脱炭素・水素社会　新産業創設への脈動 2021Ⅱ

ポストコロナの新時代　　脱炭素・水素社会構築 ＆ 新産業創生のための脈動 2021【Ⅱ】

まとめ資料を中心に集めましたので大きなファイルになりました

2021.3.27.　　by Mutsu Nakanishi

資　料　収　集　内　容　　A4判　全257頁

1. ポストコロナを支える新製造業構築　脱炭素社会創生へむけて　新分野に舵を切る
   2021年3月のインターネットから拾い読み　by Mutsu Nakanishi
2. 2050年　脱炭素カーボンニュートラル&水素社会構築　理解のために　　2021.3.25.
   経済産業省資源エネルギー庁　home page より 収集　https://www.enecho.meti.go.jp/
3. NEDO 水素エネルギー白書　2015　NEDO 採取版 100567362.pdf

この日本の停滞した日本の社会を打破して、新しい時代を築くことが、今日本の最大課題となっている。
政府は躍起になって、デジタル化・新水素社会創設をスローガンに、新しい社会構築を目指すことを表明している。
でもその内実を見ると、中身の伴わぬ丸投げの姿勢がちらちら。成長の見通しつかぬ大企業と官僚が現状打破のためにまとめ上げた計画・白書の丸投げか・・・・・。ポストコロナの新時代にバラ色の夢を描くことは必要なるも、その中で暮らす人の暮らしが全く見えない。バラ色の水素社会の暮らしが見えないのに疑問がわく。
現状を言えば、日本の成長は停滞したままもう10数年。　格差はどんどん広がり、雇用は縮小・非正規拡大。所得は伸びず、むしろ雇用不安が暮らしの中に忍び寄る。
どこもそうなんだ…と思っていましたが、そうではない。　先進国の中で、日本だけがここ10年取り残されてきたのだ。このことに向き合わねば、目指す新産業創生も水素社会構築も絵にかいた道。その姿勢がまったくみえぬ。
大企業中心の仲間政治　東京一極集中の村社会からの大きなパラダイムシフトなくしては絵にかいた餅。
暮らしの改善・社会の成長を動かす金回り　日銀頼みの金融、大企業トリクルダウンではどうにもならぬ日本の経済。さらには国土の基本インフラさえボロボロ。　このことについては一切目を向けぬバラ色の夢に不安一杯。
世界から見れば　今日本は全く常識離れの社会という姿が見え隠れ。
もちろん良いところもありますが多くありますが、日本の成長回復の具体的なアプローチ・今の不安社会改善の道が両輪として組み合されねば、絵に描いた餅。
2050年への日本の歩む道の視点にこの日本の現状を突破する実行路線を重ねねば…と。
3月にも述べた気がするのですが、社会の中を何を尺度に見るのも重要な課題。
金回り・つまり暮らし・所得の改善　世界が進める一極集中から脱却する新しい社会の展開等々。
ただでさえ、税金は上がり、実質賃金は低迷し、先が見えぬ社会の中にいる。

良い悪い場別にして、田中・池田首相かぶち上げた日本列島改造・所得倍増の暮らし改善計画をぶち上げ、高度成長の社会をつくりあげた。そんな暮らし改善=所得・雇用を積極的に刺激する政策なくして、いくらぶち上げても絵に描いた餅。水素社会計画と両輪となる暮らし・社会改善の視点からの50年積み上げ実現計画がいる。
そんな気がして、何か3月に紹介した脱炭素・水素社会構築の資料に消化不良を感じ、ご批判も覚悟で、再度新たに入手した資料をお知らせすることに。
このポストコロナの新産業・脱水素社会構築計画に両輪となる人の暮らしの具体的な改善計画　ポストコロナの日本の成長戦略とそれをさえる実効経済・暮らしの視点からもこのポストコロナの新時代眺めたいと。
掲載資料中身は上記したこととは無関係な資料ですが、人の暮らしの視点からも注視すると市民の目も養いたいと。

ポストコロナの社会を考え、イメージするときにでも参考になれば…

2021.3.27.　from Kobe　Mutsu Nakanishi

■　自動車　WEB CARTOP　2/13(土) 18:05 配信

水素ステーションの数だけが問題じゃない！　燃料電池車の普及に立ちはだかるハードルとは
燃料電池車 700 気圧　15 年規制あり車も廃車に

水素充填の時間はEVの充電時間よりも短いのがメリットのひとつ



水素ステーションはまだ全国で130カ所を超えるほどしか普及していない

世界はクルマの電動化に向かっている。日本でも、実質的なCO2排出量をゼロにするカーボンニュートラルを2050年までに実現するという目標を政府として掲げている。非常に高い目標だが、世界的に見るとまだまだ甘いと感じるほど、ゼロエミッション化の勢いは止まらない状態だ。

【写真】700万円が100万台に！中古価格が「大下落」した先代ミライ

ゼロエミッション、すなわち排ガスを出さないクルマといえば電気自動車が中心となっているが、その運用においては充電に時間が掛かるというネガがある。実際に電気自動車オーナーとして数年を共にしてきた経験からすると、乗用ユースであれば充電の待ち時間というのはそれほど気にならない（通常は普通充電で利用して、月に2回くらいしか急速充電を使わないという使い方のため）のも事実だが、一方で毎日数100kmを走る商用ユースでは、現状のスペックの電気自動車では向いていないというのも理解できる。

というわけで、カーボンニュートラル社会を目指す上で、ゼロエミッション車のもうひとつの選択肢として燃料電池車に注目が集まっている。ご存じのように現在市販されている燃料電池車というのは水素を燃料に酸素と反応させる発電機（これを燃料電池と呼ぶ）を使う、電気で走るクルマだ。水素は高圧タンクに充填するため、満タンまで5分～10分程度で済むというのが電気自動車に対するアドバンテージだ。

燃料電池の性能とタンク容量によって航続可能距離は異なるが、最新の燃料電池車であるトヨタMIRAIは満タン状態で850kmを走ることができるとされている（カタログ値）。このくらいの走行性能を短時間の水素充填でカバーできるのであれば、水素充填の手間はほとんど気にならないといえるだろう。

もっとも水素ステーションは、まだまだ全国で130カ所を超えたレベルである、どこでもスムースに運用できる状態とはいえない。しかしながら、カーボンニュートラルを目指す政策によって、今後は水素ステーションが増えることも期待できる。

次ページは：長く大事に乗ると水素タンクの使用期限が切れてしまう

長く大事に乗ると水素タンクの使用期限が切れてしまう



2代目MIRAIは年間3万6000台程度の生産規模だ

とはいえ、水素ステーションが増えればすべての課題は解決して、燃料電池車がどんどん増えるかといえば、ほかにも課題はある。

たとえば量産性だ。2020年12月に登場した2代目MIRAIでは「初代に比べて10倍の生産能力を実現した」というが、それでも年間3万6000台程度の生産規模である。トヨタ・グループ全体の生産台数は2020年で約953万台（これは世界一の数字）となっていることを考えると、MIRAIの生産能力というのは、まったくもって次世代の主流になるとはいえない規模感だ。燃料電池車を普通に見かけるようになるというレベルになるのは、程遠い。

ほかにも燃料電池車の普及に向けた課題はある。意外に知られていないが、燃料電池車が搭載している高圧水素タンクには公式に定められた寿命「充填可能期限」がある。定期的に検査をしていくという前提で、高圧水素タンクの期限は15年と定められているのだ。たしかに700気圧という信じられないほど高圧で水素を押し込むのであるから、ノーメンテで使いっぱなしにできるような代物でないのは当然だが、車体は使えてもタンクが寿命で廃車にせざるを得ないという状況になる未来がやって来るのは、ほぼ間違いない。

燃料電池自体も徐々に劣化が進むものであり、けっして永遠に使えるシステムではないが、そうした経年劣化とは異なる高圧タンクに対する法的な規制による寿命が決まっているという状況は、これから普及させていくのであれば何らかの解決策を見出すべきだろう。

なによりも燃料電池車がカーボンニュートラルに貢献するには、水素の製造自体がカーボンニュートラル化しなければならない。現在は、天然ガスや石油から取り出した水素が流通の中心となっているが、本当に環境モデルとするのであれば、再生可能エネルギーの発電による水分解で製造した水素を中心にすべきであろう。そこに製鉄所などで生まれる副産物としての水素も活用するというのが理想的な未来ではある。

いまのところはカーボンニュートラル社会に必要になるであろう水素インフラと燃料電池車の製造を応援するフェイズのため、水素の製法まで指摘する声は大きくはないが、本当に地球環境に貢献するためにはクリーンな方法で水素を生み出すところまで配慮してこそ、燃料電池車の普及フェイズがやってくるといえよう。

■ 火力発電　　ニュースイッチ　日刊工業新聞　3/20(土) 16:31 配信

厳冬で石炭火力が再評価？「石炭ガス化複合発電」実用化急ぐ

再生エネの不安



IGCCの大型実証が進められる大崎クールジエン

2020年12月下旬から21年1月上旬にかけて厳冬により暖房需要が増え、液化天然ガス（LNG）火力発電所の燃料不足から電力需給逼迫（ひっぱく）を招いた。太陽光発電の出力低下もあり、不安定な再生可能エネルギーに依存するリスクが顕在化した一方、調整力としての石炭火力の役割が再認識された。二酸化炭素（CO2）排出の大本としてやり玉にあがる石炭火力だが、カーボンオフセット技術を組み合わせれば、むしろCO2を減らす潜在力を秘める。

電力不足でLNG緊急調達、エネルギー業界が総出で対策

瀬戸内海に浮かぶ島々の中に、ひと際高い棟が建つ施設がある。中国電力とJパワーが共同出資する大崎クールジエン（広島県大崎上島町）だ。ここで石炭ガス化複合発電（IGCC）の大型実証が実施されている。石炭を少量の酸素と熱を加えて蒸し焼きにすることで、一酸化炭素と水素を主成分とする燃料ガスが生成される。この燃料ガスを利用して発電する仕組みだ。

Jパワーは石炭ガス化の技術開発に02年から取り組んできた。CO2を分離回収することで、現在は水素濃度85%のガス化に成功している。ゆくゆくは水素濃度100%を目指す。水素専焼タービンは27年頃の開発が見込まれており、「タービンを導入すれば水素専焼に移行できる」（Jパワー）という。

IGCCはCO2を減らす「カーボンネガティブ」への道を開く。水素専焼タービンで発電し、分離したCO2を回収・貯留すれば、CO2排出は実質ゼロになる。この条件で自然由来のバイオマスを混焼すれば、混焼分だけ大気中のCO2を実質的にマイナスにできる。LNG火力は固体のバイオマスを混焼できないが、同じ固体の石炭火力だからこそ可能となる。

Jパワーは竹原火力発電所（広島県竹原市）で10%のバイオマス混焼を実施しており、カーボンネガティブの可能性も探っている。ただ、これはCO2回収・貯留が大前提だ。日本ではまだCO2貯留の適地を調査中の段階で、実現までには時間を要する。

20年7月、梶山弘志経済産業相が非効率な石炭火力を30年までにフェードアウトする方針を表明した。国内の電源に占める石炭火力の比率は約30%で、発電所は約150基。このうち超臨界圧（SC）以下の石炭火力は114基にのぼる。目下、経産省の作業部会で非効率石炭火力の定義などが議論されている。Jパワーも「老朽化した一定の設備は休廃止することになる」（菅野等取締役常務執行役員）と見越す。

石炭火力への逆風は強まっている。脱炭素の流れに逆行するとして、総合商社は海外プロジェクトから撤退。メガバンクは石炭火力への投融資を停止すると表明した。一方でエネルギー安定供給の観点から、ベースロード（BL）電源の役割が再認識されている。国内の1月上旬の電力需給逼迫や、米テキサス州の寒波に伴う停電も、BL電源の不足が根底にある。

カーボンニュートラルを進める中で、電力安定供給との兼ね合いをどうするか。どちらも手抜かりが許されないが、完璧な両立も難しい。いかに最適なエネルギーミックスを導くか、知恵を絞らなければならない。

研究開発の最前線

人工光合成ではない「P2C」でCO2からCOを生成、東芝が工業化にめど

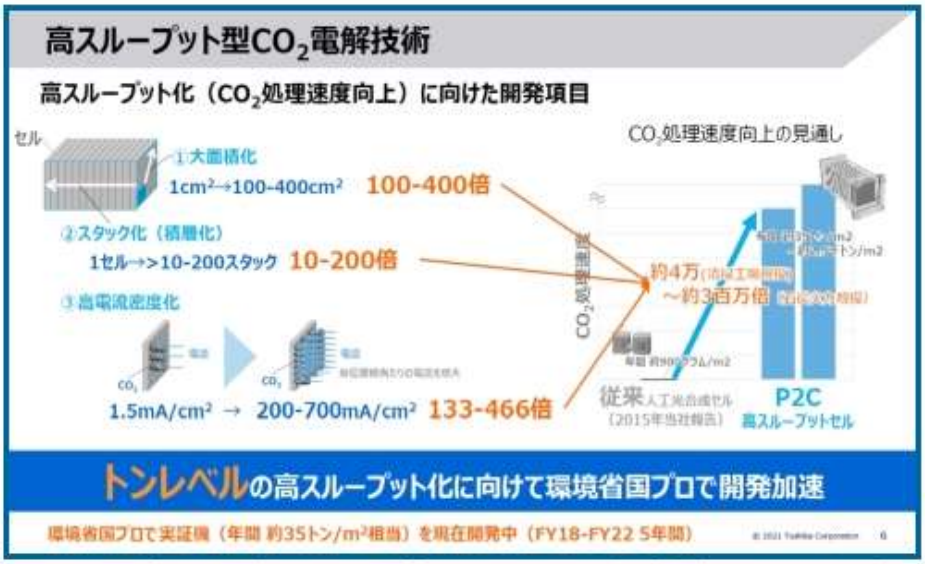
東芝は2021年3月22日、CO_2（二酸化炭素）を燃料や化学品の原料となるCO（一酸化炭素）に電気化学変換する「Power to Chemicals（P2C）」を大規模に行う技術を開発したと発表した。一般的な清掃工場が排出する年間約7万トンのCO_2をCOに変換でき、CO_2排出量が清掃工場の数十倍になる石炭火力発電所にも適用可能だという。2025年の市場投入を目指して開発を進めるとともに、政府が推進するカーボンニュートラルによる需要拡大に合わせて2030年ごろから本格的に事業化していきたい考えだ。

今回開発したのは、電力を使ってCO_2からCOを生成するP2Cの電解セルの大面積化と、電解セルを複数積層するスタック化の技術である。

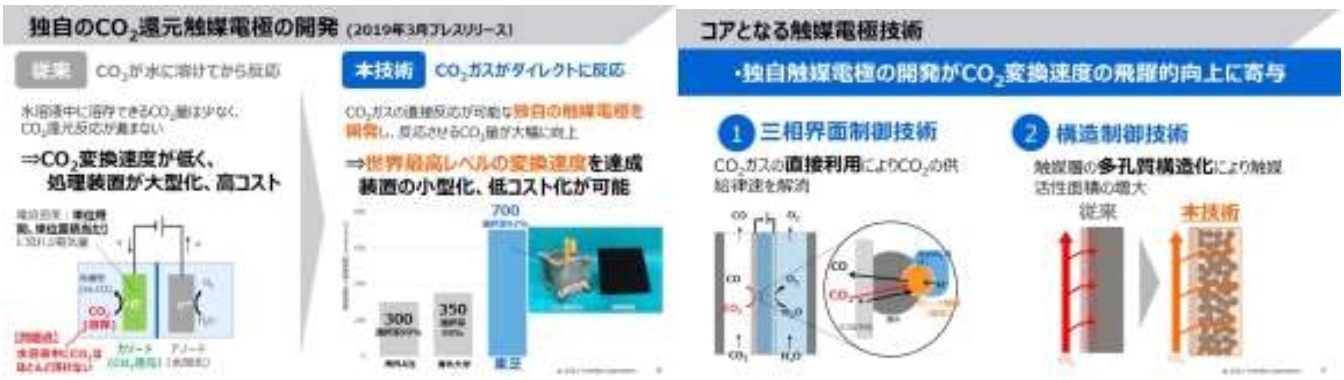


東芝が開発したP2C電解セルスタック（クリックで拡大） 出典：東芝

東芝は2019年3月、CO_2を気相で直接反応させられる独自開発の還元触媒電極を用いた電解セルにより、液相で反応する従来型の電解セルと比べて約466倍となる電流密700mA/cm^2、ファラー効率（全電流に対する生成物に寄与した部分電流の割合）92%を達成していた。この性能は、CO_2を効率的に触媒と反応させる三相界面制御技術と、多孔質構造で触媒活性面積を増大させる構造制御技術によって実現した。触媒の材料については詳細を明かしていないものの「燃料電池などで用いられている一般的な金属材料」（東芝 研究開発本部 研究開発センター トランスデューサ技術ラボラトリー 上席研究員の北川良太氏）としている。



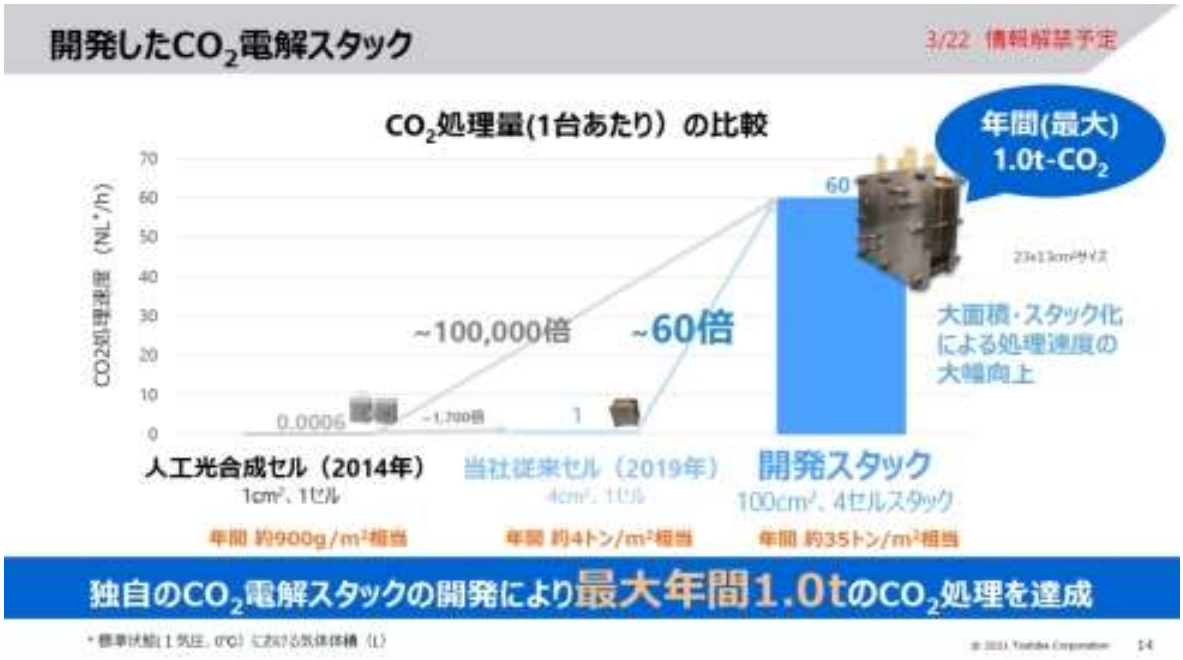
P2C電解セルの処理性能向上には、大面積化、スタック化、高電力密度化の3つの要素がある（クリックで拡大） 出典：東芝



東芝が2019年3月に発表した独自開発の還元触媒電極を用いた電解セルの技術（左）。三相界面制御技術と構造制御技術によって実現した（右）（クリックで拡大） 出典：東芝

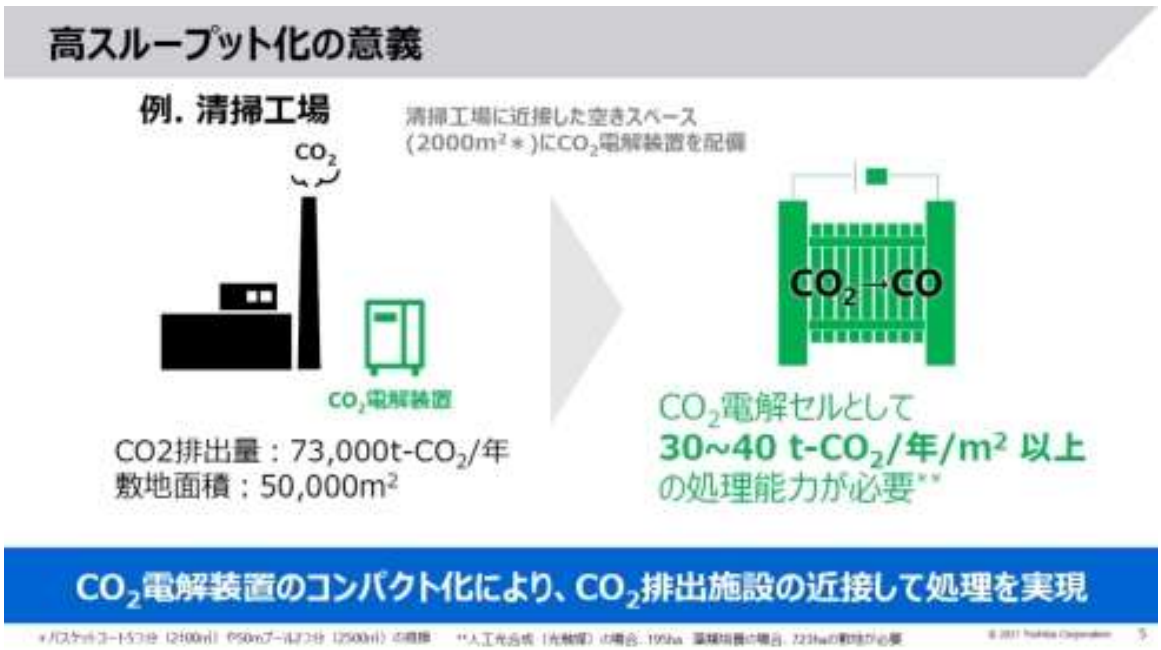
しかしこの時点では、電解セルの面積は1cm^2にすぎず、P2C電解セルを工業的に利用可能にする上ではCO_2の処理能力を大幅に増やすための大規模化の技術が必要だった。そこで東芝は、電解セルの大面積化とスタック化に向けた開

発に着手。今回の発表では、面積を従来比 100 倍となる 100cm^2 に広げて４層にスタックした電解セルを開発した。電流密度 200mA/cm^2 で動作させた際のファラデー効率は 94%を達成している。2019 年３月発表時の電解セルを用いると 1m^2 当たりの CO_2 処理能力は年間約４トンにすぎないが、新たに開発した電解セルを用いれば 1m^2 当たり年間約 35 トンの CO_2 を処理できる。



開発した P2C 電解セルスタックの処理性能。P2C 電解セルは、東芝は 2014 年ごろに開発していた人工光合成セルと比べて 1700 倍近い処理性能の向上を果たしていたが、今回の大面積化とスタック化によりさらに処理性能が向上した（クリックで拡大） 出典：東芝

一般的な清掃工場は、敷地面積が５万 m^2 に対して CO_2 の年間排出量は約７万 3000 トンになる。この清掃工場に近接した約 2000m^2 の空きスペースに、新開発の P2C 電解セルを用いた電解装置を設置すれば、排出される CO_2 をほぼ全て CO に変換できることになる。なお、約 2000m^2 の広さは、バスケットコート５つ分（2100m^2）、50m プール２つ分（2500m^2）に当たる。また、CO_2 を CO などの有価物に変換する他技術と比較した場合、光触媒を用いる人工光合成では 195ha（1ha は１万 m^2）、藻類培養で 723ha の敷地が必要になるという。



一般的な清掃工場の CO2 排出量に求められる CO2 電解装置の性能と設置面積（クリックで拡大） 出典：東芝

次ページ電解セルの大面積化とスタック化の課題はどのように解決したのか

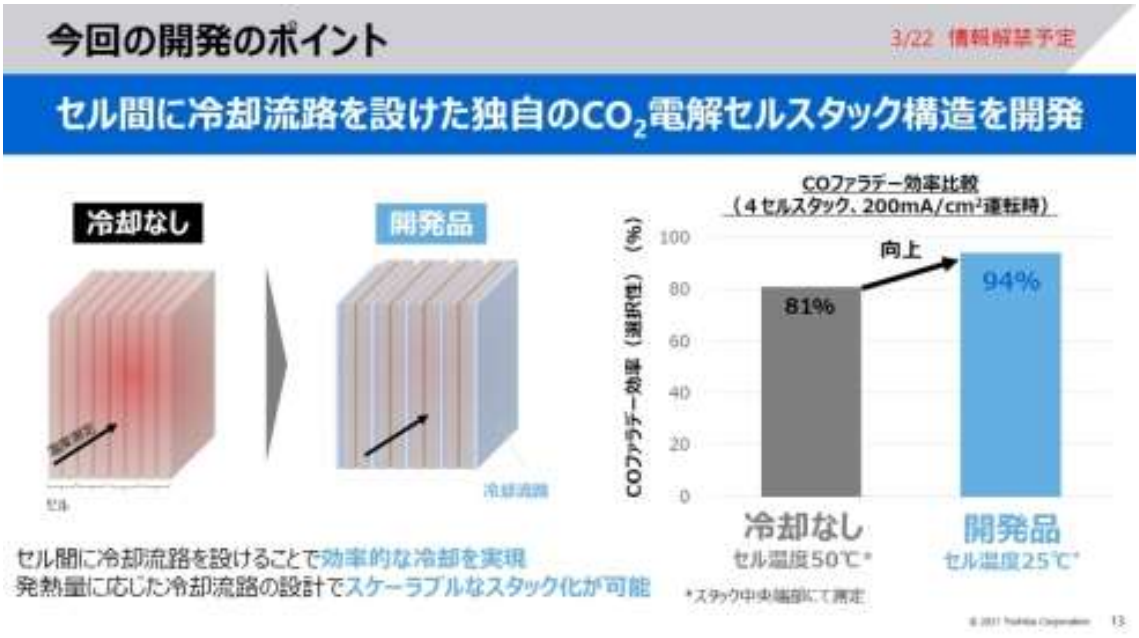
電解セルの大面積化とスタック化の課題はどのように解決したのか

ただし、大面積化とスタック化を実現する上ではCO_2還元反応の効率が低下するという課題を解決する必要があった。例えば、面積 16cm^{2}の電解セルのファラデー効率が 93%であるのに対して、面積 100cm^{2}の電解セルを 4 層重ねた 4 セルスタックでは 81%に低下してしまう。これは、電解反応時の損失が熱として電解セル内に発生し、目的の反応である CO の生成ではなく副反応である水素の生成比率が増加してしまうためだ。



P2C電解セルにおける大面積化とスタック化の課題（左）と熱発生による温度上昇の影響（右）（クリックで拡大） 出典：東芝

この課題解決のために開発したのが、セル間に冷却流路を設けた独自の CO_2 セルスタック構造だ。大面積化とスタック化で発生する熱を、セル間の冷却流路を使って逃がすことにより効率的な冷却を実現した。先述した面積 100cm^{2}の 4 セルスタックにおいて、冷却流路がない場合にセルスタック中央端部の温度は 50℃に上昇するが、セル間に冷却流路を設けることで 25℃に下げることができた。ファラデー効率も 81%から 94%に向上できたという。

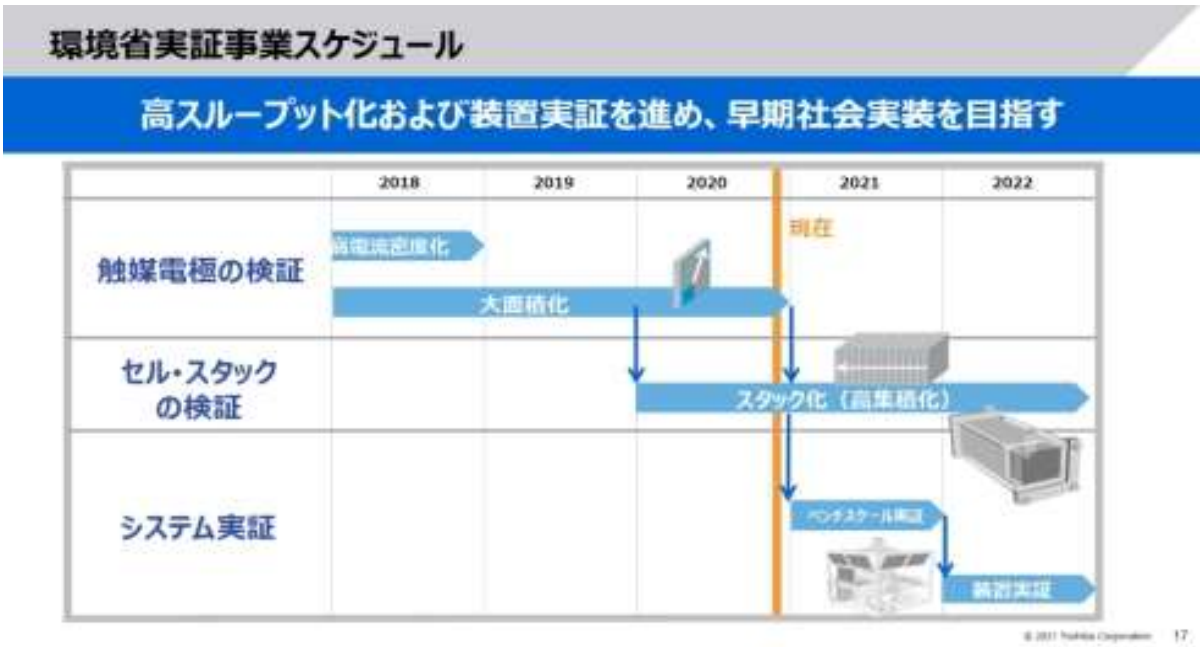


セル間に冷却流路を設けて課題を解決した（クリックで拡大） 出典：東芝

北川氏は「発熱量に応じた冷却流路の設計により、さらなる大面積化、スタック化も可能になる」と説明する。大面積化については 400cm^2、スタック化は 200 層、そして電流密度は 2019 年 3 月の発表と同じ 700mA/cm^{2}まで可能と想定している。これら全てを最大値で適用すれば、1m^{2}当たり年間約 2500 トンの CO_2 処理能力が求められる石炭火力発電所への対応も視野に入る。スケールアップのための技術開発で重要になるのは、触媒電極を均一に形成できる塗布プロセスだが、東芝がこれまで開発を進めてきた燃料電池の製造技術を応用することで実現できるとしている。

なお、これらの技術開発は、2018～2022 年度の 5 カ年で環境省の委託事業として進められている「二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業」に基づく成果だ。今回の成果で、独自触媒電極を使った電解セル

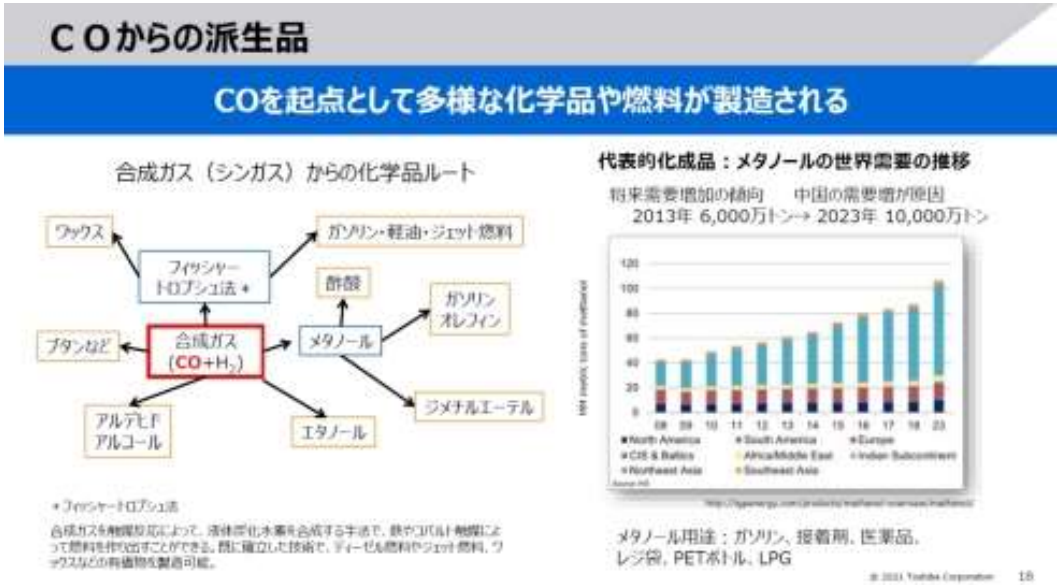
の大面積化とスタック化に道筋が付いたことから、2021 年度以降は 1m^2 当たり年間約 35 トンの CO_2 を処理できる実証機を用いたシステム実証を進めていく方針だ。



環境省実証事業のスケジュール。今後はシステム実証を進めることになる（クリックで拡大） 出典：東芝

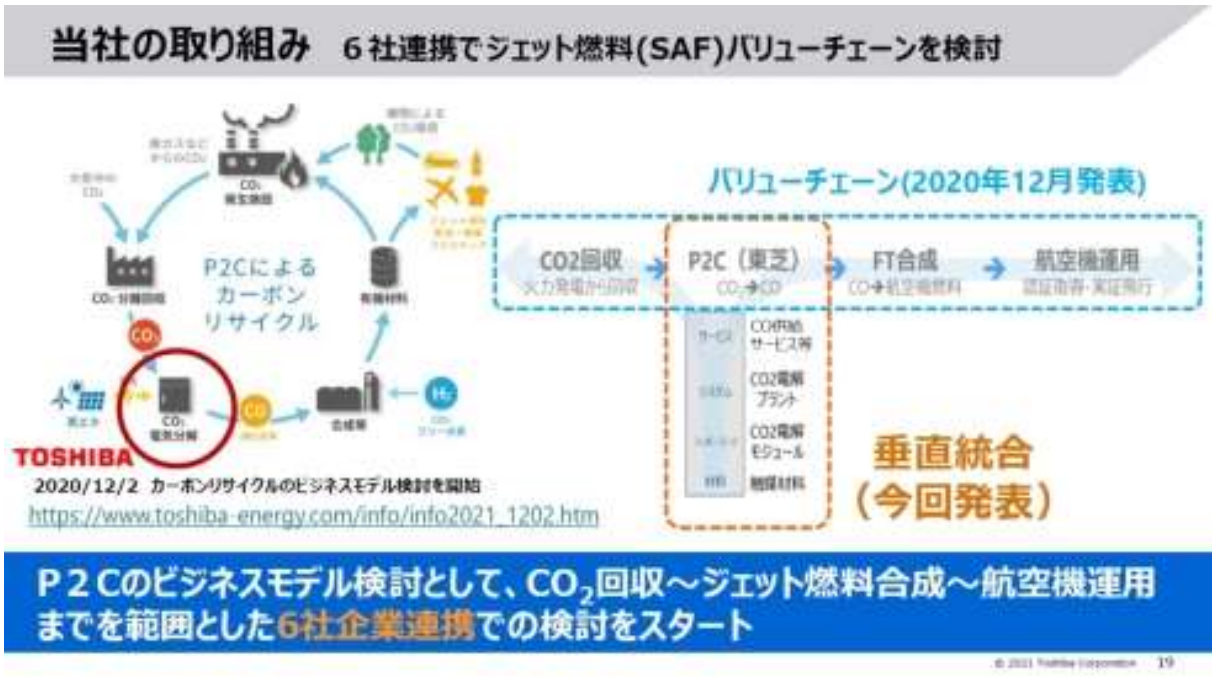
生成した一酸化炭素は化学品や燃料の原料に

東芝が開発を進めている P2C 電解セルによって CO_2 から生成される CO は、水素を混合した「合成ガス（シンガス）」とすることで、さまざまな化学品や燃料を製造できることが知られている。例えば、触媒反応であるフィッシャートロプシュ法を適用すれば、ガソリンや軽油、ジェット燃料を製造できる。この他にも合成ガスからは、酢酸やジメチルエーテルの原料となるメタノール、ブタン、アルデヒド、エタノールなどが製造できる。



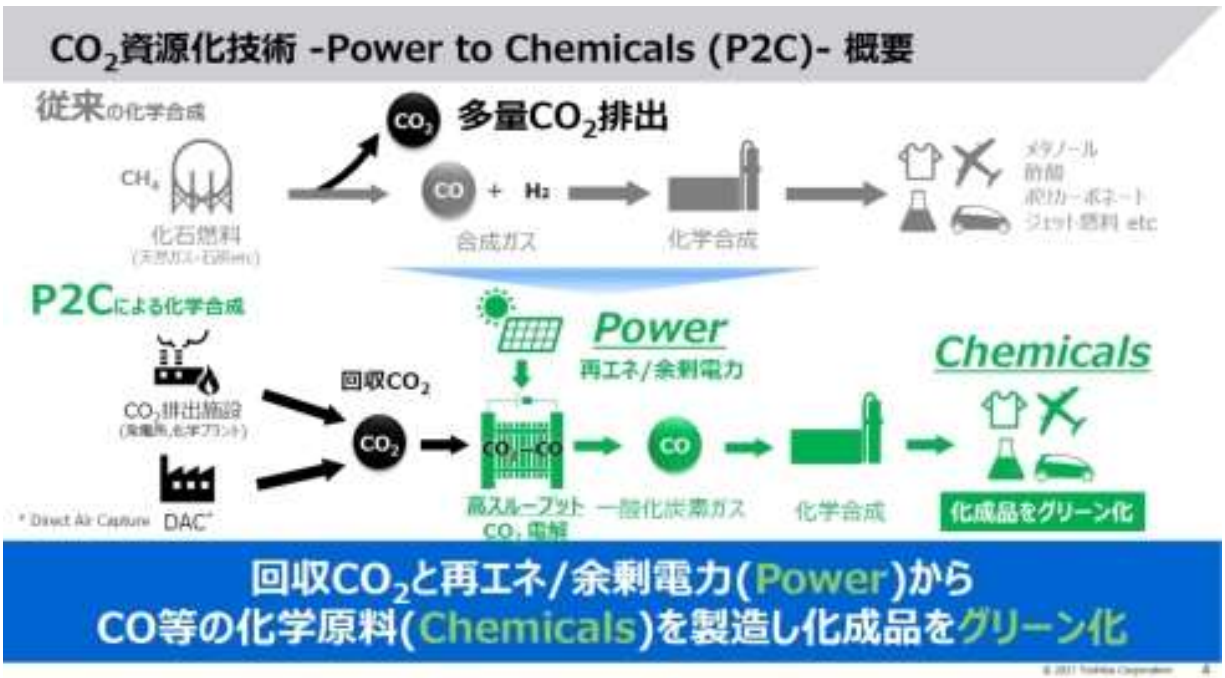
CO からの製造できる化学品や燃料。また、CO から製造できるメタノールの需要は大幅に拡大している（クリックで拡大） 出典：東芝

東芝と東芝エネルギーシステム、東洋エンジニアリング、出光興産、全日本空輸、日本 CCS 調査の 6 社は 2020 年 12 月、P2C により排ガスなどから得られる CO_2 を SAF（Sustainable Aviation Fuel：持続可能なジェット燃料）として再利用する、カーボンリサイクルのビジネスモデル検討を開始することで合意している。東芝 研究開発本部 研究開発センター トランスデューサ技術ラボラトリー 室長の水口浩司氏は「現在、新型コロナウイルス感染症の影響で航空業界は厳しい状況にあるが、2024 年ごろには需要が回復すると予測されている。そのタイミングに併せて、CO_2 排出削減に貢献する SAF の航空機での利用を始められるようにしたい」と強調する。



東芝など６社によるSAF のバリューチェーン（クリックで拡大） 出典：東芝

なお、P2C プロセスでは、CO_2 から CO を生成するのに電力が必要になる。この電力源として太陽光発電を用いる場合は人工光合成ともいえるが、電力源は風力発電などでよいこともあり、東芝は Power to Chemicals と呼んでいる。実際に、P2C 電極セルを用いた CO_2 処理システムの 2030 年以降の本格化的な事業化は、カーボンニュートラルの実現に向けた火力発電から再生可能エネルギーへの移行が背景にある。「火力発電は稼働率 100%が前提になっているのに対し、安定的な発電が難しい再生可能エネルギーの稼働率は 20～30%が想定されている。この場合、ピーク時の余剰電力を捨てなければならなくなるが、それらの電力を無駄にしないためには P2C プロセスで化学品や燃料の製造に用いるという需要が出てくるはずだ」（水口氏）としている。



P2C による化学合成と従来技術の比較（クリックで拡大） 出典：東芝

■ 重工・プラントメーカー　日本経済新聞　2021 年 3 月 22 日

三菱重工が狙う水素 4000 億円市場　欧米で製造に参画



米国のスタートアップ、インフィニウムに出資しCO2と再生可能エネルギーから環境負荷の少ない燃料を生成する技術の確立を目指す

三菱重工業が欧米で脱炭素の切り札となる水素などの製造に相次いで参画している。再生可能エネルギーから水素などを製造する技術を持つ複数の企業に出資。2021年3月期に参画した案件は既に10件以上にのぼる。再生エネが普及する欧米などは二酸化炭素（CO2）を排出しない水素製造で先行する。まず4000億円程度の関連市場に照準を合わせ、将来的に自社の発電設備の販売にもつなげたい考えだ。

1年で10件以上

米国では21年、環境負荷の少ない製法で水素やアンモニアを製造するスタートアップ企業に相次いで出資した。2月には米国で天然ガスに含まれるメタンから水素などを取り出す技術を持つC-ZERO（カリフォルニア州）に出資。CO2を排出しない水素の製造技術を開発する。1月には米アマゾンや英APベンチャーズと共同で、CO2や再生エネから航空機や船舶などに使う環境負荷の少ない燃料を開発するインフィニウムに出資した。いずれも米国の統括会社を通じて出資し、出資額は非公表。

三菱重工は20年10月に公表した22年3月期から3カ年の事業計画で、水素など次世代エネルギー分野を成長分野に掲げた。24年3月期までに次世代エネルギーなどの成長領域に1800億円を投じる方針。成長領域の売上高で1000億円を目指すとした。

21年3月期に海外で参画した水素製造などプロジェクトは既に10件以上あり、異例のスピードといえる。欧州では1月に独ハンブルクの水素プロジェクトに参画。オーストラリアでは20年11月にグリーン水素などの開発に参画した。

まずは「面」を確保



水素の製造過程でCO2を排出しない技術を持つ米モノリス社に出資した（米国で運転中のプラント）

同社の海外展開はこれまで、東南アジアや欧米などに発電設備や環境プラントなどを輸出する「インフラ輸出」型だった。設備を売り、現地でエンジニアリングも手掛けるパッケージ戦略を強みとしてきた。

一方、今回の脱炭素分野への投資は「従来とは違う取り組みで展開している」（エナジードメイン新エナジー事業部の豊田敏彦氏）。最も大きな違いは、すべての参画案件の事業化を見込んでいないことにある。

再生エネからつくる水素などの実用化には巨額の投資が必要だ。1社だけで直接投資をするのはリスクが大きい。一方で、脱炭素戦略は既に欧州や中国との国家間競争になりつつある。欧州では水素戦略への巨額の政府支援を背景に多くの水素製造プロジェクトが立ち上がる。こうした事業を探索して見きわめるスピードが求められる。

海外で水素事業への参画が相次ぐ	
21年2月	メタンから水素などを生成する技術を持つ米Ｃ―ＺＥＲＯに出資
21年1月	ＣＯ２と再生可能エネルギーからクリーン燃料を生成する米インフィニウムにアマゾンなどと出資
21年1月	スウェーデンのバッテンフォールなどと独水素プロジェクト推進で合意
20年11月	メタンから水素などを生成する技術を持つ米モノリスに出資

このため、三菱重工はまず複数の海外案件に、少額出資などで参画。いわゆる「面」を広げていく戦略で、最初から大型の投資は行わない。事業化が見えた段階で、追加投資を判断し、設備などの販売も目指す。見込みのない事業は投資を引き揚げる可能性もある。豊田氏は「従来の三菱重工グループのリスク管理とは異なる」と話す。

20年4月に設立した「成長推進室」が投資案件の選別や探索を担う。海外で水素製造やCO2回収など新規領域で狙う市場は4000億円程度を想定している。

種まき実るか、時間との勝負



三菱重工業は水素を使ったガスタービンを開発し、低炭素化を目指している

三菱重工に対しては脱炭素の流れを背景に、主力の火力発電設備事業に向かい風が吹いている。既に石炭火力関連では、傘下の三菱パワーの呉工場（広島県呉市）で石炭火力向けボイラーの製造から撤退することを決めた。

今後、切り札となるのが水素やアンモニアを燃料にしてCO2排出を減らすガスタービンの開発だ。3月には世界で初めて、アンモニアだけで燃焼するガスタービンの技術開発に着手した。

50年に温暖化ガス排出実質ゼロを掲げる日本は30年に年間最大300万トンの水素供給を掲げるが、国内で低コストで水素を製造するインフラの整備はこれからとなる。

一方で豪州や欧州は水素を製造しやすい環境がある。天然ガスが豊富にあり、再生エネも普及していることが大きい。

国内の水素価格は1キログラムあたり1000～1500円だが、既に欧州は日本の4分の1程度の価格で製造できる技術を持つ。海外で低コストで水素を製造できるノウハウを蓄積できれば、将来的に日本の脱炭素技術の実用化も早められる可能性がある。

重工大手では川崎重工業が水素運搬船や貯蔵タンクなど供給網を担う技術開発で先行。IHIも、豪州で現地の電力会社と水素製造プロジェクトに参画した。「機を逃したら世界の競合企業の中で負ける。スピード重視だ」（豊田氏）

三菱重工グループ全体の脱炭素戦略や収益化へとつなげられるかどうか、一連の種まきがカギを握る。

（企業報道部　川上梓）

■　造船・エンジニアリング　2021/3/22　日経電子版　ニッキィの大疑問

アンモニア燃料で発電の試み　温暖化ガス抑制に期待



アンモニア燃料を使う次世代船の開発計画も進んでいる（今治造船の工場）

アンモニアを発電の燃料に使うそうね。アンモニアという名前は聞いたことがあるけれど、これを発電で使うと地球温暖化対策になるというのはどういうことかしら。

アンモニア燃料の活用について、石村知子さんと貞弘純子さんが松尾博文編集委員に聞いた。

石村さん「何のために使うのですか」

脱炭素の目標、実現できる？　鍵は再生エネと技術革新

石炭火力発電、なくせるの？　英仏全廃へ、日本は遅れ

アンモニアは窒素と水素の化合物です。世界で年間２億トンほど生産され、大半は肥料や工業用です。これを発電燃料に使う取り組みが始まりました。アンモニアを燃焼させても、地球温暖化の原因となる二酸化炭素（CO2）を排出しないからです。日本を含む、多くの国が 2050 年ごろまでに温暖化ガスの排出を実質ゼロにする目標を掲げています。日本は石炭や液化天然ガス（LNG）を燃料に使う火力発電が電源の 76%を占めます。これを太陽光や風力などの再生可能エネルギーに置き換えていく必要がありますが、自然条件やコストなどの制約から、再エネですべて代替することができないかもしれません。火力発電を使い続ける手段として、アンモニア燃料に注目が集まっているのです。

貞弘さん「どのように使うのですか」

石炭火力や LNG 火力の燃料に混ぜます。段階的に比率を上げ、将来はアンモニアだけでの燃焼を目指します。東京電力ホールディングスと中部電力が燃料調達と火力発電事業を統合した JERA（東京・中央）は、21 年度から石炭火力の燃料にアンモニアを 20%混ぜて使う実証試験を始め、30 年度以降に全国の発電所で利用を始める計画です。

関西電力や中国電力、Ｊパワーなどもアンモニア燃料の活用を考えています。政府は脱炭素実現に向けた「グリーン成長戦略」で、重点 14 分野の一つにアンモニア燃料を定めました。政府は 30 年に国内で 300 万トン、50 年に３千万トンの消費を計画しています。アンモニアを発電に使う試みは海外でもあまり例がなく、日本が先行しています。

石村さん「脱炭素には水素利用も有効と聞きます」

その通りです。水素も重要な脱炭素燃料です。実はアンモニアも燃焼には、自分に含まれる水素を使います。にもかかわらずアンモニアの形で使うのは、製造や輸送、貯蔵の方法が確立済みで、既存設備が有効利用できるといった利点が

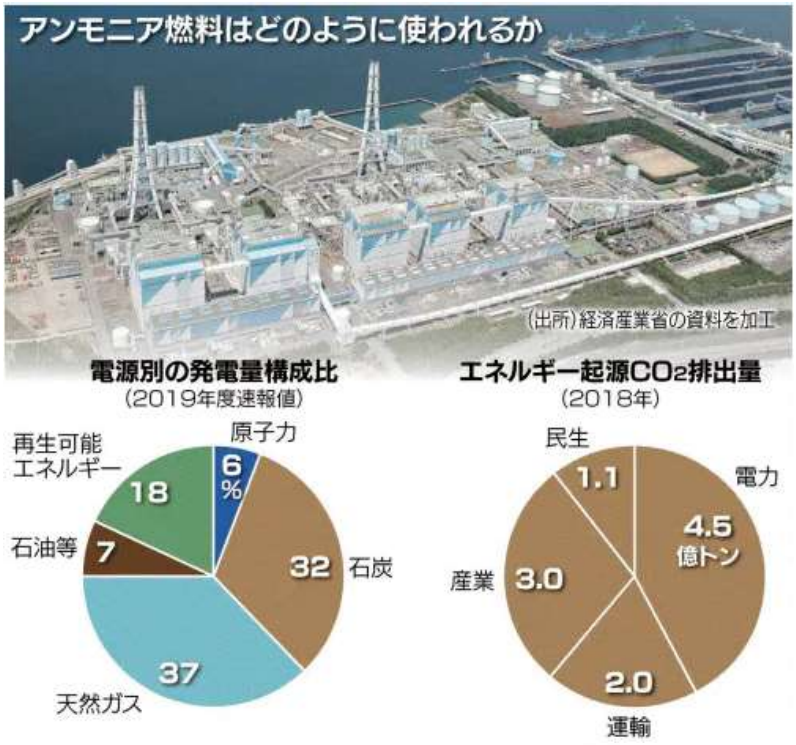
あるためです。
水素は運びやすくするため液体にしますが、セ氏マイナス 253 度の超低温が必要となるなど取り扱いが難しい。いわば「水素の乗り物」としてアンモニアを使うのです。

