターミナル (14往復・77 km/日)
2011.4～2013.9 計40,000 km 走行 (2台のうち、より長期間運 航されたバス)	2011.4～2013.8 計12,500 km 走行 (2台のうち、より長期間運 航されたバス)	2011.4～運行中 計7,700 km 走行 (2013.12までの実績)
高速道路走行あり	—	—

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「燃料電池の新たな用途について」  
第4回水素・燃料電池戦略協議会（2014年3月26日）【参考資料 [3]】

- ◆燃料電池自動車の認知率は非常に高い。(全体の92%)
- ◆燃料電池バスの総合評価は非常に高い。(とても良い+良い=92%)

Q3.「燃料電池自動車」という言葉を見聞きしたことがありますか？



Q8.「燃料電池バス」について、お気持ちに一番近い評価をつけてください。(総合評価)

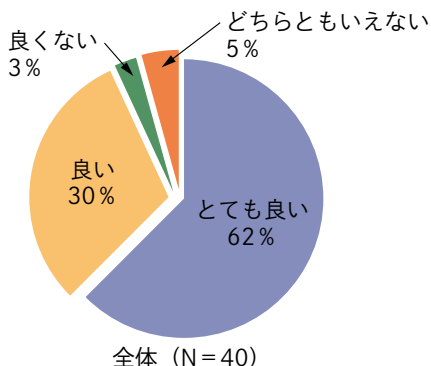


図 6-61 燃料電池バス利用者のアンケート結果

出典：JHFC プロジェクト「燃料電池バス運行実証試験」(2007年3月12日)より NEDO 作成

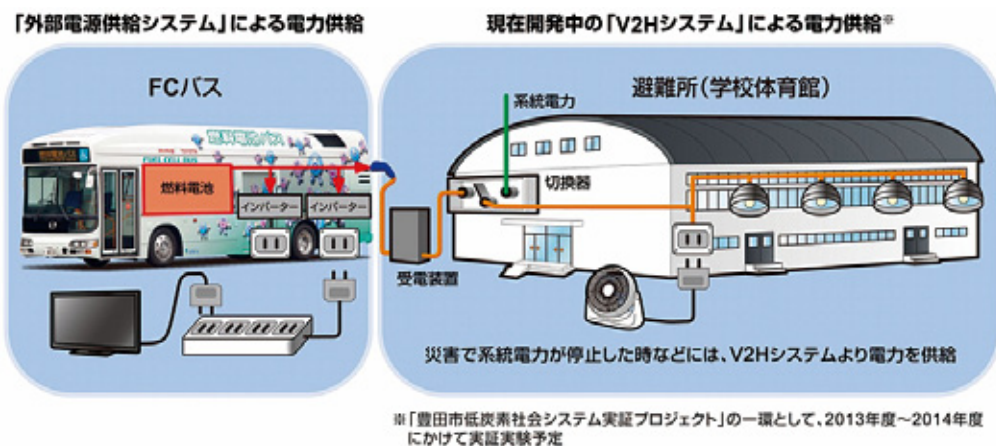


図 6-62 燃料電池バスの外部電源供給機能・V2Hシステムによる電力供給のイメージ

出典：トヨタ自動車「トヨタ自動車、燃料電池バスの外部電源供給システムを開発」(2012年08月31日)

また、動く電源車として期待される場所も大きい(図6-62)。

### 6-5-6 燃料電池フォークリフト

#### (1) 原理と特徴

燃料電池フォークリフトは排気ガスを排出しないため、倉庫・工場での作業における



図 6-63 電動フォークリフトから燃料電池フォークリフトへの置き換えのメリット

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「燃料電池の新たな用途について」  
第4回水素・燃料電池戦略協議会（2014年3月26日）【参考資料 [3]】より NEDO 作成