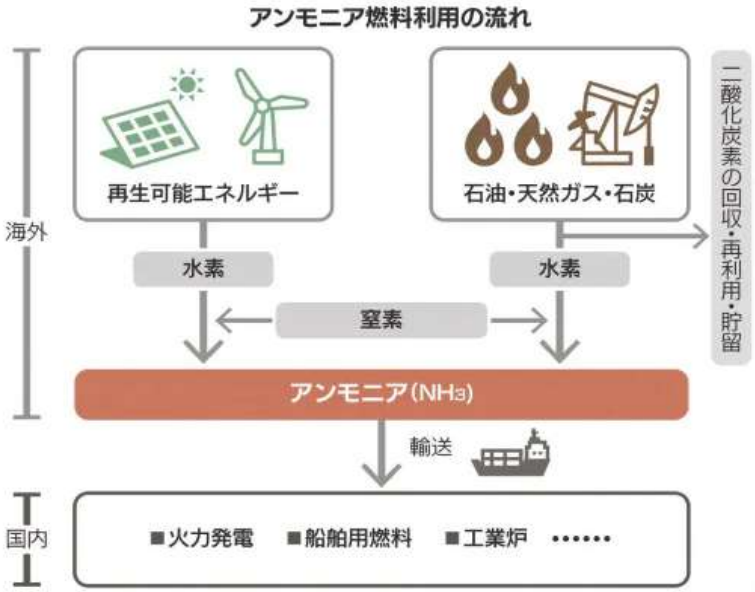
貞弘さん「実用化に向けた課題は何ですか」

本格利用時には量が膨大になります。日本全国の石炭火力にアンモニアを 20%混ぜた場合、今の世界貿易量に匹敵する２千万トンが必要です。
作り方には２つ方法があります。一つは太陽光や風力などの再エネを使って水を電気分解して水素を取り出し、これを窒素と合成する方法。もう一つは天然ガスや石油などの化石燃料から水素を取り出し合成する方法です。化石燃料からつくる場合は、発生する CO2 を回収し、地中に埋めて処理するなどの技術と組み合わせていきます。
コストの低減も重要です。実用化には 30 年までに今の価格に比べて最大３割程度下げねばなりません。大量のアンモニアを安価かつ安定的に生産・輸送するため、中東やオーストラリアなどでアンモニアを生産し、日本に運ぶ検討が始まっています。また、アンモニアは窒素酸化物（NOx）の発生を抑える技術の開発も不可欠です。
一方で、温暖化ガスを出さない電力利用が増えれば、その分発電に必要なアンモニア燃料も増えます。電力を無駄なく使い、省エネにも気を配らなければ、脱炭素を後押しすることにならないことには注意が必要です。

日本発の脱炭素技術に

アジア諸国は成長を支える電力の供給力整備が課題となる一方、電源に占める火力の比率が全体で８割に迫る。アンモニア燃料は既存設備を活用しながら脱炭素を進める有効な手段となりうる。
産油国や産炭国にとっては石油や石炭を使ってアンモニアや水素をつくれば、地中の化石燃料資源が価値を生まない「座礁資産」になることを回避できる。
日本はかつて世界に先駆けて液化天然ガス（LNG）の大量導入に踏み切り、LNG ビジネスを主導する地位を獲得した。アンモニアを日本発の脱炭素技術に育てるには国際的な仲間づくりが欠かせない。
（編集委員　松尾博文）





■今回のニッキィ

石村　知子さん　大学職員。長い自粛期間だったが、昔好きだった読書を再開できたのは数少ないよい点だった。「『ライフシフト』など、読みたいと思っていた話題の本を消化できています」

貞弘　純子さん　京都在住。現在、キャリアコンサルタント資格の試験勉強を進めているところだ。以前部下の相談に乗っていて、「キャリア形成について学びたいと思ったのがきっかけです」

沸騰の半導体株　進化支える日本の装置・材料メーカー

2021 年 3 月 22 日



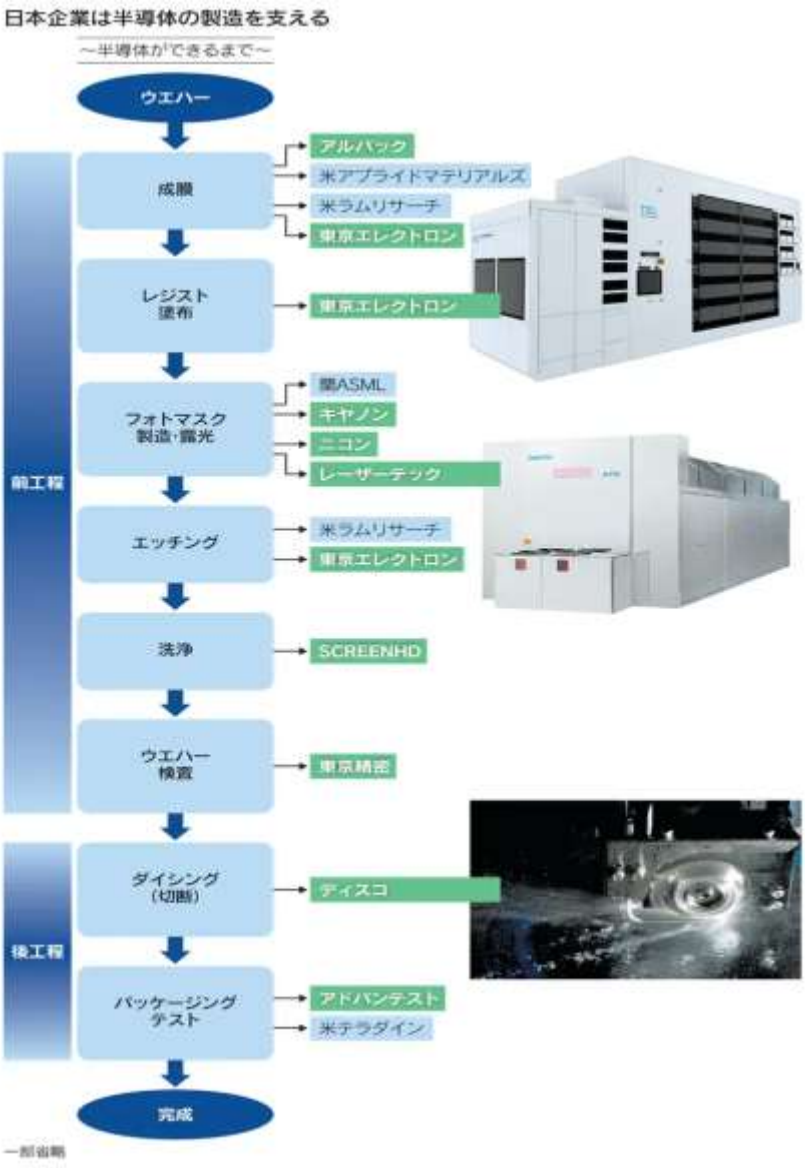
（写真は台湾・台南の TSMC 工場）

日本には高いシェアを持つ装置メーカーが多い

日本の半導体メーカーは海外勢に押され、かつての勢いを失った。だが、回路の「微細化」など半導体の進化を支える製造装置分野に目を移すと、日本企業は大きな存在感を示す。高速通信規格「5G」の普及や新型コロナウイルスの感染拡大に伴う巣ごもり消費で半導体市場が活況を迎えるなか、装置企業の成長期待も強まっている。

半導体は省エネや処理速度向上のため、電子回路の微細化が進む。SMBC 日興証券の花屋武アナリストは「半導体装置企業は半導体企業にとって、次のテクノロジーに対する解を見つける重要なパートナーだ」と強調する。

半導体の製造プロセスはシリコンウエハーに電子回路を形成する「前工程」と、パッケージや性能テストなどの「後工程」に大別される。日本の半導体関連の代表銘柄の東京エレクトロンは、米アプライドマテリアルズやオランダ ASML ホールディングに次ぐ売上高で世界３位の前工程装置メーカーだ。前工程は微細化技術の進化が速く、競争力の高い装置メーカーへの株式市場での評価も高まっている。東エレクの株価はコロナ感染前の 2019 年末から７割強上昇し、時価総額は６兆 6000 億円を超える。



前工程では写真技術を応用した装置が多いが、東エレクはウエハーにレジスト（感光材）を塗布して、電子回路を現像する「コータ・デベロッパ」で９割の世界シェアを持つ。回路以外の不要な部分をガスを使って取り除く「エッチング」などにも強い。日本の前工程メーカーでは、ウエハーを洗浄して不純物を除去する「洗浄」分野で SCREEN ホールディングスも強みを持つ。

前工程の中でも最も付加価値が高いとされるのは、シリコンウエハーに電子回路のパターンを焼き付ける「露光」装置だ。回路線幅が５ナノ（ナノは 10 億分の１）メートルや３ナノメートルの最先端半導体の露光には「EUV（極端紫外線）」と呼ばれる技術が必要で、ASML が独占している。そして、露光に密接する分野で急成長しているのがレーザーテックだ。

露光では写真技術を応用してウエハーに回路パターンを転写するが、その原板に当たるのが「フォトマスク」だ。レー

ザーテックはフォトマスクに欠陥がないか検査する装置で、EUV 光を使った機種を 100%供給している。19 年末に比べ株価は 2 倍強に上昇、時価総額は 1 兆 2000 億円を超えた。

日本には後工程でも高いシェアを持つ装置メーカーが多い。回路を焼き付けたウエハーを切り分けてチップを取り出すダイシング（切断）装置ではディスコがトップシェアを持ち、完成した半導体チップの性能を試験する「テスター」と呼ばれる装置ではアドバンテストが世界 2 強の一角を占める。

ウエハー、レジスト　高い世界シェア

半導体材料でも国内メーカーは高い競争力を持っている。微細化に対応した技術開発で、基板材料のシリコンウエハーや製造過程で使うフォトレジスト（感光性樹脂）などは世界トップのシェアを誇る。総合化学メーカーも利益率の高い半導体材料事業を強化しており、業績を下支えしている。


基板材料のシリコンウエハーは日本勢がシェアトップを占める

シリコンウエハーでは世界首位の信越化学工業と SUMCO が合計で約 6 割のシェアを握る。高速通信規格「5G」やデータセンター向けなど先端品に使う直径 300 ミリ㍍品に強みを持つ。

2020 年度は新型コロナウイルスの影響を受けたものの、市場予想平均（QUICK コンセンサス）では両社とも 21 年度は増収増益の見通しだ。株価もコロナ前の水準を回復して、SUMCO は約 2 年 9 カ月ぶり高値圏で推移。足元で調整局面にある信越化も 21 年 1 月には上場来高値を更新した。

ウエハー業界ではシェア 3 位の台湾の環球晶円（グローバルウェハーズ）が 4 位の独シルトロニックを買収する見通しだ。単純計算では SUMCO を抜きシェア 2 位となるが、先端品では日本勢に強みがありそうだ。特に信越化は「経営の目利き力や顧客との交渉術、財務体質の強さが光り、トップの座は変わらない」（モルガン・スタンレーMUFG 証券の渡部貴人アナリスト）との評価がある。

ウエハー上に回路を形成する際に使うフォトレジストでも日本勢が 9 割前後のシェアを占める。JSR や東京応化工業などが代表銘柄だ。素材が分解できず模倣されにくいとされ、技術力を蓄積してきた日本勢が優位に立つ。

19 年に日本政府が韓国向けの半導体材料の輸出管理を厳格化したことで影響も懸念されたが、足元では日本メーカーの業績に大きな影響は出ていない。東京応化は 21 年 12 月期も 2 期連続の最高益更新を見込む。JSR もレジストを含むデジタルソリューション事業はコロナ禍でも増収増益を確保している。


JSRのレジストは利益率の高さを評価する声が多い

かつて石油化学が事業の主軸だった総合化学メーカーも、近年は付加価値の高い半導体材料に注力している。洗浄剤や薄膜の形状加工に使う特殊ガスなどを主要製品群に持つ。車用部材などとともに、足元の業績回復をけん引している。

19 年に半導体製造装置大手の蘭 ASML とライセンス契約を結んだ三井化学の EUV（極端紫外線）ペリクルは 21 年度から商業化。露光工程の防じんに使うもので、市場からの注目も高い。各社とも、半導体需要増という追い風のなかで関連材料を事業の柱として着実に育てていけるかが今後の株式評価を左右しそうだ。

（佐藤俊簡、龍元秀明、長谷川雄大、三田敬大、生田弦己、広井洋一郎、台北=中村裕、シリコンバレー佐藤浩実）

［日経ヴェリタス 2021 年 3 月 21 日号に全文掲載］

日本が総がかりで取り組む Road マップ

■ 経済産業省　資源エネルギー庁　Home Page より資料採録　2021.3.25.

https://www.enecho.meti.go.jp/

2050 年脱炭素カーボンニュートラル& 水素社会構築　理解のために

1. カーボンニュートラルって何ですか？（後編）～なぜ日本は実現を目指しているの?

2021-03-16

https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon_neutral_02.html

- なぜ、「カーボンニュートラル」を目指すのか？
- 「カーボンニュートラル」を実現するための対策、その方向性は？
  - ◆ どの部分の CO2 を減らすの？
  - ◆ どんな技術が開発されているの？

2．水素を使った革新的技術で 鉄鋼業の低炭素化に挑戦　2018-06-28

https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/course50.html

- 日本における鉄鋼業の CO2 排出量と省エネポテンシャル
- 低炭素化の鍵となるのは、鉄鉱石に含まれる酸素をとりのぞく「還元」
- CO2 を削減するために「水素」を利用する

3. 太陽と CO2 で化学品をつくる「人工光合成」、今どこまで進んでる？　2021-03-04

https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/jinkoukougousei2021.html

- CO2 を使うことで削減する、「人工光合成」を簡単におさらい
- 変換効率 7.0%達成、量子収率 100%実現…世界初の画期的な研究成果
- 実際のシステムを使った水素製造フィールドテストも

4.　日本のエネルギー2020　日本のエネルギーを知る 10 の質問

https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/pdf/energy_in_japan2020.pdf



1 安定供給
　どのくらいエネルギー自給できていますか
2 経済性
　電気料金はどうなっていますか・・・・
3 環境
　カーボンニュートラルとは何ですか
4 安全性
　どのようにエメルギーを安定供給　安全性を確保しますか
5 3E+S
　エネルギー政策の基本方針はどうなっていますか
6 イノベーション
　脱炭素化のイノベーションにはどのようなものがありますか
7 再エネ
　再エネの導入は進んでいますか
8 福島の復興
　福島の復興は進んでいますか
9 原子力
　原子力発電は必要ですか
10 省エネ
　省エネの取組は進んでいますか

◆ 上記 1.～4. PDF 資料を合本しました

2050 年脱炭素カーボンニュートラル& 水素社会構築　理解のために

経済産業省　資源エネルギー庁　Home Page より資料採録

2021-03-16

カーボンニュートラルって何ですか？（後編）～なぜ日本は実現を目指しているの？

温暖化対策 基礎用語 技術

いいね！ シェア 18 ツイート 0 メルマガ登録 記事のリクエスト



メディアなどでよく見聞きする「カーボンニュートラル」という言葉について、正しく理解するためのシリーズの後編です。前編（「カーボンニュートラル」って何ですか？（前編）～いつ、誰が実現するの？」参照）では、「カーボンニュートラル」がそもそも何を意味するのか、いつまでにおこなうのか、誰が表明しているのかについて解説しました。今回は、なぜ「カーボンニュートラル」を目指すのか、どのように実現していくのかについてご紹介しましょう。

なぜ、「カーボンニュートラル」を目指すのか？

前編でお伝えしたとおり、「カーボンニュートラル」はいろいろな意味で使われることがある言葉ですが、日本が目指す「カーボンニュートラル」とは、「温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする」ことを意味しています。菅総理は2020年10月の所信表明演説で、「2050年にカーボンニュートラルを目指す」ことを表明しました。では、なぜ、カーボンニュートラルの実現を目指しているのでしょうか？

それは、みなさんもご存じのとおり地球温暖化への対応が喫緊の課題であることに加え、カーボンニュートラルへの挑戦が次の成長の原動力につながるからです。

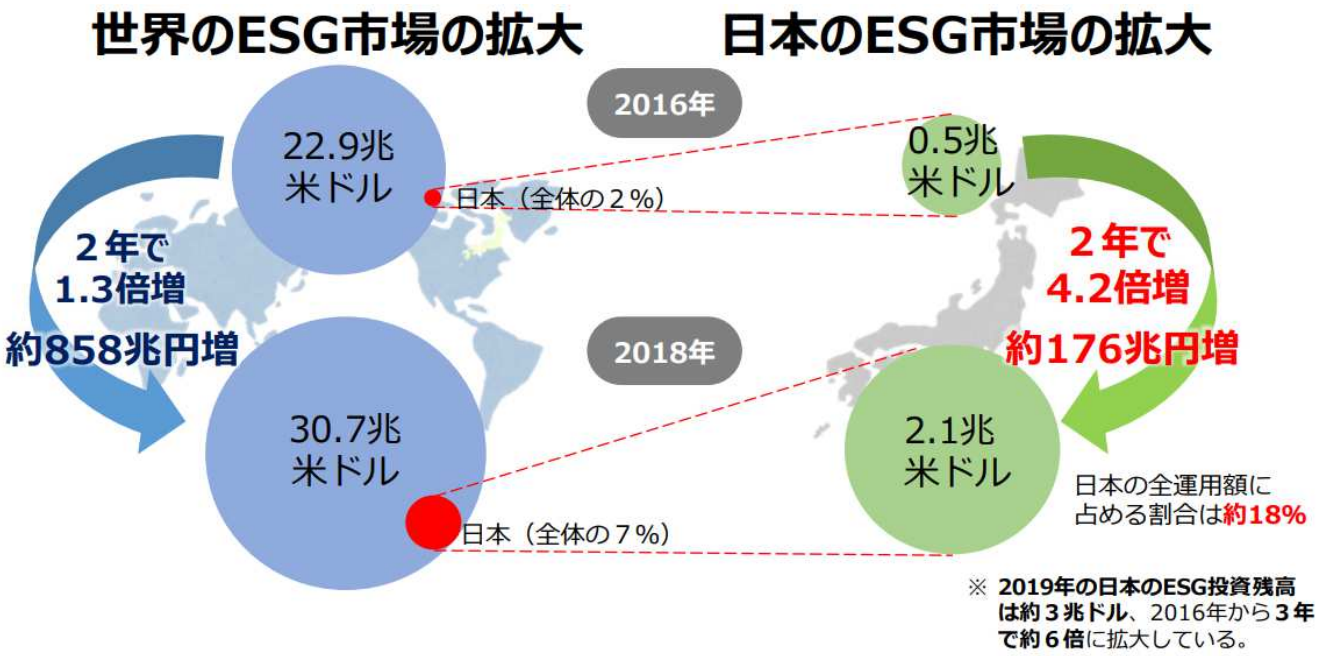
世界では、120以上の国と地域が「2050年カーボンニュートラル」という目標を掲げ、大胆な投資をする動きがあいつぐなど、気候変動問題への対応を“成長の機会”ととらえる国際的な潮流が加速しています。世界中のビジネスや金融市場も、その潮流の中で大きく変化しています。カーボンニュートラルへの挑戦は、社会経済を大きく変革し、投資をうながし、生産性を向上させ、産業構造の大転換と力強い成長を生み出すチャンスなのです。

各国の削減目標と気候変動政策

	カーボンニュートラル目標	グリーン×成長戦略　の記載ぶり
日本	2050年 カーボンニュートラル <総理所信演説(2020年10月)>	成長戦略の柱に**経済と環境の好循環**を掲げ、**グリーン社会の実現**に最大限注力（中略）もはや、温暖化への対応は経済成長の制約ではありません。積極的に温暖化対策を行うことが、**産業構造や経済社会の変革**をもたらし、**大きな成長につながる**という発想の転換が必要です。 <第203回総理所信演説(2020年10月)>
アメリカ	2050年 カーボンニュートラル <2020年7月バイデン氏の公約>	**高収入の雇用**と**公平なクリーンエネルギー**の未来を創造し、**近代的で持続可能なインフラを構築**し、連邦政府全体で科学的完全性と証拠に基づく政策立案を回復しながら、**国内外の気候変動対策**に取り組む。気候への配慮を**外交政策**と**国家安全保障**の**不可欠な要素**に位置付け。 <気候危機対処・雇用創出・科学的十全性の回復のための行政行動に関するファクトシート（2021年1月）>
EU	2050年 カーボンニュートラル <長期戦略提出(2020年3月)>	**欧州グリーンディール**は、公正で繁栄した社会に変えることを目的とした新たな**成長戦略**であり、2050年に温室効果ガスのネット排出がなく、経済成長が資源の使用から切り離された、近代的で資源効率の高い**競争力のある経済**。 <The European Green Deal（2019年12月）>
英国	2050年 カーボンニュートラル <長期戦略提出(2020年12月)>	2世紀前、英国は世界初の産業革命を主導した。（中略）英国は、クリーンテクノロジー（風力、炭素回収、水素など）に投資することで世界を新しい**グリーン産業革命に導く。** <The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution（2020年12月）>
中国	2060年 カーボンニュートラル <国連総会一般討論(2020年9月)>	**エネルギー革命**を推進しデジタル化の発展を加速。経済社会全体の全面的**グリーンモデルチェンジ**、**グリーン低炭素の発展**の推進を加速。 <第14次五か年計画　原案(2020年11月)>
韓国	2050年 カーボンニュートラル <長期戦略提出(2020年12月)>	カーボンニュートラル戦略を**将来の成長の推進力**として利用 将来世代の生存と持続可能な未来のために、GHG排出量を削減するという課題は守らなければならない国際的な課題であり、この課題は**将来の成長の機会**と見なされるべき。 <韓国の長期低排出発展戦略（2020年12月）>

大きい画像で見る

とくに昨今では、環境（Environment）、社会（Social）、企業統治（Governance）を考慮して投資をおこなう「ESG投資」が世界中で拡大しているため、環境への配慮は企業にとっても取り組むべき重要課題となっています。先進国を中心に、企業も生き残りをかけて、カーボンニュートラルを目指す技術のイノベーションの開発に大規模な投資をおこなっています。日本は、国としてカーボンニュートラルの技術開発を目標とし、産学官連携のもと長期的な視野に立ち、その実現を目指しています。



（出典）NPO法人 日本サステナブル投資フォーラム公表資料より環境省作成

大きい画像で見る

詳しく知りたい

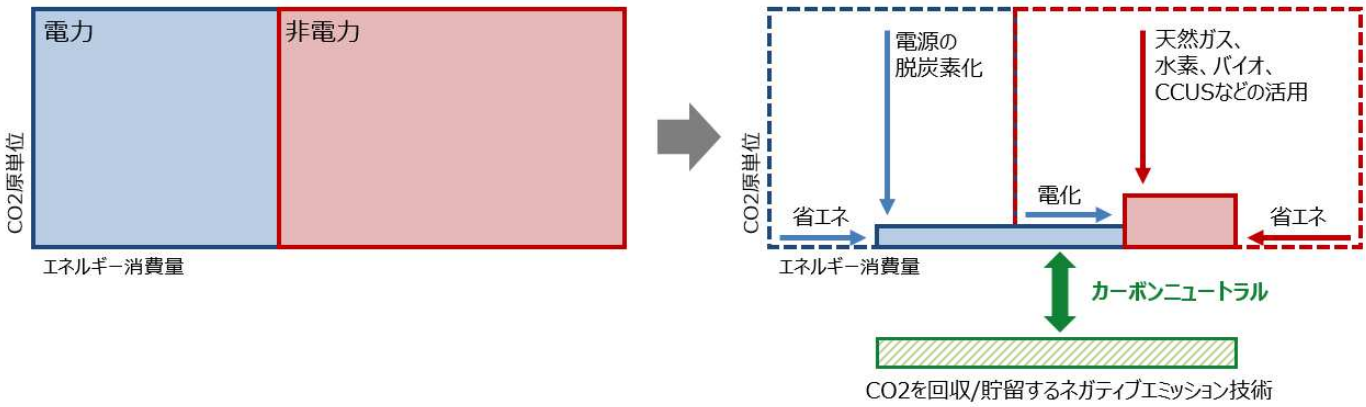
- CO2排出量削減に必要なのは「イノベーション」と「ファイナンス」
- 企業の環境活動を金融を通じてうながす新たな取り組み「TCFD」とは

菅総理の所信表明演説でも、「もはや、温暖化への対応は経済成長の制約ではありません。積極的に温暖化対策をおこなうことが、産業構造や経済社会の変革をもたらし、大きな成長につながるという発想の転換が必要です」と述べられました。カーボンニュートラルへの挑戦は、世界のグリーン産業をけん引し、日本が掲げる「経済と環境の好循環」を生み出すカギになると期待されているのです。

「カーボンニュートラル」を実現するための対策、その方向性は？

では、「カーボンニュートラル」は、本当に実現できるのでしょうか。実のところ、「2050年までに達成」という目標は、大変困難な課題です。具体的にどのような対策が必要となるのでしょうか。エネルギー起源CO2に関する対策の大きな方向性について、以下の図をもとに解説していきましょう。

CO2排出削減のイメージ



（出典）第3回　グリーンイノベーション戦略推進会議

大きい画像で見る

エネルギー起源CO2の排出量を考える際の指標として、「エネルギー消費量」と「CO2排出原単位」があります。「エネルギー消費量」はその名の通り、エネルギーをどれだけ使用するのかという意味ですが、エネルギーの使用には電力として消費するものもあれば、熱や燃料として利用する非電力でのエネルギー消費もあります。一方、「CO2排出原単位」とは、燃料を燃焼したり電気や熱を使用するなど、ある一定量のエネルギーを使用する際に、どのくらいのCO2が排出されるかを示すものです。燃料を燃焼したり電気や熱を使用したりすることで排出される「エネルギー起源CO2」は、以下の式で表されます。

エネルギー起源CO2の排出量＝CO2排出原単位×エネルギー消費量
CO2排出原単位：一定量のエネルギーを使用する時に排出されるCO2排出量
エネルギー消費量：エネルギーを使用した量

上の図でいうと、縦軸のCO2排出原単位と、横軸のエネルギー消費量をかけ合わせたもの（つまり、面積に該当するもの）が「エネルギー起源CO2の排出量」になります。カーボンニュートラルを達成するためには、「CO2排出原単位」と「エネルギー消費量」を低減し、この面積をゼロにしていく必要があります。では、どのように取り組んでいけばいいのでしょうか？

① 省エネルギー・エネルギー効率の向上
面積を小さく（CO2排出を低減）するために、まずできることはエネルギー消費量を減らすこと（省エネ）です。節電などがすぐに思いつくかもしれませんが、エネルギー効率の高い製品にすることによっても、エネルギー消費を抑えることができます。しかし、それだけではエネルギー使用量をゼロにすることは難しく、これだけでカーボンニュートラルを達成することはできません。

② CO2排出原単位の低減
省エネと同時に、一定量のエネルギーをつくる場合のCO2排出量（CO2排出原単位）を減らすことも必要です。電力部門では、再生可能エネルギー（再エネ）や原子力発電の利用といった「電源（電気をつくる方法）」の非化石化をすすめること、あるいはCO2を回収・貯留して利用する「CCUS」（「知っておきたいエネルギーの基礎用語 ～CO2を集めて埋めて役立てる『CCUS』」参照）やカーボンリサイクルを併用した火力発電を使うことなど、電源の脱炭素化を進める必要があります。カーボンニュートラルを達成するためには、電力部門のCO2排出原単位をゼロにする、つまり電源の脱炭素化が前提になってくるでしょう。

一方、非電力部門では、CO2排出原単位を低減するために何ができるでしょうか。エネルギーを自動車など動力の燃料として利用したり、産業部門や家庭部門で熱として利用したりすることでもCO2は排出されてしまいます。そこで、使用する燃料をより低炭素なものに転換したり、水素やバイオマス、合成燃料などに転換すれば、CO2排出原単位を低減することができます。CO2排出原単位を下げれば、CO2の総排出量を削減することにつながるのです。

③ 非電力部門の電化
非電力分野では、高熱利用や燃料利用など脱炭素化が技術的に難しかったり、高コストになったりする場合もあり、電力部門と比較すると、比較的CO2排出原単位を低減することが難しいと言われています。そのため、排出原単位のより小さい電力をエネルギーとして利用することで、二酸化炭素排出量（面積）を小さくします。電化を進めるとともに電源の脱炭素化をおこなうことで、CO2排出量（面積）を小さくすることができるのです。

④ネガティブエミッション

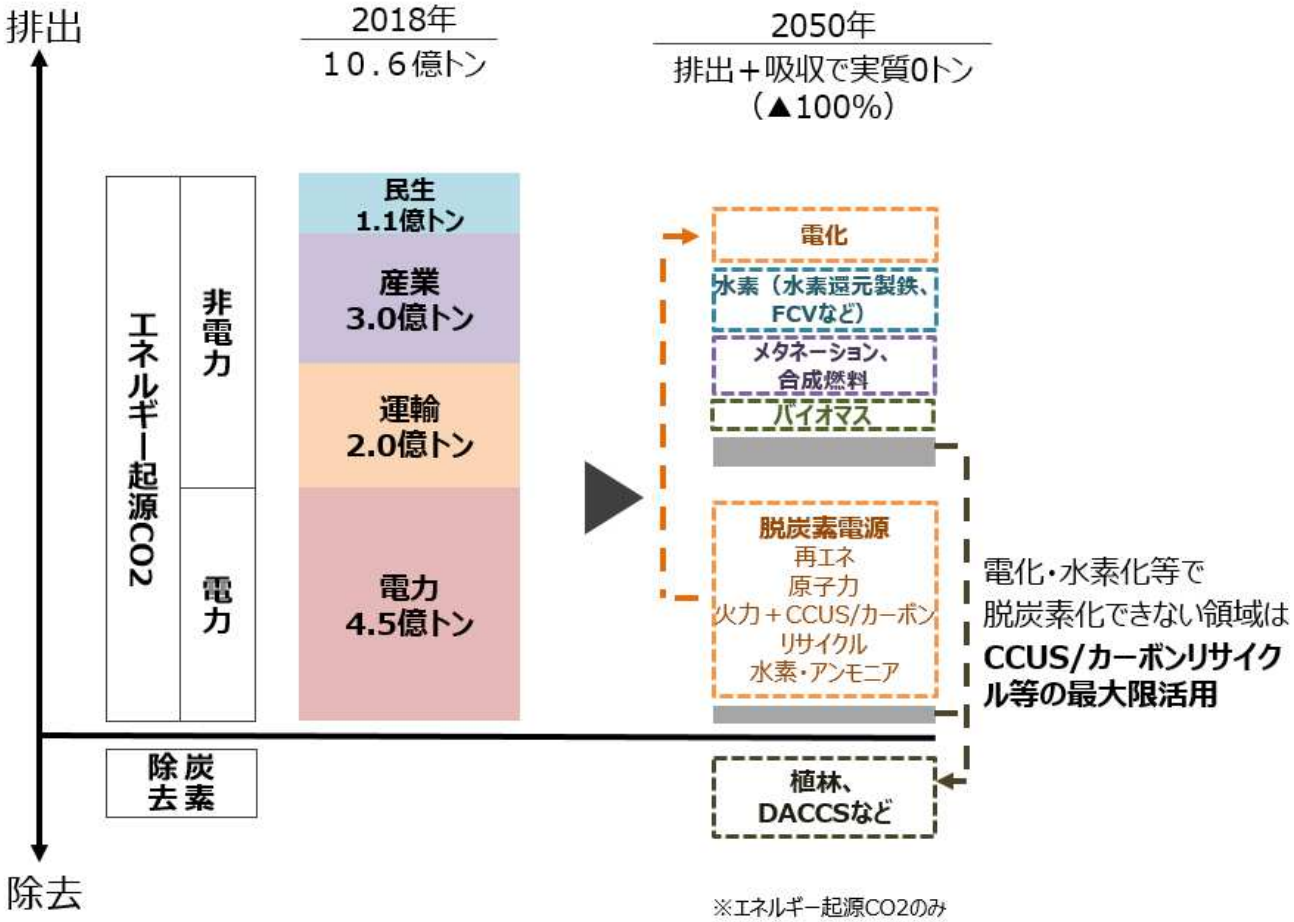
省エネやCO2排出原単位の低減、電化の取り組みをしても、どうしても脱炭素化できない部門や、CO2の削減に膨大なコストがかかってしまう部分もあります。また、非エネルギー起源の温室効果ガスの排出もあります。そうした分野については、植林を進めて光合成に使われる大気中のCO2の吸収量を増やしたり、「BECCS」（バイオマス燃料の使用時に排出されたCO2を回収して地中に貯留する技術）や「DACCS」（大気中にすでに存在するCO2を直接回収して貯留する技術）といった「ネガティブエミッション技術」を用いたりすることによって、大気中のCO2を減少させることができます。

⑤CO２排出を全体としてゼロに

上記のように、カーボンニュートラルを目指すためには、①省エネ、②電源の脱炭素化や非電力部門のCO2排出原単位の低減、③非電力部門の電化、④ネガティブエミッションを組み合わせ、トータルでのカーボンニュートラルを目指すことが重要です。

どの部分のCO2を減らすの？

では、どのくらいの量のCO2を、どのように減らしていくことが求められていくのでしょう？エネルギー起源のCO2について、具体的なイメージを次の図で説明しましょう。



※「民生」は一般の人々の生活（家庭部門）や、事務所やお店などの第3次産業（業務部門）のこと

大きい画像で見る

先ほども述べたように、カーボンニュートラルを実現するには、電力部門の脱炭素化が大前提になります。一方、非電力部門については、電化や水素化などCO2を排出しないエネルギーへの転換を進めることが必要です。このようにして、2018年には電力・非電力部門あわせて10.6億トン排出していたエネルギー起源CO2を減らしていく必要があります。2050年には、排出量と、植林やDACCSなどによるCO2の吸収を相殺することで、実質排出０トンにしていくことを目指しています。

どんな技術が開発されているの？

最後に、それぞれの分野で、カーボンニュートラルに向けてどのような取り組みがおこなわれているかをご紹介しましょう。電力部門では、再エネの導入拡大、水素発電やアンモニア発電における技術開発が進められています。

詳しく知りたい

アンモニアが"燃料"になる？！（前編）～身近だけど実は知らないアンモニアの利用先

非電力部門では、工場などの産業分野において、機器のエネルギー源を電力にする「電化」の促進や、バイオマスの活用などの技術開発に取り組むとともに、製造プロセスにおいても新しい技術の導入が試みられています。たとえば、鉄鋼業など製造プロセスでの原料として化石燃料を使用する産業では、電化による非化石化をおこなうことができません。そのため、原料である石炭の代替として水素を利用することで低炭素化を図る技術の研究が進められています（「水素を使った革新的技術で鉄鋼業の低炭素化に挑戦」参照）。化学産業では、光触媒を用いて太陽光によって水から水素を分離し、水素と工場から排出されるCO_2を組み合わせてプラスチック原料を製造する人工光合成技術（「CO2を"化学品"に変える脱炭素化技術『人工光合成』」参照）などの研究が進められています。また、セメント産業では、CO2を廃コンクリートなどに用いて炭酸塩として固定し、原料などに使用するCCUSの取り組みなどが進められており、コンクリート製品でもCO2を利用した「CO2吸収コンクリート」の開発がおこなわれています（「未来ではCO2が役に立つ？！『カーボンリサイクル』でCO2を資源に」参照）。



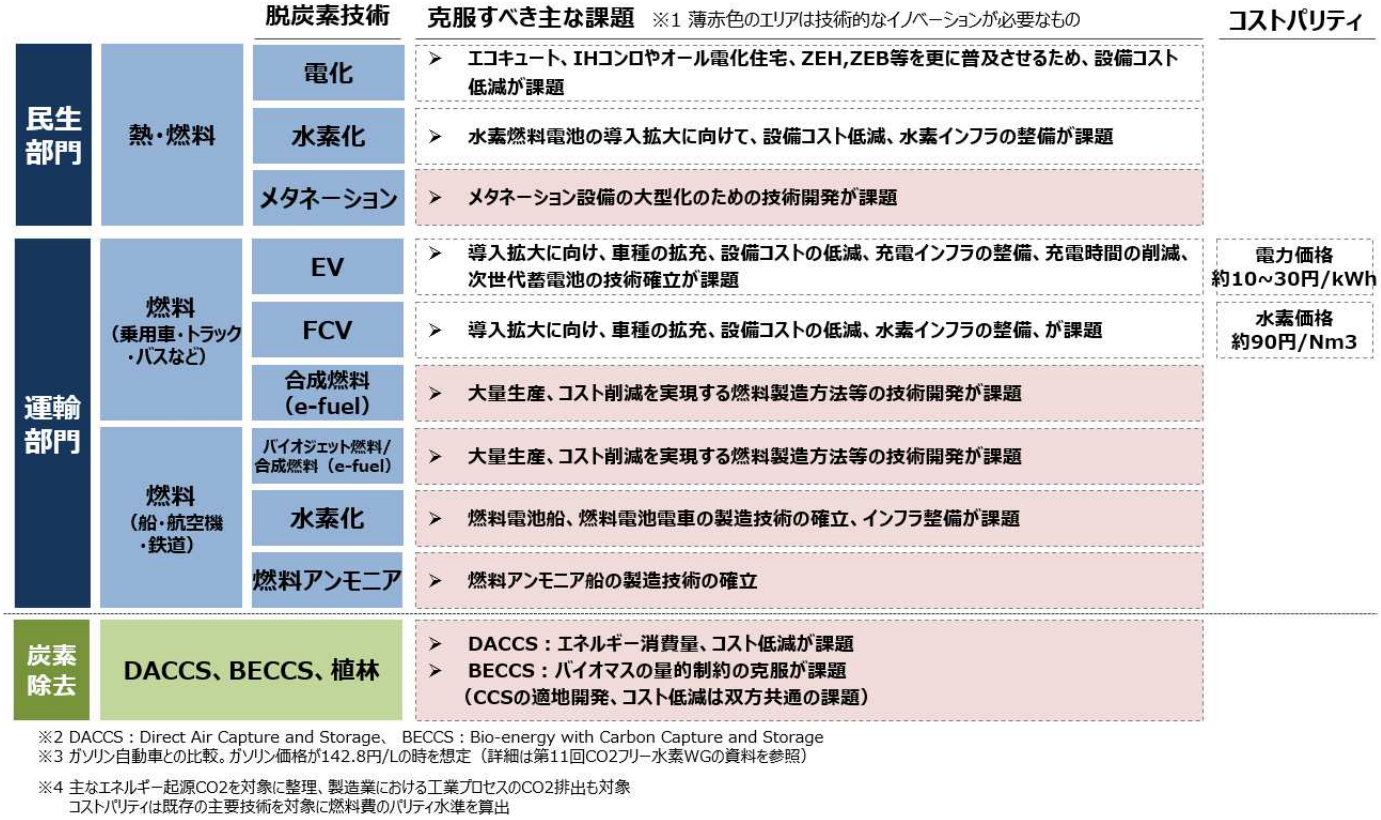
		脱炭素技術	克服すべき主な課題 ※1 薄赤色のエリアは技術的なイノベーションが必要なもの	コストパリティ
電力部門	発電	再エネ	➢ 導入拡大に向け、系統制約の克服、コスト低減、周辺環境との調和が課題	
		原子力	➢ 安全最優先の再稼働、安全性等に優れた炉の追求、継続した信頼回復が課題	
		火力＋CCUS/カーボンリサイクル	➢ CO2回収技術の確立、回収CO2の用途拡大、CCSの適地開発、コスト低減が課題	
		水素発電	➢ 水素専焼火力の技術開発、水素インフラの整備が課題	水素価格 約13円/Nm3
		アンモニア発電	➢ アンモニア混焼率の向上、アンモニア専焼火力の技術開発が課題	
産業部門	熱・燃料	電化	➢ 産業用ヒートポンプ、設備のコスト低減、技術者の確保、より広い温度帯への対応が課題	
		バイオマス活用（主に紙・板紙業）	➢ 黒液（パルプ製造工程で発生する廃液）、廃材のボイラ燃料利用の普及拡大に向け、燃料コストの低減が課題	
		水素化（メタネーション）	➢ 水素のボイラ燃料利用、水素バーナー技術の普及拡大に向け、設備のコスト低減、技術者の確保、水素インフラの整備が課題	水素価格 40円/Nm3
			➢ メタネーション設備の大型化のための技術開発が課題	
		アンモニア化	➢ 火炎温度の高温化のためのアンモニアバーナー等の技術開発が課題	
	製造プロセス（鉄鋼・コンクリート・化学品）	鉄：水素還元製鉄	➢ 水素による還元を実現するために、水素による吸熱反応の克服、安価・大量の水素供給が課題	水素価格 約８円/Nm3
		コンクリート：CO2吸収型コンクリート	➢ 防錆性能を持つCO2吸収型コンクリート（骨材としてCO2を利用）の開発・用途拡大、スケールアップによるコスト低減、CO2のセメント原料活用（石灰石代替）の要素技術開発が課題 ➢ セメントキルン（回転窯）からのCO2回収のための技術開発が課題	
		化学品：人工光合成	➢ 変換効率を高める光触媒等の研究開発、大規模化によるコスト低減が課題	

※2 主なエネルギー起源CO2を対象に整理、製造業における工業プロセスのCO2排出も対象
コストパリティは既存の主要技術を対象に燃料費のパリティ水準を算出

※3 水素発電のパリティはLNG価格が10MMBtuの場合、水素還元製鉄は第11回CO2フリー水素WGの資料より抜粋(100kW級の純水素FCで系統電力＋ボイラーを置換)

大きい画像で見る

運輸の分野では、みなさんも知っている電動自動車（EV）や燃料電池自動車（FCV）の導入拡大などが進められています。また、私たちの家庭においても、給湯器やコンロなどの電化の促進や、水素燃料電池の導入拡大などが進められています。



		脱炭素技術	克服すべき主な課題 ※1 薄赤色のエリアは技術的なイノベーションが必要なもの	コストパリティ
民生部門	熱・燃料	電化	➢ エコキュート、IHコンロやオール電化住宅、ZEH,ZEB等を更に普及させるため、設備コスト低減が課題	
		水素化	➢ 水素燃料電池の導入拡大に向けて、設備コスト低減、水素インフラの整備が課題	
		メタネーション	➢ メタネーション設備の大型化のための技術開発が課題	
運輸部門	燃料（乗用車・トラック・バスなど）	EV	➢ 導入拡大に向け、車種の拡充、設備コストの低減、充電インフラの整備、充電時間の削減、次世代蓄電池の技術確立が課題	電力価格 約10~30円/kWh
		FCV	➢ 導入拡大に向け、車種の拡充、設備コストの低減、水素インフラの整備、が課題	水素価格 約90円/Nm3
		合成燃料（e-fuel）	➢ 大量生産、コスト削減を実現する燃料製造方法等の技術開発が課題	
	燃料（船・航空機・鉄道）	バイオジェット燃料/合成燃料（e-fuel）	➢ 大量生産、コスト削減を実現する燃料製造方法等の技術開発が課題	
		水素化	➢ 燃料電池船、燃料電池電車の製造技術の確立、インフラ整備が課題	
		燃料アンモニア	➢ 燃料アンモニア船の製造技術の確立	
炭素除去	DACCS、BECCS、植林		➢ DACCS：エネルギー消費量、コスト低減が課題 ➢ BECCS：バイオマスの量的制約の克服が課題 （CCSの適地開発、コスト低減は双方共通の課題）	

※2 DACCS：Direct Air Capture and Storage、 BECCS：Bio-energy with Carbon Capture and Storage
※3 ガソリン自動車との比較。ガソリン価格が142.8円/Lの時を想定（詳細は第11回CO2フリー水素WGの資料を参照）

※4 主なエネルギー起源CO2を対象に整理、製造業における工業プロセスのCO2排出も対象
コストパリティは既存の主要技術を対象に燃料費のパリティ水準を算出

大きい画像で見る

2050年カーボンニュートラル達成のためには、さまざまな既存の技術に加え、新しい技術を駆使して目標に近づけていくことが必要です。エネルギーを使う私たちも、エネルギーを低炭素・脱炭素なものへと転換するという意識を高めていくことが必要になるでしょう。

お問合せ先

記事内容について

経済産業省 産業技術環境局 地球環境対策室

スペシャルコンテンツについて

長官官房 総務課 調査広報室

2021/3/16に公開した記事内の図に誤りがありました。「どの部分のCO2を減らすの？」の図版中、左の図に「2014年 12.4億トン」と記載しておりましたが、正しくは「2018年 10.6億トン」でした。また、右の図に「非化石電源」と記載しておりました箇所は正しくは「脱炭素電源」でした。お詫びして訂正いたします。（2021/3/17 11:00）

2018-06-28

水素を使った革新的技術で鉄鋼業の低炭素化に挑戦

温暖化対策 水素 省エネルギー 熱エネルギー 技術

いいね！ シェア 20 ツイート 1 メルマガ登録 記事のリクエスト

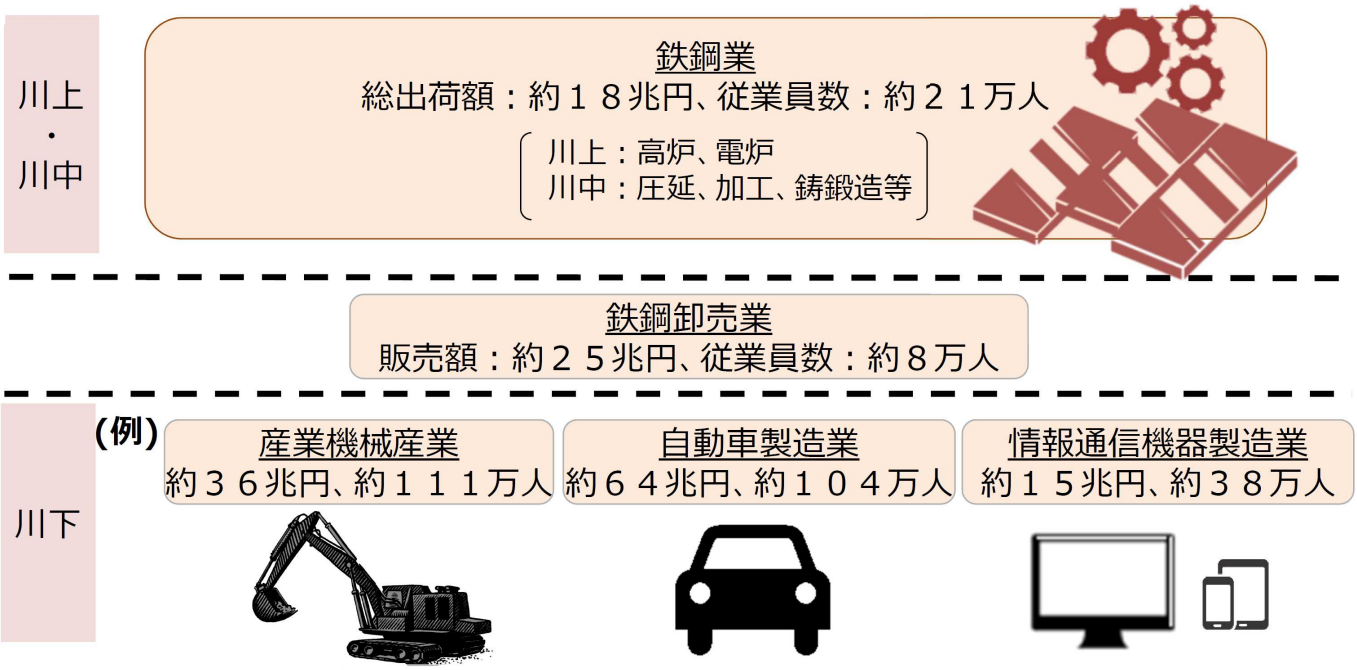


「実はCO2削減によく効く、熱エネルギーの低炭素化」でもご紹介したように、産業における熱エネルギーを使ったプロセスはCO2の排出量が多いという課題があります。こうした産業部門の中でもCO2排出量で多くの割合を占める「鉄鋼業」において、現在技術開発が進められている、「水素活用還元プロセス技術」という低炭素化の試みについてご紹介します。

日本における鉄鋼業のCO2排出量と省エネポテンシャル

鉄鋼業は、自動車や情報通信機器、産業機械など、ほかの産業の基盤となる基幹産業であり、製造業の上流行程にあたる産業分野です。その国内総出荷額は約18兆円、従業員数は約21万人にものぼります（2015年時点）。製造業全体の名目GDP（国内総生産）に占める割合は3.2%、金額にすると約3.5兆円です（2015年時点）。

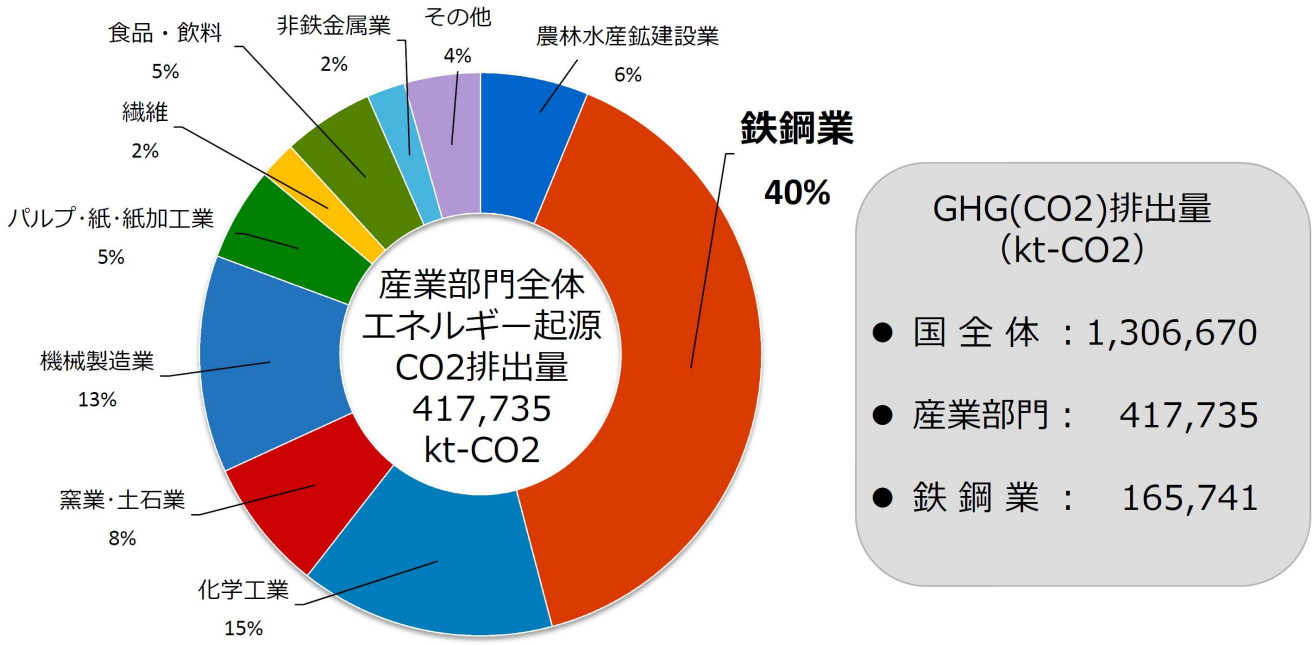
日本の鉄鋼業界の産業規模（2015年）



（出典）経済産業省経済センサス、商業統計調査、国民経済計算

大きい画像で見る

このように、重要な産業である鉄鋼業ですが、エネルギーを起源とするCO2排出量の割合で見ると、産業部門全体の約40%と、ひじょうに高い率を占めています（2016年時点）。また、その40%のうちの約80%を「製鉄プロセス」が占めています。



（出典）国立研究開発法人国立環境研究所「日本の温室効果ガス排出量データ（2016）」

大きい画像で見る

一方で、日本企業は長い間、世界でもトップクラスの省エネ取り組みを推進してきた歴史があり（「省エネ大国・ニッポン ～省エネ政策はなぜ始まった？そして、今求められている取り組みとは？～」参照）、それは鉄鋼業においても同様です。国際エネルギー機関（IEA）の調査によれば、2011年における日本の鉄鋼業の省エネポテンシャル（省エネをさらに進められる余地がどのくらいあるか）は、世界最小です。これは、日本の鉄鋼業はすでに世界トップクラスの省エネを達成していることを意味しています。さらなる省エネを進め、CO2排出量を低減するためには、革新的な技術の開発が必要となります。

各国の省エネポテンシャル（2011年）



（出典）IEA「Energy Technology Perspective2014」

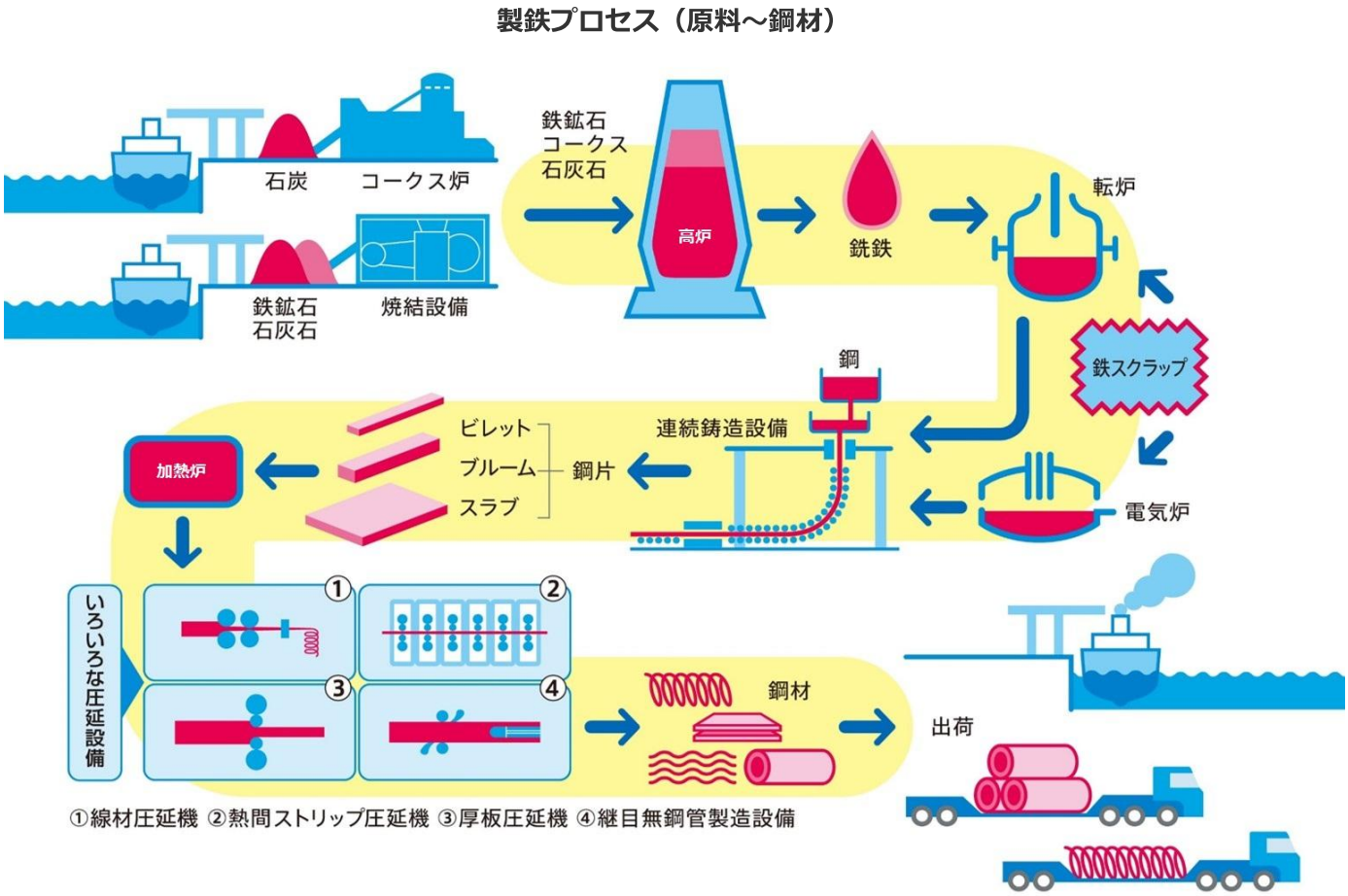
大きい画像で見る

低炭素化の鍵となるのは、鉄鉱石に含まれる酸素をとりのぞく「還元」

そこで取り組まれているのが「水素活用還元プロセス技術」、頭文字をとって「COURSE50（コース50）」と呼ばれる技術です。この「還元」という言葉、理科の授業で習った記憶があるのではないでしょうか？「還元」とは、物質が酸素と結びつく「酸化」とは逆の反応、つまり、酸化物から酸素をとりのぞくことを意味します。学校の授業を思い出しながら、そのプロセスを見てみましょう。

製鉄プロセスとは、以下のようなものです。まず、材料の石炭を蒸し焼きにして「コークス」と呼ばれる物質を作ります。大気を遮断して蒸し焼きにすることで、さまざまな含有物がガスとなって抜け出し、より純粋な炭素部分だけが残って、燃焼しやすい物質になります。

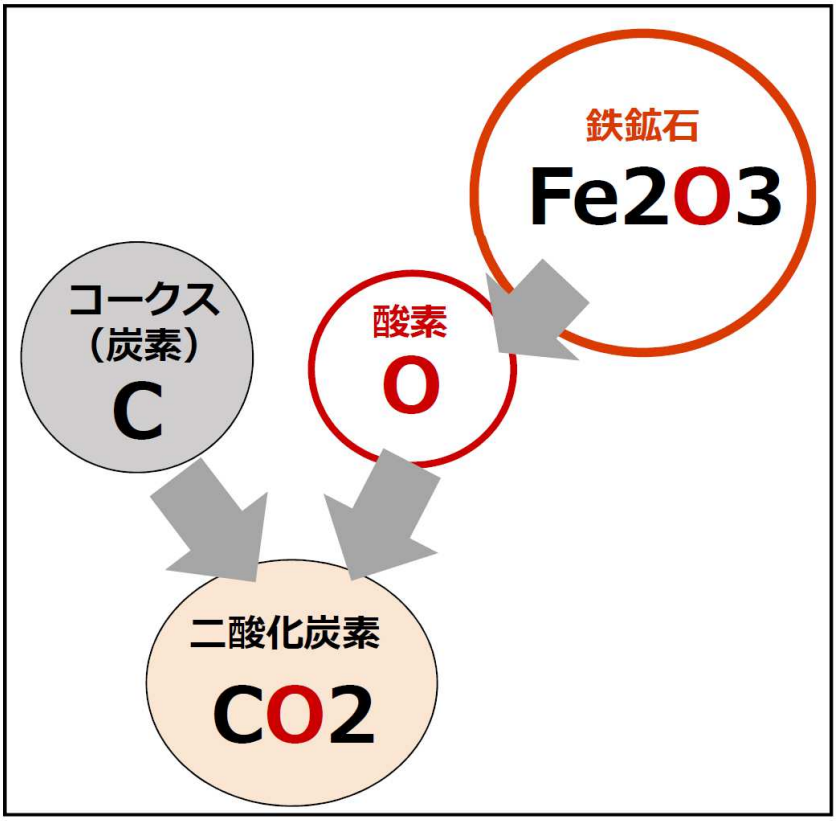
次に、このコークスと鉄鉱石や石灰石を、「高炉」と呼ばれる炉に投入します。高炉はひじょうに大きなもので、高さ30階建てのビルに相当するほどです。そこで出来るのが、製鋼の原料となる「銑鉄（せんてつ）」です。その後、さまざまな行程を経て、「鋼片」と呼ばれる塊になり、最終的に鋼材となります。この高炉で何が起こっているのかということが、「COURSE50（コース50）」に深く関わってきます。



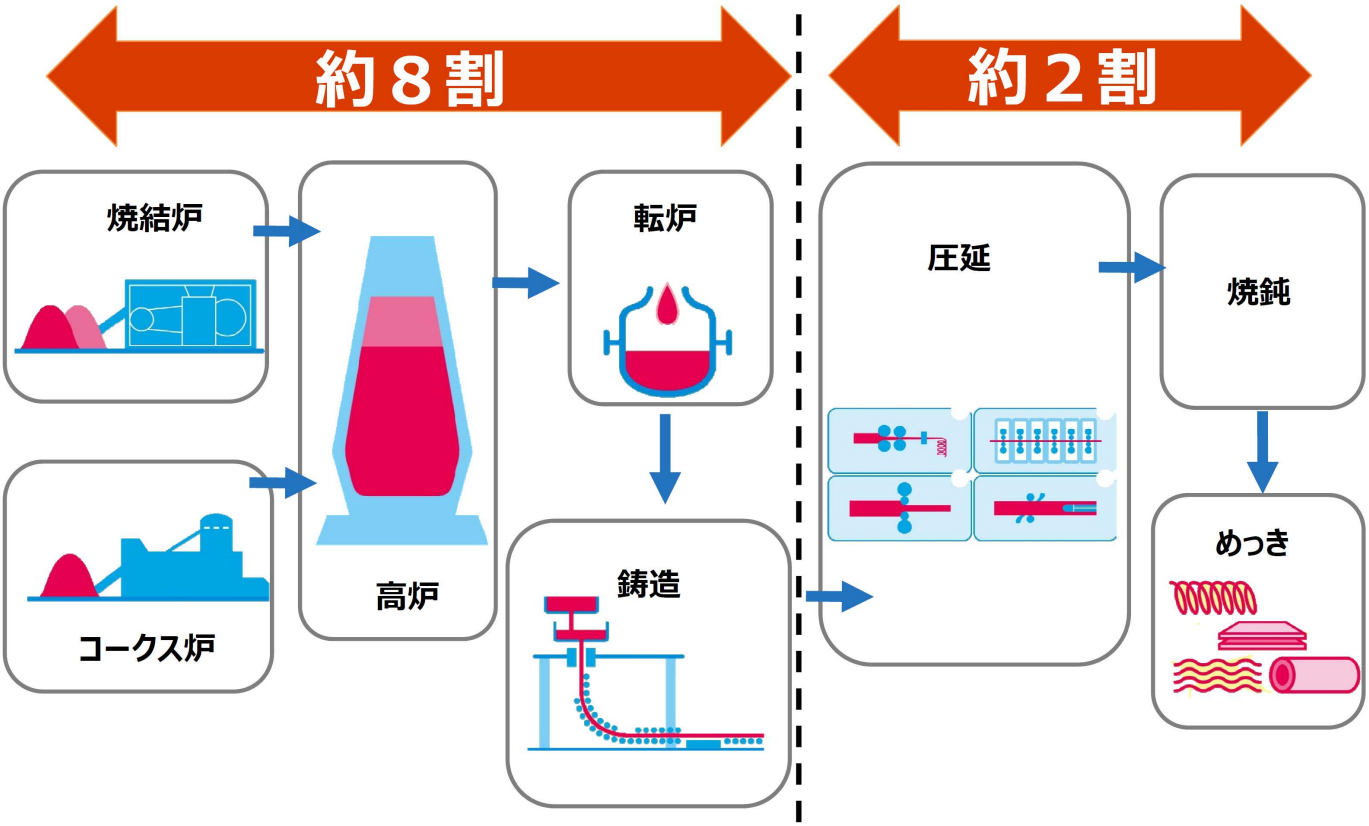
（出典）一般社団法人日本鉄鋼連盟

大きい画像で見る

前述したコークスは炭素の塊、元素記号では「C」で表される物質です。一方、鉄鉱石は「Fe2O3」で表されます。高炉の中では、燃焼しやすいコークスは燃えてひじょうに高い熱を発し、炉内を高温にします。この熱により、鉄鉱石が溶かされるのです。さらに、コークスは「C」ですから、鉄鉱石に含まれる酸素「O」と結びついてCO2を発生させ、鉄鉱石から酸素をとりのぞくという役割を果たします。この現象を還元と呼ぶのです。この工程により、鉄鉱石が酸化することを防ぎ、強い鉄を作ることができます。



「製鉄プロセス」全体におけるエネルギー消費の割合は、この高炉を含む「上行程」が約8割を占めています。この部分で省エネとCO2削減が進めば、鉄鋼産業全体のCO2排出量に、大きなインパクトを与えることができます。



（出典）一般社団法人日本鉄鋼連盟

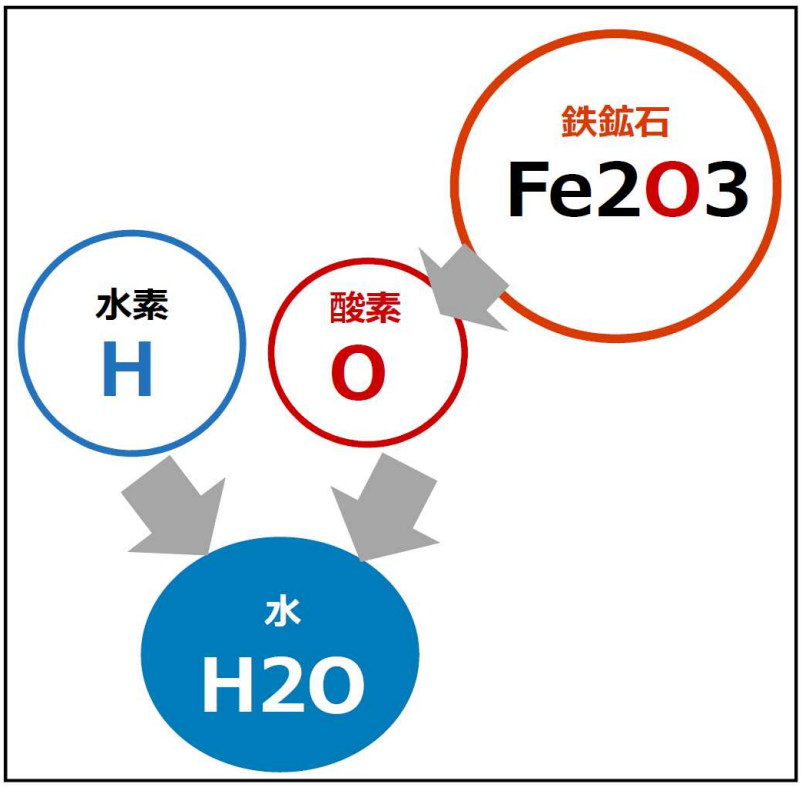
大きい画像で見る

CO2を削減するために「水素」を利用する

「COURSE50」は、この高炉を使う製鉄プロセスの「上行程」に関して、低炭素化を図ろうとするものです。「COURSE50」は、以下の2つの技術で構成されています。

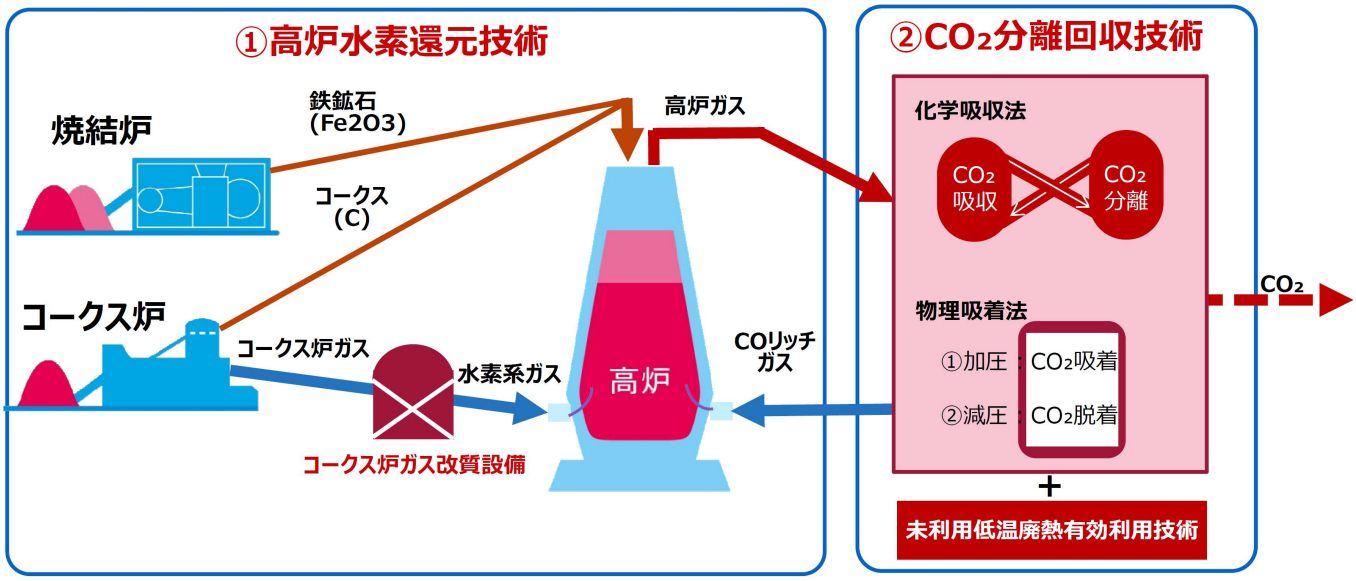
①「高炉水素還元技術」

石炭を蒸し焼きにしてコークスにする時、そこから排出されるガスの中にはメタン（CH4）も含まれています。このメタンから水素（H）を取り出して、高炉に投入するコークスの役割の一部を代替させます。つまり、水素（H）を、鉄鉱石「Fe2O3」の酸素「O」と結びつけて水（H2O）を作ることで、鉄鉱石から酸素をとりのぞく「還元」をおこなうわけです。



②「CO2分離回収技術」

水素で「還元」を一部代替させるとはいえ、高熱で燃焼させるためにも高炉へのコークスの投入はやはり必要です。しかしそうすると、前述した通り、「還元」でCO2が発生してしまいます。そこで、高炉が排出するガスの中からCO2を分離し、回収します。また、この分離行程には、製鉄所内で使われずに廃棄されている低温の熱エネルギー（未利用低温排熱）を利用します。



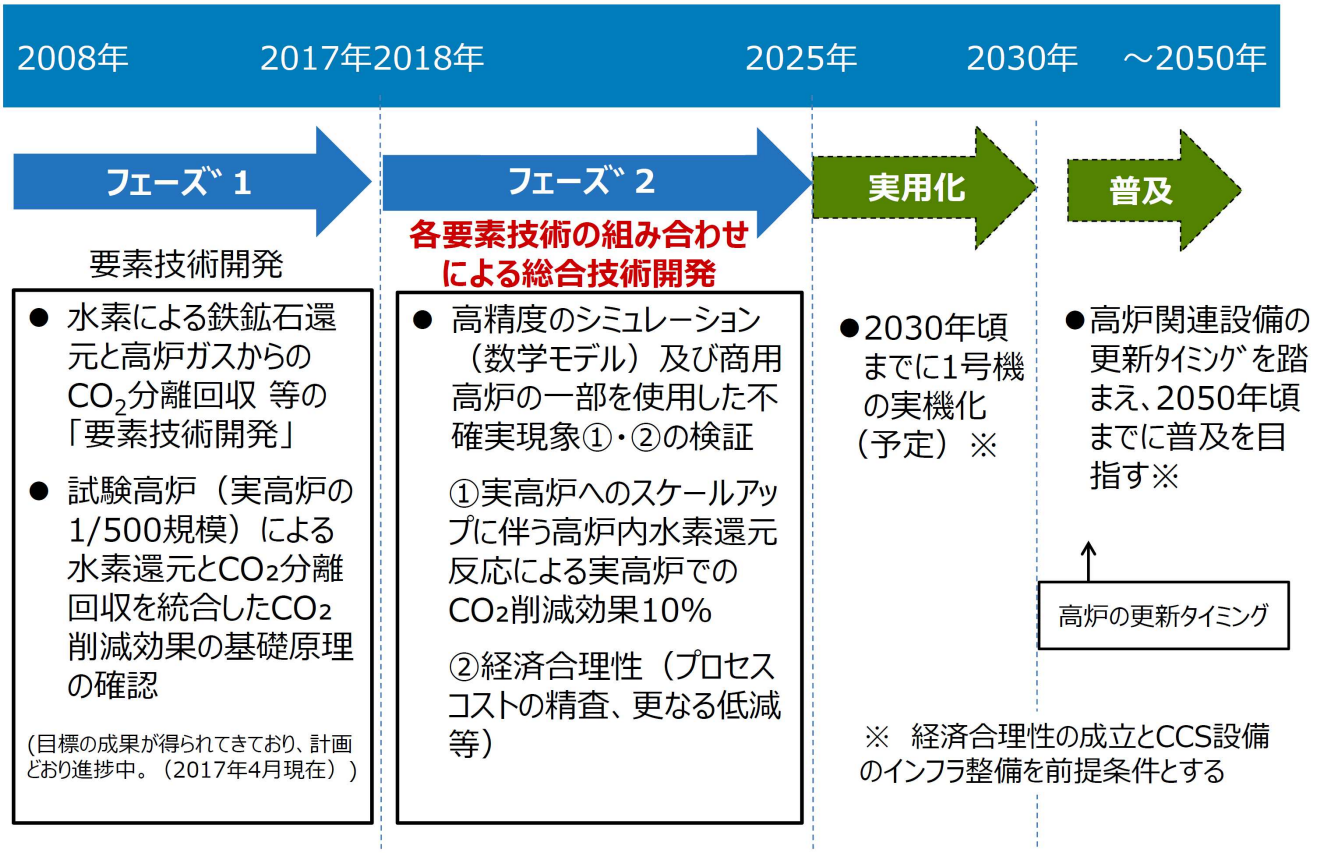
大きい画像で見る

このように、「COURSE50」が実現できれば、製鉄プロセスの上行程において低炭素化を図ることができるのです。

高さ約35メートルの試験高炉でダイナミックな実験

現在、「COURSE50」に関しては、企業や大学などが協力し、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援を受けながら、研究を進めています。水素還元技術では、製鉄所内で副次的に発生するガスを活用した水素の増幅や、水素を含むガスを高炉に入れる吹き込み方法など、水素還元割合の増加を実現させるための研究が進められています。また、CO2の回収方法として、化学物質で吸収させる「化学吸収技術」方式と、吸着剤を使用する「物理吸着技術」の技術開発が進められています。

COURSE50の開発ロードマップ



大きい画像で見る

開発ロードマップ上では、2018年はフェーズ2にあたり、2016年に完成した試験高炉で、現在実証実験が進められています。前述したように巨大な実際の高炉とくらべると小さいものの、それでも高さは全長約35メートルと、十分大きな設備です。鉄鋼業のダイナミックさが分かるのではないでしょうか。



実証実験がおこなわれている試験高炉

まずは2030年頃までの1号機実機化に向けて、そして2050年の「COURSE50」普及に向けて、今後も官民の力を合わせて研究開発に取り組んでいきます。

お問合せ先

記事内容について

経済産業省 製造産業局 金属課 金属技術室

スペシャルコンテンツについて

長官官房 総務課 調査広報室

2021-03-04

太陽とCO2で化学品をつくる「人工光合成」、今どこまで進んでる？

基礎用語・Q&A　温暖化対策　技術

いいね！　シェア 91　ツイート　3　メルマガ登録　記事のリクエスト



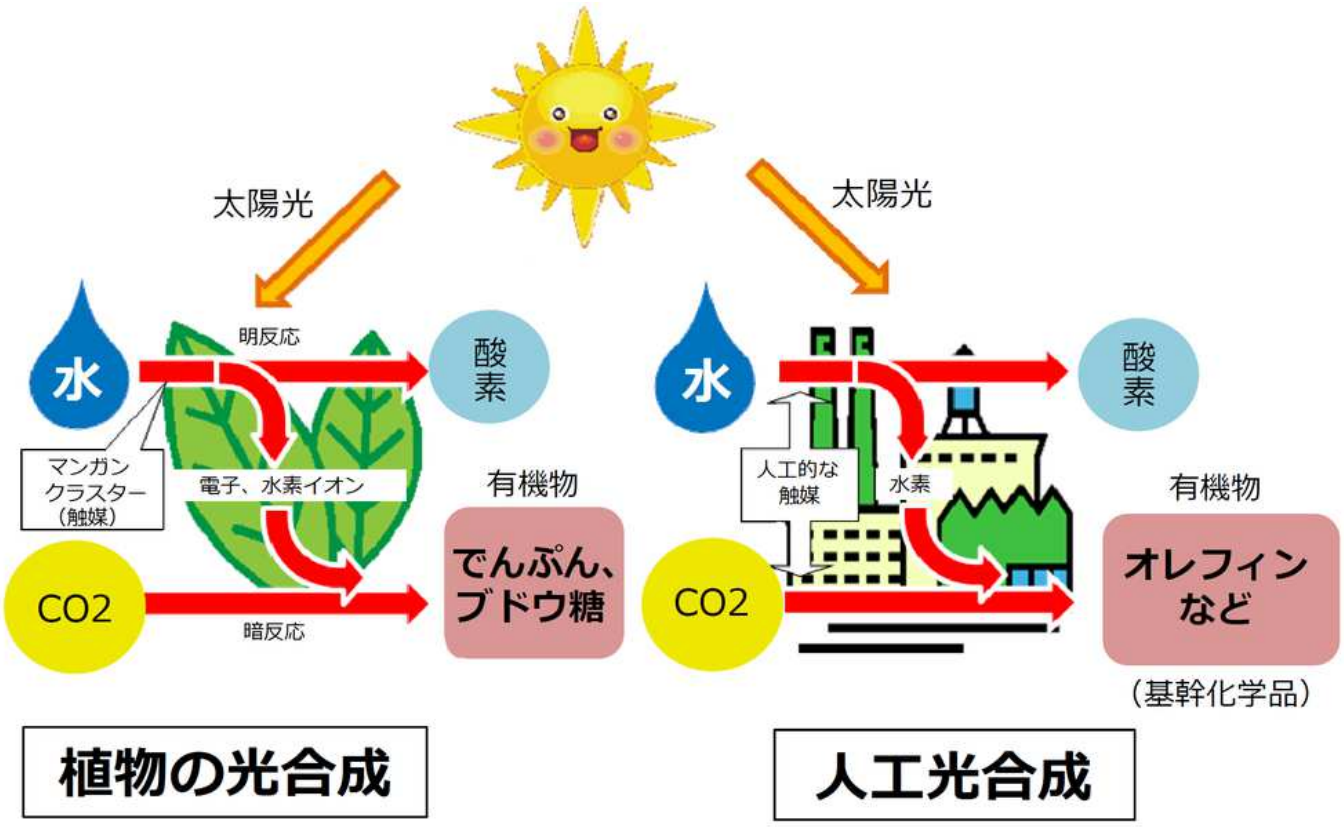
光触媒を使った水素製造のフィールドテスト

植物が、太陽エネルギーを利用してCO2と水から有機物（でんぷん）と酸素を生み出す「光合成」。日本が目指す「カーボンニュートラル」（「『カーボンニュートラル』って何ですか？（前編）～いつ、誰が実現するの？」参照）においても、CO2削減に寄与する植物のこうした働きは重視されていますが、この光合成を模して、太陽エネルギーとCO2で化学品を合成しようとしているのが「人工光合成」技術です。そのメカニズムについては「CO2を“化学品”に変える脱炭素化技術『人工光合成』」でご紹介しましたが、今回は、産官学連携で進められている「人工光合成」が今どこまで進んでいるのか、研究の最前線をご紹介しましょう。

CO2を使うことで削減する、「人工光合成」を簡単におさらい

日本が掲げる「2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」という長期的目標を実現するためには、さまざまな領域でCO2を削減することが重要です。その方法のひとつとして、日本は、「カーボンリサイク

ル」や「CCUS」といった、“CO2を使用することで削減する”革新的技術の研究を進めています。「人工光合成」は、プラスチックなど身近な製品の原料を製造する化学産業において、CO2を活用しようとする技術です。



「光合成」と「人工光合成」の概念

大きい画像で見る

たとえば、上の図にある、プラスチックの原料などになる「オレフィン」を人工光合成で作るには、太陽光に反応して水を酸素と水素に分解する「光触媒」と呼ばれる物質と、そこから水素だけを取り出す「分離膜」、水素にCO2を合わせて化学合成をうながす「合成触媒」の技術が必要となります。

これらの技術は、「CO2を“化学品”に変える脱炭素化技術『人工光合成』」でご紹介したとおり、現在、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が支援する産官学連携のプロジェクトで研究が進められています。2020年9月には、梶山経済産業大臣が人工光合成プロジェクトを視察。光触媒で水から水素を作っている様子を見学しました。

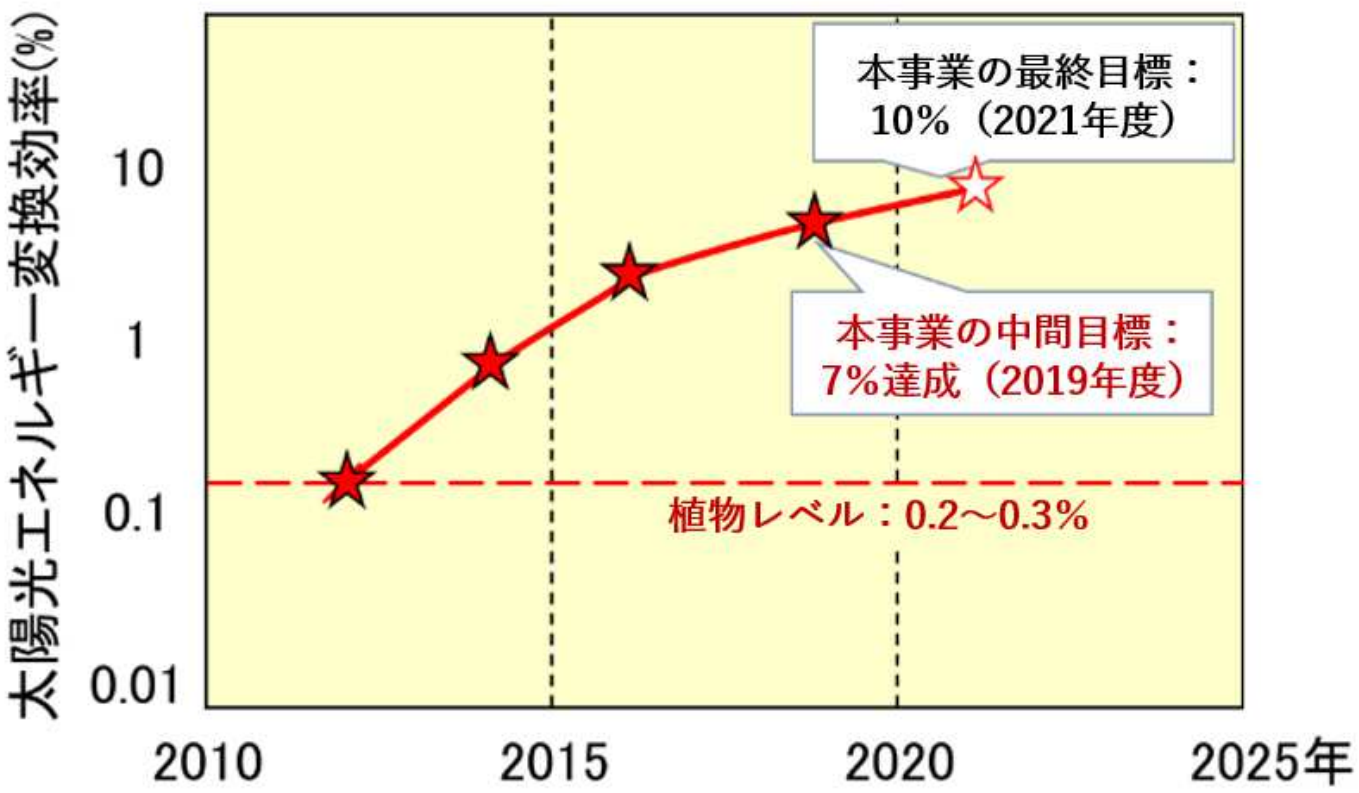


変換効率7.0%達成、量子収率100%実現…世界初の画期的な研究成果

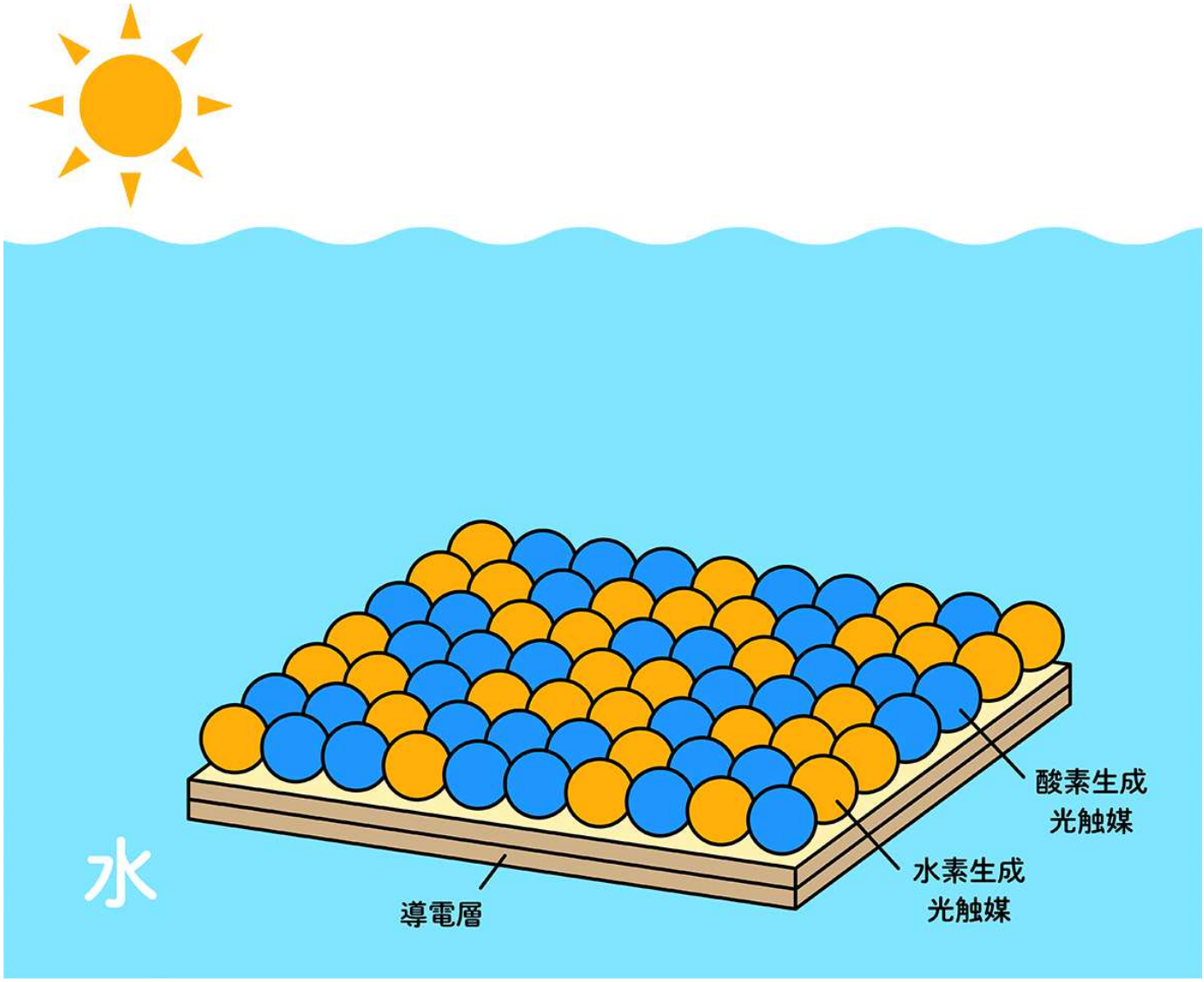
2021年の今、その研究はどこまで進んでいるのでしょうか？

開発当初、「光触媒」における「太陽エネルギー変換効率」、つまり太陽エネルギーを使ってどのくらい水から水素を作り出すことができるのかについては、植物の光合成と同じくらい（0.2～0.3%）でした。前回の記事では、水素と酸素を別々の光触媒で生成する「タンデムセル型光触媒」という方法で、2017年度に効率が3.7%まで上昇しているとお伝えしていましたが、2019年には5.5%を達成しました。これは、「窒化タンタル」と呼ばれる光触媒を利用することで、光を透過しやすい赤色透明という特徴を持つ電極を開発できたことが理由です。現在はさらに7.0%まで上昇しており、2021年度の最終目標である10%まで、あと少しとなっています。

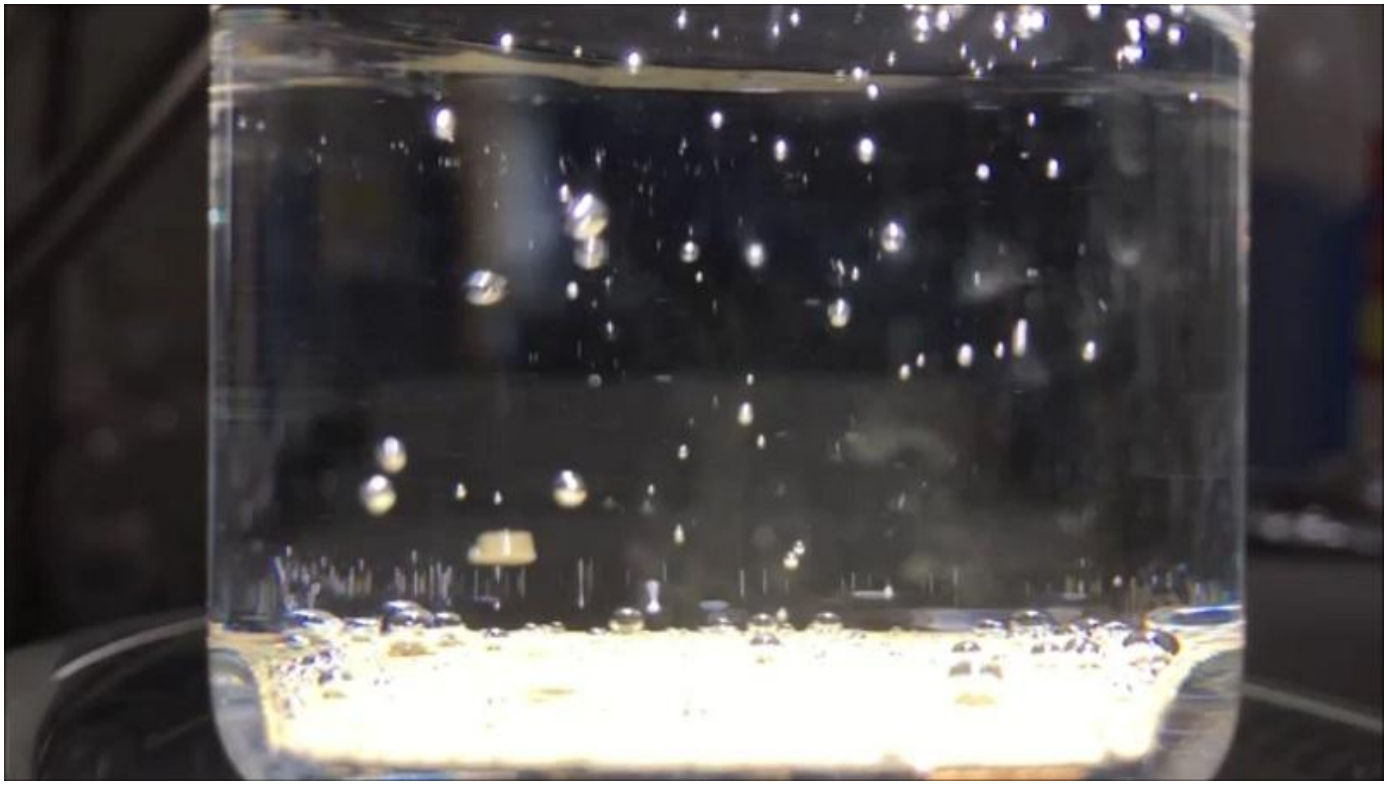
タンデムセル型光触媒と太陽光エネルギー変換効率の推移



また、世界初の技術であり、水中に置いて太陽光をあてれば水素と酸素を生成することができるシート「混合粉末型光触媒シート」は、実際の環境においた上で予備実験が実施されました。現在は、太陽エネルギー変換効率1.1%を達成しています。



混合粉末型光触媒シートによる水分解の概念図



混合粉末型光触媒シートによる水分解反応

実用化を目指して製造プロセスの研究も進められており、「スクリーン印刷」を利用した製造法の開発に成功しています。粉末状になった光触媒や電気を通すことのできる材料を、印刷機を使って基盤上に塗布するのです。この製造プロセスであれば、大量生産や大面積展開を実現することができます。

さらに2020年5月には、NEDOと人工光合成化学プロセス技術研究組合・信州大学・山口大学・東京大学・産業技術総合研究所の共同研究により、世界で初めてとなる100%に近い「量子収率」の粉末状光触媒が開発されました。光触媒の太陽エネルギー変換効率を高めるための方法には、大きく分けて以下の2つがあり、今回は②を最大化することができたということです。

① これまでの光触媒は紫外線しか吸収できなかったが、紫外線だけでなく、可視光線まで吸収することでより多くの太陽エネルギーを利用する
② 光の粒子である「光子」を利用する効率＝量子収率を高める

これまでに開発された光触媒では、量子収率50%に達するものはほとんど報告されていなかったため、画期的な成果です。今回のものは紫外線の領域を対象としたもので、こうした研究を応用して、太陽エネルギー変換効率をより高めることができるようになれば、それだけ多くの水素を作り出すことが可能となり、低コストで効率的な人工光合成が実現できます。

詳しく知りたい

世界初、100%に近い量子収率で水を分解する光触媒を開発

実際のシステムを使った水素製造フィールドテストも

一方、「分離膜」の開発については、水素の透過性にすぐれた分離膜の開発に成功しています。水素と酸素が混合して状態が不安定になっている、“爆発性”のある気体から、安全に水素を分離する技術を確立することができています。

「合成触媒」については、CO2と水素からオレフィンを作る化学反応において、その収率が50%以上を達成しています。また、実験とシミュレーションをおこない、最適な小型パイロット装置の仕様も決定されています。

現在、東京大学の研究施設では、光触媒を利用した水素（ソーラー水素）の生成システムについて、フィールドテストが始められています（トップ写真参照）。安全で耐久性のある製造モジュールを開発することができれば、人工光合成の社会実装をさらに一歩先へと進めることができます。将来的には、水素製造プラントとオレフィン合成プラントが隣り合う風景も目にすることができるかもしれません。

スペシャルコンテンツでは、これからもこの夢の技術「人工光合成」について、研究の最前線をご紹介していきます。

お問合せ先

記事内容について

経済産業省 製造産業局 素材産業課

スペシャルコンテンツについて

長官官房 総務課 調査広報室

日本のエネルギー2020

エネルギーの今を知る 10 の質問

1 安定供給
どのくらいエネルギーを自給できていますか

2 経済性
電気料金はどうなっていますか

3 環境
カーボンニュートラルとは何ですか

4 安全性
どのようにエネルギー安定供給および安全性を確保しますか

5 3E+S
エネルギー政策の基本方針はどうなっていますか

6 イノベーション
脱炭素化のためのイノベーションには、どのようなものがありますか

7 再エネ
再エネの導入は進んでいますか

8 福島の復興
福島の復興は進んでいますか

9 原子力
原子力発電は必要ですか

10 省エネ
省エネの取組は進んでいますか

経済産業省
資源エネルギー庁

こちらのQRコードで
PDFがダウンロード
できます。

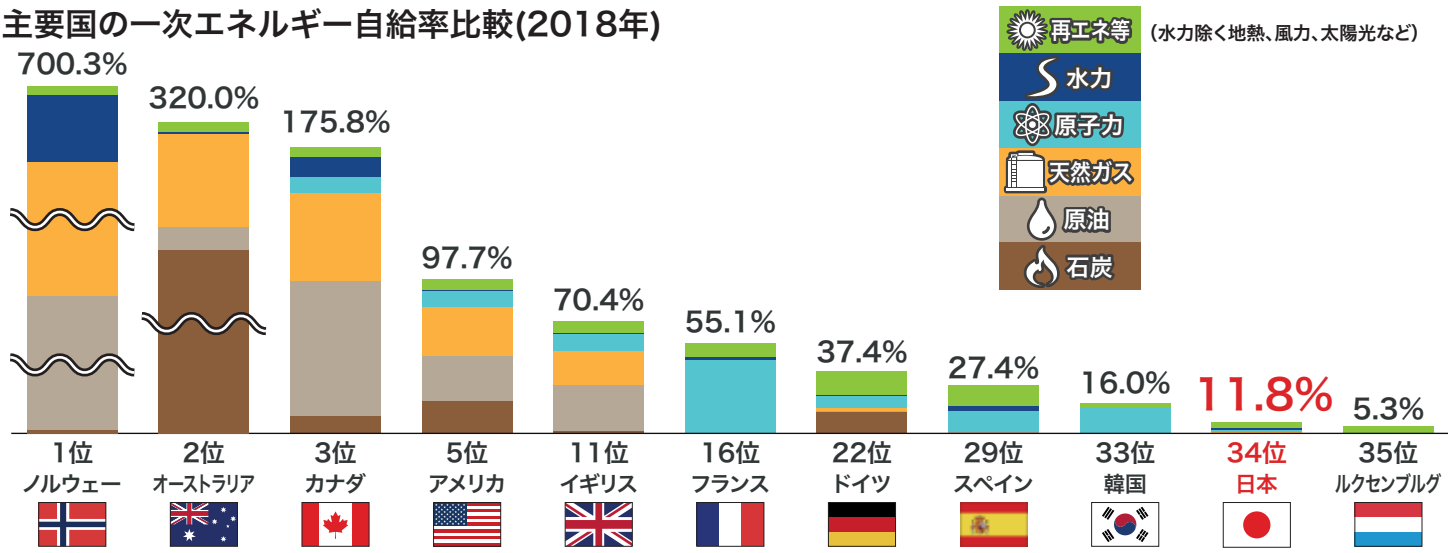
1. 安定供給

エネルギー自給率の推移

Q 日本は、国内の資源でどのくらいエネルギーを自給できていますか？

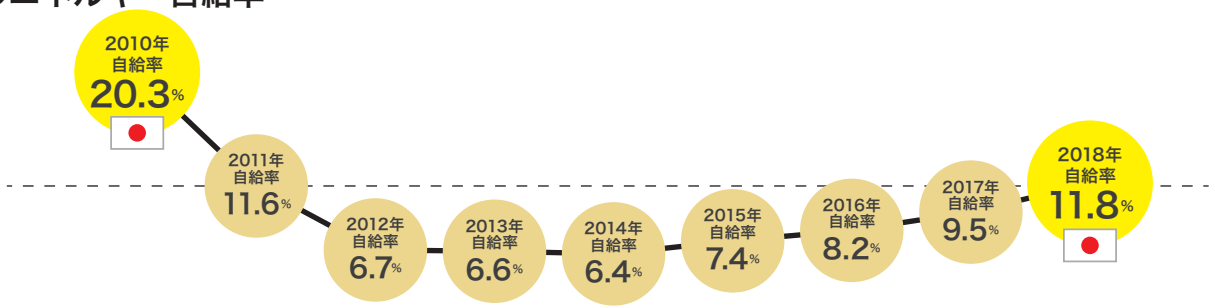
A 2018年の日本の自給率は11.8%で、他のOECD諸国と比べても低い水準です。