CO<sub>2</sub> 排出量を削減することが期待される。また、環境汚染物質を放出しないため、閉鎖された作業空間の大気汚染を防ぐことも可能である。

ゼロエミッションなフォークリフトとしては蓄電池（鉛蓄電池）式フォークリフトも考えられるが、図 6-63 に示すような観点から燃料電池フォークリフトのメリットも大きい。鉛蓄電池の交換に比べて、水素充填は時間が短く、作業時間を節減できるメリットがある。鉛蓄電池は放電するに従い出力も低下するが、燃料電池は水素残量が低下しても出力が一定のままである。さらに鉛蓄電池の購入、保管及び処分が不要であり、保守コスト削減の期待がある。

## (2) 課題

我が国では、屋内での水素供給設備について例示基準はなく、基本的に水素ステーションの基準に準じてしまうため、通常の水素ステーション並みに保安距離（離隔距離）を大きくとる必要がある。また、閉鎖空間の水素設備の要件（換気など）に配慮する必要がある。

現状で燃料電池フォークリフトは 35 MPa システムなので、70 MPa の燃料電池自動車用水素ステーションとは別のシステムを設置する必要がある。

また、倉庫や配送センターで活用する場合、2 交代制以上で稼働する施設でないと短時間燃料充填のニーズが少ないと考えられる。

## (3) 実用事例

米国では、リーマンショック後の刺激策の一環として 2010 年頃に燃料電池フォークリフ

トの導入が本格化、現在は約4,000台が稼働中である。例えば、サウスカロライナ州のBMWの工場では、総数275台の燃料電池フォークリフトが運用されている。

燃料電池ユニット大手は米国Plug Power（フランスAir Liquideが出資）である。初期には導入補助金と税還付による優遇措置があったが、現在は税還付による優遇のみとなっている（2016年まで）。

ドイツでは、BMWライプチヒ工場で燃料電池フォークリフトによる実証実験「H2 IntraDrive」がドイツの水素燃料電池技術革新プログラム（NIP）の一環として行われており、Linde（Linde Material Handling）が水素供給を、ミュンヘン工科大学が環境面での効果の評価を行っている（図6-64）。また、欧州プロジェクトではフォークリフト実証であるHyLiftプロジェクトを実施して実証を進めている。このように、欧米では燃料電池フォークリフトの導入が進んできている（図6-65）。

日本では、北九州水素タウンで燃料電池フォークリフト2台の実証実験が2012年12月～2014年3月に行われた。また、関西国際空港では「KIXスマート愛ランド水素グリッドプロジェクト」を実施する予定で、2014～2015年度にかけて豊田自動織機製燃料電池フォークリフト2台（図6-66）を導入し、岩谷産業が水素供給施設などの水素インフラを整備する予定である。

## 6-5-7 燃料電池に関わる基盤技術

### (1) 原理と特徴

固体高分子形燃料電池（PEFC）は、家庭用燃料電池、燃料電池自動車、燃料電池バスなどに用いられている。これは電解質（固体高分子）と電極触媒から構成される膜電極接合体（MEA：Membrane Electrode Assembly）に、水素と酸素を供給することで発電を



図6-64 BMWライプチヒ工場での燃料電池フォークリフト実証実験「H2IntraDrive」

出典：Linde「Launch of H2IntraDrive project：Sustainable intralogistics, sustainable production」



図 6-65 海外における燃料電池フォークリフトの導入状況

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「燃料電池の新たな用途について」  
第4回水素・燃料電池戦略協議会（2014年3月26日）【参考資料 [3]】より NEDO 作成



図 6-66 豊田自動織機製燃料電池フォークリフト

出典：豊田自動織機

行うものである。電極触媒には一般的には貴金属である白金が用いられている。作動温度は 60～80℃程度であることが多い。

固体酸化物形燃料電池 (SOFC) は、定置用燃料電池が主な用途であり、家庭用から業務用・産業用まで、幅広い容量のシステムの開発が行われている。このセルは、イットリア安定化ジルコニア (YSZ) などの電解質と電極触媒とで構成され、そのセルを合金もしくはセラミックスのインターコネクタにより複数個接続して所定の発電出力を得るもので



ある。作動温度が650～900℃程度と高温であることから、反応性が高く、電極触媒に高価な貴金属が不要であり、天然ガスなどの化石燃料を用いた場合でも発電効率が高いなどの特徴を有する。