主要国の一次エネルギー自給率比較(2018年)



出典:IEA「World Energy Balances 2019」の2018年推計値、日本のみ資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」の2018年度確報値。※表内の順位はOECD35カ国中の順位

我が国のエネルギー自給率

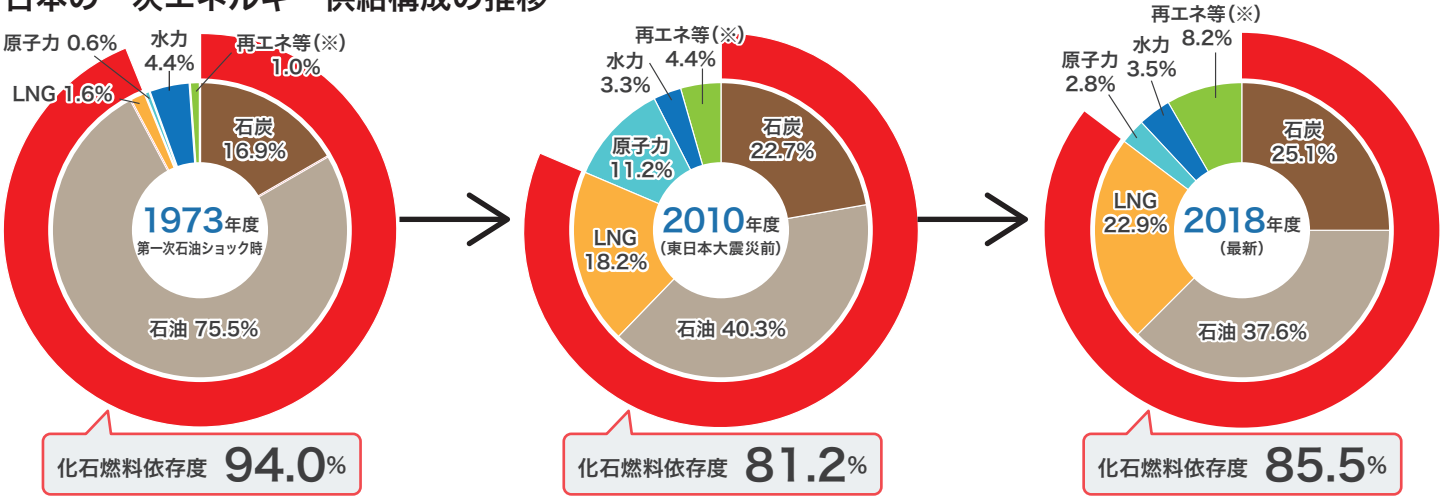


一次エネルギー: 石油、天然ガス、石炭、原子力、太陽光、風力などのエネルギーのもともとの形態
エネルギー自給率: 国民生活や経済活動に必要な一次エネルギーのうち、自国内で産出・確保できる比率

Q 日本はどのようなエネルギーを利用していますか？

A 海外から輸入される石油・石炭・天然ガス(LNG)など化石燃料に大きく依存しています。
東日本大震災以降、化石燃料への依存度は高まっており、2018年度は85.5%です。

日本の一次エネルギー供給構成の推移



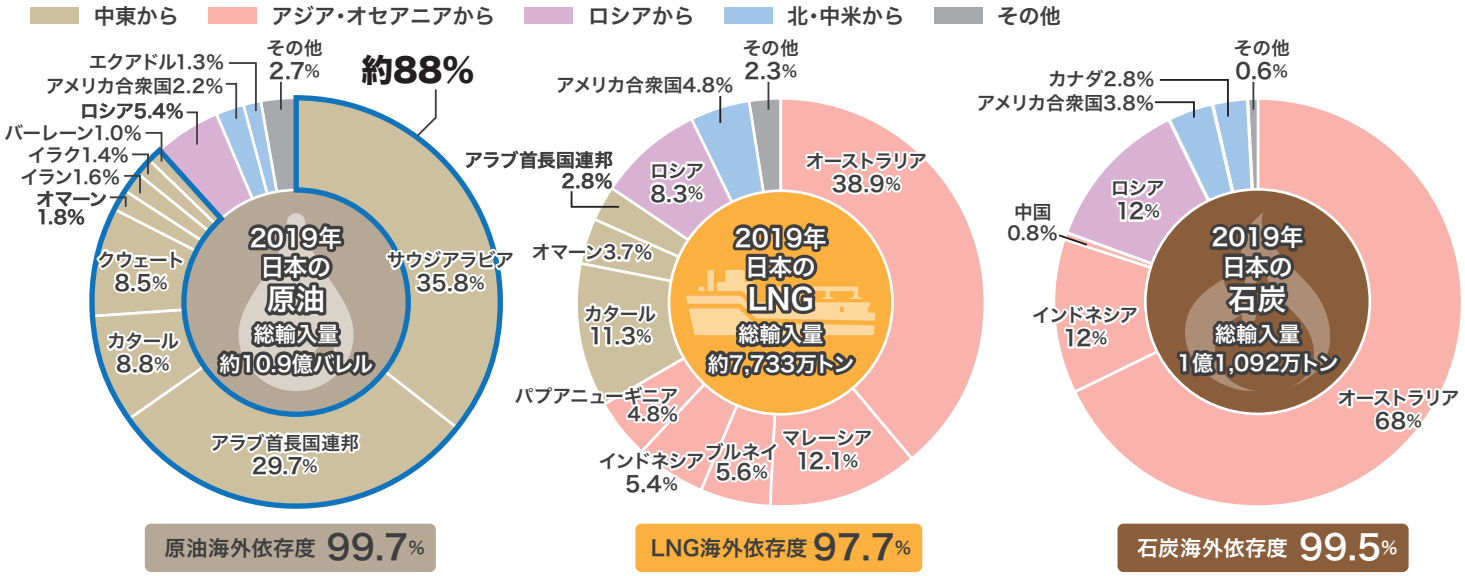
出典:資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」
※四捨五入の関係で、合計が100%にならない場合がある。再エネ等(水力除く地熱、風力、太陽光など)は未活用エネルギーを含む。

資源確保の状況

Q 日本はどのような国から化石燃料を輸入していますか？

A 原油は中東地域に約88%依存しています。LNGや石炭は、中東地域依存度は低いものの アジアなど、海外からの輸入に頼っています。

日本の化石燃料輸入先(2019年)



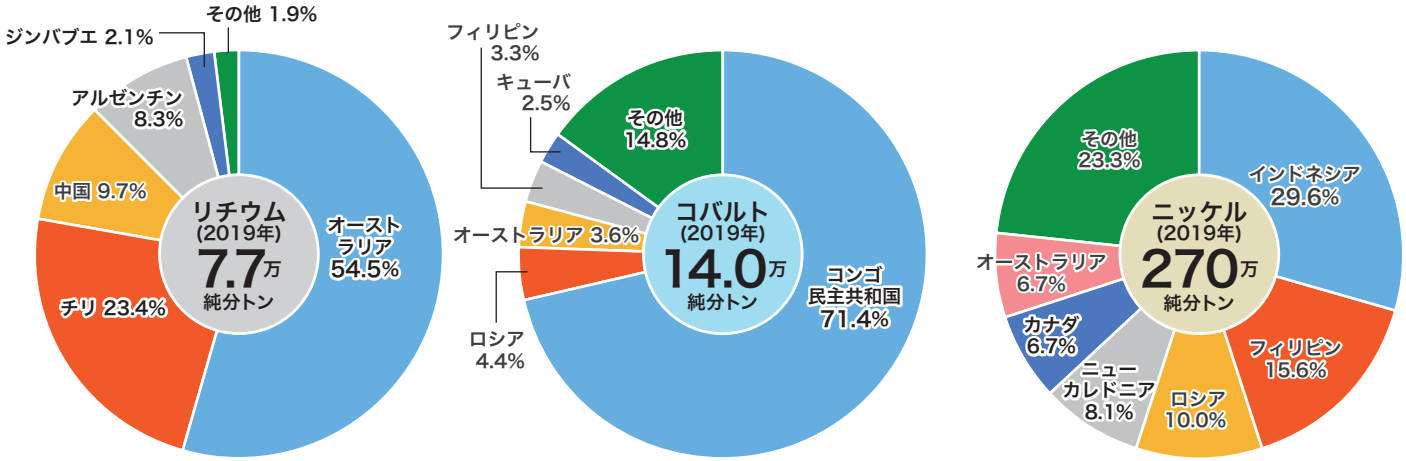
出典：財務省貿易統計（海外依存度は総合エネルギー統計より）

化石燃料資源の安定確保に向けた取組：原油調達先である中東諸国との関係強化を進める。また、原油に比べ少ないLNGの市場流通量を増やすべく、調達先の多角化、更なる権益獲得に向けた取組を進める。

Q 鉱物資源にはどのようなものがありますか?

A たとえば、電気自動車に使われているリチウムイオン電池には、リチウム、コバルト、ニッケルなどのレアメタルが使用されています。日本はほぼ100%の鉱物資源を輸入に頼っています。
（以下の３種の鉱物は、日本の輸入依存度100%）

主要レアメタルの世界年間生産量



リチウム（Li）
金属中最も軽く、エネルギー密度が高い特性を活かし、EVのバッテリーやノートパソコン等のモバイル用電源であるリチウムイオン電池材料として欠かせない存在。

コバルト（Co）
強磁性体、白色の金属で鉄より酸化されにくく、酸やアルカリにも強い。
携帯電話、ノートパソコン、EV等に使用されるリチウムイオン電池の正極材の用途が最も多い。

ニッケル（Ni）
クロムなどとの合金によるステンレス鋼や耐熱鋼等が最大の用途で、硬貨から電子産業まで幅広い活躍。ニッケル化合物は、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池の正極材等として使用される。

出典：USGS（Mineral Commodity Summaries 2020）

鉱物資源の安定供給の確保に向けた取組：エネルギー供給強靭化法によってJOGMEC法を改正し、鉱物資源の安定供給の確保に向けて、鉱山開発事業（上流）や製錬事業（中流）へのリスクマネー支援を強化（出資・債務保証）しました。
JOGMEC法：独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構法のことであり、JOGMECの業務範囲等を規定しています。

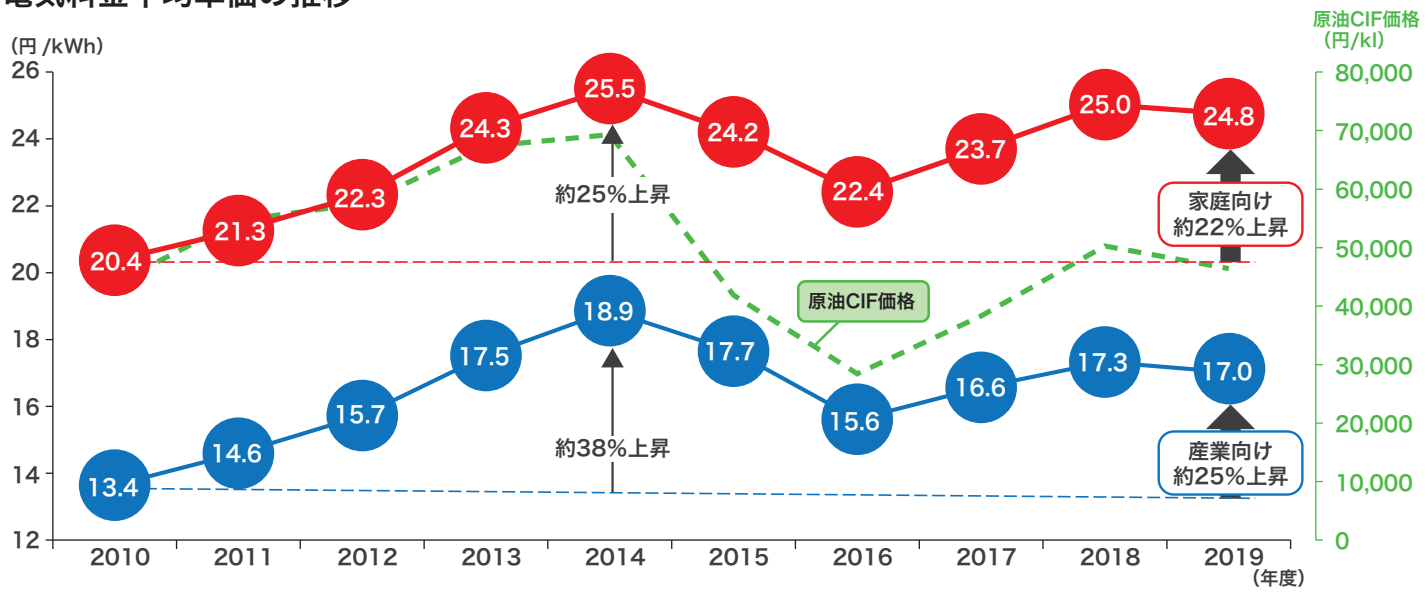
2. 経済性

電気料金の変化

Q 電気料金はどうなっていますか？

A 東日本大震災以降、電気料金は上がっています。原油価格の下落などにより2014～2016年度は低下しましたが、再び上昇傾向です。

電気料金平均単価の推移



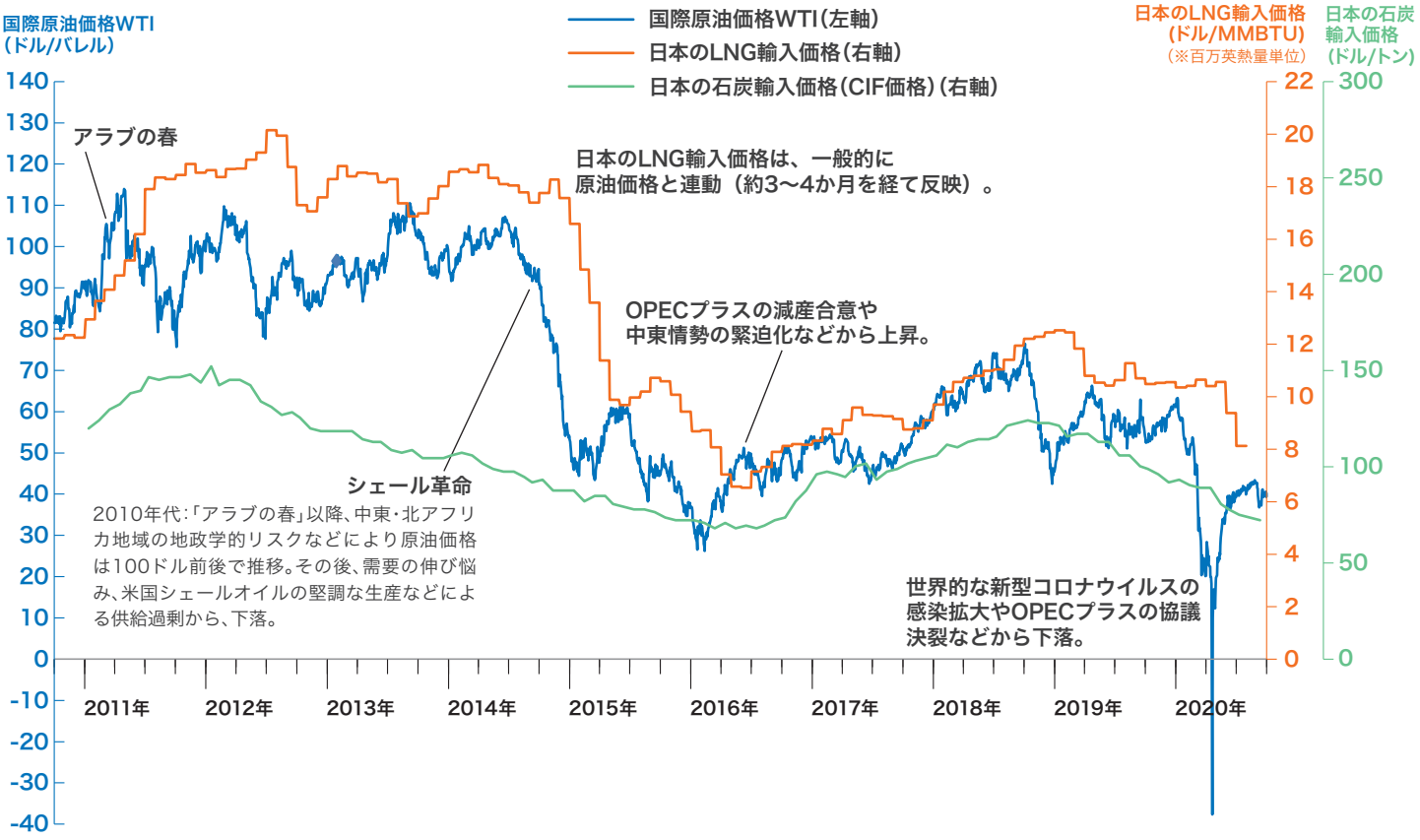
出典：発受電月報、各電力会社決算資料を基に作成

原油CIF価格：輸入額に輸送料、保険料等を加えた貿易取引の価格

要因 1：燃料価格

燃料価格が、電気料金やエネルギーコストに影響します。

過去の原油価格下落局面と現在の状況

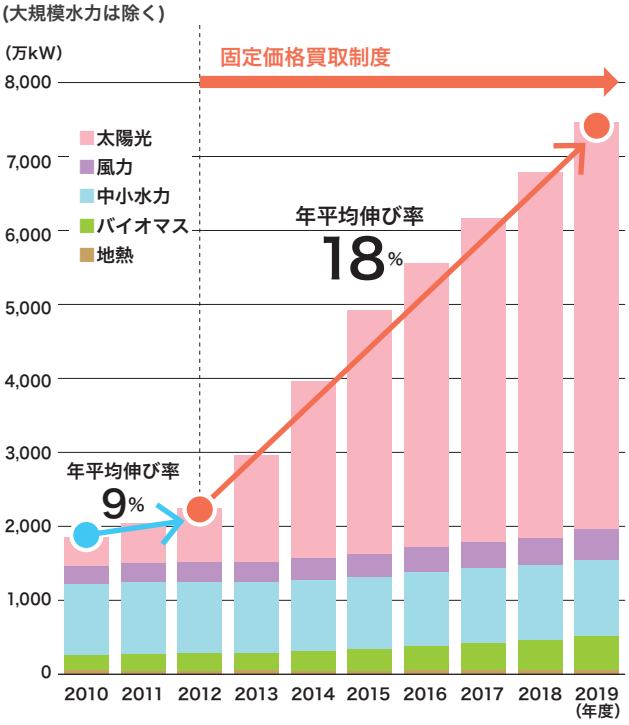


出典：CME日経、財務省貿易統計を基に作成

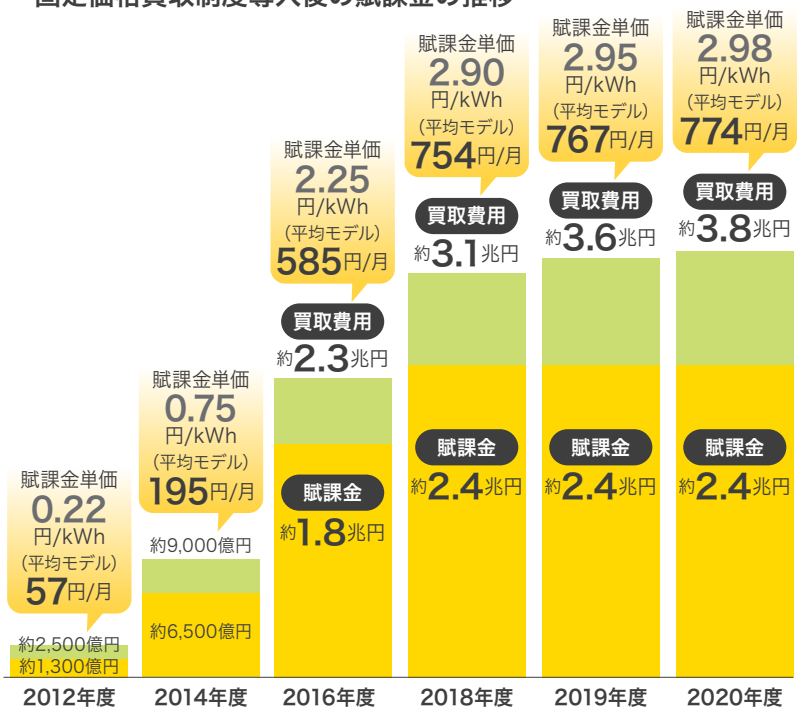
要因2:再エネのコスト

2012年の固定価格買取制度の導入以降、再エネの設備容量は急速に伸びています。一方、買取費用は3.8兆円に達し、一般的な家庭での平均モデル負担額(月260kWh)で賦課金負担は774円/月にのぼっています。再エネの最大限の導入と国民負担の抑制の両立を図るべく、コスト効率的な導入拡大を進めています。

再エネの設備容量の推移
(大規模水力は除く)



固定価格買取制度導入後の賦課金(ふかきん)の推移



出典:JPEA出荷統計、NEDOの風力発電設備実績統計、包蔵水力調査、地熱発電の現状と動向、RPS制度・固定価格買取制度認定実績などにより資源エネルギー庁作成

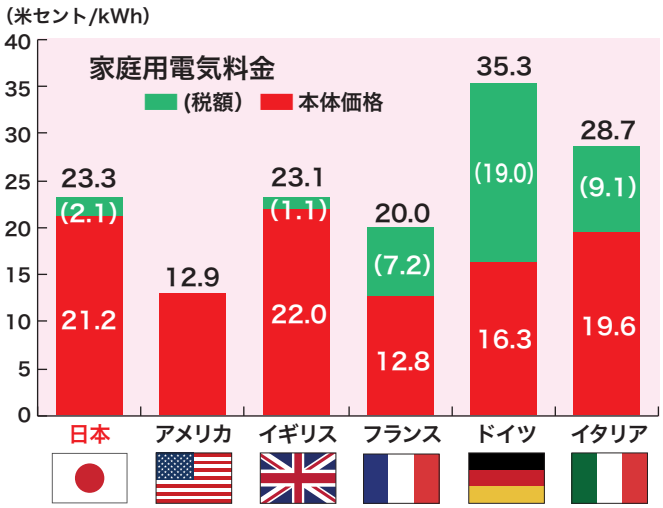
固定価格買取制度:再エネで発電した電気を、電力会社が固定価格で一定期間買い取る制度。このため再エネの買取費用は、電力会社が利用者から賦課金という形で回収している。

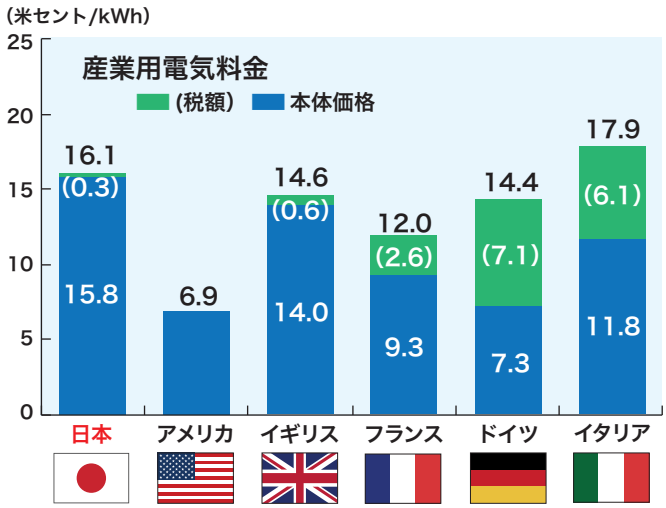
電気料金の国際比較

日本の電気料金は、家庭用、産業用ともに高い水準となっていましたが、各国での課税・再エネ導入促進政策の負担増で格差は縮小してきています。

電気事業の効率的な運営と、電気料金の低下に向けた努力を怠ってはなりませんが、その際には我が国固有の事情、すなわち、燃料・原料の大部分を輸入に依存しておりその安定供給が不可欠なこと等、供給面での課題に配慮する必要があります。

電気料金の国際比較(2018年)





出典:IEA「Energy Prices and Taxes 1th Quarter 2019」を基に作成

(注1)米国は本体価格と税額の内訳不明。
(注2)日本、フランス、ドイツは第2Q時点、英国は、産業用:第3Q、家庭用:第4Q時点の数値。

3. 環境

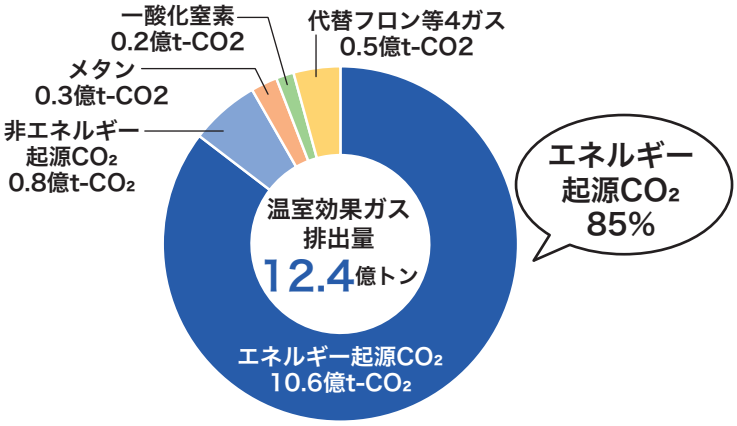
地球温暖化対策　～カーボンニュートラル～

Q カーボンニュートラルとは何ですか？

A 「温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする」ことです。

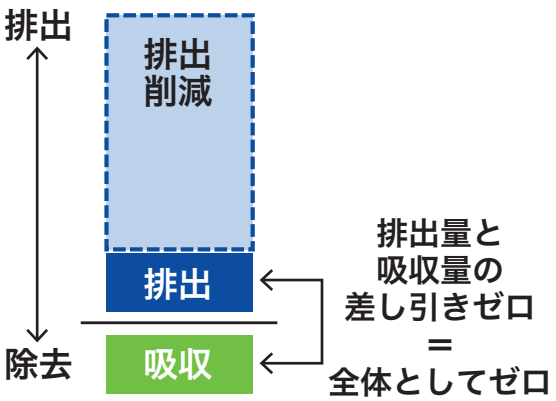
- 「温室効果ガス」の対象は、CO_2だけでなく、メタンなど全ての温室効果ガス。
- 「排出を全体としてゼロにする」とは、排出量から吸収量を差し引いた、合計がゼロとなる（ネットゼロ、実質ゼロと同じ）

日本の温室効果ガス排出量（2018年度）

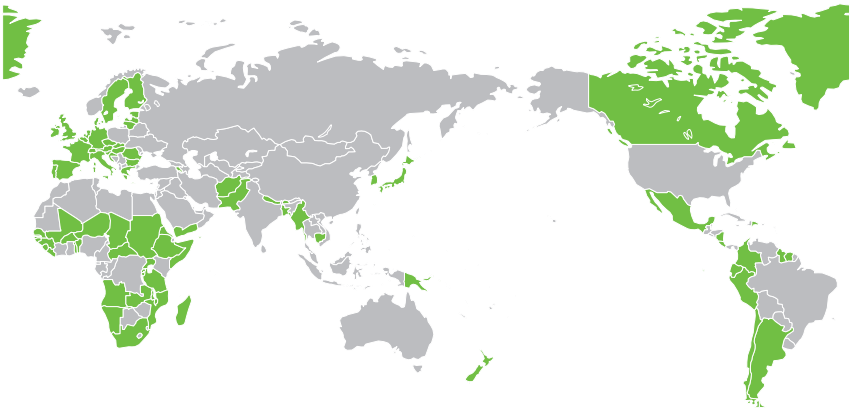


※CO_2以外の温室効果ガスはCO_2換算した数値

温室効果ガスのネットゼロ排出のイメージ

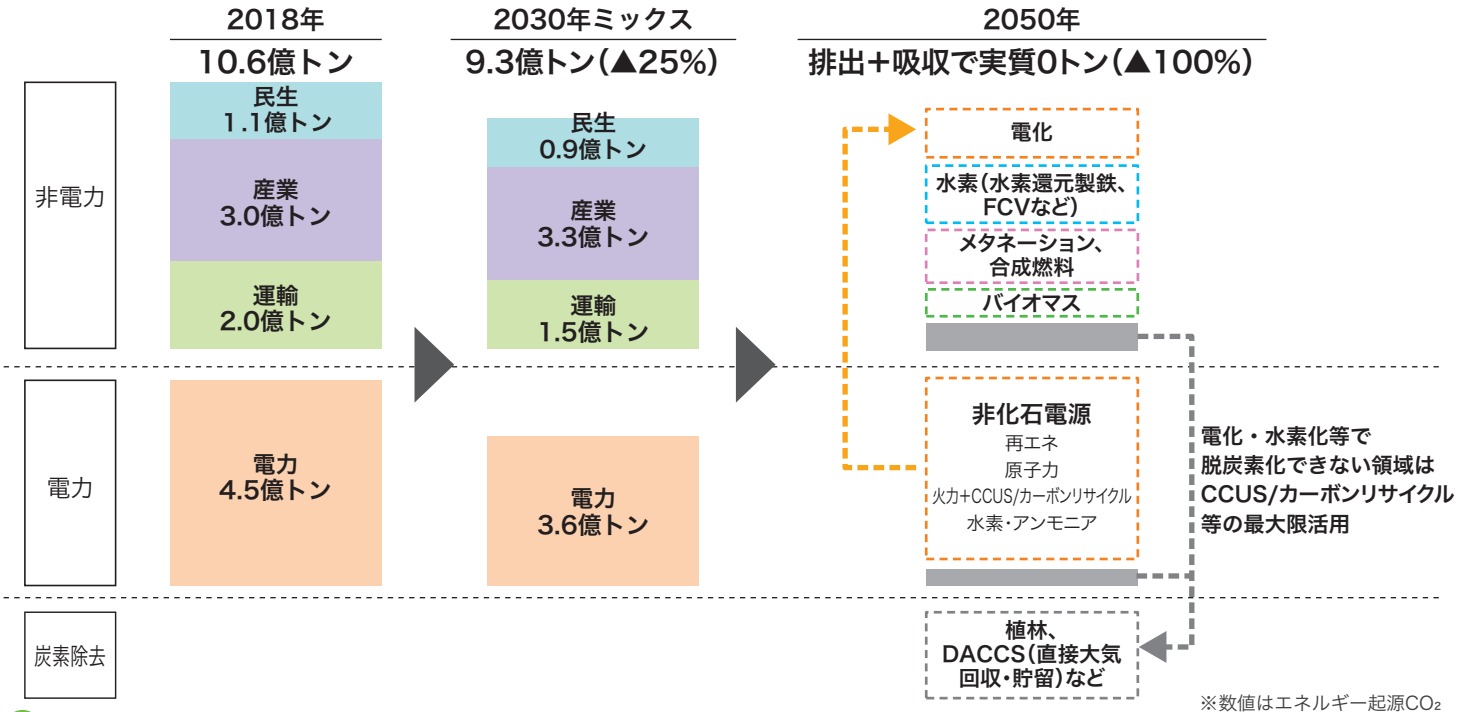


カーボンニュートラルに賛同した国　日本を含め123か国と1地域



国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の「IPCC1.5度特別報告書」によると、産業革命以降の温度上昇を1.5度以内におさえるという目標を達成するためには、2050年近辺までのカーボンニュートラルが必要という報告がされています。
この1.5度努力目標を達成するために、2020年10月28日時点で、日本を含め123か国と1地域が、2050年までのカーボンニュートラルを表明しています。

カーボンニュートラルへの転換イメージ



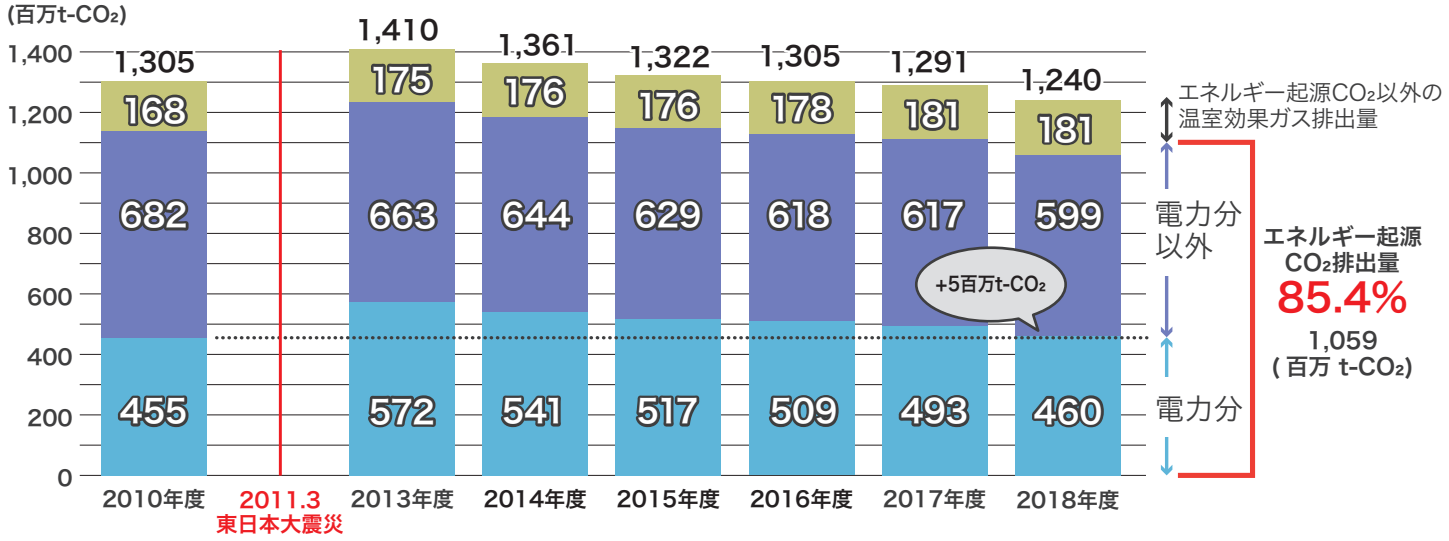
※数値はエネルギー起源CO_2

温室効果ガス排出量

Q 日本は温室効果ガスをどれくらい排出していますか？

A 東日本大震災以降、温室効果ガス排出量は増加しましたが、2018年度は12.4億トンまで減少しました。今後も、削減に向けた努力を続ける必要があります。

日本の温室効果ガス排出量の推移



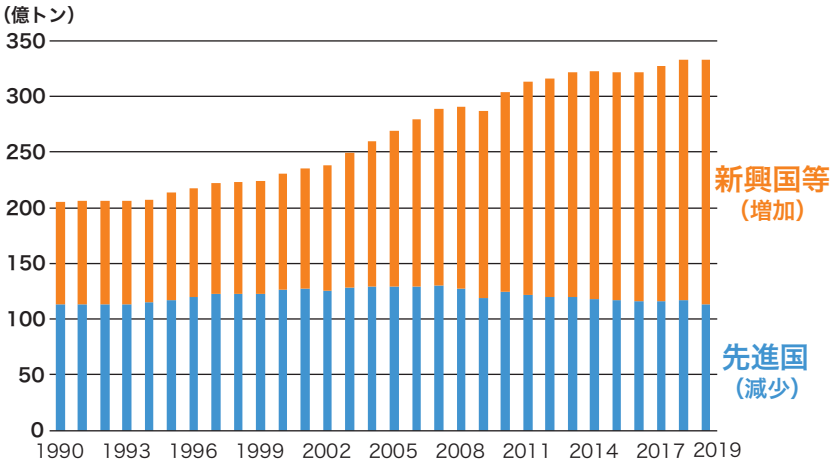
出典：総合エネルギー統計、日本の温室効果ガス排出量の算定結果（環境省）を基に作成

温室効果ガス：CO_2、メタン、一酸化二窒素、ハイドロフルオロカーボン類、パーフルオロカーボン類、六フッ化硫黄の6種類。

コラム - 世界のCO_2排出量

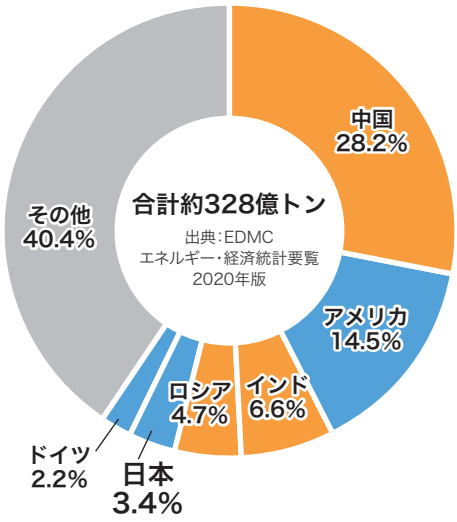
日本のCO_2排出量は、世界で５番目。CO_2排出の内訳の大宗はエネルギー起源が占めます。世界のエネルギー起源CO_2排出量は、先進国では削減が進みますが、世界全体では減っていません。
エネルギー起源CO_2は化石燃料の使用によることから、日本は、高効率・低炭素技術やカーボンリサイクル等のイノベーションを展開し、世界の排出削減に貢献するよう取り組んでいます。

世界のCO_2排出量推移



出典：IEA「Energy related CO_2 emissions 1990-2019」より作成
（備考）「先進国」は、オーストラリア・カナダ・チリ・EU・アイスランド・イスラエル・日本・韓国・メキシコ・ノルウェー・ニュージーランド・スイス・トルコ・米国を指す

世界のCO_2排出量（2017年）



CO_2の排出量、どうやって測る？～“先進国vs新興国”

CO_2の排出量は「先進国で削減vs新興国で増加」と言われますが、国別の排出量の推移や対立に気をとられるのではなく、世界全体でどれだけ排出量が削減できたかを常に注視することが大切です。

参照：https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/co2_sokutei.html



こちらのQRコードで記事がご覧頂けます。

4. 安全性

安全性の確保

Q 激甚化する自然災害に対し、どのようにエネルギー安定供給および安全性を確保しますか？

A 2020年6月「エネルギー供給強靱化法」が閣議決定され、電気事業法の改正が行われました。災害時の連携強化、送配電網の強靱化、災害に強い分散型電力システムなどを進めています。

台風・豪雨による電力・燃料供給インフラの損壊



兵庫県淡路市風力発電設備倒壊
（2018年8月台風）



千葉県市原市水上設置型太陽光発電所損壊
（2019年9月台風）



千葉県君津市送電線鉄塔倒壊
（2019年9月台風）



冠水した製油所敷地
（2019年10月台風）



水没したタンクローリー
（令和2年7月豪雨）

津波による被害

東日本大震災時の津波の影響で水素爆発をした福島第一原子力発電所
（2011年3月）



画像：東京電力ホールディングス写真集　https://photo.tepco.co.jp

エネルギー供給強靱化法

「エネルギー供給強靱化法」とは、正式名称を「強靱かつ持続可能な電気供給体制の確立を図るための電気事業法等の一部を改正する法律」と言います。「電気事業法等」とあるように、電気事業などに関するルールをさだめた「電気事業法」と呼ばれる法律のほか、「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法（再エネ特措法）」と「独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構法（JOGMEC法）」の改正も含まれています。

電気事業法　**再エネ特措法**　**JOGMEC法**

「法制度」の観点から考える、電力のレジリエンス

電力インフラ・システムを強靱にする法制度をご紹介します。

①法改正の狙いと意味
②被災からの学びを活かした電気事業法改正
③被災に強く再エネ導入にも役立つ送配電網の整備推進
④次世代の電力プラットフォームもにらんだ法改正
⑤再エネの利用促進にむけた新たな制度とは？

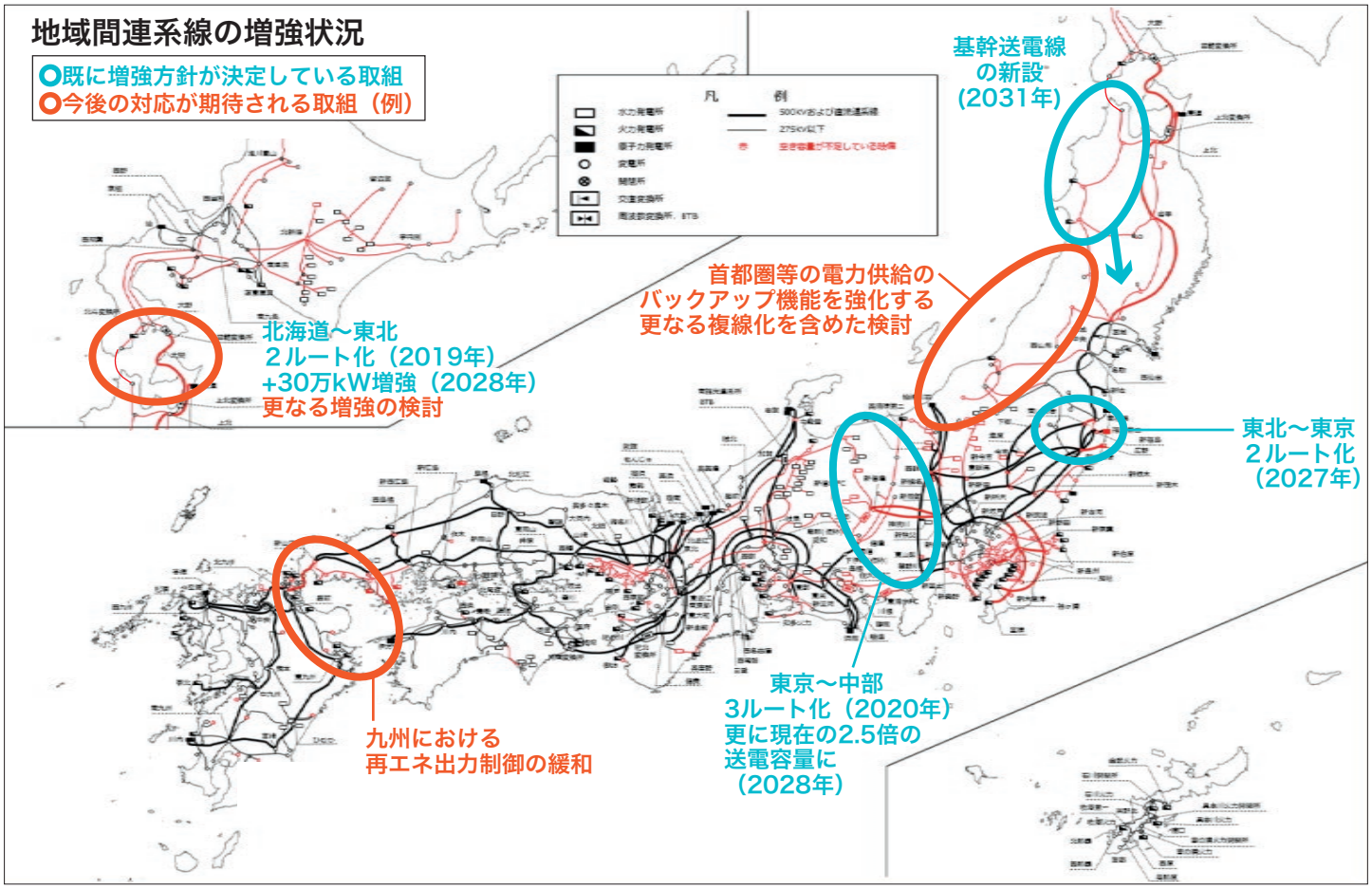
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/denjihokaisei_01.html



こちらのQRコードで記事がご覧頂けます。

取組1：電力インフラの強靭化

巨大な台風や首都直下地震等の大規模災害の発生が予想されると共に、脱炭素化の要請が強まる中、我が国の電力ネットワークは、レジリエンスを抜本的に強化し、再エネの大量導入等にも適した次世代型ネットワークに転換していくことが重要です。バックアップ機能の強化を図るため、全国ネットワークの複線化を図り、電力インフラの強靭化を実現します。

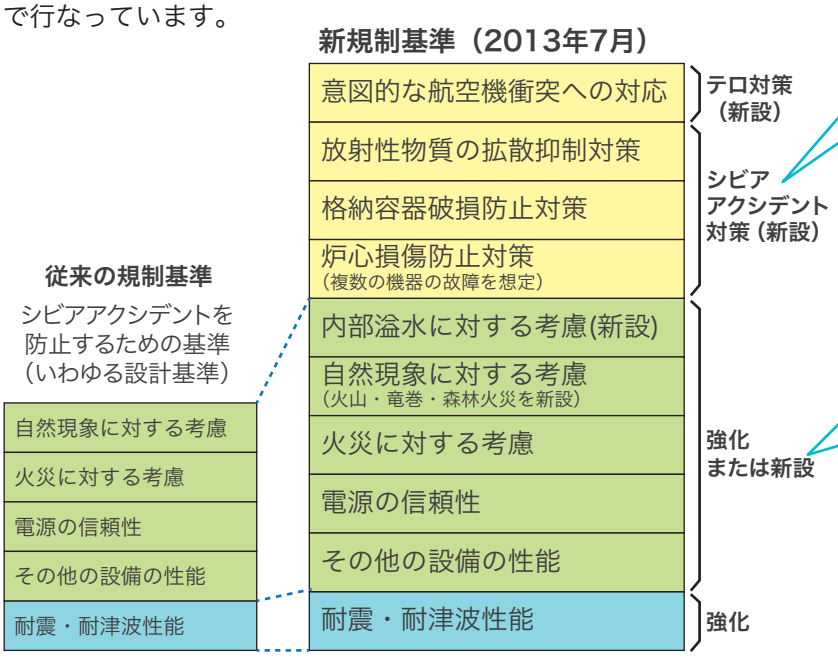


レジリエンス：「強靭性」、あるいは「回復力」や「弾力性」を表す。

地域間連系線：隣接する電力会社の供給区域の系統設備を相互に接続する送電線、周波数変換装置、交流直流変換装置のことで、エリアを超えた電力の融通が可能になる。

取組2：安全性を高めた新規制基準への対応

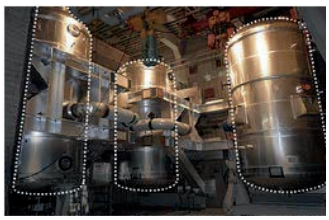
原子力発電所の再稼働にあたっては、原子力規制委員会によって、新規制基準に適合することが求められ、従来の規制基準と比べ、事故防止のための対策が強化されるとともに、万一の際の備えやテロ対策を追加で行なっています。



出典：原子力規制委員会資料

シビアアクシデント対策例

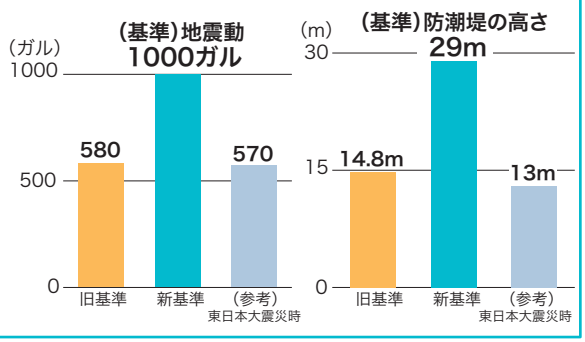
万一、圧力低下のために格納容器内の気体放出が必要になった場合でも、放射性物質の放出量を1/1000以下に抑制できる装置や、水素爆発を防止する装置を設置。



新規制基準での強化例

地震：基準となる地震の揺れの強さを580ガルから1000ガルに

津波：震災等の知見を踏まえ、想定津波の高さを23.1mとし、防潮堤の高さの基準を14.8mから29mに



出典：東北電力ホームページ

5. 3E+S

基本方針

Q エネルギー政策の基本方針はどうなっていますか？

A 安全性(Safety)を大前提とし、自給率(Energy Security)、経済効率性(Economic Efficiency)、環境適合(Environment)を同時達成するべく、取組を進めています(3E+S)。日本は資源に恵まれない国です。全ての面で優れたエネルギーはありません。エネルギー源ごとの強みが最大限に発揮され、弱みが補完されるよう、多層的なエネルギー供給構造を実現することが不可欠です。



Energy Security（自給率）
東日本大震災前(約20%)を更に上回る
概ね25%程度を2030年度に実現(現在11.8%)

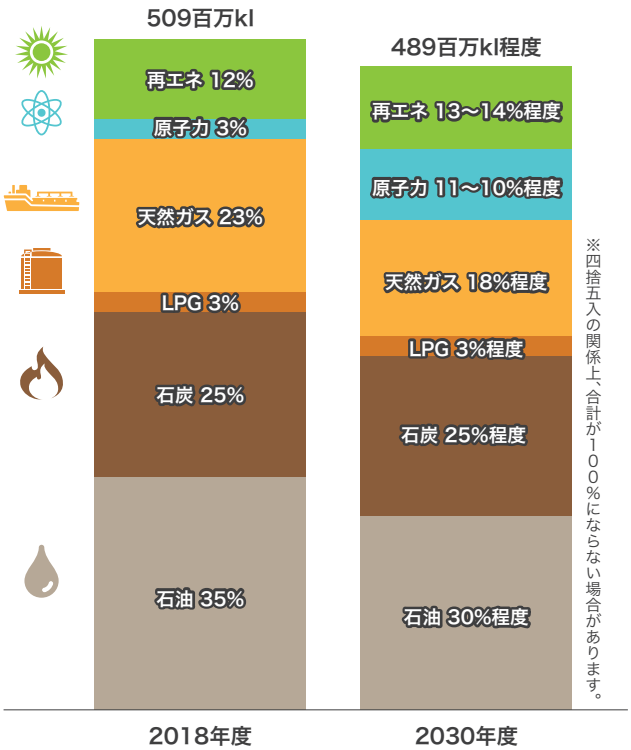
Economic Efficiency（電力コスト）
現状よりも引き下げる
(2013年度 9.7兆円 ⇒ 2030年度 9.2～9.5兆円)
※エネルギーミックス策定時