## (2) 課題

### ① 全体的な課題

家庭用などの定置用燃料電池は10年程度以上の製品寿命が要求されるため、長時間運転の耐久性・信頼性が必要である。一方、燃料電池自動車では、自動車の起動停止や加減速に伴う急速な出力変動サイクルに対する耐久性・信頼性が重要となる。

こうした用途ごとに要求される様々なレベルの耐久性・信頼性を確保しつつ、コスト低減を図ることが、燃料電池技術の本格普及へ向けた課題である。加えて、システムの高効率化、車への搭載性向上やシステムのコスト低減につながる小型・高出力密度化、セルや周辺部材の量産技術なども重要課題である。

NEDOはこれらの諸課題の解決を目的として技術開発を進めている。以下、その取り組み例を紹介する。

### ② 貴金属使用量の低減：電極触媒の低白金化技術（PEFC）

電極触媒の白金使用量を低減させるため、白金の粒子径を制御して反応効率を上げる試みや触媒粒子の表面にのみ白金を薄く付けるコアシェル構造の触媒が検討されている。

白金や白金合金を、カーボン担体に均一かつ任意の粒子径に制御して担持する技術（ナノカプセル法）が開発されている（図6-67）。この新規担持法により調整した触媒は、標準的な触媒に比べて、自動車の運転状況を模擬した耐久試験において、より高い耐久性向上を示すことが確認されている。

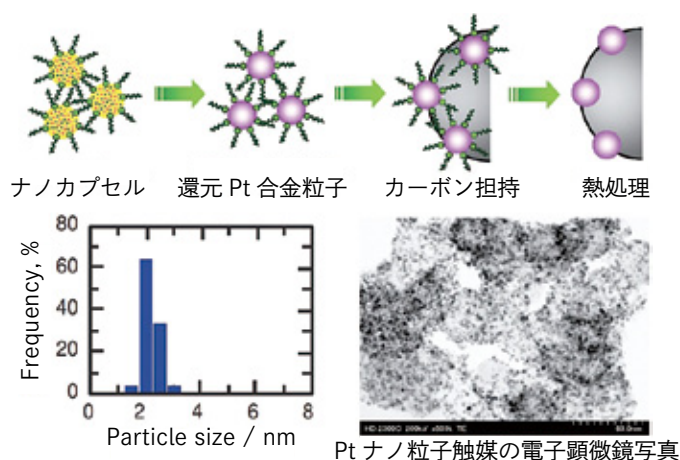


図6-67 ナノカプセル法の概念と開発触媒の粒子分布

出典：山梨大学 燃料電池ナノ材料研究センター パンフレットより  
NEDO 作成



一方、コアシェル法は、コアとなる部分を白金とは異なる金属とし、その周りを1～2原子層の白金で覆うことによって、低白金化と高活性化を両立させる技術である（図6-68）。現在までに、標準的な触媒に対し、触媒活性を6倍程度に向上させる技術が見出されている。

### ③ 貴金属使用量の低減：非貴金属触媒（PEFC）

白金などの貴金属を使用しないカソード触媒として、窒素・炭素を主成分とするジルコニウムやタンタルなどの酸化物を主成分とする酸化物系非貴金属触媒（図6-69）や、カーボン主成分とするカーボンアロイ触媒（図6-70）の検討が行われている。現在までに、どちらも純酸素／純水素系の単セル評価において、白金系標準触媒と同レベルの初期性能が見出されている。

### ④ 膜・電極接合体中の構造・反応・物質移動解析（PEFC）

燃料電池の発電性能は、燃料電池の電気化学反応が生じるMEAのところでいかに反応に寄与するガス（水素、空気）、水を適切に分布させるかに依存している。膜・電極接合体（MEA）材料の形態・機能の特性を的確に計測・解析する手法とガス（水素、空気）、水の物質移動現象の解明を進め発電性能向上への設計指針を提案へつなげる開発が進められている。

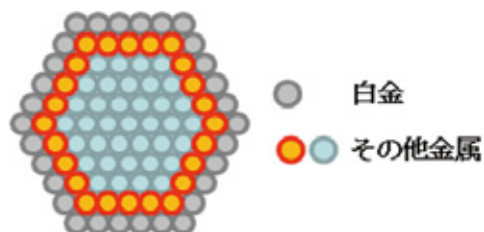


図 6-68 コアシェル構造の概念図

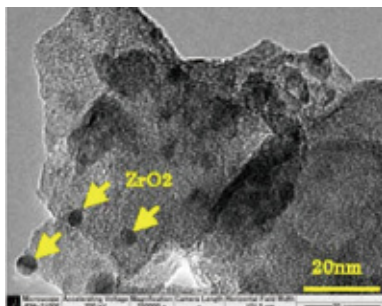


図 6-69 Zr系酸化物非貴金属触媒

出典：NEDO「固体高分子形燃料電池実用化推進技術開発／基盤技術開発／酸化物触媒」平成24年度分中間年報

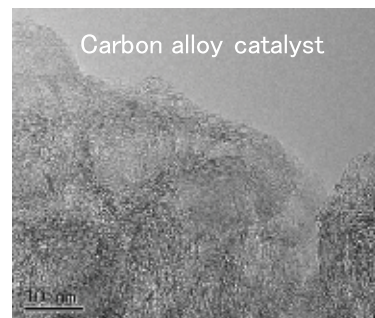


図 6-70 カーボンアロイ触媒

出典：NEDO 燃料電池・水素技術開発平成22年度成果報告シンポジウム平成22年度要旨集

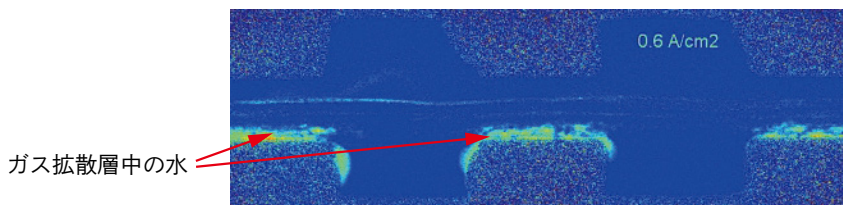


図 6-71 発電中セル内に滞留する水の可視化

出典：NEDO「固体高分子形燃料電池実用化推進技術開発／基盤技術開発／MEA 材料の構造・反応・物質移動解析」平成 25 年度分中間年報

一例として燃料電池セル中での水分分布計測の結果を図 6-71 に示す。運転中に水がどこに多く分布しているかがわかり、材料構成との関係からセル構造、MEA 構造などへの最適化に活用されている。

### ⑤ 耐久性迅速評価方法の開発 (SOFC)

固体酸化物形燃料電池 (SOFC) エネファームの本格普及、及び業務用・産業用固体酸化物形燃料電池 (SOFC) システムの実現のためには、高耐久性と低コストを両立したセルスタックが必須である。

日本国内ではセラミックスメーカーなどが様々なタイプのセルスタック開発を進めてい

表 6-14 耐久性迅速評価方法の開発において検討中の SOFC セルスタック一覧

スタック	第 1 グループ		第 2 グループ	第 3 グループ			
	筒状 平板形	円筒 横縞形	小型円筒形	平板形	筒状 横縞形	一体 焼結形	
材 料	空気極	LSF-base	LSCM	LSCF	LSCF	LSCF	LSCF
	中間層	DC	SDC	None	GDC	GDC	GDC
	電解質	YSZ	YSZ	LSGM	YSZ	YSZ	ScSZ
	燃料極	Ni/YSZ	Ni/YSZ	Ni/CeO <sub>2</sub>	Ni/YSZ	Ni/YSZ	Ni/ScSZ
運転温度	700℃	900℃	630℃	700℃	750℃	750℃	
スタック外観							