Environment（温室効果ガス排出量）
欧米に遜色ない温室効果ガス削減目標を実現
(2030年度に2013年度比▲26%)

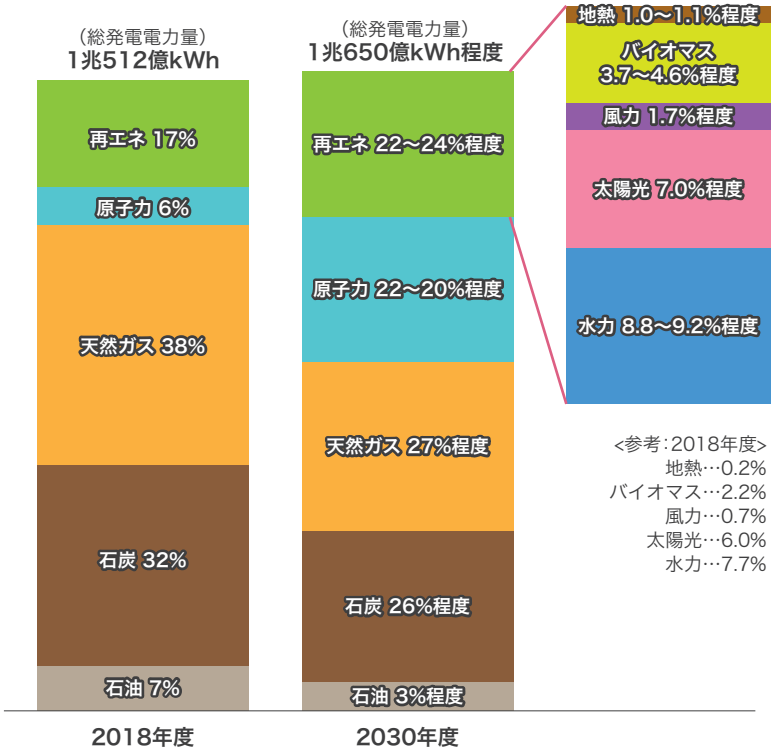
Q 将来の一次エネルギー供給および電源構成はどうなりますか？

A エネルギー政策の基本方針に基づき、施策を講じたときに実現される2030年度のエネルギー需給構造のあるべき姿(エネルギーミックス)は下図のとおりです。

一次エネルギー供給



電源構成



エネルギーミックスの進捗状況

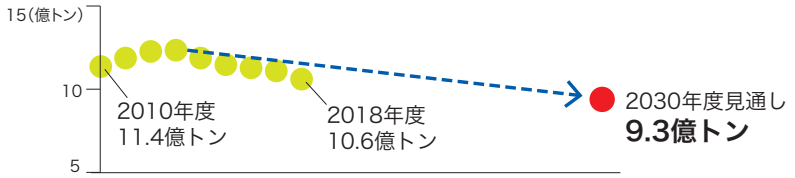
安定供給 エネルギー自給率推移



経済性 電力コスト推移
（燃料費+FIT買取費）



環境 エネルギー起源
CO_2排出量推移



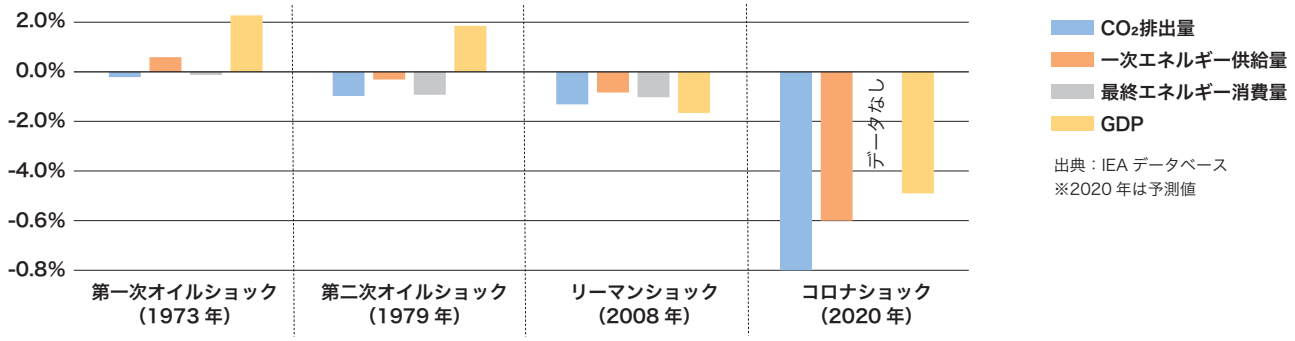
出典：総合エネルギー統計（2018 年度確報値）等を基に資源エネルギー庁作成

コロナショックとエネルギー安定供給

Q コロナショックは、エネルギー需給にどのような影響を与えましたか？

A IEA（International Energy Agency：国際エネルギー機関）によると、コロナショックの影響等により、2020年の世界のGDP、一次エネルギー供給率、CO_2排出量が前年を大きく下回ると予測されています。

コロナショックと過去のショックの前年比増減率（世界）



出典：IEA データベース
※2020 年は予測値

需要側の状況と課題

1. 新たな日常・生活様式・企業活動を踏まえた、エネルギー利用の効率向上、全体最適化に向けた取組



2. エネルギー転換（電化・水素化など）の支援・推進

AI、IoT、デジタル化





脱炭素化

供給側の状況と課題

3. 資源・燃料の安定的な調達



化石資源
鉱物資源

4. イノベーション投資が計画的に実行される環境整備



5. 脱炭素エネルギーの更なる導入



6. エネルギーレジリエンスの一層の強化



出典：第 31 回総合資源エネルギー調査会　基本政策分科会資料より作成

6. イノベーション

日本が進めるイノベーション

Q 脱炭素化のためのイノベーションには、どのようなものがありますか？

A 再エネ等からのCO_2フリー水素製造や燃料電池自動車等への多様な利活用、カーボンリサイクルなどがあります。

水素社会の実現に向けた取組

水素の大量供給、国際的な水素取引も見据えたサプライチェーン構築、燃料電池自動車や家庭用燃料電池の導入をはじめ様々な分野における利活用を推進しています。

製造

・都市ガスなどから水素製造
・工業プロセスからの余剰の水素

国内再生可能エネルギー



太陽光発電で作った電気を用いた水素製造の実証

輸送・供給（サプライチェーン）

水素ステーションの整備支援



利用

運輸分野 **燃料電池自動車等の導入支援**



民生分野 **燃料電池の導入支援**

ENE・FARM


燃料電池複合発電システム [HYBRID-FC]

発電分野 **水素発電の検討**



産業分野 **産業プロセスでの水素利用・技術開発**

海外からの水素輸入

豪州の石炭やブルネイの天然ガスを用いた水素製造・日本への海上輸送の実証

日ブルネイサプライチェーン事業主体：**AHEAD**

日豪サプライチェーン事業主体：**HySTRA**

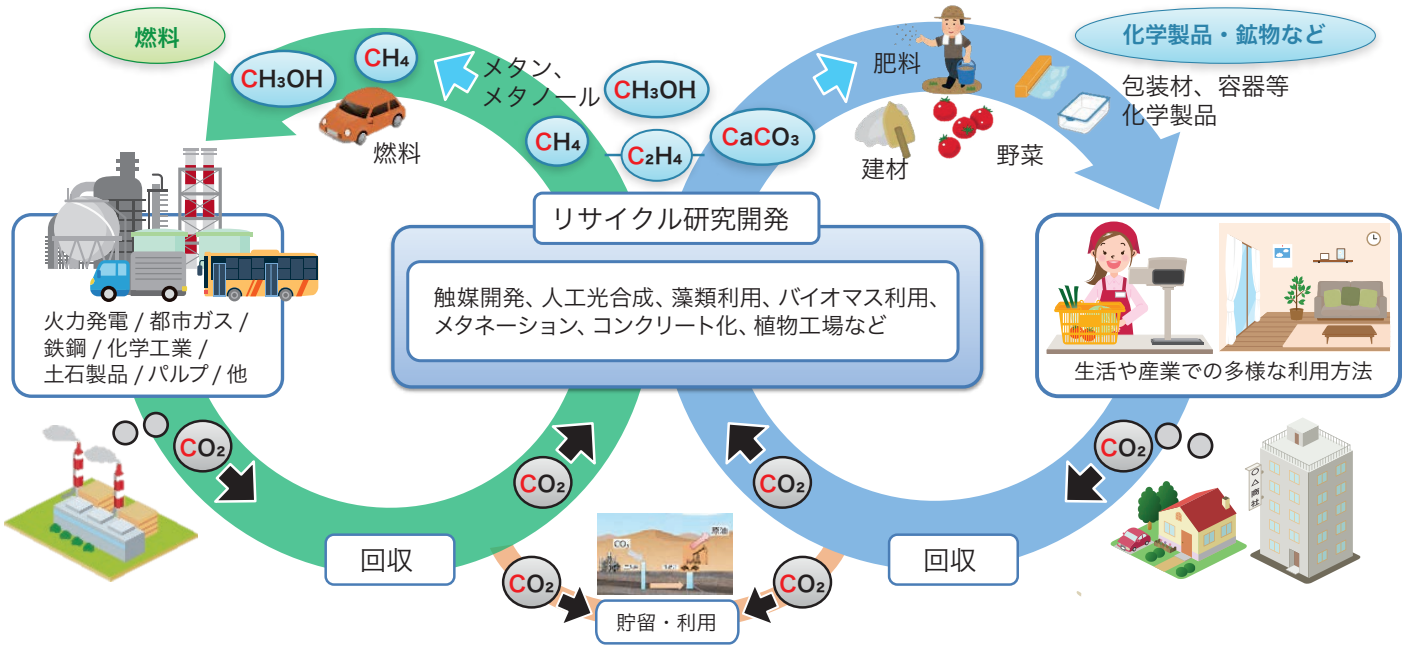

ブルネイに建設された水素化プラント




世界初の液化水素運搬船「すいそふろんてぃあ」号

カーボンリサイクル、CCUS（CO_2の再利用）

CO_2を分離・回収し、コンクリートやプラスチック原料など資源として利用し、大気中へのCO_2排出を抑制していく技術です。



2020年、水素エネルギーのいま～少しずつ見えてきた「水素社会」の姿

日本では、世界に先駆けて「水素社会」を実現するべく、国やさまざまな企業が官民あげての実証実験などを進めています。
2020年現在における、水素エネルギー利活用の姿を見てみましょう。

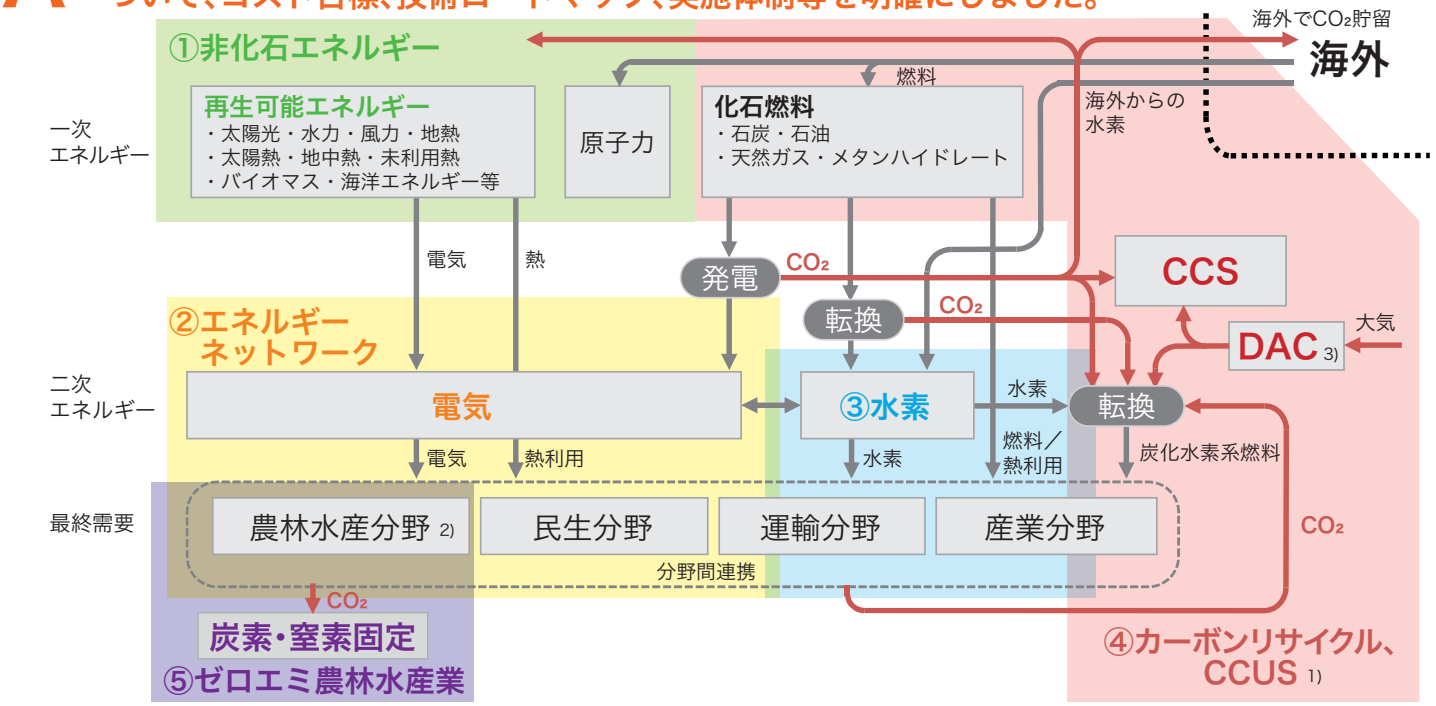
参照：https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/suiso2020.html



こちらのQRコードで記事がご覧頂けます。

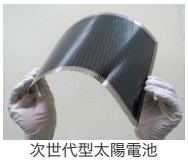
Q 日本のイノベーションは、どこまで進んでいますか？

A 2020年1月「革新的環境イノベーション戦略」を策定し、以下の重点領域に関する39テーマについて、コスト目標、技術ロードマップ、実施体制等を明確にしました。



1) CCUS : Carbon Capture, Utilization and Storage（炭素の回収・利用・貯留）
2) 農業・林業・その他土地利用部門からのGHG排出量は世界の排出量の約1/4を占める（出典：IPCC AR5 第3作業部会報告書）
3) DAC : Direct Air Capture（大気からのCO₂分離）

さまざまな技術の実用化でCO₂を削減

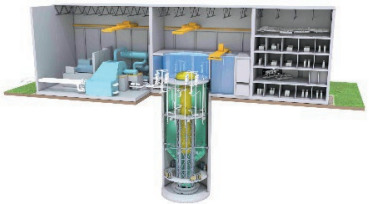
どこでも太陽光発電	水素社会の実現	CO₂を出さず水素で製鉄	CO₂を再利用してコンクリート等を製造	DAC（CO₂直接回収）	電動化や燃料の脱炭素化など	農地・森林・海洋でのCO₂吸収
柔軟・軽量・高効率な太陽光発電の実現	水素の製造、輸送・貯蔵、利用まで一貫したサプライチェーンを構築	水素による鉄鉱石の還元技術を開発	火力発電所等の排ガスからCO₂を分離回収し、土木資材に再資源化	大気中からCO₂を分離・回収し、固定化する技術の開発	次世代電動航空機の実現ならびに当該航空機に必要な技術の確立	森林・海洋のCO₂吸収を持続・普及させる技術の開発
 次世代型太陽電池（ペロブスカイト太陽電池）	H₂	鉄鉱石 Fe_2O_3、水素 H_2、酸素 O、H_2O		空気、エネルギー、Air Contactor		
CO₂削減量 70億t/年	CO₂削減量 60億t/年	CO₂削減量 38億t/年	CO₂削減量 43億t/年	CO₂吸収量 80億t～/年	CO₂削減量 20億t/年	CO₂吸収量 119億t～/年

出典：「革新的環境イノベーション戦略」（令和2年1月21日統合イノベーション戦略推進会議決定）概要
＊削減量・吸収量は世界全体における数値をNEDO等において試算。

原子力にいま起こっているイノベーション

革新的な原子力技術の代表的なもののひとつが、「小型モジュール炉」です。原子力には発電の用途以外に、水素の製造、熱エネルギーの利用、遠隔地でのエネルギー源、医療及び産業利用についても研究が活発化しています。

https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/smr_01.html



こちらのQRコードで記事がご覧頂けます。

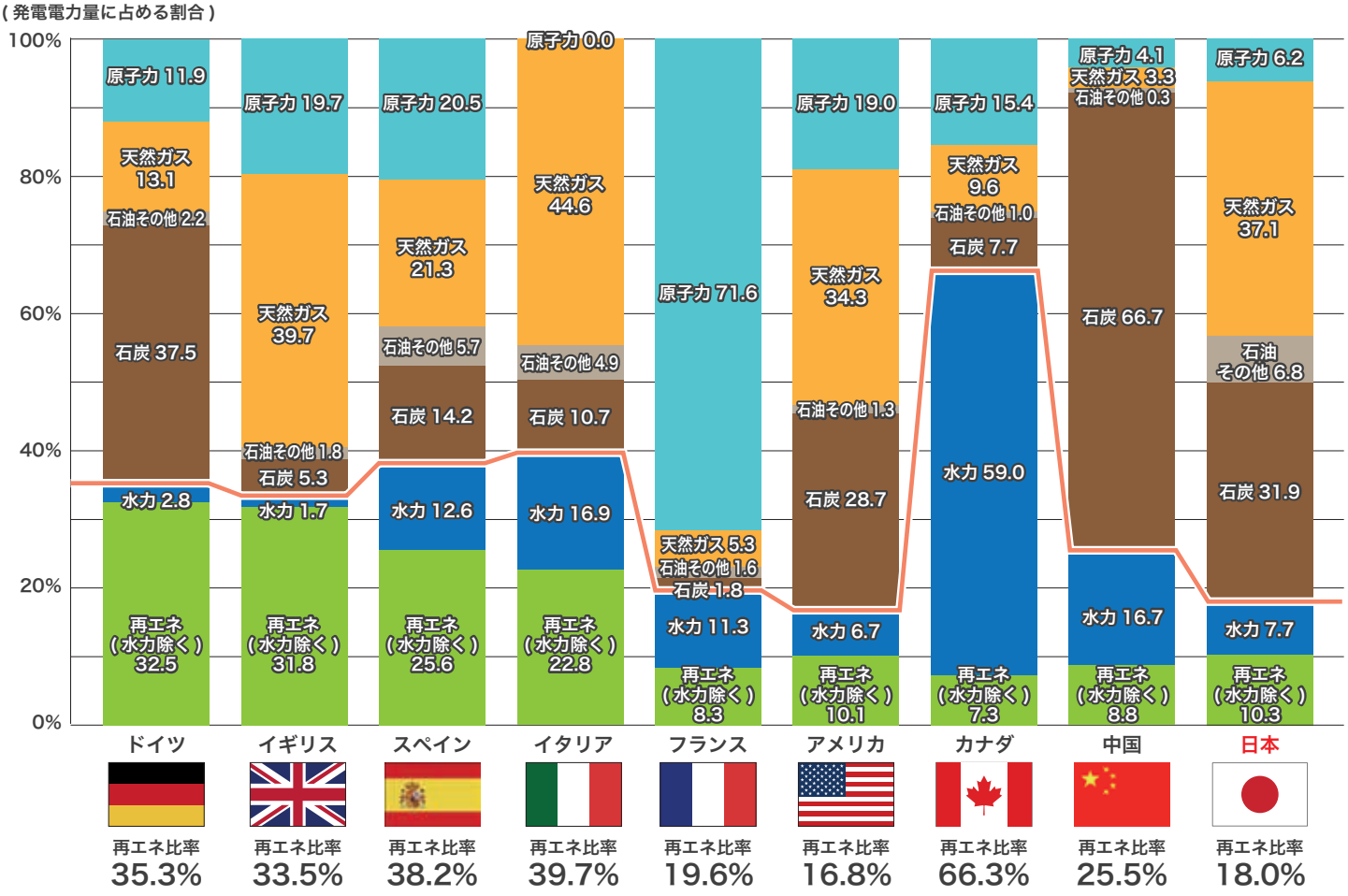
7. 再エネ

再エネの導入

Q 日本では、再エネの導入は進んでいますか?

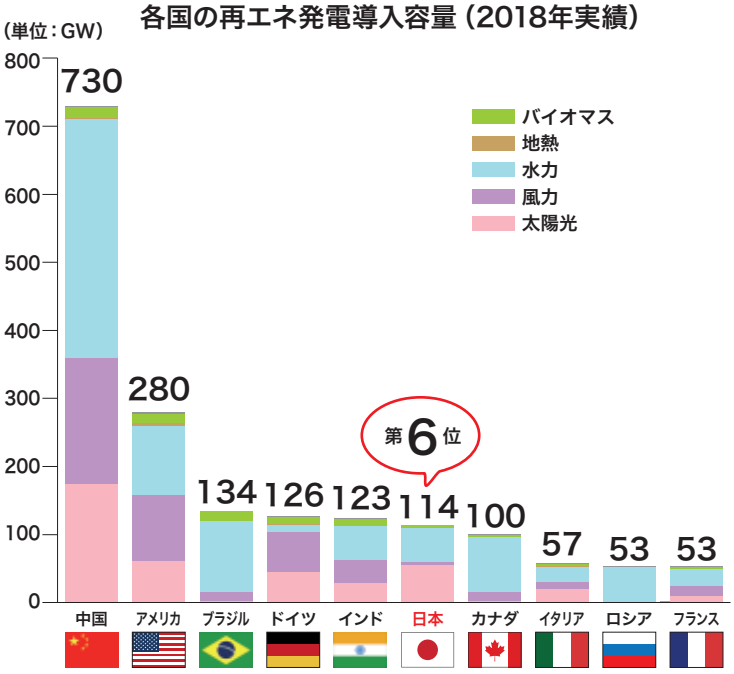
A 日本の再エネ電力比率は2019年度で、18%です。
再エネ発電設備容量は世界第6位で、太陽光発電は世界第3位です。

主要国の発電電力量に占める再エネ比率の比較

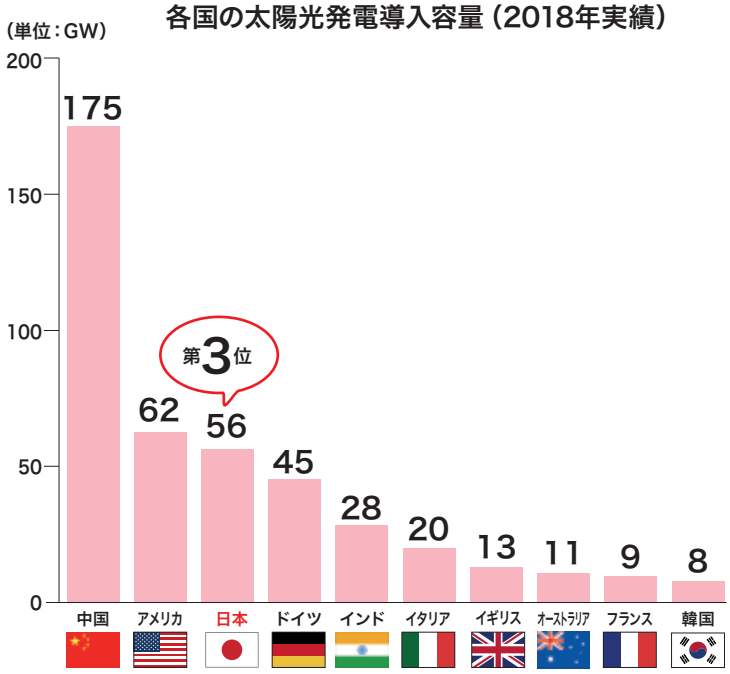


出典：IEA「Data Services」、各国公表情報より資源エネルギー庁作成

各国の再エネ発電導入容量（2018年実績）



各国の太陽光発電導入容量（2018年実績）



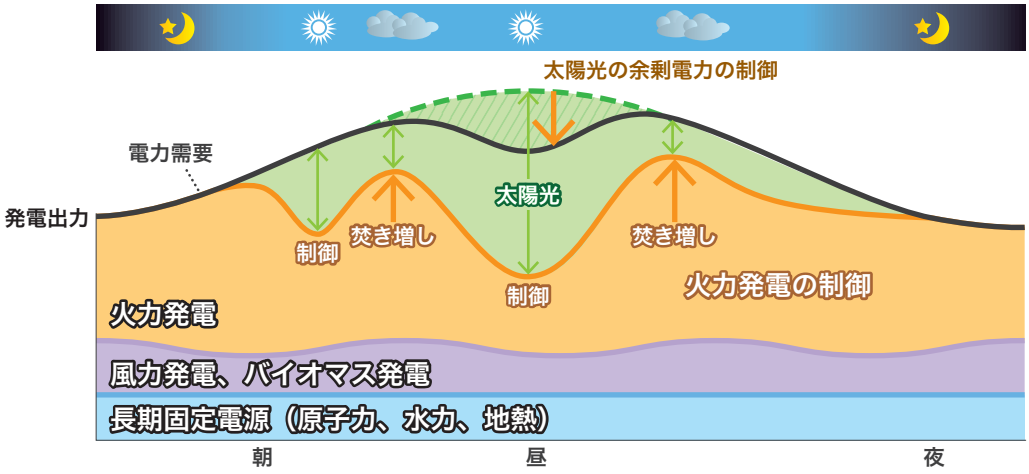
出典：Renewables 2019（IEA）より資源エネルギー庁作成

再エネの主力電源化

Q 再エネだけでエネルギーを賄うことはできないのですか？

A 再エネは季節や天候によって発電量が変動し、安定供給のためには火力発電などの出力調整が可能な電源や、蓄電池と組み合わせてエネルギーを蓄積する手段の確保が必要です。

最小需要日(5月の晴天日など)の需給イメージ



電気を安定して使うには、常に発電量(供給)と消費量(需要)を同じにする必要があります。そのため、再エネの出力の上下に対応出来る火力発電などで、発電量と消費量のバランスをとる必要があります。

Q 再エネの主力電源化のために、どのような政策を進めていきますか？

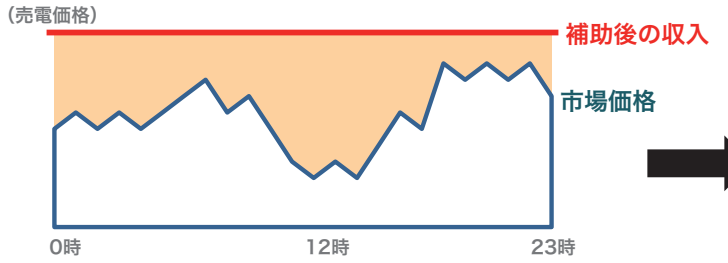
A 大規模太陽光・風力等の競争力ある電源への成長が見込まれるものには、欧州等と同様、電力市場と連動した支援制度を導入します。

FIT制度とFIP制度

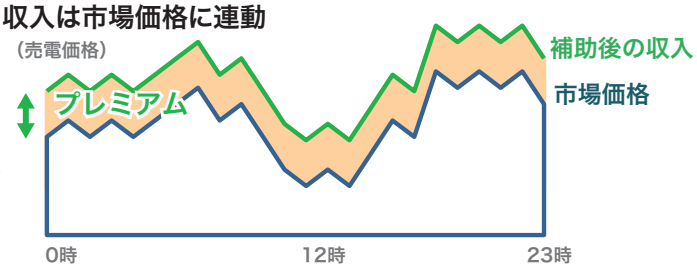
競争力ある電源※への成長が見込まれるものは、欧州等と同様、電力市場と連動したFIP制度へ移行し、再エネの最大限の導入と国民負担の抑制の両立を図るべく、コスト効率的な導入拡大を進めています。

※対象電源やタイミングについては、導入状況等を踏まえ、調達価格等算定委員会で審議して、経済産業大臣が決定します。

FIT制度：価格が一定で、収入はいつ発電しても同じ

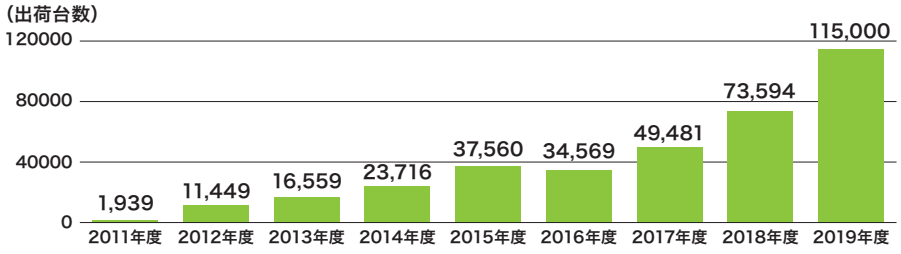


FIP制度：補助額(プレミアム)が決められた期間一定で、収入は市場価格に連動



国内におけるリチウムイオン蓄電システムの市場動向

2019年度の国内出荷台数は、11万台を超えました。
約9割は家庭用であり、太陽光発電からの余剰電力の自家消費率向上が期待されます。



出典：日本電機工業会自主統計データ

災害時には電動車が命綱に!?xEVの非常用電源としての活用法

経済産業省は国土交通省と連携して『災害時における電動車の活用促進マニュアル』を公表しました。このマニュアルを参考に電動車からの正しい給電方法を確認・試行してみてはいかがでしょうか。

参照：https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/xev_saigai.html



こちらのQRコードで記事がご覧頂けます。

8. 福島の復興

福島第一原子力発電所の廃炉・汚染水対策

Q 福島第一原発の廃炉・汚染水対策は進んでいますか？

A 廃炉・汚染水対策は世界にも前例のない困難な作業ですが、中長期ロードマップに基づき、安全かつ着実に取組を進めています。

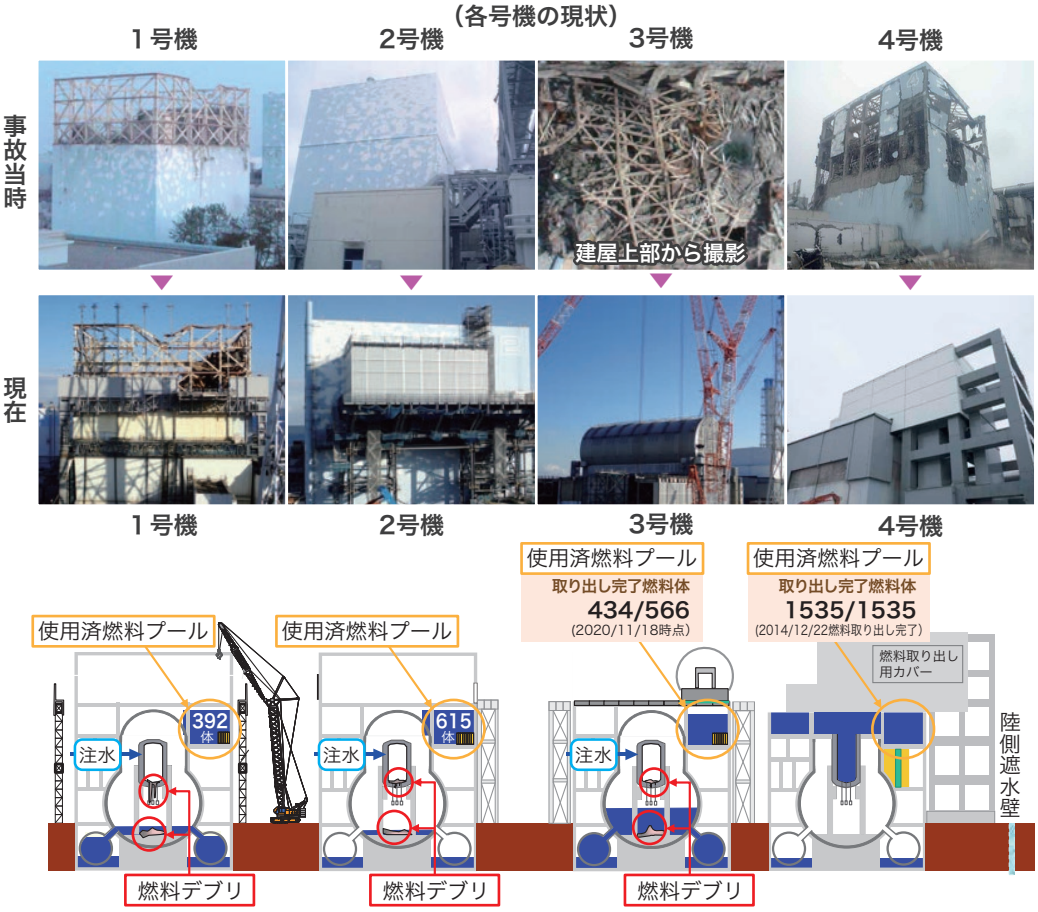
廃炉

各号機は安定状態を維持しており、使用済み燃料プールからの燃料取り出しに向けたガレキ撤去や除染などを行っています。
燃料デブリ(溶けて固まった燃料)の取り出しに向けては、格納容器内部の調査や取り出し装置の開発等を進めており、その結果を踏まえ、準備が整い次第2号機で試験的取り出しを開始し、段階的に規模を拡大していく予定です。



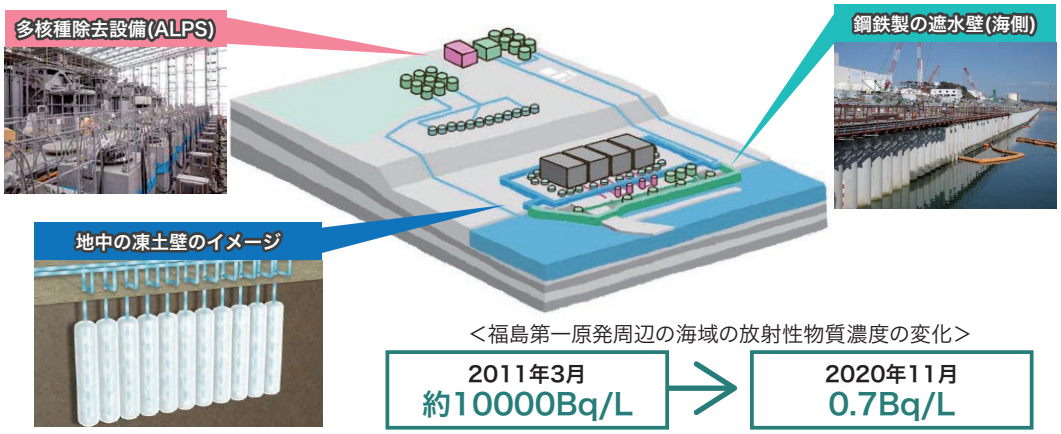
これまでの調査から、燃料デブリの分布など格納容器内部の状況がわかってきました。
2019年2月の2号機での調査で、燃料デブリと思われる堆積物をつまみ、持ち上げることができました。

（各号機の現状）



汚染水対策

福島第一原発で1日あたりに発生する汚染水の量は、凍土壁等の重層的な対策により、対策開始前の1/3程度に低減しています。発生した汚染水は複数の浄化設備で処理し、可能な限り放射性物質を除去した上でタンクに貯蔵しています。
周辺海域の水質も大幅に改善してきています。



<福島第一原発周辺の海域の放射性物質濃度の変化>

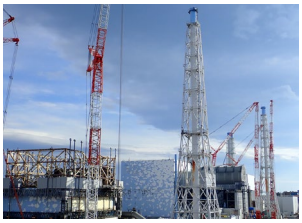
2011年3月	→	2020年11月
約10000Bq/L		0.7Bq/L

福島第一原発「廃炉・汚染水対策」の取組

廃炉・汚染水対策についてはホームページでも解説しています。

- 福島第一原発「燃料デブリ」取り出しへの挑戦
- 現場で進む、汚染水との戦い
- 安全・安心を第一に取り組む、福島の“汚染水”対策　etc

参照：https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/keyword/?k=廃炉



こちらのQRコードで記事がご覧頂けます。

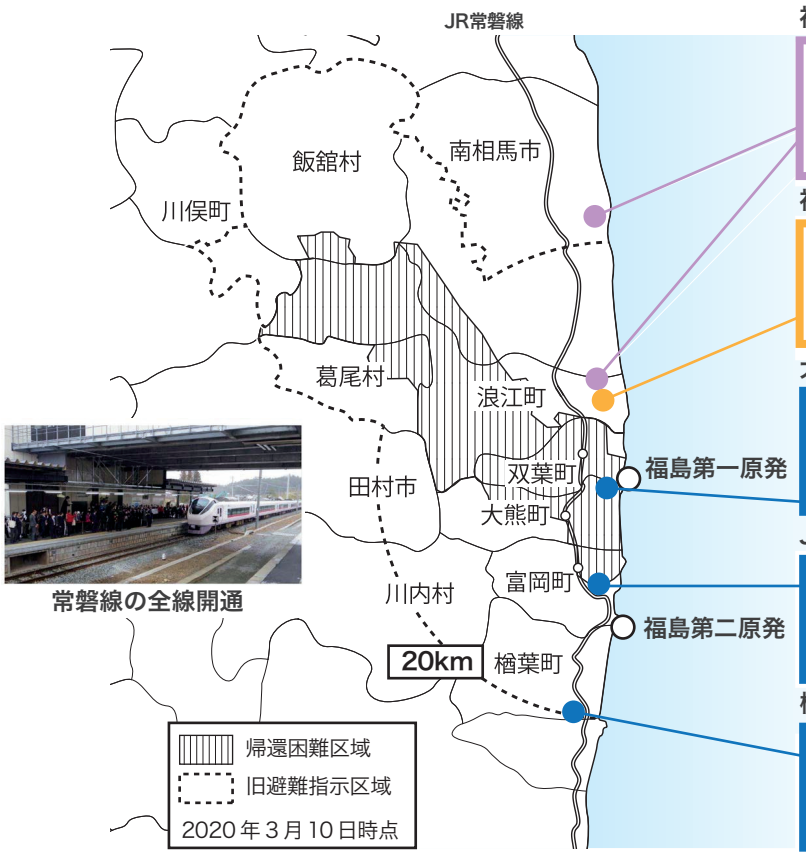
福島の復興

Q 福島の復興は進んでいますか？

**A 現在、「帰還困難区域」以外は、全ての地域の避難指示が解除されています。
また、2020年3月14日には、JR常磐線が全線で営業運転を再開しました。
帰還困難区域についても、特定復興再生拠点の整備に向けて取り組んでいます。また、除染やインフラ・生活環境サービスの整備を加速させるとともに、なりわい再建・新たな産業の創出や産業集積の促進を通じた、福島の地域再生に向けた取組を進めています。**

福島イノベーション・コースト構想

浜通り地域などの産業を回復するため、新たな産業の創出を目指すものです。



常磐線の全線開通

福島ロボットテストフィールド(南相馬市、浪江町)



ロボットの開発・実証のためのロボットテストフィールドを整備(2020年3月開所)

福島水素エネルギー研究フィールド(浪江町)



世界最大級となる1万kWの水電解装置を用いて、再生可能エネルギーから大規模に水素を製造する実証事業を実施(2020年3月開所)

大熊分析・研究センター(大熊町)



低・中線量のガレキ類や燃料デブリの分析などを実施

JAEA廃炉国際共同研究センター国際共同研究棟(富岡町)



国内外の大学や研究機関、企業などが集結し、廃炉研究などを実施

楢葉遠隔技術開発センター(楢葉町)



原子炉格納容器の調査・補修ロボットの開発・実証試験やバーチャル・リアリティシステムを利用した作業者訓練などを実施

福島新エネ社会構想

福島を未来の新エネ社会の先駆けの地とし、世界へ発信しています。

再エネの導入拡大

- 阿武隈、双葉エリアの風力発電などのための送電線増強など

水素社会実現のモデル構築

- 再エネを活用した大規模水素製造実証
(世界最大級となる1万kWの水電解装置の導入)
- 水素輸送・貯蔵技術の実証
(2020年東京オリンピック・パラリンピック期間中の活用)など

スマートコミュニティの創出

- 新地町、相馬市、浪江町、楢葉町、葛尾村を始め、福島におけるスマートコミュニティの構築を支援など

福島県の食品の安全性

県産農林水産物は出荷前に検査を実施、安全性を確認しています。基準値を超過した品目は、市町村単位で出荷が制限され、流通しません。

福島県による農林水産物のモニタリング検査等の状況

(2020年4月1日～8月31日)※「玄米」のみ、2019年8月26日～2020年8月31日

種別	検査点数	基準値超過数	超過数割合
玄米(2020年産)	全袋検査(約949万点)	0点	0.00%
野菜・果実	1,220件	0件	0.00%
畜産物	1,743件	0件	0.00%
栽培山菜・きのこ	442件	0件	0.00%
海産魚介類	1,689件	0件	0.00%
内水面養殖魚	14件	0件	0.00%
野生山菜・きのこ	458件	0件	0.00%
河川・湖沼の魚類	459件	4件	0.35%

米は、県内全域で生産・出荷される全ての米を検査してきましたが、2015年産以降5年間基準値超過がないことから、2020年産米から避難指示等のあった12市町村を除きモニタリングへ移行しました。避難指示等のあった12市町村においては、全量全袋検査を継続していきます。

出典：福島復興のあゆみ(第29版)を基に作成

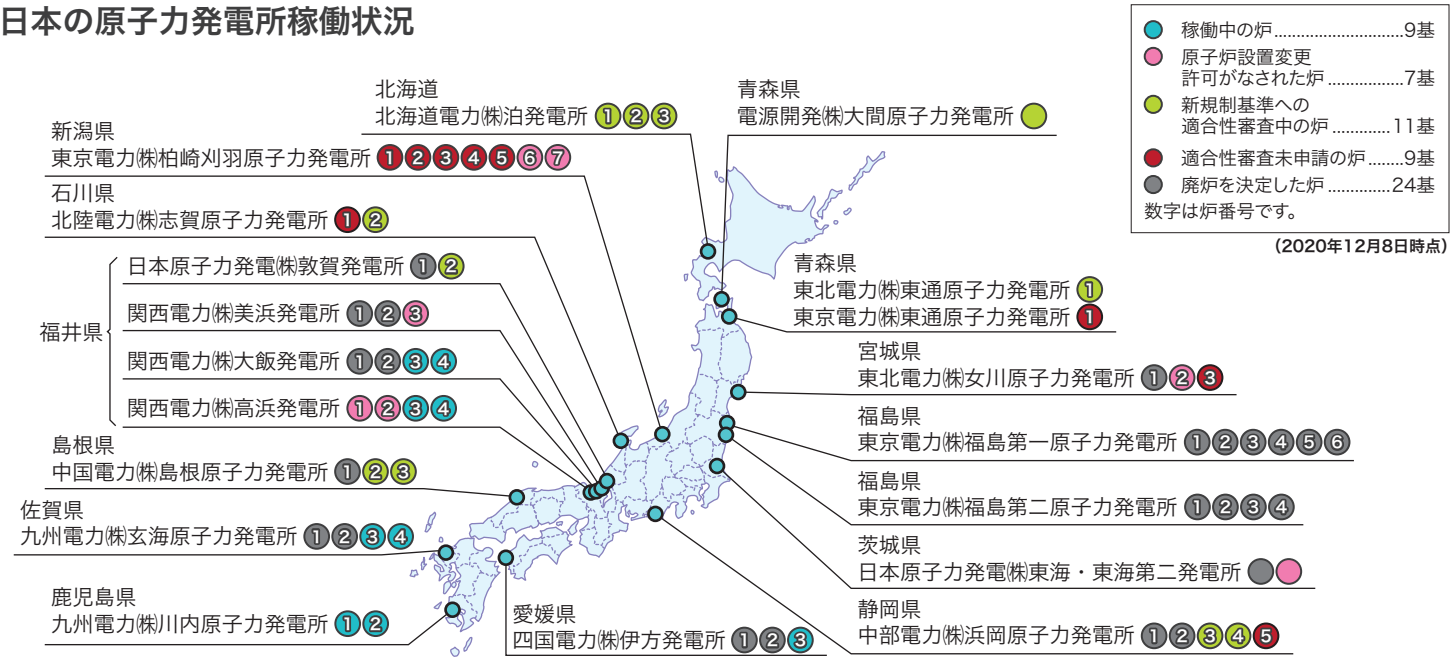
9. 原子力

原子力発電所の稼働状況

Q 原子力発電は必要ですか？

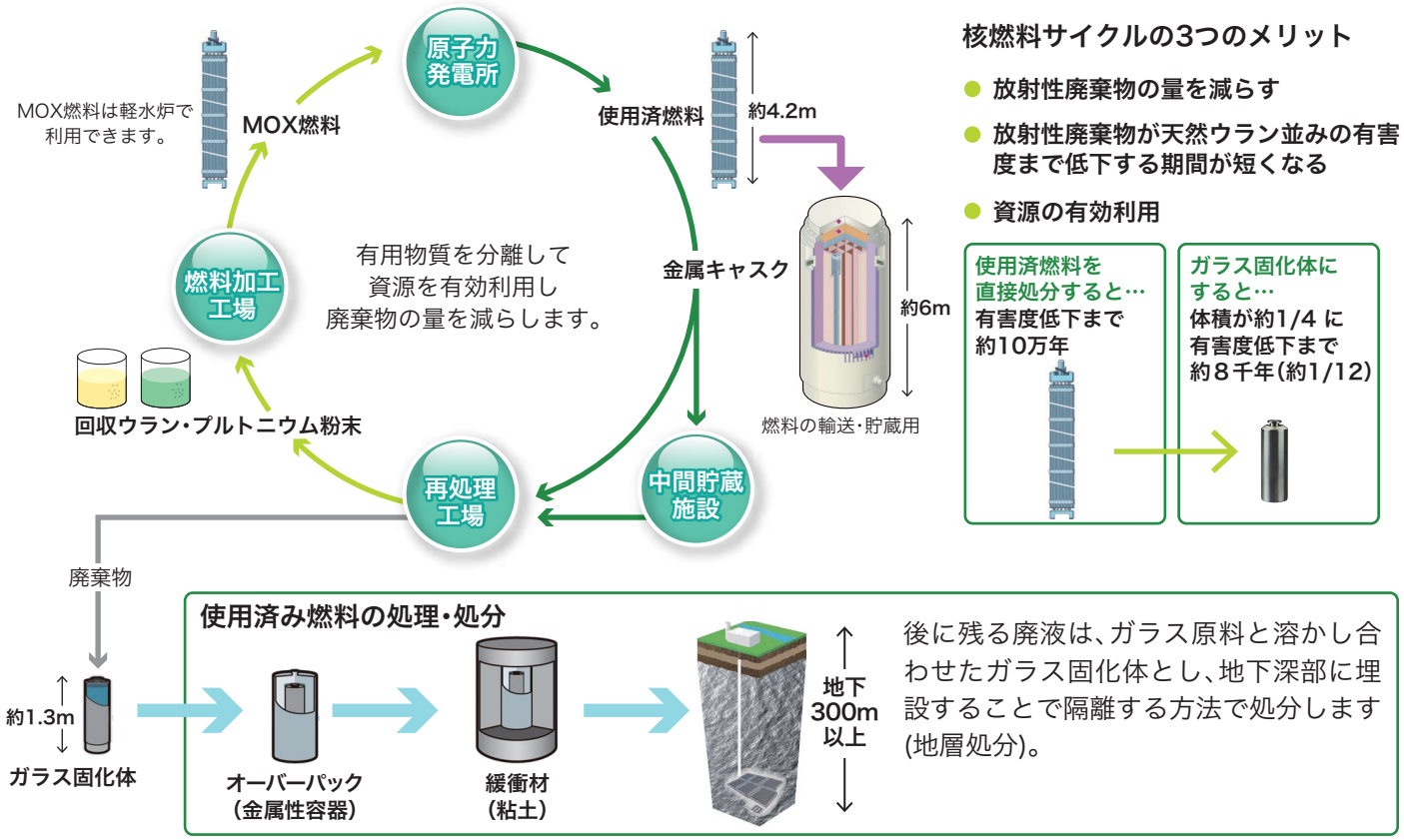
A 資源の乏しい我が国で、①安定供給の確保、②電力コストの引下げ、③温室効果ガス排出の抑制の3点を実現するためには、原子力発電は欠かすことのできない電源です。再稼働にあたっては、安全性を最優先に、新規制基準に適合することが必要です。

日本の原子力発電所稼働状況



核燃料サイクルと地層処分

日本は、原子力発電所の使用済燃料を再処理し、回収されるウランとプルトニウムを再利用しつつ、廃棄物の発生量を抑える「核燃料サイクル」を推進しています。



燃料集合体、金属キャスク図：日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集」

科学的特性マップと文献調査

地層処分の仕組みや日本の地質環境等などについて理解を深めていただくために、2017年7月に「科学的特性マップ」を公表しました。

地域の科学的特性を４つの色で色分け

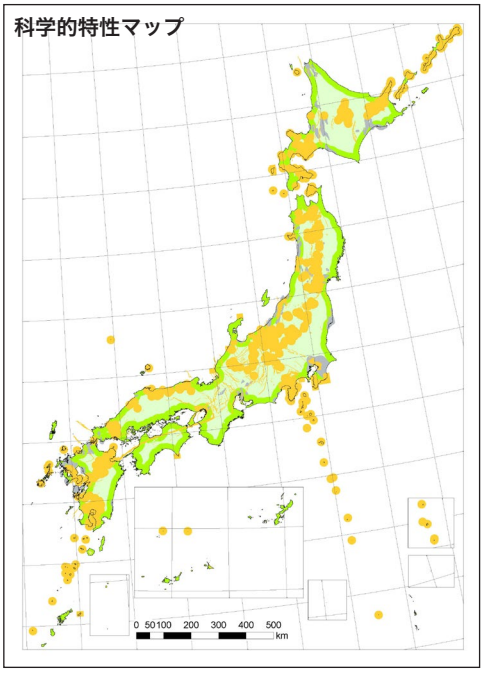
- ◆ **オレンジ：火山や活断層に近い　等**
- ◆ **シルバー：地下に鉱物資源がある**
- ◆ **グリーン：好ましい特性が確認できる可能性が高い**
- ◆ **濃いグリーン：グリーンの中でも海岸から近い**