出典：各種資料より NEDO 作成

るが、その開発サイクルの短縮と効率化を図るため、耐久性迅速評価方法の開発を行っている。熱力学的・化学的・機械的解析、三相界面微細構造解析などを高度化し、加速劣化試験やシミュレーション技術などと複合させることにより、比較的短時間の耐久試験における SOFC の微小な劣化現象を的確に評価・解析し、9 万時間レベルの耐久性を迅速かつ高精度に検証することを目標としている（表 6-14）。

## ■ 6-5-8 水素発電

### (1) 原理と特徴

天然ガス火力発電において水素を混焼させることで発電時の CO<sub>2</sub> 排出量を直接的に削減可能である。水素と他の燃料ガスと混合して発電する混焼発電については実証が進められている。また、水素のみで発電する専焼発電については世界的に事例が少なく、今後さらに検討が必要であるが、発電段階では CO<sub>2</sub> を排出せず、水素の製造方法によっては、CO<sub>2</sub> フリーの電源となる。また、従来のがスタービンと同様に大規模化が可能であり、安定・安価かつ大量の水素供給と結び付けることで、大規模かつ安定的で低環境負荷な電源となる。

水素発電の導入により恒常的かつ大規模な水素需要が生じるため、水素価格の低下や燃料電池自動車など他の水素利活用分野においても波及効果が期待される。

### (2) 課題

水素は天然ガスなどの既存の燃料に比べると、発熱量が低い、燃焼速度が速い、火炎温度が高いなどの燃焼特性を持つため、燃焼部材への影響含め、耐熱性、NO<sub>x</sub> 低減技術など水素ガスの燃焼に向けてガスタービンの各種構造の最適化が必要となる。

主なガスタービンの種類としては「拡散方式」（＝燃料と空気を別々に噴射する方式）と「予混合方式」（＝燃料と空気を予め混合噴射する方式）の 2 種類に分かれる。

拡散方式は、局所的に高温スポットが生じやすく、NO<sub>x</sub> の発生が問題となるため、水・蒸気噴射などにより NO<sub>x</sub> を低減している。これにより効率が低下してしまうものの、多様な燃料種への対応が可能となり、水素燃焼も可能である。このため、工業プロセスで発生する水素リッチガスの自家発電での活用や、石炭ガス化発電での活用に向けて水素リッチガスを高効率で燃焼できるドライ型のガスタービンの開発が各社により進められている。専焼による水素発電の要素技術は完了しているが、実証が必要な段階である。

一方、予混合方式は、水・蒸気噴射することなく NO<sub>x</sub> の発生を低減できることから、高効率の発電が可能となるものの、火炎が不安定になりやすいため、現状では水素の混焼は 5%程度が上限と言われている。

### (3) 実用事例

我が国では、WE-NET でシステム検討が行われていた。

イタリア最大の電力会社 ENEL と GE とが水素専焼ガスタービン（16 MW 級）を開発し、2009 年より水素専焼発電の運転を開始している（図 6-72）。

水素混焼用ガスタービンの開発例を図 6-73 に示す。川崎重工業は水素濃度が体積当たり 60% までの混焼において、天然ガス焼き並みの低 NO<sub>x</sub> な燃焼技術の開発に成功し、2015 年の市場投入を目指している。日立は NEDO の多目的石炭ガス製造技術開発（EAGLE：Coal Energy Application for Gas, Liquid and Electricity）のパイロットプラントにて、石

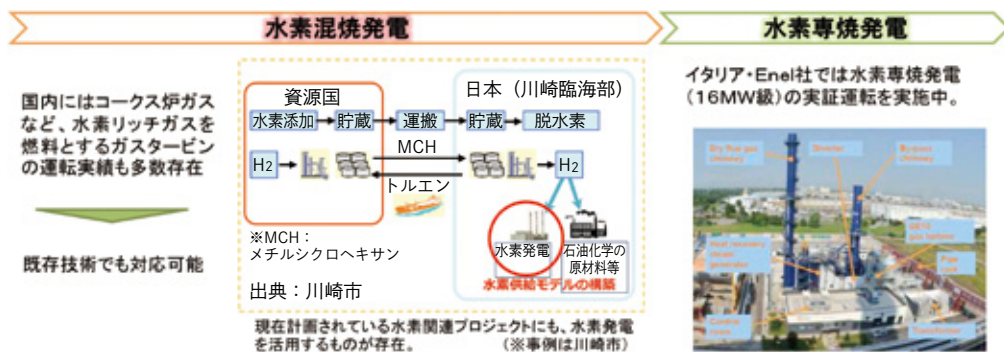


図 6-72 水素発電

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「水素・燃料電池について」  
第 1 回水素・燃料電池戦略協議会（2013 年 12 月 19 日）【参考資料 [3]】より NEDO 作成

#### 川崎重工の水素ガスタービン開発

- ✓ 天然ガスに対して体積当たり60%の水素混焼に対応した水素ガスタービン用燃焼器を開発。
- ✓ 天然ガスとは別の箇所から水素と空気を投入する「追い焼き型」により、水噴射を行うことなくNO<sub>x</sub>を制御。
- ✓ この燃焼器を搭載した30MW級の水素ガスタービンを2015年に市場投入する予定。

【出典】川崎重工業

#### 日立製作所のIGCC用ガスタービン開発

- ✓ NEDOプロジェクトの一環として、IGCC(石炭ガス化複合発電)向けガスタービン燃焼器を開発。
- ✓ 燃料を急速混合することによって、プラント効率低下につながる水蒸気噴射や空素希釈を行うことなく低NO<sub>x</sub>化を図るとともに、炎をバーナーから離れた位置で安定させることで逆火を防ぐことが可能。
- ✓ 石炭ガス化複合発電のパイロットプラントで実証を行い、実機での試験に成功。

【出典】日立製作所／(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構

図 6-73 川崎重工業・日立製作所の水素ガスタービン

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「水素発電について」  
第 4 回水素・燃料電池戦略協議会（2014 年 3 月 26 日）【参考資料 [3]】より NEDO 作成

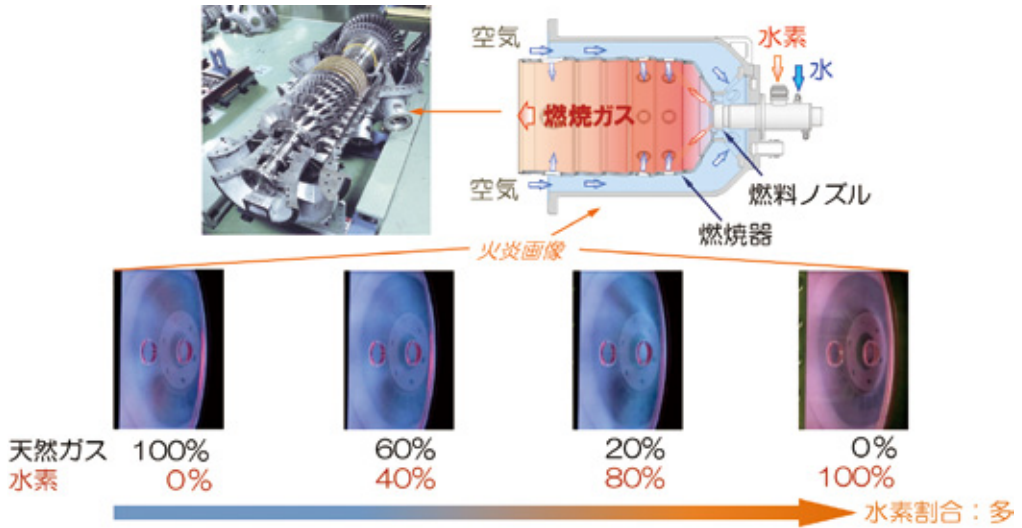


図 6-74 川崎重工業のデュアル水噴射型水素ガスタービン

出典：経済産業省「水素・燃料電池戦略ロードマップ」【参考資料 [1]】

炭ガス化発電用高水素濃度対応低 NO<sub>x</sub> 技術開発の一環として IGCC に適したタービンを開発している。

さらに川崎重工業は、水素と天然ガスの比率を自由に変えられるガスタービンも開発中であり、混焼から専焼まで可能な技術としている（図 6-74）。