※グリーンの地域であっても、個々の地点が地層処分に必要な条件を満たすかどうかは、段階的な調査を綿密に実施し、確かめる必要があります。

参照：https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/

マップの詳細はこちら

こちらのQRコードで記事がご覧頂けます。



文献調査の詳細はこちら

こちらのQRコードで記事がご覧頂けます。

科学的特性マップを公表以降、全国各地で対話活動を実施中。これまでの取組状況を踏まえ、全国のできるだけ多くの地域で文献調査を実施できるよう、引き続き全国での対話活動に取り組んでいます。

20年程度の調査期間中、放射性廃棄物は一切持ち込まない

科学的特性マップの公表（2017年7月）

全国各地での対話活動

関心グループのニーズに応じた情報提供等

文献調査
自治体からの応募、もしくは、国からの申入れを自治体が受諾
（机上調査）

概要調査地区の選定

概要調査
（ボーリング調査）

精密調査地区の選定

精密調査
（地下施設での調査・試験）

施設建設地の選定

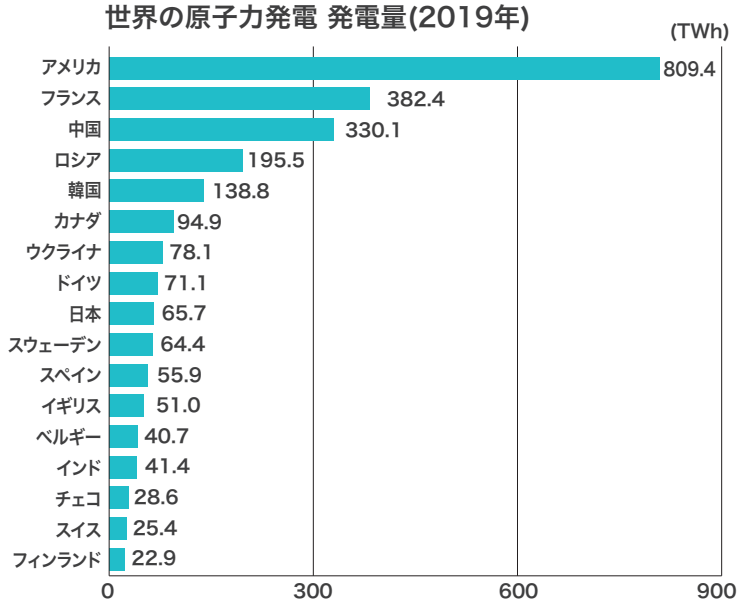
地域の意見を聴く（意見に反して先へ進まない）

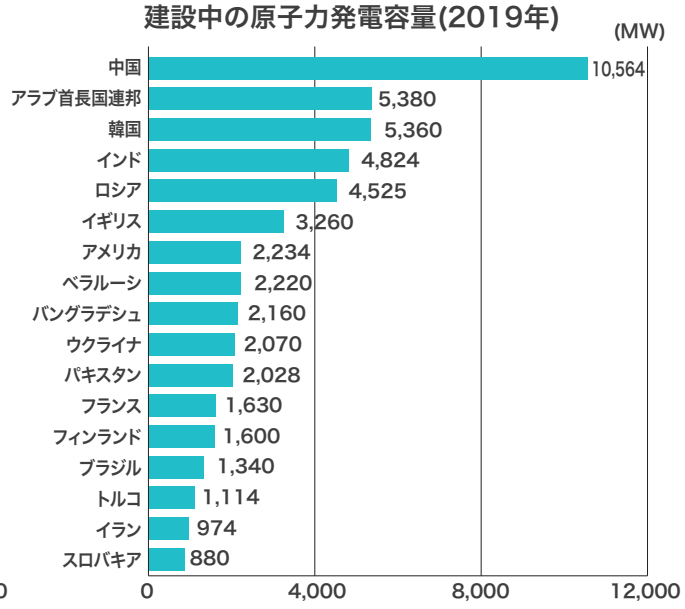
地域の意見を聴く（意見に反して先へ進まない）

地域の意見を聴く（意見に反して先へ進まない）

コラム - 世界における原子力の動向

原子力発電の発電量実績を見ると、上位からアメリカ、フランス、中国、ロシア、韓国となってますが、建設中の原子力発電容量を見ると、中国が非常に多くの建設を行っていることが分かります。





出典：IAEA Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050 REFERENCE DATA SERIES No. 1 2020 Edition

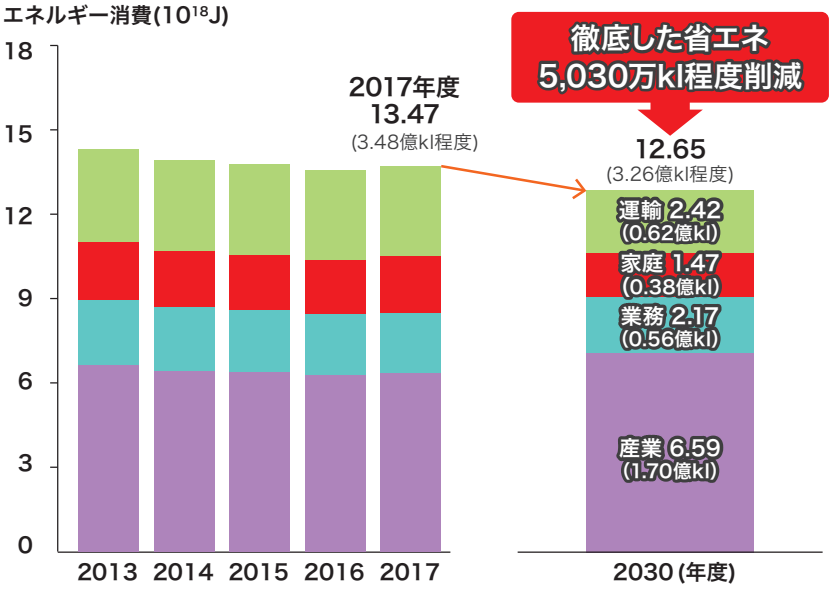
10. 省エネ

徹底した省エネ

Q 日本の省エネの取組はどこまで進んでいますか？

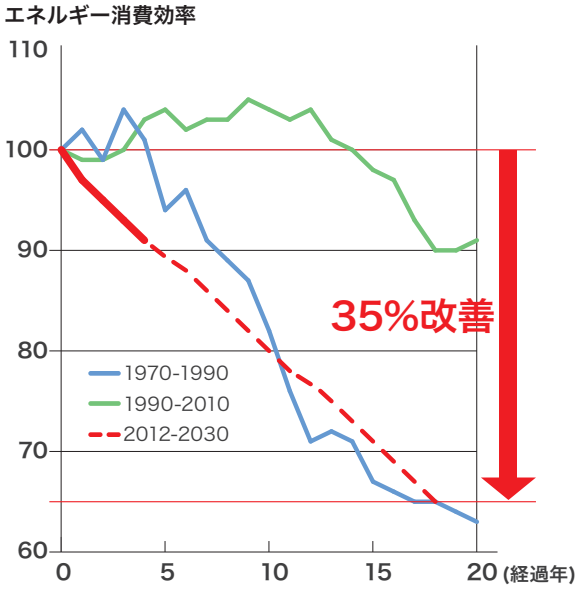
A 日本はエネルギー消費効率を高める取組を続けています。エネルギーミックスにおける2030年度の需給見通しの実現に向けて省エネを進めることが必要です。

エネルギーミックスにおける最終エネルギー需要



出典：資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」、内閣府「国民経済計算」、日本エネルギー経済研究所「エネルギー・経済統計要覧」を基に作成
※J(ジュール)はエネルギーの大きさを示す指標の1つ。
※()内はエネルギーの原油換算値。原油換算係数0．0258(kℓ／GJ)によって算出した。

エネルギー消費効率の改善



※1970年、1990年、2012年のエネルギー消費効率を100とする
※エネルギー消費効率＝最終エネルギー消費/実質GDP

機器の省エネ表示が新しく

今まで5段階だった評価区分を、0.1きざみの41段階（1.0～5.0）の評価点にすることで、より詳しい性能表示ができるようになります。電気冷蔵庫、電気冷凍庫、電気便座、照明器具は、2020年11月より新しい省エネ表示が導入され、店頭での表示が始まりました。エアコン、テレビ等は2021年以降に導入される予定です。



統一省エネラベルの例（電気冷蔵庫）

①多段階評価点
市場における製品の省エネ性能の高い順に5.0～1.0までの41段階で表示（多段階評価点）。★（星マーク）は多段階評価点に応じて表しています。

②省エネルギーラベル
省エネ性マーク、省エネ基準達成率、エネルギー消費効率、目標年度を表示。

③年間の目安電気料金
エネルギー消費効率(年間消費電力量等)をわかりやすく表示するために年間の目安電気料金で表示。

電気料金は、公益社団法人 全国家庭電気製品公正取引協議会「新電気料金目安単価」から1kWhあたり27円(税込)として算出。

新登場：ミニラベルの例

小さいサイズのラベルに評価点を表示。
Webサイトなどの限られたスペースでも、省エネ情報をわかりやすく表示できます。



新しい省エネ表示ラベルはこちらから…省エネ型製品情報サイト

機器ごとの省エネ性能のほか、省エネラベルの出力ができるサイトです。
家電・ガス製品購入時の参考になる省エネ機器の選び方や使い方を掲載しています。
4,000以上の製品を網羅した「省エネ性能カタログ(PDF版)」も配付中。



お問い合わせ先
経済産業省資源エネルギー庁長官官房総務課調査広報室
〒100-8931　東京都千代田区霞が関 1-3-1
電話 03-3501-1511(代表) https://www.enecho.meti.go.jp/
本パンフレットの電子版(pdf)は、下記URLからご覧頂けます。
https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/

エネルギーについてさらにくわしく知りたい方はこちら
「スペシャルコンテンツ」
エネルギーに関するさまざまな話題を提供しています。
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/

※このパンフレットは資源の有効利用のため、古紙配合率80%の再生紙・VEGETABLE OIL INKを使用しています。
古紙パルプ配合率80％再生紙を使用
VEGETABLE OIL INK
日本のエネルギー2020　発行：2021年2月

「NEDO 水素エネルギー白書」　発行年月：2015 年 2 月

NEDO は、将来の水素社会の実現に向け、水素エネルギーに関する社会の理解を一層深める観点から、「NEDO　水素エネルギー白書」を取りまとめました。
白書では、水素そのものの特徴から、エネルギーとして利用することの意義、水素社会実現に向けた政策動向、製造、輸送・貯蔵、利用まで関連する技術動向、現状の課題と今後の方向性など、水素エネルギーを取り巻く国内外の情報を体系的に集約いたしました。
　本書は、水素に関心を持ち始めた方々を対象とした水素エネルギーの入門書として、水素の特徴、政策、技術、市場から将来の方向性まで、国内外の情報を体系的に集約するとともに、水素社会実現に向けた課題と取り組みの方向性を示しています

―水素社会実現に向けた課題克服への取組推進―

国立研究開発法人　新エネルギー・産業技術開発機構　NEDD

NEDO home page より　採録
https://www.nedo.go.jp/library/suiso_ne_hakusyo.html
https://www.nedo.go.jp/content/100567362.pdf
〈 全７章　196 ページ 〉



第1章：水素とは何か (1992KB)
第2章：水素エネルギーに関連する日本の政策と取組み (5776KB)
第3章：水素エネルギーに関連する各国の取組み (2473KB)
第4章：水素エネルギーの市場の現状と展望 (2638KB)
第5章：水素エネルギーの社会受容性 (2040KB)
第6章：水素エネルギー技術 (7286KB)
第7章：水素社会実現を目指して (1687KB)
用語集 (978KB)
参考文献 (939KB)

目　次

はじめに …… 1

第 1 章　水素とはなにか …… 3

1-1　水素とは …… 3

1-2　水素エネルギーを導入する意義 …… 6

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 …… 11

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

第 3 章　水素エネルギーに関連する各国の取り組み …… 55

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

第 4 章　水素エネルギーの市場の現状と展望 …… 75

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

第 5 章　水素エネルギーの社会受容性 …… 89

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

第 6 章　水素エネルギー技術 …… *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*

第 7 章　水素社会実現を目指して …… *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*

用　語　集 …… *181*

参　考　資　料 …… *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ます。

はじめに

新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」）では、1980 年の創立以来、燃料電池技術や水素利用技術の開発に取り組んできました。固体高分子形燃料電池システムについては、産業界とともに技術開発を含む様々な取り組みを行った結果、2009 年に家庭用のコージェネレーションシステム（エネファーム）として、世界に先駆けて市場導入を実現しました。また、燃料電池自動車につきましても、2014 年 12 月に世界初となる一般販売が開始され、これに併せて水素ステーションの整備も進んでいます。NEDO は、燃料電池自動車や水素ステーションの分野でもその実用化に向けて産業界とともに取り組んできたところです。

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災及び東京電力福島第一原子力発電所事故を機に、我が国のエネルギー事情は大きく変化しました。この変化を踏まえ、2014 年 4 月、新たなエネルギー政策の方向性を示すものとして、「エネルギー基本計画（第四次）」が閣議決定されました。本基本計画には、水素は多様な一次エネルギー源から様々な方法で製造でき、気体、液体、固体というあらゆる形態で貯蔵・輸送が可能であり、利用方法次第では高いエネルギー効率、低い環境負荷、非常時対応などの効果が期待され、将来の二次エネルギーの中心的役割を担うことが期待されるとされており、この水素を本格的に利活用する「水素社会」の実現に向けた取り組みを加速すると謳っています。

また、経済産業省では、2014 年 6 月、水素社会の実現に向けた取り組みの加速に向けた「水素・燃料電池戦略ロードマップ」を策定し、今後の取り組みの道筋を示しました。この戦略ロードマップにおいて、水素社会の実現に向けて、これまで取り組んできた家庭用燃料電池（エネファーム）の普及の拡大、燃料電池自動車市場の整備に加え、水素発電の本格導入といった水素需要の拡大や、その需要に対応するための水素サプライチェーンの構築の必要性が示されています。そして、6 月に改訂された「日本再興戦略 2014」において、ロードマップに基づき必要な措置を着実に進めることとされています。

このように、我が国の政府は、水素社会の実現に向けて取り組んでいくことを明確に示すなか、水素に対する国民の関心も高まっているところです。このような水素を巡る環境の変化を踏まえ、NEDO が取り組んできた技術開発から得た知

見を社会に還元すべく、水素エネルギーを巡る国内外の状況や水素の製造、貯蔵・輸送、利用に関連する技術の状況などを一冊にまとめ、「NEDO 水素エネルギー白書」として公表することにしました。このような水素エネルギーに関する網羅的かつ体系的な書は世界初のものであると考えています。

水素ビジネスに携わる方も一般の方々も、本書を座右の書として水素エネルギーへの理解をさらに深めていただくとともに、水素社会の実現に向けた議論の基礎や、技術開発の指針として活用していただくことを願っております。

最後になりましたが、本書の作成にあたり、経済産業省、NEDO 事業に参加いただいている企業や研究機関など、多くの機関の方々のご協力を賜りました。この場をお借りして、厚くお礼を申し上げます。

2015 年 2 月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

理事長　古川　一夫

第 1 章

水素とはなにか

水素への注目が高まっている。現在、水素は主に工業原料として用いられているが、一般的には必ずしも馴染みが深いものではない。本章では、水素への基本的な理解を得るため、水素の特徴、現在の用途、製造方法、エネルギーとして利用する意義について述べる。

1-1　水素とは

■ 1-1-1　水素の特徴

水素とは、原子番号 1 の元素で元素記号は H であり、通常、原子が 2 つ結びついた水素分子（H_2）の形をとる。無色、無臭で、地球上最も軽い気体であり、水素分子の状態として存在することはほとんどないが、水などのように他の元素との化合物として地球上に大量に存在する。

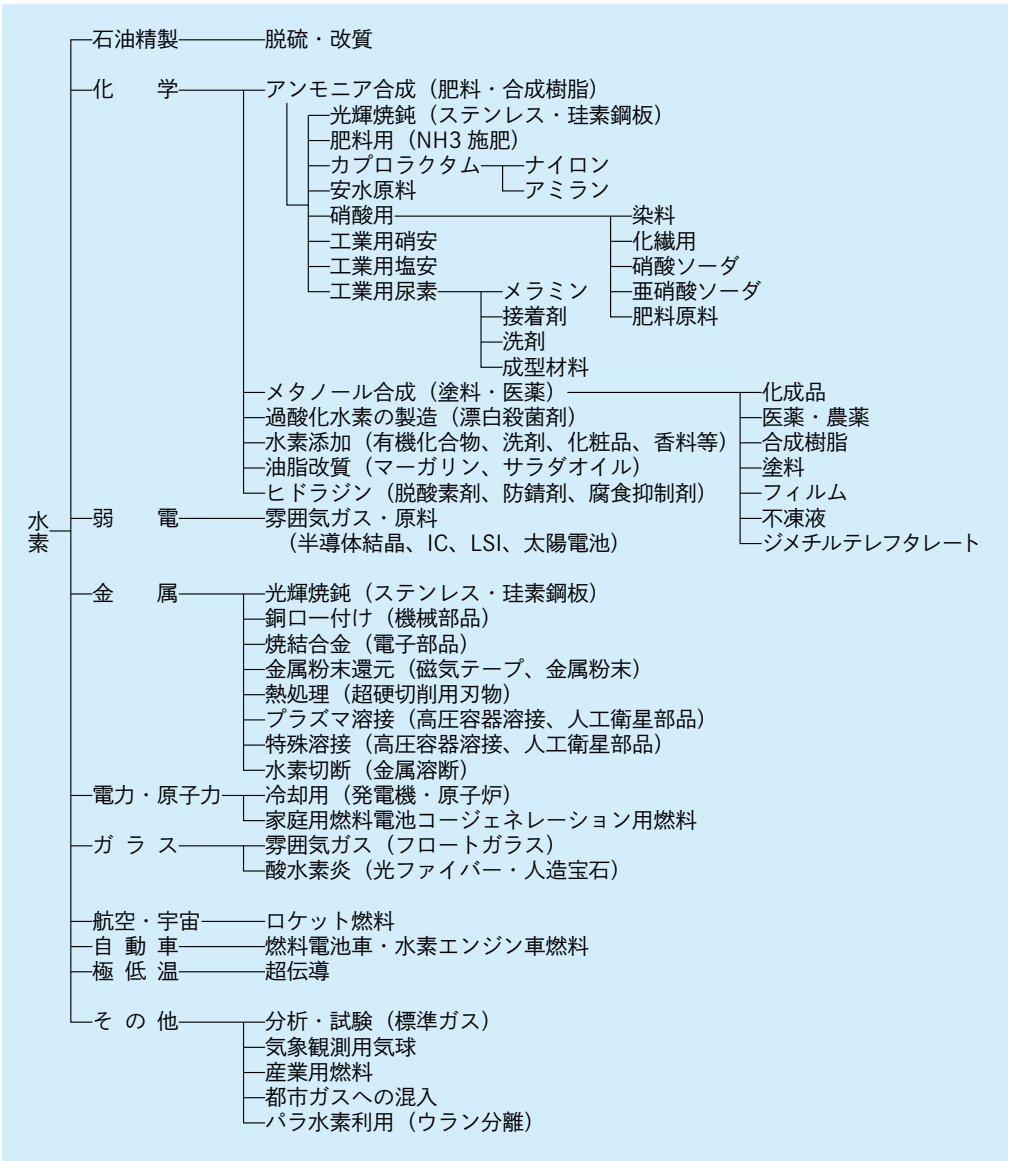
水素の特徴を以下に示す。

- 宇宙で最も豊富にある元素。質量では宇宙全体の約 70％を占める（太陽はじめ、宇宙の星々のほとんどが水素の核融合反応によって光っている）。
- 水素単体では自然界にほとんど存在せず、地球上では化合物として存在する（水、化石燃料、有機化合物など）。
- 無色、無味、無臭の気体。
- 最も軽い気体（空気に対する比重 0.0695）で、拡散速度が速い。
- 燃えても火炎がみえにくい。
- 燃焼すると酸素と反応して水になる。
- −252.6℃で液化する。

1-1-2　水素の用途

工業原料としての水素の用途は多岐にわたっている。例えば、石油の精製における原油に含まれる硫黄分の除去、半導体プロセスにおける雰囲気ガス、ステンレス鋼の光輝焼純、金属冶金や樹脂生成プロセスにおける還元剤、アンモニア合成用原料、光ファイバーの素材となる石英硝子の製造プロセス、ファイバー加工時の熱源などが主な用途である。

表 1-1　水素の主な用途



出典：岩谷産業ホームページ【参考資料［21］】より NEDO 作成

また、身近な製品として、マーガリンやサラダオイルなどの油脂硬化剤、化粧品、洗剤、香料、ビタミン剤などの原料の一部としても使用されている。

この他、エネルギー用途としては、ロケットの燃料として液化水素が活用されているほか、水素イオンを利用したニッケル水素電池がある。

水素の主な用途について表 1-1 に示す。

■ 1-1-3　水素の製造

水素は図 1-1 に示すとおり、様々な原料を出発点として製造することができる。

天然ガス、LPG、ナフサ、石油残渣といった炭化水素から水素を製造する方法としては、水蒸気改質法、部分酸化法などのプロセスが実用化されている。これは化石燃料から水素と一酸化炭素を発生させ、さらにシフト反応により一酸化炭素と水蒸気から水素を発生させる二段階のプロセスとなっており、製造された粗水素は、圧力スイング吸着（PSA：Pressure Swing Adsorption）、膜分離などといったプロセスで精製される。

工業プロセスからは、製油所における石油精製プロセス、コークス炉などの製鉄プロセス、エチレン製造など石油化学プロセス、ソーダ工場における食塩水の電解プロセスなどから副次的に水素が発生しており、この水素は主として工場内の他のプロセスの原料や、エネルギー源として利用されている。

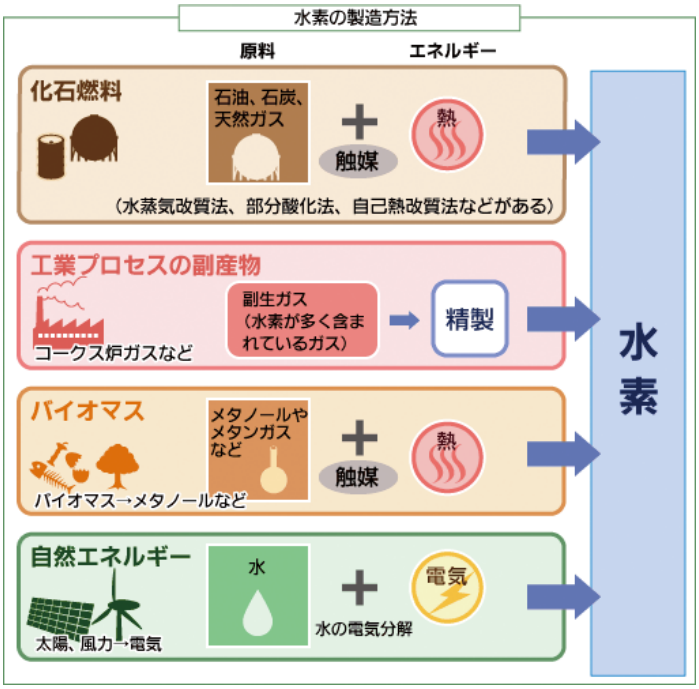


図 1-1　水素の製造方法

水電解による水素製造は、アルカリ水電解法と固体高分子膜を利用した固体高分子膜水電解法があり、小規模な工業用として一定程度行われている。風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーを利用する場合は、天候の変化などに伴い発電量が変動することから、出力変動に対応することが必要となる。

バイオマスからの水素製造は、出発原料に応じて、メタン発酵、水蒸気ガス化などのプロセスが用いられる。

この他、将来の技術として、光触媒による水素製造技術、高温ガス炉などの熱を活用しヨウ素（I）と硫黄（S）を循環して水素を製造するプロセス（IS プロセス）による水素製造技術などの研究が進められている。

1-2　水素エネルギーを導入する意義

1-2-1　エネルギー・セキュリティの向上

水素エネルギーの導入推進は、2014 年 4 月に策定されたエネルギー基本計画で定められた方向性である 3 E ＋ S（エネルギーの安定供給、経済効率性の向上、環境への適合、安全性）と、国際化推進・国際市場開拓と経済成長への貢献するものである。

特に我が国の輸送部門は、日本のエネルギー使用量の約 2 割を占め（図 1-2）、そのほぼ全てを原油・石油製品に依存しており、地政学的リスクが懸念されている。2014 年 12 月から市販開始された燃料電池自動車（FCV：Fuel Cell Vehicle）が燃料に利用する水素は、将来的には海外の褐炭や原油随伴ガスなどの未利用エネルギーや、国内外の再生可能エネルギーを用いて製造できる可能性があり、一次エネルギー源を地政学的リスクの低い地域などから安価に調達することも検討されている。

水素エネルギーの利活用技術の適用可能性は幅広く、燃料電池自動車や既に実用化段階にある家庭用燃料電池システムだけでなく、船舶や鉄道などを含む他の輸送分野、水素発電など、我が国のエネルギー消費分野の多くに対応し得る潜在的なポテンシャルがある。

こうした多岐にわたる分野において水素の利活用を抜本的に拡大することで、大幅な省エネルギーや環境負荷低減、エネルギー・セキュリティの向上に大きく貢献するとともに、新たな市場を開拓できる可能性がある（図 1-3）。

1-2-2　省エネルギー、環境負荷低減

燃料電池は燃料である水素と、空気中の酸素との電気化学反応から電気エネルギーを直接取り出すため発電効率が高い。また、電気と熱の両方を有効利用することで、さらに総合エネルギー効率を高めることが可能である（図 1-4）。

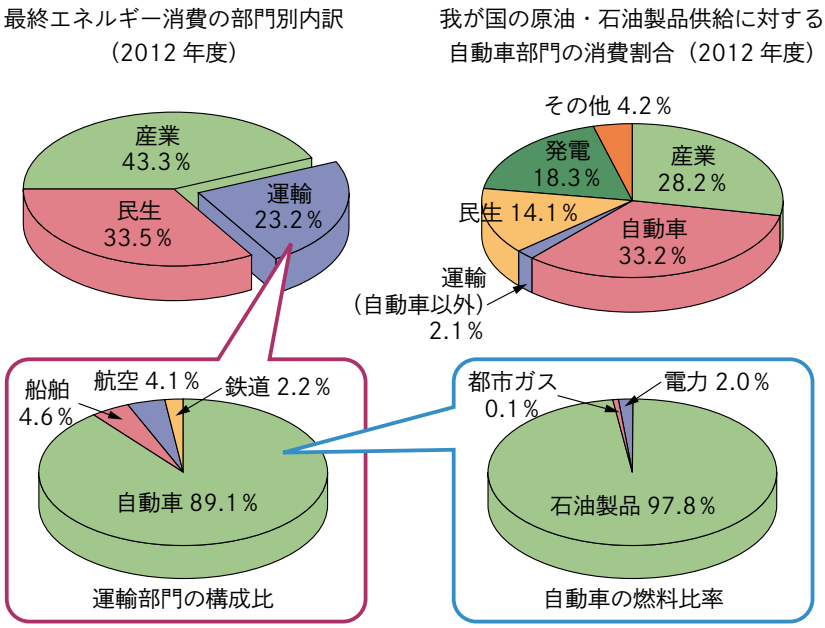


図 1-2　輸送部門のエネルギー消費

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



図 1-3　水素利活用技術の適用可能性

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

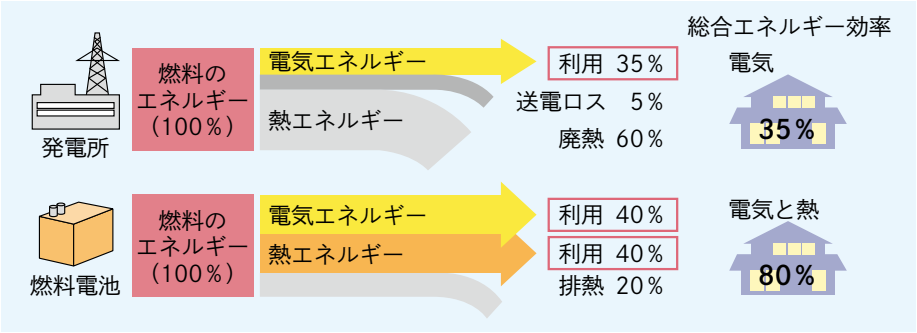


図 1-4　燃料電池のエネルギー効率

このため、燃料電池の活用を広げることで、大幅な省エネルギーにつながり得ると考えられる。

燃料電池自動車の CO_2 排出量は、水素製造源によって様々ではあるが、従来のガソリン車と比べると、高いエネルギー効率を有する燃料電池技術により、電気自動車と同様にエネルギー消費量や環境負荷の低減に大きく貢献することが期待できる（図 1-5）。さらに、水素の製造時に二酸化炭素回収・貯留技術（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）を組み合わせる、又は再生可能エネルギーから水素を製造するといった水素の製造方法次第では、CO_2 排出量を大幅に削減でき、さらには CO_2 フリーのエネルギー源として水素を活用し得ると考えられる。

1-2-3　産業振興

水素・燃料電池関連の市場規模は、我が国だけでも 2030 年に 1 兆円程度、2050 年に 8 兆円程度に拡大すると試算されており（図 1-6）、今後 10 ～ 35 年間で大きく成長する分野と期待されている。

一方、日本の燃料電池分野の特許出願件数は世界 1 位で、2 位以下の欧米をはじめとする各国と比べて 5 倍以上と諸外国を大きく引き離している。また、家庭用燃料電池システムを世界に先駆けて商品化するなど、水素エネルギー利活用分野における現時点での日本の競争力は高いといえる（図 1-7）。

特に日本の自動車産業に関しては、我が国の国内雇用者数の約 1 割、輸出額の 2 割を占める基幹産業である一方、国際的な競争が激化している中で、燃料電池自動車という新しい領域で世界をリードしていくことは、産業競争力確保の観点から重要である。

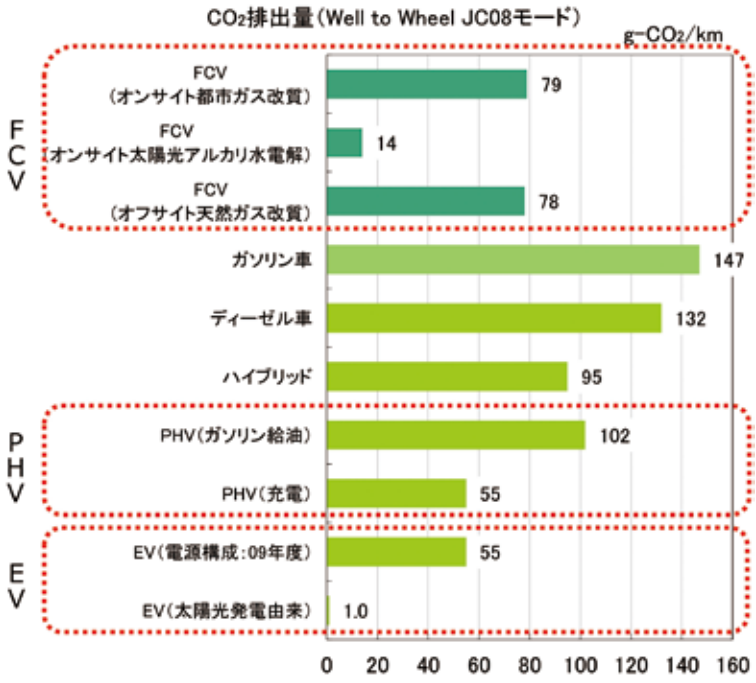


図 1-5　二酸化炭素排出量（Well to Wheel）の比較

出典：財団法人日本自動車研究所「総合効率と GHG 排出の分析報告書」
（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］】

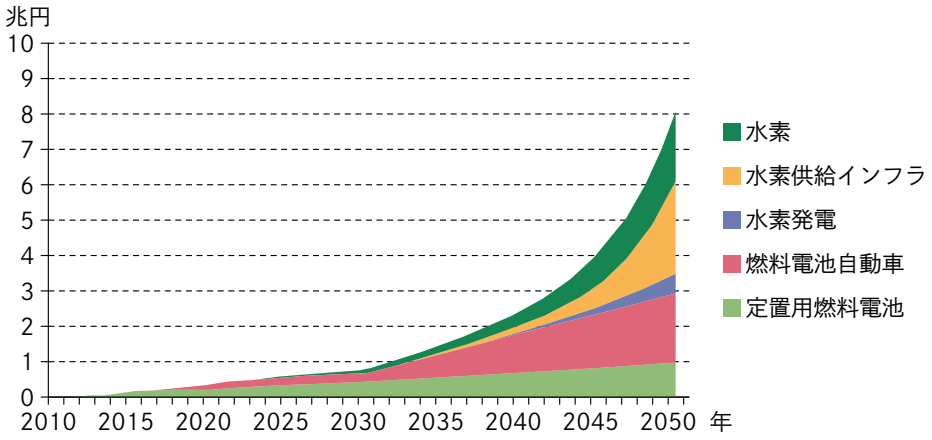


図 1-6　我が国における水素・燃料電池関連の市場規模予測

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

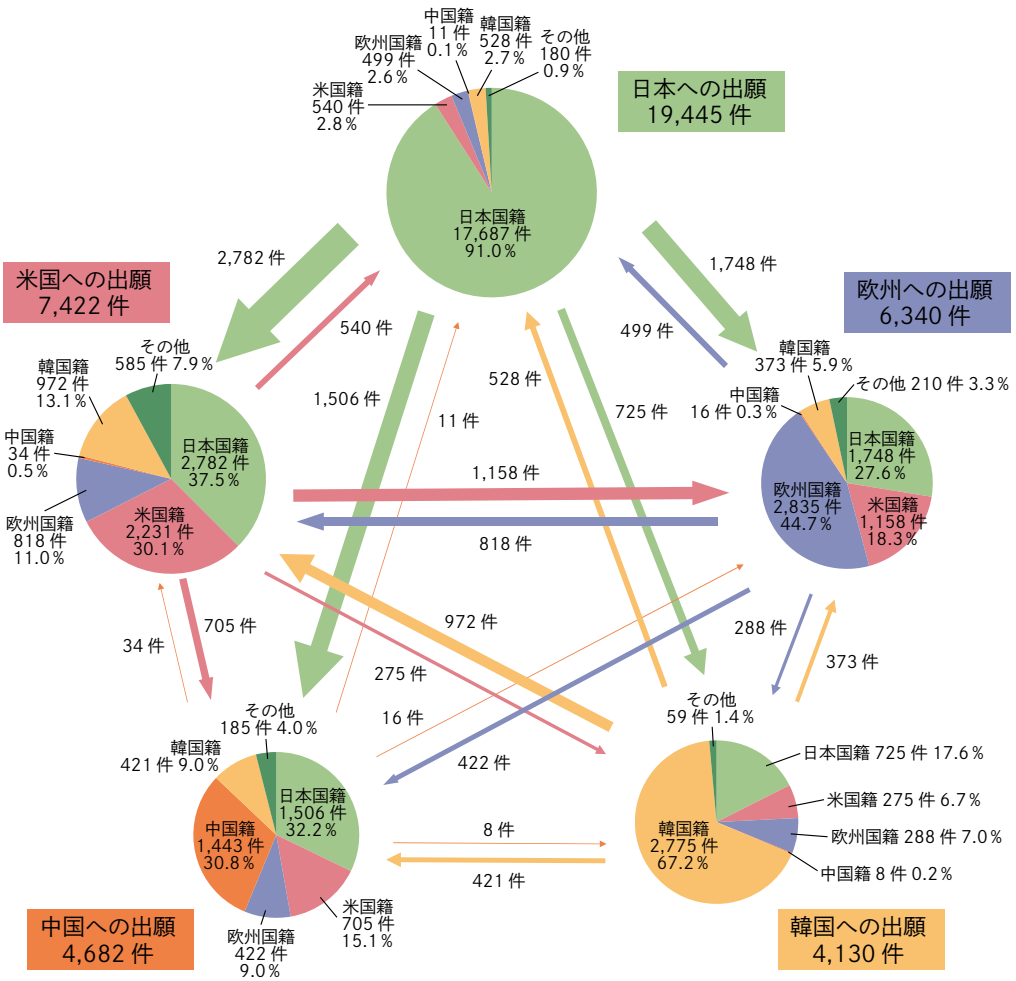


図 1-7　日米欧中韓における出願収支

出典：特許庁「平成 23 年度 特許出願技術動向調査報告書（概要）燃料電池」
（2012 年 4 月）より NEDO 作成

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

日本をはじめ、世界各国で水素や水素エネルギーについての取り組みが行われている。本章では、日本で水素や水素エネルギーがどのように位置付けられ、どのような政策を進めているか、また自治体や民間はどのような取り組みを行っているかについて述べる。

2-1　水素エネルギーに関する日本の政策

2-1-1　日本再興戦略

水素エネルギーの推進や燃料電池自動車の実用化は、近年、明確に日本の政策として位置付けられている。安倍総理は 2013 年 5 月に、燃料電池自動車を環境にやさしい革新的な自動車とし、これに係る規制を一気に見直すと述べている（表 2-1）。

表 2-1　安倍総理の「成長戦略第 2 弾スピーチ」での燃料電池自動車への言及

競争相手よりも一歩先のイノベーションを、常に生み出し続けるほかに道はありません。
私は、新たなイノベーションに果敢に挑戦する企業を応援します。その突破口は、規制改革です。
例えば、燃料電池自動車。二酸化炭素を排出しない、環境にやさしい革新的な自動車です。
しかし、水素タンクには経産省の規制、国交省の規制。燃料を充てんするための水素スタンドには、経産省の規制の他、消防関係の総務省の規制や、街づくり関係の国交省の規制という、がんじがらめの規制の山です。
一つずつモグラたたきをやっていても、実用化にはたどりつきません。
これを、今回、一挙に見直します。

出典：首相官邸安倍総理「成長戦略第 2 弾スピーチ」（2013 年 5 月 17 日）

表 2-2　日本再興戦略― JAPAN is BACK ―における水素・燃料電池の位置付け

燃料電池技術開発・低コスト化	世界に先駆けて我が国の市場に燃料電池を加速的に導入するために、先端的研究開発を推進するとともに、徹底的な標準化も進めながら低コスト化を図り、2030 年には家庭用燃料電池（エネファーム）530 万台（日本全世帯の約 1 割に相当）を市場に導入する。
水素供給インフラ導入支援、FCV・水素インフラに係る規制の見直し	2015 年の燃料電池自動車の市場投入に向けて、燃料電池自動車や水素インフラに係る規制を見直すとともに、水素ステーション整備の支援により、世界最速の普及を目指す。

出典：日本再興戦略― JAPAN is BACK ―（2013 年 6 月 14 日）

同年 6 月にアベノミクス 3 本目の矢として発表された「日本再興戦略― JAPAN is BACK ―」では、家庭用燃料電池（エネファーム）の普及拡大と 2015 年からの燃料電池自動車導入と世界最速普及が明確に謳われている（表 2-2）。

2-1-2　エネルギー基本計画

2014 年 4 月 11 日に閣議決定された新たな「エネルギー基本計画」において、水素が将来の二次エネルギーの中核として位置付けられた（表 2-3）。

同計画においては、水素の優れた特徴を踏まえて、水素を日常の生活や産業活動で利活用する社会（水素社会）を目指した取り組みを加速すること、具体的には、従前より取り組みが進められている定置用燃料電池（エネファームなど）の普及・拡大、燃料電池自動車の導入加速に向けた環境の整備といった取り組みに加え、水素の本格的な利活用に向けた水素発電などの新たな技術の実現、水素の安定的な供給に向けた製造、貯蔵・輸送技術の開発の推進が追加されるとともに、水素の製造、輸送・貯蔵、利用までを俯瞰した、“水素社会”の実現に向けたロードマップの策定が示された（表 2-4）。

2-1-3　水素・燃料電池戦略ロードマップ

経済産業省では、2013 年 12 月より産学官からなる「水素・燃料電池戦略協議会」（座長：柏木 孝夫 東京工業大学 特命教授）を設置した。協議会では、水素エネルギーの意義と将来の水素需給の見通しについて産学官で認識を共有するとともに、水素エネルギーの意義を踏まえた上で、さらなる利活用に向けて「時間軸」を明確にしつつ、水素の「製造」「貯蔵・輸送」「利用」まで一気通貫して官民の役割分担を明示し、事業者間でも共通認識を持てるような、2050 年頃までを見据えた具体的な取り組みに関するロードマップを策定することを目的として検討を進めた。主な論点を表 2-5 に示す。

協議会は 3 回、協議会の下に設置されたワーキンググループは 7 回開催され、半年にわたる集中的な議論の結果として、水素エネルギーの製造、輸送・貯蔵、利用の各段階で目

表 2-3　新しい「エネルギー基本計画」における水素の位置付け

第 2 章　エネルギーの需給に関する施策についての基本的な方針
第 2 節　各エネルギー源の位置付けと政策の時間軸
2．二次エネルギー構造の在り方
（3）水素：“水素社会”の実現
将来の二次エネルギーでは、電気、熱に加え、水素が中心的役割を担うことが期待される。
水素は、取扱い時の安全性の確保が必要であるが、利便性やエネルギー効率が高くまた、利用段階で温室効果ガスの排出がなく、非常時対応にも効果を発揮することが期待されるなど、多くの優れた特徴を有している。
水素の導入に向けて、様々な要素技術の研究開発や実証事業が多くの主体によって取り組まれてきているが、水素を日常の生活や産業活動で利活用する社会、すなわち“水素社会”を実現していくためには、技術面、コスト面、制度面、インフラ面で未だ多くの課題が存在している。このため、多様な技術開発や低コスト化を推進し、実現可能性の高い技術から社会に実装していくため、戦略的に制度やインフラの整備を進めていく。

出典：経済産業省「エネルギー基本計画」（2014 年 4 月 11 日）【参考資料［2］】

表 2-4　水素社会を実現するための主な取り組み

定置用燃料電池（エネファームなど）の普及・拡大	・家庭用燃料電池について市場自立化に向けた導入支援を行うとともに、低コスト化のための研究開発などを引き続き実施。 ・業務・産業分野の燃料電池については早期の実用化・普及拡大に向けて技術開発や実証などを推進し、市場創出を図る。
FCV の導入加速に向けた環境の整備	・規制見直しや導入支援などの整備支援により四大都市圏を中心に 2015 年内に 100 ヶ所程度の水素ステーションを整備。 ・燃料電池自動車の導入を円滑に進めるための支援を積極的に行う。 ・水素ステーションについて、既存のインフラの活用、移動式や小型のステーションの利用も含めた戦略的な展開を進める。 ・燃料電池バスや燃料電池フォークリフトなどの早期の実用化の技術開発などを着実に推進。
水素の本格的な利活用に向けた水素発電などの新たな技術の実現	・水素発電を含む水素の利用技術について、技術開発を含めて戦略的な取り組みを着実に進める。
水素の安定的な供給に向けた製造、貯蔵・輸送技術の開発の推進	・水素を安価で大量に調達するための、水素の製造から貯蔵・輸送に関わる技術開発などを着実に進める。
“水素社会”の実現に向けたロードマップの策定	・水素社会の実現に向けたロードマップを、2014 年春を目処に策定。

出典：経済産業省「エネルギー基本計画」（2014 年 4 月 11 日）より NEDO 作成【参考資料［2］】

指すべき目標とその実現のための産学官の取り組みをまとめた「水素・燃料電池戦略ロードマップ～水素社会の実現に向けた取組の加速～」が 2014 年 6 月 23 日に公表された。このロードマップでは水素の利用について、技術的課題の克服や経済性の確保に要する期間の長短に着目し、3 つのフェーズに分けて取り組みを進めていくことが示された（図 2-1）。

表 2-5　水素・燃料電池戦略協議会の主な論点

1. 水素エネルギー利活用の意義と導入見通し
2. 水素エネルギーの利用
3. 水素の製造
4. 水素の輸送・貯蔵
5. ロードマップの策定及び分野横断的取り組み

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「水素・燃料電池戦略協議会の主な論点」
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］】

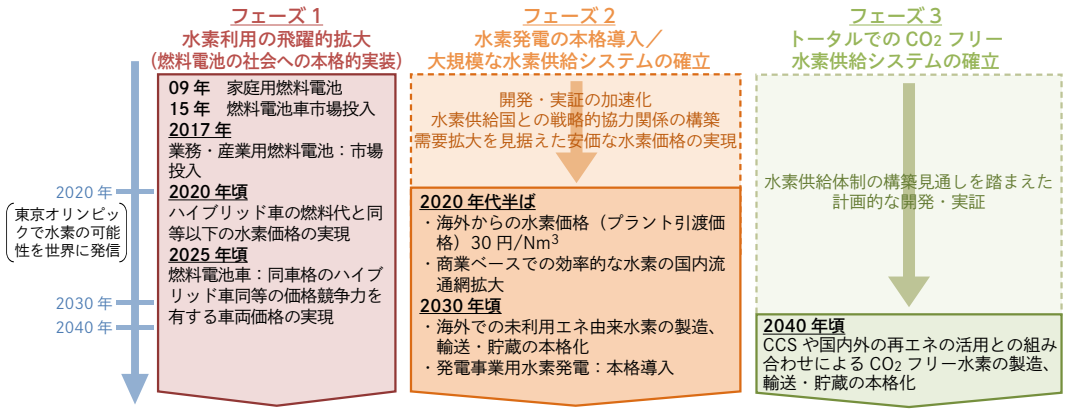


図 2-1　経済産業省「水素・燃料電池戦略ロードマップ」

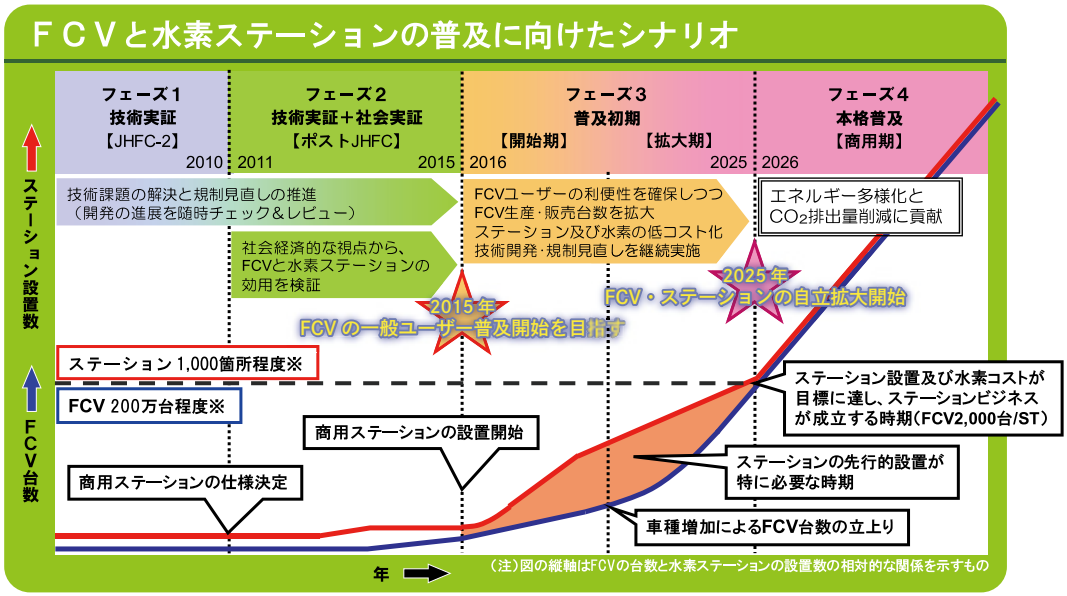
出典：経済産業省「水素・燃料電池戦略ロードマップ」概要版【参考資料［1］】より NEDO 作成

2-1-4　水素エネルギーに関する目標

燃料電池実用化推進協議会（FCCJ：Fuel Cell Commercialization Conference of Japan）は、燃料電池の普及と実用化を目指し、燃料電池産業の発展に寄与することを目的とした我が国の民間企業と関係団体からなる組織である。FCCJ は、2010 年 3 月に燃料電池自動車と水素ステーションの普及に向けたシナリオを発表した（図 2-2）。

このシナリオは、2050 年における運輸部門の温室効果ガス排出量の 80％削減に貢献することを前提に、燃料電池自動車の 2015 年から普及開始と水素ステーションの先行整備が必要としている。さらに、2025 年頃以降には経済原理に基づく自律的拡大への到達が必要としている。

「エネルギー基本計画」及び「水素・燃料電池戦略ロードマップ」においては、家庭用燃料電池システムの導入台数目標や水素エネルギーの導入やコストに関する目標が示された。この目標をまとめて表 2-6 に示す。



※前提条件：FCVユーザーのメリット（価格・利便性等）が確保されて、順調に普及が進んだ場合

図 2-2　燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）のシナリオ（2010 年 3 月）

出典：燃料電池実用化推進協議会

表 2-6　水素エネルギーに関する目標一覧

	2015 年頃	2020 年頃	2025 年頃	2030 年頃
家庭用燃料電池		累計台数 140 万台 ユーザーが 7、8 年で投資回収可能なコストの実現		累計台数 530 万台 ユーザーが 5 年で投資回収可能なコストの実現
業務・産業用燃料電池	2017 年 SOFC の市場投入			
燃料電池自動車	2015 年 乗用車市場投入 2016 年 バス市場投入		同車格のハイブリット車同等の価格競争力を有する車両価格の実現	次世代自動車（ハイブリット自動車、電気自動車、プラグインハイブリット自動車、燃料電池自動車、クリーンディーゼル自動車、CNG 自動車など）については、2030 年までに新車販売に占める割合を 5 割から 7 割とする
水素発電		自家発用水素発電の本格導入開始		発電事業用水素発電の本格導入開始
水素輸送・貯蔵	ガソリン車の燃料と同等以下の水素価格の実現 100 ヶ所水素 ST 整備	ハイブリット車の燃料代と同等以下の水素価格の実現 自立的商用展開可能な ST コスト（整備・運営）〈現在の半額程度〉の実現	2020 年代半ば ・海外からの水素価格（プラント引渡価格）30 円/m^3 ・商業ベースでの効率的な水素の国内流通網拡大	海外からの未利用エネ由来水素の製造、輸送・貯蔵の本格化

出典：経済産業省「水素・燃料電池戦略ロードマップ」「エネルギー基本計画」より NEDO 作成【参考資料［1］、［2］】

2-1-5　「日本再興戦略」改訂 2014 ―未来への挑戦―

アベノミクス「三本の矢」により始まりつつある経済の好循環を一過性のものに終わらせず、持続的な成長軌道につなげることを狙い、2014 年 6 月 24 日に「日本再興戦略」改訂 2014 が閣議決定された。新たな日本再興戦略においては、これまでの取り組みについてのフォローアップと新たな取り組みが示されている。

この新たな戦略において、「戦略市場創造プラン　テーマ 2：クリーン・経済的なエネルギー需給の実現」の中で、水素社会の実現に向けたロードマップの実行が掲げられ、「水素・燃料電池戦略ロードマップ」に基づき、水素の製造から輸送・貯蔵、そして家庭用燃料電池や燃料電池自動車などの利用に至る必要な措置を着実に進めることや、産学官から成る協議会において進捗のフォローアップを行うことが定められた。

2-2　我が国の水素エネルギーに関する取り組み

表 2-6 に示す目標の達成に向けて、国は水素エネルギーに関する取り組みを推進している。国の取り組みとしては、導入や設置を促進するための補助金、規制の見直し、基準・標準化の整備、技術開発の推進があげられる。近年の水素・燃料電池に関する主な国の取り組みの予算の推移について表 2-7 に示す。

以降に国としての取り組みについての概要を述べる。

表 2-7　国の取り組みの予算推移　（単位：億円）

	2010 年度	2011 年度	2012 年度	2013 年度	2014 年度
NEDO（技術開発）					
固体高分子形燃料電池技術開発事業	51.0	48.4	35.0	31.9	31.9
固体酸化物形燃料電池技術開発事業	14.5	6.2	6.2	12.4	13.0
水素利用関連技術開発事業	32.5	27.2	23.0	20.0	32.5
水素・燃料電池実証開発事業	8.7	9.2	30.0	7.5	—
再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発事業	—	—	—	11.3※1	16.0
小計	**106.8**	**81.5**	**94.2**	**71.8**	**77.4**
経済産業省					
燃料電池自動車用水素供給設備設置補助事業	—	—	—	46.0	72.0
民生用燃料電池導入支援補助事業※2	67.7	136.7	90.0	250.5	200.0
小計	**67.7**	**136.7**	**90.0**	**296.5**	**272.0**
合　計	**174.5**	**218.2**	**184.2**	**368.3**	**349.4**

出典：各種資料より NEDO 作成

※ 1　2013 年度は、経済産業省事業として実施

※ 2　金額には補正予算を含む

2-2-1　技術開発

我が国では NEDO が中心となって、水素・燃料電池の研究開発を支援してきた。

NEDO は 1981 年度より燃料電池分野の研究開発を開始している。研究開発当初は、業務用への適用を目指しリン酸形燃料電池（PAFC）の技術開発が行われ、その後、固体酸化物形燃料電池（SOFC）、固体高分子形燃料電池（PEFC）の技術開発が推進されてきた（図 2-3）。

(1)　燃料電池関連の技術開発

①　固体高分子形燃料電池（PEFC）の技術開発

固体高分子形燃料電池（PEFC）の主な技術課題については図 2-4 に示される種々の課題がある。NEDO はこれらの課題に対して、研究開発当初は、市場投入に必要な性能や耐久性が確保可能かを見極めるための個々の材料、部品の性能向上、耐久性向上の開発、システム化検討などを進めた。その後、実際の市場投入を目指し、性能、耐久性の実用化検討及び実際に生産可能かの技術検討が実施された。検討結果は、家庭用固体高分子形燃料電池（PEFC）システムの 2009 年からの販売開始に生かされている。

家庭用燃料電池システムの市場導入にあたってはシステムコストの低減、特に周辺機器（補機類）のコストダウンが必要であった。そこで補機の「共通仕様リスト」が策定され、それと整合を図った周辺機器（ポンプ・ブロワ、流量計・圧力計など、弁類、水処理装置、熱交換器、電力変換装置を対象とした）の技術開発が行われ、システムコストの大幅な低減を実現した。

現在も燃料電池自動車の大量普及に向けて、耐久性向上、効率向上、低コスト化の課題解決に取り組んでいる。

②　固体高分子形燃料電池（PEFC）システムに関する基準・標準化

技術開発と並行して、NEDO は、自動車用と定置用などの固体高分子形燃料電池（PEFC）システムの実用化・普及のために必要な技術基準の設定、安全性の確認と標準化を推進し、安全性、信頼性などの評価試験データの取得、評価手法の確立、国内外の基準・標準の作成、提案を行ってきた。

2002 年 5 月に内閣府と関係省庁の局長級で構成される「燃料電池実用化に関する関係省庁連絡会議」が設置され、燃料電池に関する 6 法律 28 項目の関連法規制の包括的な再点検が決定されたが、NEDO 事業で実施した安全確認試験データの取得・評価手法の開発の成果は、この規制再点検や国際標準化に活用されている。

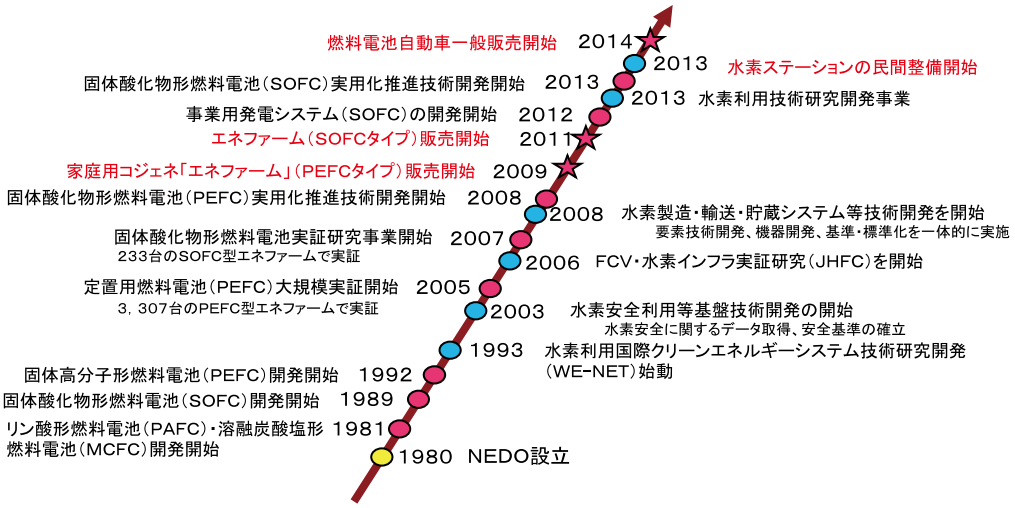


図 2-3　NEDO の水素・燃料電池関連の取り組み

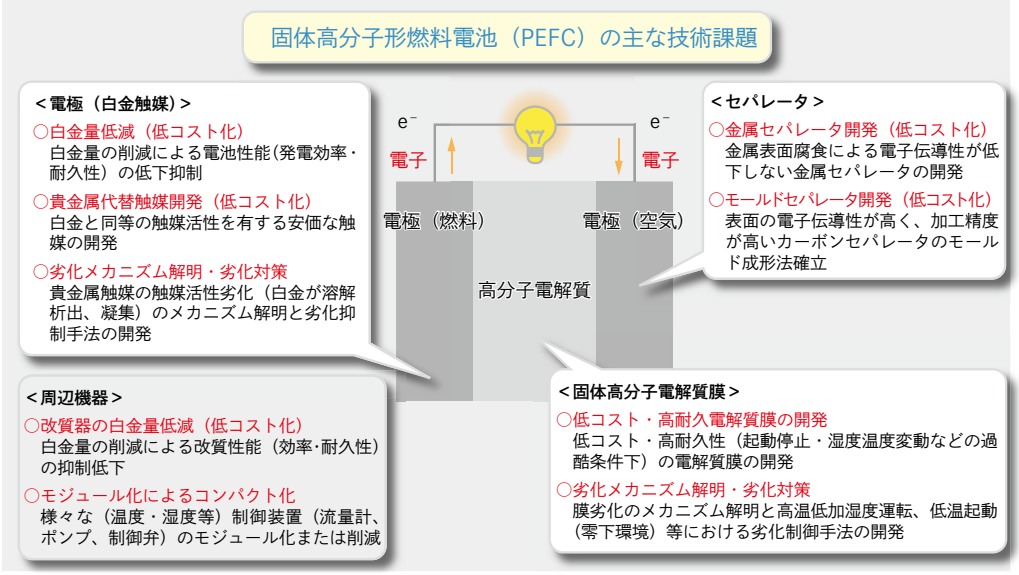


図 2-4　PEFC の主な技術課題

③　家庭用燃料電池システムの実証研究

固体高分子形燃料電池（PEFC）エネファームの市場導入を円滑に進めることを目的に、2005 年度から 2009 年度に約 3,300 台の 1 kW 級定置用固体高分子形燃料電池（PEFC）システムの大規模かつ広域的な実証研究を行った（図 2-5）。一般家庭などの実際の使用状況における実測データを取得することにより、以後の燃料電池開発の課題を抽出し、技術開発プロジェクトとの連携も行った。

固体酸化物形燃料電池（SOFC）エネファームについても、2007 年度から 2010 年度に計 233 台を用いて、実証研究が行われた。

2010 年には産学官連携推進会議において、「世界に先駆け『エネファーム』を商品化」したとして NEDO プロジェクト参画者が内閣総理大臣賞を受賞している（図 2-6）。



燃料電池メーカー	LPG	都市ガス	灯油	合計
ENEOS セルテック*1	1062	191	0	1253
荏原製作所	0	396	314	710
東芝燃料電池システム	553	195	0	748
パナソニック*2	0	520	0	520
トヨタ自動車	0	76	0	76
合計	1615	1378	314	3307

＊1　新日本石油と三洋電機が設立した燃料電池専業会社（H20/4～）
＊2　（旧）松下電器産業（H20/10～）

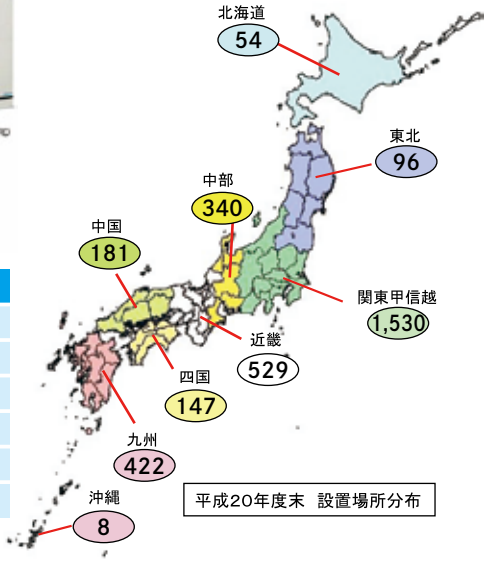


図 2-5　定置用燃料電池大規模実証事業の参画メーカー

出典：新エネルギー財団「平成 21 年度定置用燃料電池大規模実証事業報告書」より NEDO 作成

内閣総理大臣賞

世界に先駆け「エネファーム」を製品化

〈受賞者〉

東芝燃料電池システム株式会社　技師長　　永田　裕二

NEDO プロジェクト「家庭用燃料電池システムの周辺機器の技術開発」のプロジェクトリーダーとして、燃料電池システムメーカーと多くの周辺機器メーカーを取りまとめ、大幅なコストダウンと性能向上を実現した。

〈連携機関〉

東芝燃料電池システム(株)、(株)ENEOS セルテック、パナソニック(株)、富士電機ホールディングス(株)、新日本石油(株)、東京ガス(株)、大阪ガス(株)、(社)日本電機工業会、(社)日本ガス協会、(財)日本ガス機器検査協会、(独)産業技術総合研究所、(財)新エネルギー財団、京都大学、同志社大学、東京工業大学、大同大学など

〈成果の概要〉

産学官連携の研究開発プロジェクトにおいて、家庭用固体高分子形燃料電池（PEFC）コージェネレーションシステムの性能及び耐久性向上に貢献した。また、周辺機器の共通仕様を明示し、多くの周辺機器メーカーと協力して、性能向上、消費電力削減、コストダウンを同時に達成する機器を開発した。更に、大規模実証研究に実証機を積極的に提供して、実使用環境下において、約 20％の 1 次エネルギー使用量削減及び 1,200 kg／年の CO_2 削減効果を実証した。加えて、規制緩和につながる各種データを収集するとともに、政府関係機関に働きかけることにより、家庭用燃料電池の導入拡大に貢献した。2009 年度において、3 社合計で 5,258 台を出荷。



家庭用燃料電池コージェネレーションシステム「エネファーム」

〈関連する NEDO 事業／NEDO の役割〉

関連プロジェクト：固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発（2005-07）
定置用燃料電池大規模実証事業（2005-09）
水素社会構築共通基盤整備事業（2005-09）

エネファーム市場投入の目標に向けて、技術開発、実証研究及び基準・標準のプロジェクトを企画立案し、一貫して実施した。プロジェクト間の情報交流を促進し、技術開発の進展に貢献した。
国内外においてエネファームに係る技術動向等を積極的に広報した。

図 2-6　産学官連携推進会議における内閣総理大臣賞

④　固体酸化物形燃料電池（SOFC）の研究開発

固体酸化物形燃料電池（SOFC）については耐久性の確保が大きな課題となっている。NEDO は、民間企業における研究開発サイクルを短縮・効率化させるため、固体酸化物形燃料電池の劣化機構の解明や、9 万時間（約 10 年間）の耐久性を見通すためのセルスタック耐久性評価技術の確立といった基盤的な研究開発を実施している（図 2-7）。

業務用・事業用の固体酸化物形燃料電池（SOFC）事業として、工場・ビル・コンビニエンスストア、スマートコミニティへの応用が期待される数～数百 kW 中容量システムの実負荷環境実証試験と、実用化への課題抽出に向けた実証事業、さらに固体酸化物形燃料電池（SOFC）、ガスタービン、蒸気タービンを組合せ 60％以上の高発電効率を有するトリプルコンバインドシステムの要素技術確立に向けた開発を行っている。

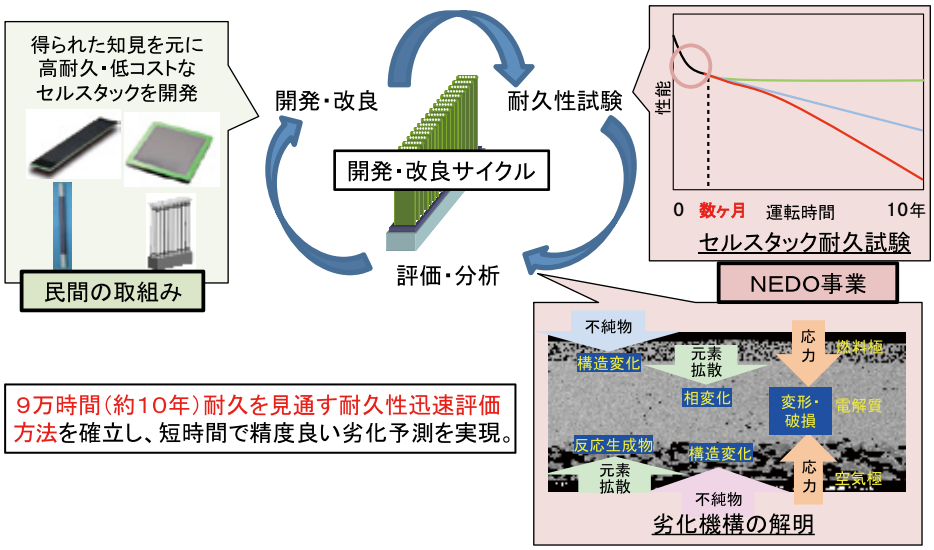


図 2-7　固体酸化物形燃料電池開発加速のための取り組み

(2)　水素関連の技術開発

①　水素に関する基礎的挙動の解明

大量の水素をコンパクトに輸送・貯蔵するためには、高圧化または液化した状態の水素の取扱いが不可欠であり、水素貯蔵・輸送関連機器、部品、材料などの製造はこの水素の特性を踏まえて行う必要がある。このため、NEDO は高圧／液化水素環境下における水素脆化（水素を吸収して金属材料が脆くなる現象）や水素トライボロジー（水素雰囲気下における 2 つの物体の接触面の摩擦、摩耗、潤滑などの現象）といった水素に関する基礎原理の解明に取り組んできた。ここでは超高圧水素ガス環境を再現できる材料評価装置などの高度な研究装置を駆使し、水素脆化のような水素特有の現象の再現を行い、その際の水素の挙動や材料の状態を精密に観測することで基本原理を解明する技術基盤の確立を実施した（図 2-8）。

この結果、水素に関する科学的知見に基づいた、合理的な機器設計指針（材料劣化対応策）や材料劣化評価法を提案し、より安全で簡便に水素を利用するために必要な材料や機器の設計指針、劣化評価法などを産業界に提供した。

②　水素ステーション構成機器の開発

水素ステーションにおいて使用される、70 MPa 級という高圧水素に対応した水素製造装置、圧縮機、プレクーラー、蓄圧器といった機器の開発を実施し、実用化に至っている。現在は、それぞれの機器について、さらなる低コスト化の取り組みを進めている。



図 2-8　水素先端科学基礎研究事業の概要

③　燃料電池自動車・水素インフラに関する基準・標準化の整備

燃料電池自動車の普及と水素供給インフラの普及展開及び国際競争力強化の確保に向け、産業界との密接な連携の下にグローバルマーケットを視野に入れ、安全技術や関係する法規や法令などの再点検、基準・規格作りなどが必要である。その達成のため NEDO は、政府の方針や産業ニーズに沿った規制の見直しなどに必要な安全確認データや材料物性など、性能データの取得、評価や試験方法の開発を行ってきた。現在も引続き国内規制適正化・国際基準調和・国際標準化に対応した研究開発を実施している。

④　燃料電池自動車・水素インフラの実証研究

燃料電池自動車の市場導入に向けては、実証研究による実測データの取得と実用化のための課題（技術、コスト、安全など）を抽出、他の関連プロジェクトに反映させることが必要である。

経済産業省と NEDO は水素インフラと燃料電池自動車などの実証研究として、2002 年度から水素・燃料電池実証プロジェクト（Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project、略称「JHFC プロジェクト」）を実施し、実測データの取得と実用化のための課題（技術、コスト、安全など）を抽出、他の関連プロジェクトに反映させた。

2011 年度からは「JHFC プロジェクト」の第 3 期として「地域水素供給・インフラ技術社会実証事業」を開始。この事業は、2015 年以降の燃料電池自動車の一般ユーザーへの普及開始に向け、実使用に近い条件での燃料電池自動車及び水素供給インフラに関する技術実証及び商用ステーションの総合実証と位置付けられた。

実証事実においては、ユーザーに対する利便性、耐久性及び実用性を含めた燃料電池自動車及び水素供給インフラの事業成立性、社会一般の水素エネルギーに関する受容性向上に向けた検討を行った（図 2-9）。さらに、市街地に 70 MPa 商用モデルステーションを 3 ヶ所建設し、用地選定、設計、建設から運用までの一連の総合実証を実施したほか、3 分間で満充填（5 kg）という実用化時に求められる性能を確立した。



図 2-9　地域水素供給・インフラ技術社会実証事業の成果

左：日本初のガソリンスタンド併設型水素ステーション、中央：45 MPa 水素トレーラ、右：水素トレーラ運用状況

2-2-2　導入支援

政府の補助金による支援としては、現在、家庭用燃料電池システムの普及促進と燃料電池自動車普及のための水素ステーション設置に対して行われている。

(1)　家庭用燃料電池システム（エネファーム）への支援制度

2009 年に世界に先駆けて家庭用燃料電池システムの市場導入を実現したが、政府はその普及促進を図るために補助金による支援制度を実施している（表 2-8）。補助金の金額については、技術開発の進捗によるコスト低減効果も加味して年ごとに減額され、2015 年度末で終了する予定である。家庭用燃料電池の補助金については、燃料電池普及促進協会（FCA）にて受け付けている。

また、国の補助金以外にも、一部の自治体で家庭用燃料電池システム購入者に対する独自の補助・支援制度を実施している。燃料電池普及促進協会によれば、独自の補助・支援制度を有する自治体は、2014 年 8 月 20 日時点で 211 に達している。

表 2-8　エネファームへの補助金額と予算

年度	2009 年度	2010 年度	2011 年度		2012 年度		2013 年度	2014 年度
			第一期（2011 年 4 月～2011 年 7 月）	第二期（2011 年 10 月～2012 年 1 月）	当初予算	補正予算		
補助金金額（円／台）	140 万	130 万	105 万	85 万	70 万	50 万	45 万	PEFC：38 万 SOFC：43 万
予算総額（円／年）	61 億	67.7 億	86 億	50 億	90 億	250.5 億		200 億

出典：各種資料より NEDO 作成

(2)　水素ステーション設置への支援制度

水素ステーション設置には新規の初期投資に巨額の資金が必要なこともあり、国から「燃料電池自動車用水素供給設備設置補助事業」として設置費の一部に補助金が交付されている。補助金の申請と交付は、次世代自動車振興センター（NEV）を通じて実施されている（表 2-9）。

2014 年 6 月 30 日時点で、2013 年度分が 18 件（表 2-10）、2014 年度分が 23 件（表 2-11）、合計で 41 件の交付が決定されている（図 2-10）。

これらの補助金交付を受けた水素ステーションは、一定の水素供給能力と世界的に統一された充填プロトコルに基づいた設計がされており、実証段階ではないという意味で、商用ステーションとも呼ばれている。なお 2014 年 7 月には、商用ステーションの第 1 号が尼崎市にオープンし、営業を開始している（イワタニ水素ステーション尼崎）。その後北九州市や東京にも商用ステーションがオープンしており、順次営業が始まっている。

このような国の補助に加えて、ステーションに補助金を提供する自治体も増えてきている。

表 2-9　水素ステーションへの補助上限額一覧

水素供給設備の規模	水素供給能力 (Nm^3/h)	供給方式	補助率	補助上限額（百万円）
中規模	300 以上	オンサイト方式（パッケージを含むもの）	定額	280
		オンサイト方式（上記に該当しないもの）	1/2	280
		オフサイト方式（パッケージを含むもの）	定額	220
		オフサイト方式（上記に該当しないもの）	1/2	220
		移動式	定額	250
小規模	100 以上 300 未満	オンサイト方式（パッケージを含むもの）	定額	180
		オンサイト方式（上記に該当しないもの）	1/2	180
		オフサイト方式（パッケージを含むもの）	定額	150
		オフサイト方式（上記に該当しないもの）	1/2	150
		移動式	定額	180
水素集中製造設備（供給先水素供給設備 1 設備当たり、ただし 10 設備を上限とする）			1/2	60
液化水素対応設備			1/2	40

出典：次世代自動車振興センター 2014 年度予算「燃料電池自動車用水素供給設備設置補助事業」補助金交付規程

表 2-10　2013 年度　水素ステーション設置補助事業　交付決定先

	都府県	市・区	事業者	供給能力 (Nm^3/h)	供給方式
1	東京都	練馬区	東京瓦斯	300 以上	オフサイト
2	愛知県	刈谷市	岩谷産業	300 以上	オフサイト
3	兵庫県	尼崎市	岩谷産業	300 以上	オフサイト
4	福岡県	北九州市小倉北区	岩谷産業	300 以上	オフサイト
5	愛知県	名古屋市熱田区	豊通エア・リキードハイドロジェンエナジー	300 以上	オフサイト
6	愛知県	豊田市	豊通エア・リキードハイドロジェンエナジー	300 以上	オフサイト
7	愛知県	岡崎市	岩谷瓦斯	300 以上	オフサイト
8	埼玉県	狭山市	JX 日鉱日石エネルギー	300 以上	オフサイト
9	東京都	八王子市	JX 日鉱日石エネルギー	300 以上	オフサイト
10	神奈川県	横浜市泉区	JX 日鉱日石エネルギー	300 以上	オフサイト
11	埼玉県	さいたま市見沼区	JX 日鉱日石エネルギー	300 以上	オフサイト
12	埼玉県	春日部市	JX 日鉱日石エネルギー	300 以上	オフサイト
13	千葉県	千葉市花見川区	JX 日鉱日石エネルギー	300 以上	オフサイト
14	愛知県	岡崎市	JX 日鉱日石エネルギー	300 以上	オンサイト
15	愛知県	みよし市	JX 日鉱日石エネルギー	300 以上	オフサイト
16	東京都	杉並区	JX 日鉱日石エネルギー	300 以上	オフサイト
17	神奈川県	横浜市旭区	JX 日鉱日石エネルギー	300 以上	オフサイト
18	埼玉県	戸田市	岩谷産業	300 以上	オフサイト

出典：次世代自動車振興センター 2013 年度　燃料電池自動車用水素供給設備設置補助事業　交付決定内容

表 2-11　2014 年度 水素ステーション設置補助事業 交付決定先（2014 年 6 月 30 日時点）

	都府県	市・区	事業者	供給能力 (Nm^3/h)	供給方式
1	愛知県	日進市	東邦瓦斯	300 以上	オフサイト方式
2	大阪府	茨木市	大阪ガス	300 以上	オンサイト方式（パッケージを含むもの）
3	山口県	周南市	岩谷産業	300 以上	オフサイト方式（パッケージを含むもの）液化水素対応設備
4	大阪府	泉佐野市	岩谷産業	300 以上	オフサイト方式（パッケージを含むもの）液化水素対応設備
5	福岡県	福岡市中央区	岩谷産業	100 以上 300 未満	移動式 運用場所：福岡市中央区
6	山梨県	甲府市	岩谷産業	300 以上	オフサイト方式（パッケージを含むもの）液化水素対応設備
7	神奈川県	海老名市	JX 日鉱日石エネルギー	300 以上	オフサイト方式
8	愛知県	名古屋市緑区	JX 日鉱日石エネルギー	100 以上 300 未満	オンサイト方式
9	福岡県	北九州市八幡東区	JX 日鉱日石エネルギー	300 以上	オフサイト方式（パッケージを含むもの）
10	神奈川県	横浜市中区	JX 日鉱日石エネルギー	100 以上 300 未満	移動式 運用場所：横浜市中区
11	神奈川県	横浜市中区	JX 日鉱日石エネルギー	100 以上 300 未満	移動式運用場所：相模原市中央区
12	東京都	港区	岩谷産業	300 以上	オフサイト方式（パッケージを含むもの）液化水素対応設備
13	埼玉県	さいたま市桜区	東京瓦斯	300 以上	オンサイト方式
14	千葉県	袖ヶ浦市	豊田通商／三井住友ファイナンス＆リース	100 以上 300 未満	移動式 運用場所：千代田区、大田区
15	神奈川県	川崎市川崎区	豊田通商／三井住友ファイナンス＆リース	100 以上 300 未満	移動式 運用場所：大田区、千代田区
16	神奈川県	川崎市川崎区	豊田通商／三井住友ファイナンス＆リース	100 以上 300 未満	移動式 運用場所：大田区、千代田区
17	愛知県	名古屋市港区	豊田通商／三井住友ファイナンス＆リース	100 以上 300 未満	移動式　運用場所：名古屋市東区、清須市、名古屋市中区
18	愛知県	名古屋市港区	豊田通商／三井住友ファイナンス＆リース	100 以上 300 未満	移動式　運用場所：清須市、名古屋市東区、名古屋市中区
19	神奈川県	横浜市中区	JX 日鉱日石エネルギー	100 以上 300 未満	移動式 運用場所：板橋区、千葉県印旛郡
20	神奈川県	横浜市中区	JX 日鉱日石エネルギー	100 以上 300 未満	移動式 運用場所：藤沢市、伊勢原市
21	神奈川県	横浜市中区	JX 日鉱日石エネルギー	100 以上 300 未満	移動式　運用場所：さいたま市緑区、さいたま市見沼区
22	神奈川県	横浜市中区	JX 日鉱日石エネルギー	100 以上 300 未満	移動式 運用場所：越谷市、川越市
23	滋賀県	大津市	岩谷産業	300 以上	オフサイト方式（パッケージを含むもの）液化水素対応設備

出典：次世代自動車振興センター 2014 年度　燃料電池自動車用水素供給設備設置補助事業　交付決定内容

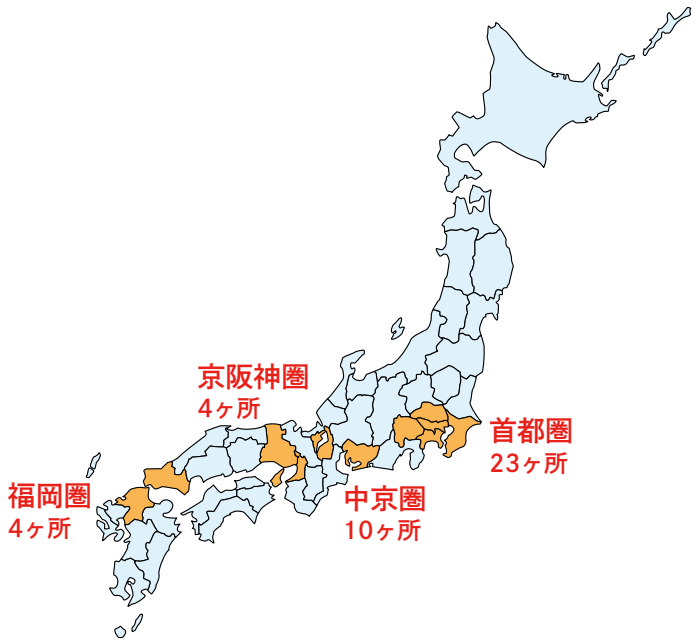


図 2-10　補助金が認められ設置が決まった商用水素ステーション（2014 年 6 月 30 日時点）

出典：次世代自動車振興センターホームページより NEDO 作成

■ 2-2-3　水素・燃料電池に関わる規制見直し

(1)　家庭用燃料電池に関する規制見直し

家庭用燃料電池に関する規制の見直しについては、NEDO 事業「固体高分子形燃料電池システム普及基盤整備事業」（2000 年度～ 2004 年度）や「水素社会構築共通基盤整備事業」（2005 年度～ 2009 年度）にて取得したデータが活用された（図 2-11）。

定格出力 10 kW 未満の定置用固体高分子形燃料電池発電ユニット、及び定置用固体酸化物形燃料電池発電ユニットに適用する基準が設けられ、「定置用小形燃料電池の技術上の基準及び検査の方法　第 8 版（2013 年）」として、一般社団法人日本電機工業会（JEMA）家庭用燃料電池認証システム検討委員会によって制定された。

エネファーム普及のために、規制見直しを行うとともに、認証制度を導入することによって、「エネファーム」としての機器指定を行い、品質を維持している。

(2)　業務・産業用燃料電池に関する規制見直しの現状

上記で述べたように、家庭用燃料電池エネファームの市販に伴い、電気出力 10 kW 未満の常圧燃料電池システムに関しては必要な規制緩和は完了していると考えられる。その範囲外となる電気出力 10 kW 以上、もしくは加圧動作の業務・産業用燃料電池の普及に向けては、必要な安全性を確保できるというデータの提示を前提として、電気事業法、消防法、

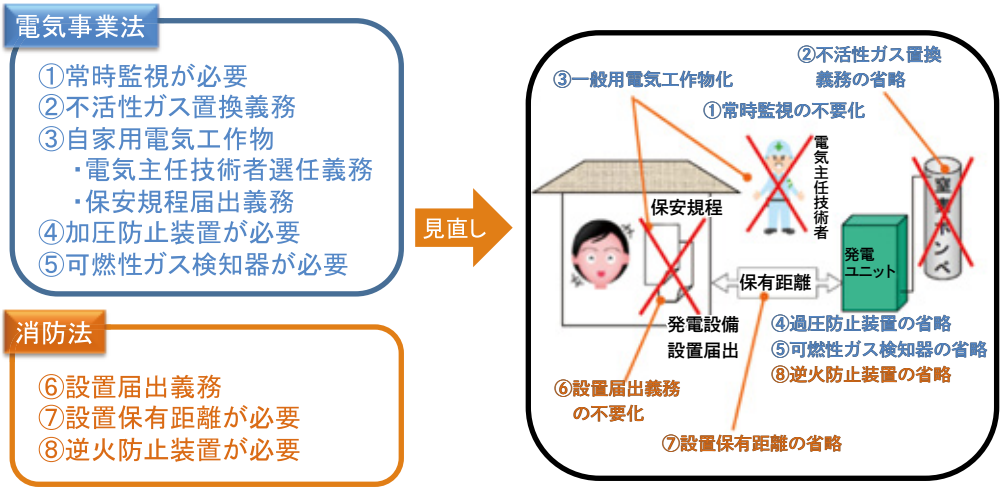


図 2-11　主な規制見直しの概要

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ワーキンググループ（2014 年 2 月 3 日）【参考資料［3］】より NEDO 作成

大気汚染防止法などの関連規制について必要な見直しを検討している。

2013 年度～ 2014 年度に NEDO 事業として実施している「固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発／固体酸化物形燃料電池を用いた業務用システムの実用化技術実証／円筒形 SOFC-ガスタービンハイブリッドシステムの実用化に向けた運転技術実証」事業においては、250 kW 級ハイブリッドシステムの各種条件下におけるシステム信頼性・安全性を検証することにより、日本電機工業会などの関連団体と協議を行いつつ、特に動作圧力 0.1 MPa 以上の加圧燃料電池に対する常時監視義務（電気事業法）の緩和を目指している。

(3)　水素ステーションに関する規制見直しの現状

水素ステーションに関しては、高圧ガス保安法、消防法、建築基準法などにより、その設置と運用が規制対象となっている。水素ステーションに関する規制見直しの現状を図 2-12 に示す。

①　高圧ガス保安法関係

高圧ガス保安法については、2005 年の規制見直しの結果、35 MPa 水素ステーションの市街地への設置、保安距離の見直しにより火気施設との距離を 8 m から 6 m へ短縮できることなどが法的に可能となった。また 2009 年度末に 70 MPa 水素スタンド対応の省令改正案、例示基準案を作成し審議が行われ、その結果 2012 年度に省令が改正され、市街地への 70 MPa 水素ステーション建設が可能となった。

現在、水素ステーション設備に使用可能な材料は、高圧水素脆性を考慮してステンレスの SUS316 や SUS316L など、特定の鋼材に制限されており、材料の低コスト化が難しい。

水素ステーション機器の低コスト化に向けて新規材料の耐水素性に関する安全データの取得などを進めている。

② 消防法関係

消防法については、消防庁が 2012 年度に行った通知に基づき、水素ステーションでのガソリンと水素ディスペンサーの並列設置が可能となった。

③ 建築基準法関係

建築基準法については、現行、水素貯蔵量の上限（商業地域・準工業地域でそれぞれ 700 Nm^3 及び 3,500 Nm^3）があり、燃料電池自動車普及時の商用水素ステーションの貯蔵量として大幅に不足するため、貯蔵量上限を引き上げる必要がある。今後、国土交通省により政令改正などの必要な措置が講じられる予定である。

④ さらなる規制見直し

「規制改革実施計画」（2013 年 6 月 14 日閣議決定）に基づく規制見直しについての取り組みは、引き続き計画どおりに推進されている（表 2-12）。

また今後、新たな技術の導入による一層のコスト低減は、引き続き重要な課題であり、民間事業者による新たな技術の提案内容や、その評価を踏まえつつ、新たな技術の活用のための安全基準の早期確立などに向けた取り組みを進める。例えば、新たな技術を活用した液化水素ポンプや、新たなタイプの容器（フープラップ式複合容器）の活用に向けて、安全性について検討した上で、必要な規制見直しのための取り組みを行うことになっている。

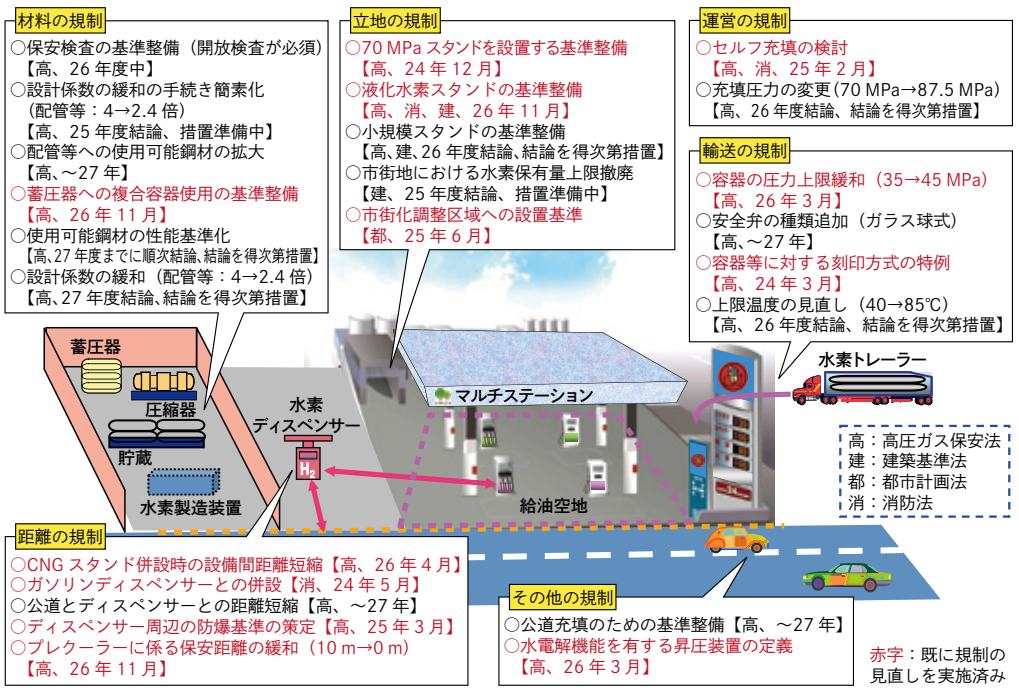


図 2-12　水素ステーションにおける各種規制の見直し（平成 26 年 11 月時点）

表 2-12　「規制改革実施計画」（2013 年 6 月 14 日閣議決定）における水素ステーション関連規制見直し

事項名	規制改革の内容	所管省庁
液化水素スタンド基準の整備①（高圧ガス保安法）	液化水素スタンドを市街地にも建設できるよう、ドイツ、米国など諸外国の事例を踏まえ、関係省庁、高圧ガス保安協会及び事業者による検討会において検討し、一般高圧ガス保安規則に液化水素スタンドに係る技術上の基準を整備する。	経済産業省
液化水素スタンド基準の整備②（消防法）	液化水素スタンドに関する高圧ガス保安法上の技術基準が定められた場合は、それを踏まえて液化水素スタンドと給油取扱所を併設する際の消防法上の安全対策を検討し、結論を得る。	総務省
液化水素スタンド基準の整備③（建築基準法）	液化水素スタンドに関する高圧ガス保安法上の技術基準が定められた場合は、それを踏まえて建築基準法第 48 条の規定に基づく許可に係る技術的助言を行う。	国土交通省
水素スタンドの使用可能鋼材に係る性能基準の整備	海外で使用実績のあるクロムモリブデン鋼などの鋼材を我が国の水素スタンドにおいても使用できるよう、ドイツ、米国など諸外国の事例を踏まえ、使用可能鋼材の拡大につき検討し、その結果に基づき一般高圧ガス保安規則の例示基準を見直す。	経済産業省
水素スタンドに係る設計係数の低い特定設備、配管などの技術基準適合手続の簡略化	水素スタンドに係る特定設備、配管などの設計係数について、ドイツ、米国など諸外国の事例を踏まえ、関係省庁、高圧ガス保安協会及び事業者による検討会において、大臣特別認可を受けなくても 2.4 倍で設計、製造できるよう検討し、結論を得次第、省令を改正する。	経済産業省
第二種製造者に相当する小規模な圧縮水素スタンド基準の整備（高圧ガス保安法）	公共機関などの防災拠点や燃料電池自動車の販売店などへの小規模な圧縮水素スタンドの設置を促進すべく、高圧ガス保安法上の第二種製造者であって、製造に係る 1 日あたりの処理能力が 30 立方メートル未満の圧縮水素スタンドに係る技術基準の整備を行う。	経済産業省
第二種製造者に相当する小規模な圧縮水素スタンド基準の整備（建築基準法）	小規模な圧縮水素スタンドに関する高圧ガス保安法上の技術基準が定められた場合は、それを踏まえて建築基準法第 48 条の規定に基づく許可に係る技術的助言を行う。	国土交通省
高圧ガス保安法における水電解機能を有する昇圧装置の位置付けの明確化	小規模な圧縮水素スタンドなどでの利用が見込まれる水電解機能を有する昇圧装置について、電気化学反応の特性を踏まえ、高圧ガス保安法上の特定設備への該当性を検討し、結論を得る。	経済産業省
市街化調整区域への水素スタンド設置許可基準の設定	高圧ガス保安法第 5 条第 1 項の規定に基づき、一般高圧ガス保安規則第 7 条の 3 に掲げる基準に適合するものとして都道府県知事の許可を受けたものであるなど安全性が確保されている圧縮水素スタンドについては、市街化調整区域にも建築できるよう、都市計画法施行令第 29 条の 7 に規定される「給油所等」には水素スタンドが含まれることを明確化する。	国土交通省
市街地に設置される水素スタンドにおける水素保有量の増加	市街地における圧縮水素スタンドの整備が促進されるよう、かかる水素スタンドにおける圧縮ガスの貯蔵量について、ドイツ、米国など諸外国の事例を踏まえ、上限の撤廃につき検討し、結論を得る。	国土交通省
圧縮水素運送自動車用複合容器に係る水素充填、保管、移動時の上限温度の緩和	圧縮水素運送自動車による水素スタンドへの効率的な水素供給を可能とすべく、圧縮水素運送自動車用複合容器について、充填、保管、移動時の上限温度を燃料電池自動車の燃料装置用容器と同一の 85℃に引き上げるよう検討し、結論を得る。	経済産業省
70 MPa 水素スタンドに対応した技術上の基準や例示基準の整備	①水素スタンドの市街地への建設を容易にすべく、プレクーラーに供する冷凍設備に係る保安距離の緩和につき検討し、結論を得る。 ②複合容器蓄圧器について、水素スタンドへの設置の技術上の基準策定につき検討し、結論を得る。	経済産業省

出典：各種資料より NEDO 作成

■ 2-2-4　水素・燃料電池に関わる標準化の取り組み

水素利用技術の実用化及び国際化に伴い、国際的な標準化が行われている。

水素利用技術に関連する国際標準として ISO TC197 が 1989 年に設立された。TC197 は安全性を有する水素ステーション設備基準や、車両との協調を要する部分の標準化を対象としている。2014 年 7 月時点において、これまでに 12 項目の国際標準（IS）が発行され、現在 8 件の作業部会（WG）で標準化案の策定作業中である（図 2-13、表 2-13）。

家庭用燃料電池システムに関連する国際標準は IEC/TC105 で論議されている。システムの個々の部位の相当する WG は図 2-14 のように決まっている。

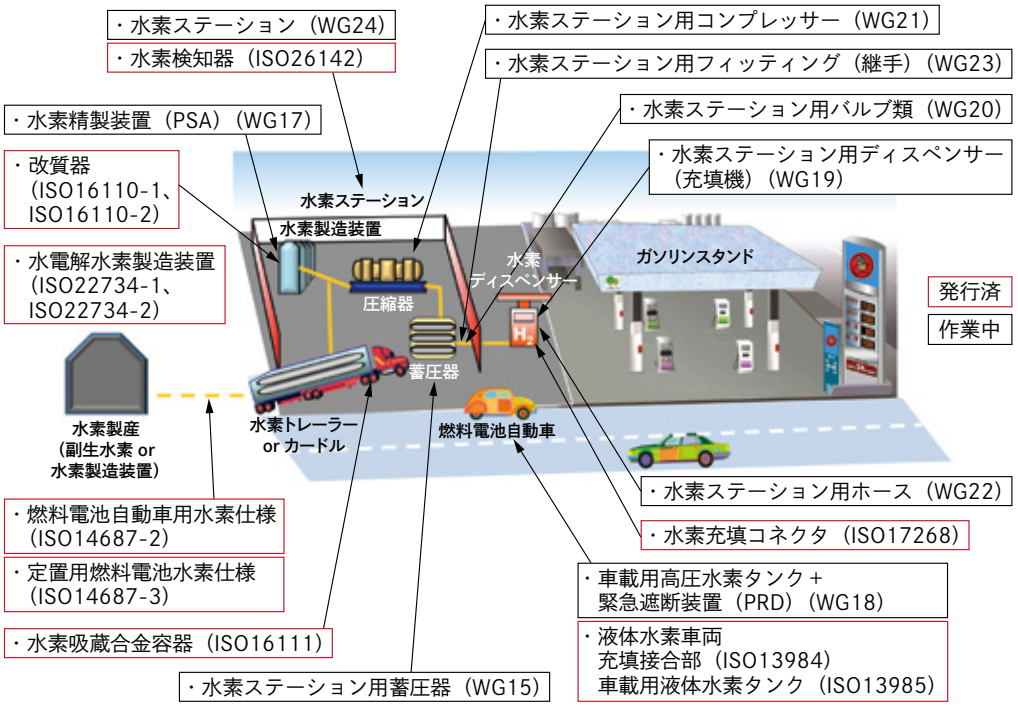


図 2-13　ISO TC197 の対象範囲（2014 年 11 月時点）

出典：各種資料より NEDO 作成

表 2-13　ISO TC197 における国際標準の発行・策定状況（2014 年 11 月時点）

名称（内容）	規格番号	種別	発行年月	標準化の対象
液化水素車両 充填接合部 車載用液化水素タンク	ISO 13984 ISO 13985	IS	1993. 3 2006. 4	・車両の液化水素充填口コネクタ ・自動車の液体水素用タンクの性能要件
水素充填コネクタ	ISO 17268	IS	2006. 6	・燃料電池自動車の充填口コネクタ ・ディスペンサーノズルの充填ノズルコネクタ
水電解水素製造装置	ISO 22734-1（工業用） ISO 22734-2（家庭用）	IS IS	2008. 6 2012. 2	・水電解装置の基本構成
改質器	ISO 16110-1（安全性） ISO 16110-2（効率）	IS IS	2007. 3 2010. 2	・化石燃料の水素改質器（内部構造、触媒などは対象外）
水素吸蔵合金容器	ISO 16111	IS	2008. 11	・アセンブリの材料、設計、建設、試験（吸蔵合金素材、容器構造は対象外）（燃料電池自動車用タンクは対象外）
燃料電池自動車用水素燃料仕様	ISO 14687-2	IS	2012. 12	・燃料電池自動車用水素燃料の品質基準
水素検知器	ISO 26142	IS	2010. 6	・検知濃度、検知範囲の限度 ・検知応答速度の限度
定置式 PEFC 用水素燃料仕様	ISO14687-3	IS	2014. 2	・定置用固体高分子形燃料電池（PEFC）の水素燃料品質基準
蓄圧器	ISO15399	IS	2013. 12	・水素ステーション用蓄圧器の性能検査試験方法
水素精製装置（PSA）	作業中	WG17	—	・水素精製装置の基本構成
車載用水素タンク、緊急遮断装置（PRD）	作業中	WG 18	—	・自動車の圧縮水素タンクの性能要件（gtr 決定事項と整合）
水素ステーション用ディスペンサー	作業中	WG 19	—	・水素ステーション用ディスペンサーの基本構成 ・検査方法
水素ステーション用バルブ類	作業中	WG 20	—	・水素ステーション用バルブの基本構成 ・検査方法
水素ステーション用コンプレッサー	作業中	WG 21	—	・水素ステーション用コンプレッサーの基本構成、材料（検討中）
水素ステーション用ホース	作業中	WG 22	—	・水素ステーション用ディスペンサーの充填ホースの性能検査試験方法（検討中）
水素ステーション用フィッティング（継手）	作業中	WG 23	—	・水素ステーション用ディスペンサーのフィッティングの性能検査試験方法（検討中）
水素ステーション	作業中	WG 24	—	・水素ステーションにおける機器の検査方法 ・水素品質の検査方法 ・安全離隔距離

出典：各種資料より NEDO 作成

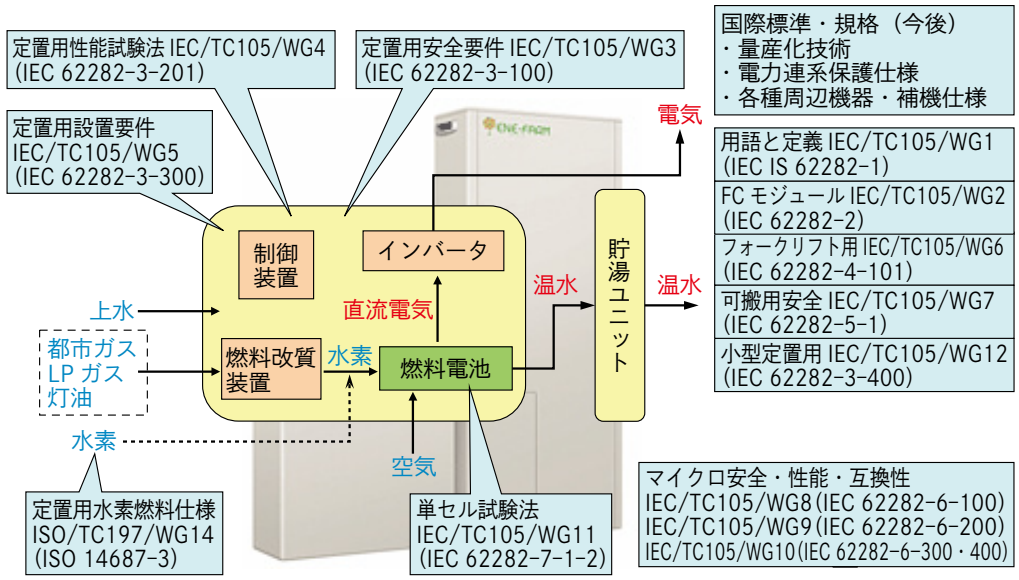


図 2-14　IEC/TC105 の対象範囲

出典：各種資料より NEDO 作成

2-2-5　自治体の取り組み

主な自治体の水素エネルギーに対する取り組みを図 2-15 と表 2-14 に示す。

2014 年の燃料電池自動車市販開始をふまえ、四大都市圏だけでなく、それらの拠点を接続する地域で水素ステーション設置計画や燃料電池自動車普及計画が策定あるいは議論されている。

(1)　東京都の取り組み

東京都環境局は、水素社会の実現に向け、水素エネルギーの利活用の可能性と課題などについて産学官が一同に介して議論し、普及に向けた戦略の共有と機運の醸成を図ることを目的に、「水素社会の実現に向けた東京戦略会議」を 2014 年 4 月に設置した。

この戦略会議では、2020 年のオリンピック・パラリンピック東京大会における水素エネルギーの利活用に向けた環境整備、2030 年を見据えた将来の水素エネルギーの利活用の可能性及び課題等の検討を目的としており、2014 年 11 月に「水素社会の実現に向けた東京戦略会議の中間まとめ」を発表した（図 2-16）。これによると、東京オリンピック・パラリンピックが開催される 2020 年までに、都内で燃料電池自動車 6,000 台、燃料電池バス 50 台以上の導入を目指すとしており、また 35 ヶ所の水素ステーションを整備するとしている。あわせて、水素ステーションと燃料電池自動車への補助金に加え、純水素型燃料電池や燃料電池フォークリフトの導入にも補助金を交付するとしている。



図 2-15　燃料電池自動車の普及に向けた地方自治体の取り組み例

出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「横断的取組について」
第 6 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 23 日）【参考資料［3］】より NEDO 作成

(2)　神奈川県の取り組み

神奈川県は、水素エネルギーの導入を目指し、2012 年 9 月に産学官による「水素エネルギー社会を目指す勉強会」を設置した。

さらに、次世代自動車の技術開発・インフラ整備・普及加速化などの取り組みを効果的に推進していくために「かながわ次世代自動車普及推進協議会」を 2013 年 8 月に設置し、その傘下には、燃料電池自動車（FCV）部会と電気自動車（EV）部会を設置している。

特に燃料電池自動車（FCV）部会では、県内に水素ステーション 10 ヶ所を設置する意向が示されている。そのために、神奈川県、横浜市、川崎市、相模原市が連携して、水素ステーションの適地を確保するとともに、普及啓発を行っていくとしている。

(3)　埼玉県の取り組み

埼玉県は 2014 年 5 月に、水素エネルギーの普及に向けて、自動車メーカーやエネルギー供給関連会社、県内自治体、学識経験者とともに「埼玉県水素エネルギー普及推進協議会」を設立した。また県内の水素のポテンシャルを把握するとともに、県内の水素インフラ整備の戦略や PR 手法を検討するとしている。

表 2-14　主な自治体（都道府県）の取り組みの例（2014 年 12 月時点）

自治体	取り組み
埼玉県	2014 年 5 月に「埼玉県水素エネルギー普及推進協議会」を設置
東京都	2014 年 5 月に「水素社会の実現に向けた東京戦略会議」を設置 2014 年 11 月に「水素社会の実現に向けた東京戦略会議の中間まとめ」を発表
神奈川県	2012 年 9 月に「水素エネルギー社会を目指す勉強会」を設置 2013 年 8 月に「かながわ次世代自動車普及推進協議会」を設置（傘下に FCV 部会を設置）
山梨県	2009 年に「山梨燃料電池実用化推進会議」を設置 2012 年度に「水素ステーション適地調査」を実施 2014 年 7 月に FCV 普及促進計画を公表
静岡県	2013 年に「ふじのくに FCV 普及促進協議会」を設立
愛知県	2005 年 7 月に「あいち FCV 普及促進協議会」を設置 2014 年 2 月に「愛知県水素ステーション整備・配置計画」を発表
大阪府	2003 年 9 月に「おおさか FCV 推進会議」を設置 2016 年 1 月に「大阪府における水素ステーション整備計画」を策定予定
山口県	2004 年に「水素フロンティア山口推進構想」を策定 「やまぐち産学公連携推進会議」で水素エネルギーの活用を検討中
福岡県	2004 年に「福岡水素エネルギー戦略会議」を設置 福岡水素戦略「Hy-Life プロジェクト」を策定 2012 年 2 月に佐賀県と連携し「北部九州燃料電池自動車普及促進構想」を発表 2014 年 8 月に経済界・自治体などが連携して「ふくおか FCV クラブ」を設立
佐賀県	2012 年 2 月に福岡県と連携し「北部九州燃料電池自動車普及促進構想」を発表
熊本県	2014 年 5 月に「熊本県燃料電池自動車普及促進計画策定委員会」を設置

出典：各種資料より NEDO 作成

(4)　山梨県の取り組み

山梨県は 2009 年に、燃料電池に関連する産業の拠点の集積と育成をめざし、関連企業、研究者、行政関係者が連携して課題と対応策を探る「山梨燃料電池実用化推進会議」を設置した。

また、2012 年度に水素ステーションの適地に関する調査を実施し、人口分布や道路交通センサスの分析から、設置にあたっては国の補助金を活用し、2 ヶ所の整備を目指しつつ、地域バランスを考慮するなかで、最低 1 ヶ所を整備することが望ましいとしている。

このような結果に基づき、2014 年度の水素ステーション補助金（燃料電池自動車用水素供給設備設置補助事業）で、甲府市内に 1 ヶ所の水素ステーションの設置が決まった。また、県もこの水素ステーションの整備推進のために独自の補助金を創設している。

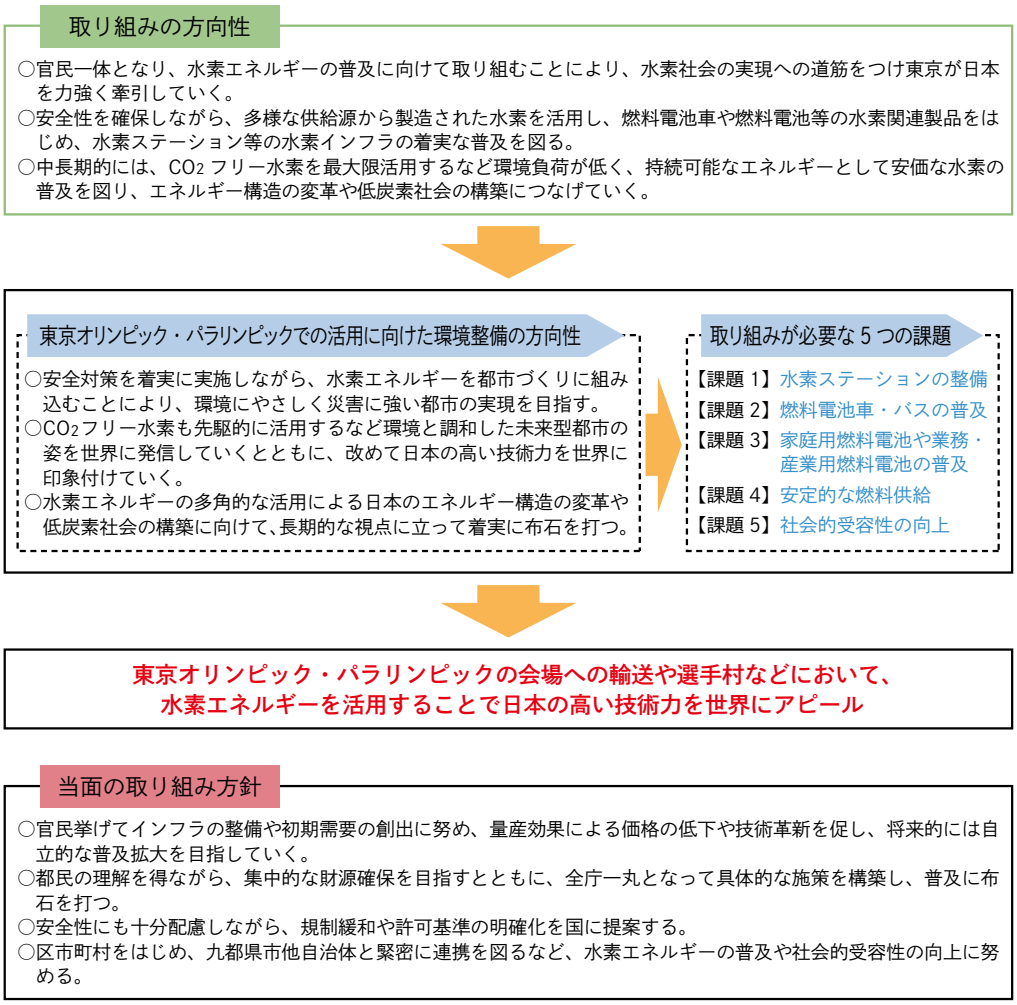


図 2-16　水素社会の実現に向けた東京戦略会議の中間まとめ

出典：東京都 第一回水素社会の実現に向けた東京戦略会議【参考資料［33］】

(5)　川崎市の取り組み

川崎市と千代田化工建設は 2013 年 6 月、水素を使った低炭素社会の実現に向けた連携・協力包括協定を締結した。この協定では（i）水素社会を支えるインフラの構築の取り組み、（ii）水素のエネルギー利用の取り組み、（iii）再生可能エネルギーにより製造する水素の活用の取り組み、（iv）その他水素社会の実現に資する取り組み、を進めるとしている（図 2-17）。水素は千代田化工建設が保有する有機ハイドライド技術を用いて輸入する。

また川崎市は、川崎臨海部での水素ネットワークの構築を進めるため、有識者や臨海部立地企業、神奈川県、NEDO などが参加する「川崎臨海部水素ネットワーク協議会」を立ち上げている。

さらに川崎市は千代田化工建設と共同で、2013 年 10 月に「水素エネルギーフロンティア国家戦略特区」を内閣府に申請、川崎市臨海部に大規模な水素エネルギーの供給拠点を構築し、水素発電所と水素供給グリッドの実現を目指している。水素は川崎市臨海部の各種の施設に供給できるように、有機ハイドライド技術を核に水素パイプラインなどの水素供給ネットワークの構築を行う。

水素発電所は水素と天然ガスの混焼により発電を行う予定で、CO_2 排出の少ない発電設備として期待されている。また、地域全体のさらなる CO_2 排出量削減に資する、川崎臨海部やその周辺における既存の天然ガス火力発電所への水素導入についても、中長期的な視野に立って検討を行っている。

また、川崎市は 2014 年 11 月に、東芝と再生可能エネルギーと水素を用いた自立型エネルギー供給システムを共同実証すると発表した。東芝は、同市の臨海部にあるコミュニティ施設に、太陽光発電設備、蓄電池、水電気分解装置、燃料電池を設置し、自立型のエネルギー供給システムを構築する。川崎市は実証試験環境を提供し、成果を両者で活用するとしている。

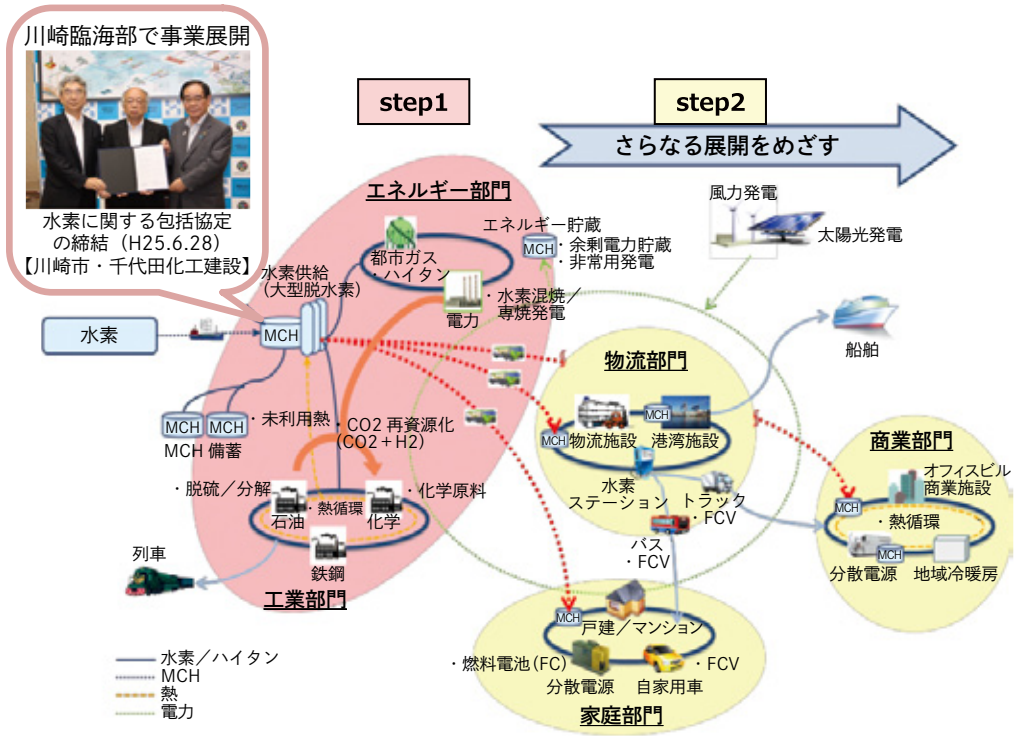


図 2-17　川崎市・千代田化工建設による「水素ネットワーク」の展開イメージ

出典：川崎市総合企画局

(6)　中部圏の取り組み

中部圏では、愛知県が 2005 年 7 月に「あいち FCV 普及促進協議会」を設置し、中部経済産業局、中部運輸局、県内の自治体、産業界と連携し、愛知県内における FCV や水素ステーションに関する実証実験や普及啓発などを協議、推進してきた。

同協議会 2014 年 2 月には、「愛知県水素ステーション整備・配置計画」を発表した（表 2-15、図 2-18）。

(7)　愛知県の取り組み

愛知県では、国などによる実証実験が先導的に行われ、愛知県はその取り組みを積極的に支援してきた。

2005 年 3 ～ 9 月に開催された愛知万博において、先述の JHFC プロジェクトの一環として、長久手会場と瀬戸会場を結ぶ会場間輸送用バスに燃料電池バスが活用され、また水素ステーションも建設した。

その後、燃料電池バスは、「知多バス」及び豊田市の「とよたおいでんバス」において路線バスとしての走行実証及び中部国際空港（セントレア）内のランプバスとしての走行実証が行われた（図 2-19）。水素ステーションはセントレアに移設され（セントレア水素ステーション）、水素充填施設として、高頻度・高稼働運転などに関する実証実験が行われた。

また、東邦ガス技術研究所水素ステーションでは、2008 年度から NEDO の技術開発事業として 70 MPa 水素ステーションの実用化に向けた研究開発・実証実験が行われている。

さらに 2013 年には、先述の地域水素供給インフラ技術・社会実証の一環として、商用仕

表 2-15　愛知県水素ステーション整備・配置計画における目標

燃料電池自動車普及目標台数	2025 年度（平成 37 年度）に累計台数 20 万台達成（ハイブリッド自動車、プラグインハイブリッド自動車及び電気自動車の販売実績を基に推計）
水素ステーションの整備目標数	**2015 年度（平成 27 年度）末　20 基** ※登録乗用車台数 1 万台以上の市町村の可住地面積をカバーできる整備数 **2025 年度（平成 37 年度）末　100 基程度** ※：燃料電池自動車の普及台数をカバーすることができる整備数（水素ステーション 1 基あたり燃料電池自動車 2,000 台をカバー）

地域別	2015 年度末	2025 年度末
名古屋地域	4 基	29 基程度
尾張西部地域	2 基	10 基程度
尾張北・東部地域	2 基	17 基程度
知多地域	3 基	7 基程度
西三河地域	7 基	27 基程度
東三河地域	2 基	10 基程度
合　計	20 基	100 基程度

出典：愛知県水素ステーション整備・配置計画

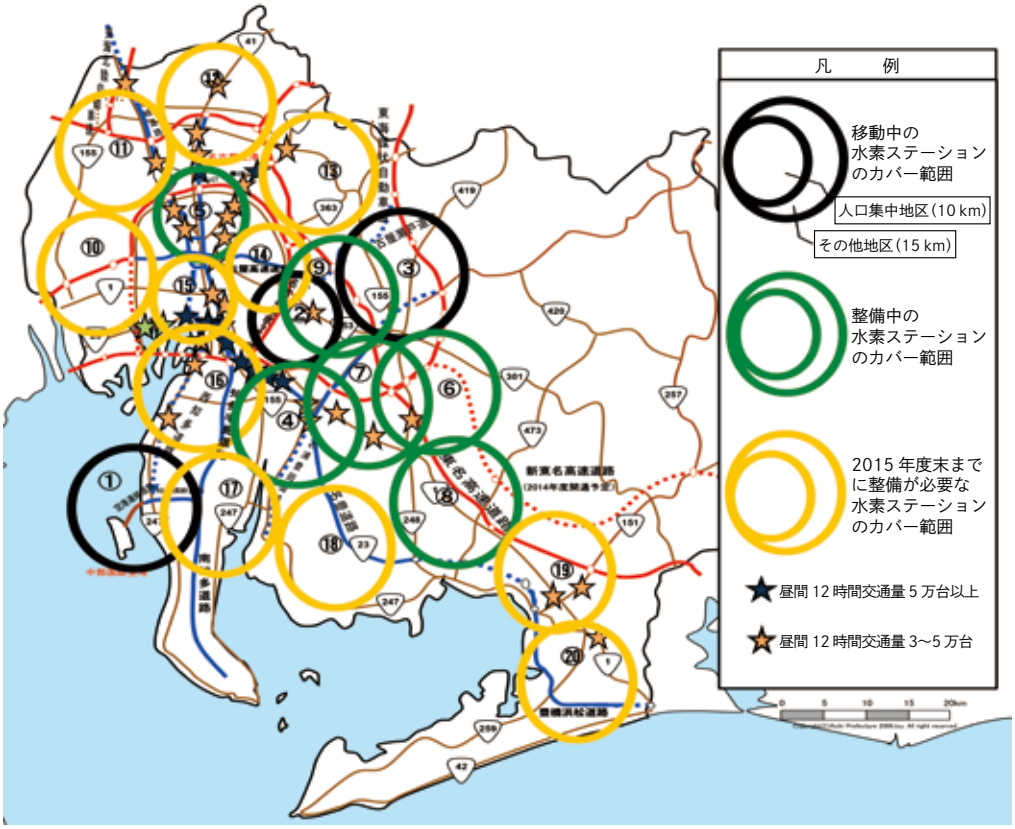


図 2-18　水素ステーションの配置イメージ（2015 年度末）

出典：愛知県水素ステーション整備・配置計画



図 2-19　とよたおいでんバス（左）と中部国際空港ランプバス（右）

出典：愛知県水素ステーション整備・配置計画、東邦ガス

様の水素ステーションを用いた総合実証が県内の 2 基（とよたエコフルタウン水素ステーション、神の倉水素ステーション）で実施された（図 2-20）。





図 2-20　神の倉水素ステーション（左）　とよたエコフルタウン水素ステーション（右）

出典：水素供給・利用技術研究組合

また、愛知県は 2014 年 12 月に、愛知県庁西庁舎駐車場に愛知県庁水素社会普及啓発ゾーンを開所した。このゾーンでは、FCV、水素ステーションを始めとする水素社会に関する普及啓発を行うとともに、移動式水素ステーションの設置・運用が可能な場を設けることで、都心部における水素ステーション整備のモデルケースを提示し、更なる整備促進に繋げるとしている。2015 年 6 月以降には、移動式水素ステーションによる水素充填を開始する予定である。

さらに、FCV の販売開始に合わせて、FCV をベースモデルとの差額の 4 分の 1 を補助することを決定するとともに、最大で 5 年間の自動車税を免除することを発表している。

(8)　関西圏の取り組み

関西圏では大阪府を中心に、2003 年 9 月に「おおさか FCV 推進会議」が設置され、在阪の水素・燃料電池に関係のある産学官が一体となり、水素エネルギー社会の実現に向けた議論を行ってきた。

2014 年 3 月には「大阪府における水素ステーション整備計画」を策定した。この計画では、大阪府の道路交通・都市計画の政策、パーソントリップ調査、及び大阪府の道路交通事情を勘案し、府内に 9 ヶ所の水素ステーションを設置することが望ましいとしている。

(9)　北部九州圏

福岡県及び佐賀県は、他の都市圏に先立ち、2012 年 2 月に「北部九州燃料電池自動車導入計画」を策定した。

同地域は全国に先駆けて燃料電池自動車及び水素ステーションの自律的拡大の実現を目指し、2015 年時点において、福岡県・佐賀県における燃料電池自動車のシェア目標を、ハイブリッド車の全国シェア（約 4%）の 2 倍である 8%に設定している（図 2-21）。

また、水素ステーションの設置では、限られた水素ステーションで燃料電池自動車の利便性を最大限確保するために、乗用車販売台数・高級車販売台数・ハイブリッド販売台数

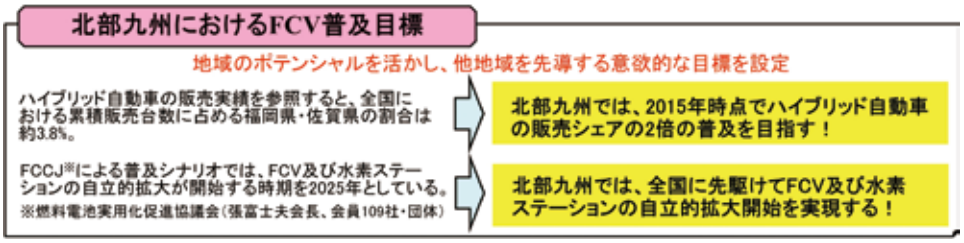
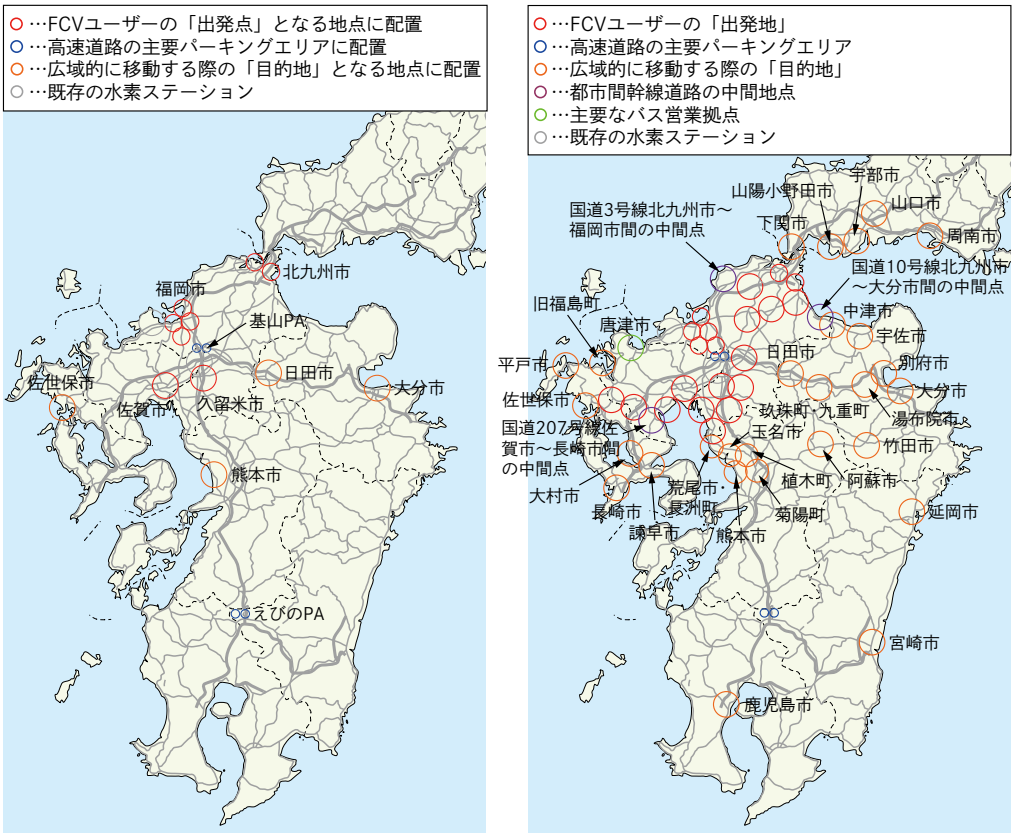


図 2-21　北部九州燃料電池自動車導入計画における燃料電池自動車普及目標

出典：福岡水素エネルギー戦略会議／佐賀県新エネルギー・産業振興課



2015 年時点配置イメージ　　2020 年時点配置イメージ

図 2-22　北部九州燃料電池自動車普及促進構想

出典：福岡水素エネルギー戦略会議／佐賀県新エネルギー・産業振興課より NEDO 作成

が多い地域に、ユーザーの出発地点となる水素ステーションを設置するとともに、道路交通センサスのデータから利用者が訪れることが多い地点には、目的地としての水素ステーションを設置するという設置イメージ案を示している（図 2-22）。

(10)　福岡県

福岡県は 2004 年に、「福岡水素エネルギー戦略会議」を設置し、水素製造、輸送・貯蔵から利用まで一貫した研究開発、水素人材育成、水素エネルギー新産業の育成・集積などに総合的に取り組む「福岡水素戦略（Hy-Life プロジェクト）」を推進している（図 2-23）。

研究開発では、九州大学に集積する水素研究拠点である「水素材料先端科学研究センター」（HYDROGENIUS）、「次世代燃料電池産学連携研究センター」（NEXT-FC）、「カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所」（I2CNER）において、国内外の優れた研究者が世界最先端の研究活動を行っている。水素関連産業の基礎を支える人材育成については、全国唯一の水素関連人材育成機関「福岡水素エネルギー人材育成センター」を設立し、これまでに 1,000 人を超える水素関連分野への参入を目指す経営者や技術者を育成している。また、水素製品研究施設「水素エネルギー製品研究試験センター」（HyTReC）を設立、世界最高水準の試験設備を導入し、企業の新しい材料や製品開発を支援している。水素社会を具現化する社会実証では、家庭用燃料電池を 150 世帯に集中設置した世界最大の「福岡水素タウン」や、副生水素をパイプラインで市街地に供給し、本格利用する世界初のモデル地区「北九州水素タウン」、北九州市（北九州水素タウン）、福岡市（九州大学）に設置した 2 ヶ所の水素ステーションを活用し、福岡県で公用車として導入している燃料電池自動車をはじめ、燃料電池バス、燃料電池フォークリフト、燃料電池スクーターなどの走行



図 2-23　福岡水素戦略（Hy-Life プロジェクト）

出典：福岡県「FCV 初期市場創出に向けた福岡県の取組」
第 6 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 23 日）より NEDO 作成

実証を行うなど、先進的な取り組みにより家庭用燃料電池や燃料電池自動車の開発・普及に貢献している。

2014 年度からは、これまでの取り組みや蓄積を最大限に生かして燃料電池自動車の普及促進と水素ステーションの整備を一体的に推進し、燃料電池自動車初期市場の創出、普及拠点の構築に重点的に取り組んでいる。

燃料電池自動車の普及促進においては、地元経済界、企業、行政、大学が一体となって燃料電池自動車の普及に取り組む「ふくおか FCV クラブ」を 2014 年 8 月に設立し、地域を挙げて燃料電池自動車の魅力発信を進めるとともに、自治体による率先導入やタクシー事業者への導入助成を行う。

また、水素ステーション運営業者への候補地の情報提供や、共同出店できる地元企業とのマッチングを実施するとともに、地元企業との共同運営を行う水素ステーションの整備費の助成、「グリーンアジア国際戦略総合特区」を活用した税制支援などにより、水素ステーションの整備を促進している。

さらに HyTReC と九州大学「水素材料先端科学研究センター」（HYDROGENIUS）の連携により、企業の製品開発を支援することで、燃料電池自動車と水素ステーションの安全性向上、低コスト化、規制見直しの加速に貢献している。

（11）　佐賀県

佐賀県には、鳥栖市に水素ステーションが設置されているほか（図 2-24）、先述した福岡県と連携した「北部九州燃料電池自動車普及促進構想」において、2015 年度までに佐賀市及び鳥栖市に水素ステーションの整備を目標とする水素インフラの整備計画を策定している。



図 2-24　鳥栖水素ステーション（日本エア・リキード）

出典：鳥栖環境開発綜合センター

また、佐賀県と九州大学が共同で固体酸化物形燃料電池の研究開発を進めているとともに、佐賀大学では水素製造などの研究を行っている。

2-2-6　産業界の取り組み

(1)　家庭用燃料電池に関する取り組み

①　家庭用燃料電池のパッケージング開発

1990 年頃から家庭用燃料電池の取り組みが盛んになり、250 W のポータブルシステム、1 kW の可搬電源システムが開発された。1997 年 2 月に京都にて、第 3 回気候変動枠組条約締約国会議（COP3）が開催され、CO_2 排出削減目標が設けられた。これを受け 1990 年台後半には、電機メーカー各社（三洋電機、松下電器産業、松下電工、東芝）が中心となり、家庭用燃料電池コージェネレーションシステムのパッケージ化開発が進められた。

②　家庭用燃料電池システムの開発・実証

1999 年より、日本ガス協会にて、NEDO 助成事業「固体高分子形燃料電池の高効率化・コスト低減のための運転研究」が実施され、都市ガスを燃料とした 1 kW 級固体高分子形燃料電池（PEFC）システムの試作機の実証運転が実施された。

2002 年度からは国、メーカー、エネルギー事業者が中心となって実証研究を行い、燃料電池システムの機器開発が進められた。

2005 年度からは、新エネルギー財団（NEF）による NEDO 助成事業「定置用燃料電池大規模実証事業」により、一般の戸建て住宅を対象に、省エネルギー性や CO_2 削減効果の調査が行われた。この実証事業の成果をもとに、コストなどを含めた総合的な検討が行われ、我が国における家庭用燃料電池の発電出力としては 0.7 kW 程度が適当であるとの示唆が得られた。2008 年 6 月にはエネルギー事業者によって、統一名称「エネファーム」が用いられることが決まり、一般市民への認知度の向上が図られた。

③　家庭用燃料電池システム「エネファーム」の誕生

2009 年 1 月にエネルギー事業者 6 社（東京ガス、大阪ガス、東邦ガス、西部ガス、新日本石油、アストモスエネルギー）によって、家庭用燃料電池「エネファーム」の販売開始と普及に向けた共同宣言が行われた。共同メッセージ「エネファームで環境立国ニッポンへ」を掲げ、エネファームが将来の日本における住宅でのスタンダードになり、地球環境問題の改善に貢献することを宣言した。

④　エネファーム パートナーズ結成

2009 年のエネファーム販売当初から、国や地方自治体によって補助金が交付され、出荷台数は年々増加している。なお国の政策としては、国の補助金は 2015 年度までとし、2016 年度には自立して市場を形成することが期待されるとともに、2020 年に累計出荷台数 140 万台という目標が掲げられた。

この自立的市場の形成と出荷台数目標の達成のため、2013 年 5 月にエネファームの関連業界・団体によってエネファームの普及推進を行う「エネファーム パートナーズ」が設立



図 2-25　エネファーム パートナーズの構成

出典：日本ガス体エネルギー普及促進協議会

された。このエネファーム パートナーズは、2014 年 9 月時点で 6 団体、住宅関連事業者 26 社、エネルギー機器製造事業者 14 社、都市ガス事業者 79 社、LP ガス事業者 10 社、その他関連事業者 2 社、その他の協力団体 4 団体で構成されている。事務局は日本ガス体エネルギー普及促進協議会である（図 2-25）。

(2)　燃料電池自動車・水素インフラに関する取り組み

①　民間 13 社の共同声明（2011 年 1 月）

2011 年 1 月に我が国の主要メーカー 13 社（トヨタ自動車、日産自動車、本田技研工業、JX 日鉱日石エネルギー、出光興産、岩谷産業、大阪ガス、コスモ石油、西部ガス、昭和シェル石油、大陽日酸、東京ガス、東邦ガス）が「燃料電池自動車の国内市場導入と水素供給インフラ整備に関する共同声明」を発表している。

この共同声明では、4 大都市圏を中心に 2015 年からの燃料電池自動車の国内市場への導入と一般ユーザーへの販売開始を目指し開発を進めること、2015 年までに水素供給インフラ（4 大都市圏を中心に 100 ヶ所程度）の先行整備を目指すことを表明している。

②　燃料電池自動車開発に関する取り組み

燃料電池自動車の開発は 1987 年にカナダの Ballard Power Systems が、従来にない高出力密度の固体高分子形燃料電池（PEFC）を開発したことにより、自動車へ搭載し実用化することへの可能性が高まった。

1993 年には Ballard Power Systems により固体高分子形燃料電池（PEFC）を搭載した

燃料電池バスの実証実験が開始され、1994 年に Daimler-Benz が Ballard Power Systems の固体高分子形燃料電池（PEFC）を搭載した燃料電池自動車を発表した。

国内ではトヨタ自動車が 1992 年から燃料電池自動車の開発を開始し、1996 年に大阪で開催された EVS（INTERNATIONAL ELECTRIC VEHICLE SYMPOSIUM & EXHIBITION）13 にて一般に公開した。本田技研工業が 1999 年に、日産自動車が 2001 年に相次いで燃料電池自動車の実験車の発表を行なった。2002 年 12 月には、トヨタ自動車と本田技研工業が日本国内において燃料電池自動車のリースを開始した。その後、各社が継続して研究開発を続け、公道走行試験などを行ってきた。当初は液体であるメタノールを燃料として車載し、車上で改質反応させて水素を製造する改質型燃料電池自動車も検討されたが、次第に水素の高圧ガスを燃料とする直接水素型燃料電池自動車が主流となってきた。

近年、燃料電池自動車の研究開発については、日本の自動車メーカーを軸とした共同開発、連携の動きが活発になっており、トヨタ自動車が BMW と 2013 年 1 月に、日産自動車が Daimler、Ford と 2013 年 1 月に、本田技研工業が GM と 2013 年 7 月に、それぞれ燃料電池自動車の共同開発についての合意を発表している。

自動車各社において FCCJ のシナリオに示された燃料電池自動車の市販開始のマイルストーンである 2015 年に向けて開発、実証試験などが続けられ、近年は開発が加速しているが、燃料電池自動車の普及における最大の課題は車両価格（コスト）である。

試作段階では、試作台数が少なく量産効果によるコスト低減効果が無いこともあり、1 台 1 億円程度と言われるほど高価であったが、簡素化や材料費の低減などの技術開発などによってコストを 1/20 以下とし、自動車各社はシステム技術開発と量産技術開発によりさらなる低コスト化を進めている（図 2-26）。

2014 年 12 月 15 日にトヨタ自動車は日本国内で FCV の発売を開始したが、その価格は

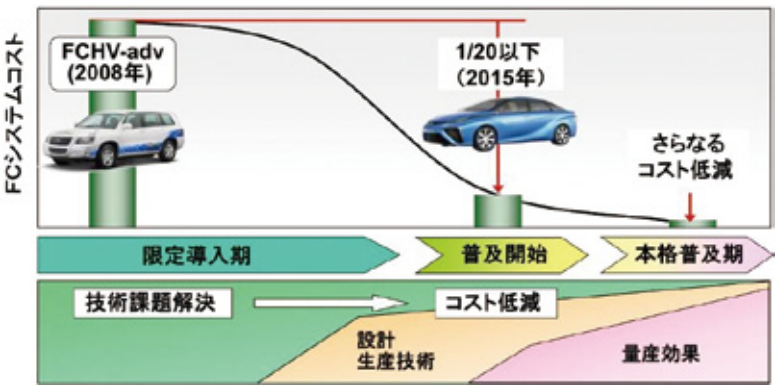


図 2-26　FCV のコストダウンのイメージ

出典：トヨタ自動車「トヨタの FCV 開発の取り組みと普及にむけた課題」
第 3 回水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ（2014 年 3 月 4 日）
【参考資料［3］】



図 2-27　燃料電池の用途・適用車種の拡大

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ワーキンググループ（2014 年 3 月 26 日）【参考資料［3］】より
NEDO 作成

約 720 万円に設定されている。本格普及期には、同車格のハイブリット車同等の価格競争力を有する車両価格の実現が目標とされている。

なお将来は、乗用車やバス向けからさらに、フォークリフトなどの産業用車両、船舶などの交通用途に拡大していくことが期待されている（図 2-27）。

■ 2-2-7　水素とスマートコミュニティ

(1)　スマートコミュニティのコンセプトと水素

スマートコミュニティとは、地域が既存電力や再生可能エネルギーなどを組み合わせ、エネルギー・マネジメント・システム（EMS）を活用することで、都市のエネルギーシステムや交通システムをより快適に変革していくことを目指した取り組みである。

スマートコミュニティのイメージを図 2-28 に示す。ここでは、風力やメガソーラーがコミュニティ・エネルギー・マネジメントシステム（CEMS）と連結され、地域全体の電力需給を管理するとともに、ビル・エネルギー・マネジメントシステム（BEMS）とホーム・エネルギー・マネジメントシステム（HEMS）が電力需要の最適化・省電力化を図っている。

この HEMS や CEMS と連携するシステムの一部として、次世代自動車（燃料電池自動車を含む）からの家庭への給電（V2H：Vehicle to Home）や、家庭用燃料電池システムの活用も検討されており、実証も進められている。

水素エネルギーはスマートコミュニティの機能を強化する重要な要素であるといえる。

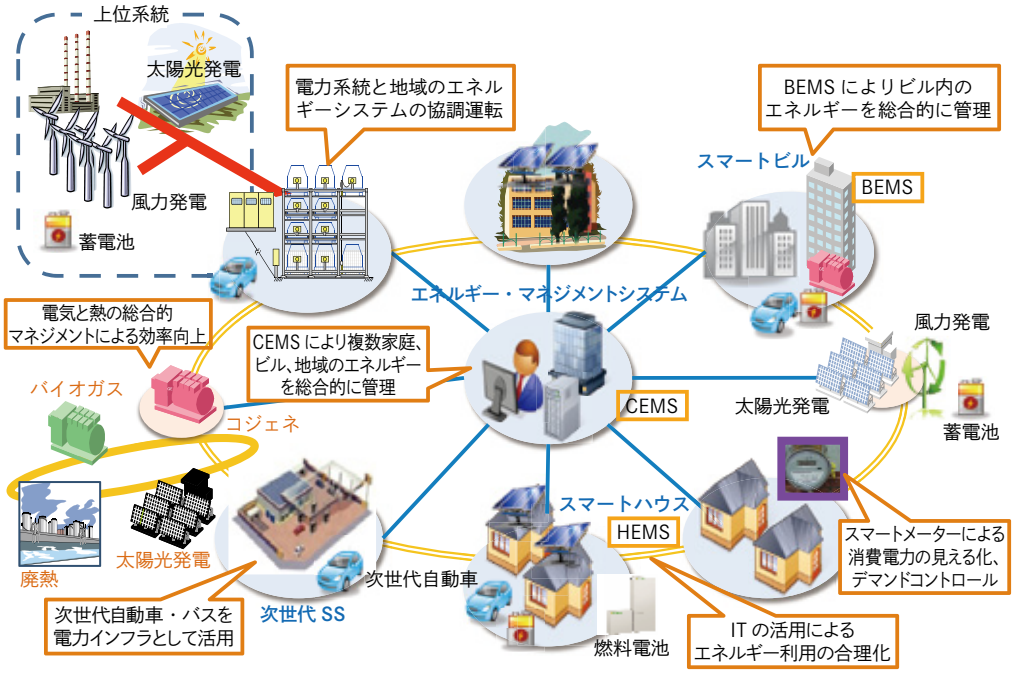


図 2-28　スマートコミュニティのイメージ

出典：経済産業省「次世代エネルギー・社会システム協議会」資料より NEDO 作成

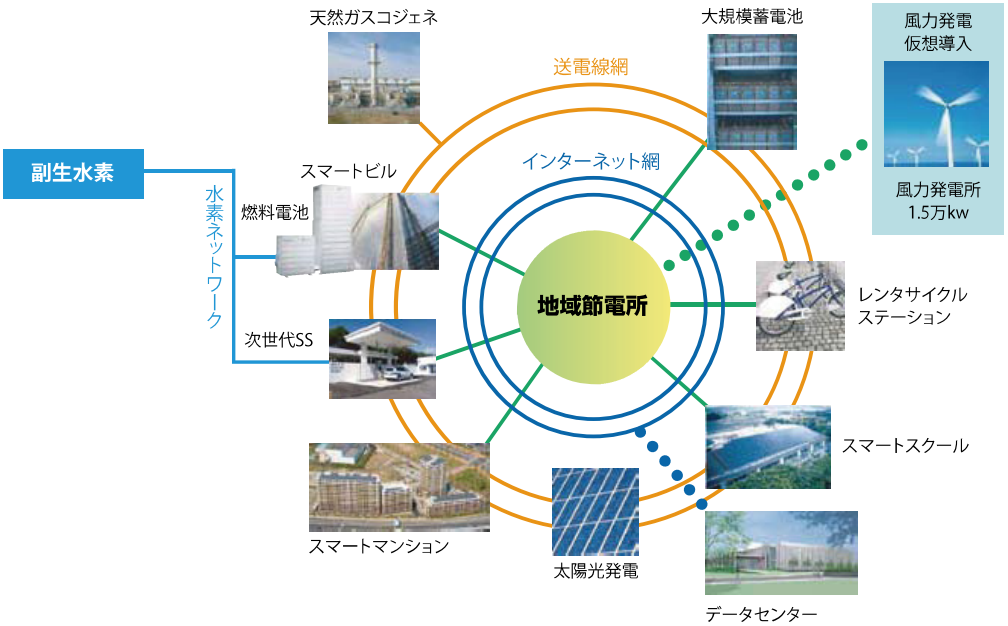
(2)　スマートコミュニティにおける水素エネルギーの実証例と構想例

①　北九州スマートコミュニティ

北九州スマートコミュニティ創造事業（八幡東区）では、製鉄所からの副生水素を活用し、水素ステーションに水素を供給するとともに、業務用リン酸形燃料電池（PAFC）や純水素型家庭用燃料電池システム（純水素型エネファーム）にも水素を供給する実証を行っている（図 2-29）。

また、本田技研工業と本田技術研究所は、2013 年度より同社の燃料電池自動車（FCX クラリティ）を用いた FCV2H の実証を同スマートコミュニティ実証事業の一環として実施している（図 2-30）。これは非常時の外部給電機能と電力需給逼迫時のピークカット効果を検証するもので、2013 年度においては以下の成果を得た。

- 燃料電池自動車からの V2H を可能とする燃料電池自動車 FCX クラリティの改良と、この燃料電池電気自動車に搭載して使用する家庭への給電が可能な可搬型インバータボックスの製作。
- 上記燃料電池自動車と可搬型インバータボックスを用いて、一戸建て住宅への V2H 給電実証可能な施設を改良した。
- 上記 V2H により家庭への電力供給した時の、スマートコミュニティの電力ピークカット／電力平準化への効果を図るための CEMS 連携。



・発電状況に応じたエネルギーの最適分配
・地域内のエネルギー需給状況に応じて電力料金を変動させるダイナミックプライシングの実施
・スマートメーターの導入
・エネルギー、CO_2 の見える化

図 2-29　北九州スマートコミュニティ創造事業における水素エネルギーの活用

出典：北九州市「北九州スマートコミュニティ創造事業パンフレット」より NEDO 作成



図 2-30　北九州スマートコミュニティ創造事業における V2H 実証

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



図 2-31　関西空港水素ステーション（左）と空港に導入された燃料電池バス（右）

出典：水素供給・利用技術研究組合

②　関西国際空港の KIX スマート愛ランド構想

関西国際空港では関西空港水素ステーションが稼働しており、2012 年 10 月からはターミナルビル間を結ぶシャトルバスには燃料電池バスが導入され、運用されてきた（図 2-31）。

関西国際空港を運営している新関西国際空港は 2012 年 12 月に、大阪府、トヨタ自動車、岩谷産業、豊田自動織機、三井物産、豊田通商、関西電力と KIX 水素グリッド研究会を立ち上げ、水素グリッドエアポートの実現に向けて、以下のような検討を行っている。

- 水素を発生させる電力源に太陽光、風力などの自然エネルギーを導入し、化石燃料などへの依存度の低い地産地消型エネルギーシステムを実証・構築する。日本初のメガワット級水素利用アプリケーションを導入して、環境に配慮した空港経営のモデルを実証・構築する。
- 水素貯蔵／燃料電池発電技術を活用した日本初のメガワット級エネルギー備蓄システムを構築し、空港全体の電力デマンドのピークカット・ピークシフト、非常用発電システムのエネルギー源として活用する。
- 関西国際空港（KIX）、大阪空港（ITM）双方に液化水素型水素ステーションを建設し、両空港間のシャトルバスを水素ハイウェイバスで連絡し、燃料電池バスを実証・導入する。
- 空港内外の社用車や移動用車輌、作業用車輌などを燃料電池車（FCV）化して、環境保護及び水素エネルギー活用の普及と PR を図る。
- 水素利用アプリケーションの導入やシステム運用の効果検証を、国際戦略総合特区事業として展開するため、国に申請する。

2013 年には新関西国際空港は「スマート愛ランド構想」を発表した（図 2-32、図 2-33）。この構想は、空港施設へ大規模に水素エネルギーを導入する日本初の実証事業である。特に燃料電池フォークリフトに関しては、2014 ～ 2015 年度にかけて豊田自動織機製 2 台を導入し、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。

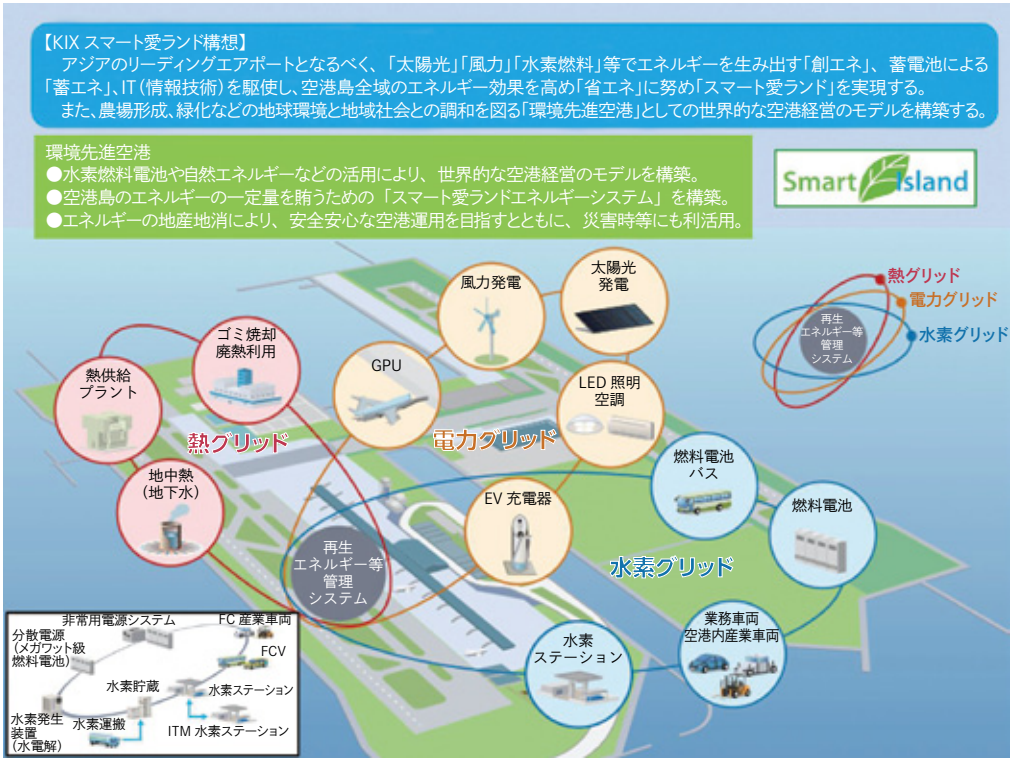


図 2-32　KIX スマート愛ランド構想

出典：新関西国際空港ニュースリリース「水素グリッド研究会を設立！」（2012 年 12 月 19 日）より NEDO 作成

③　HyGrid 構想

自動車 3 社なども加盟する HyGrid 研究会では、ハイブリッド・グリッドとして、水素と電力が補完するシステムを、再生可能エネルギーが豊かな地方部から展開する構想を打ち出している（図 2-34）。

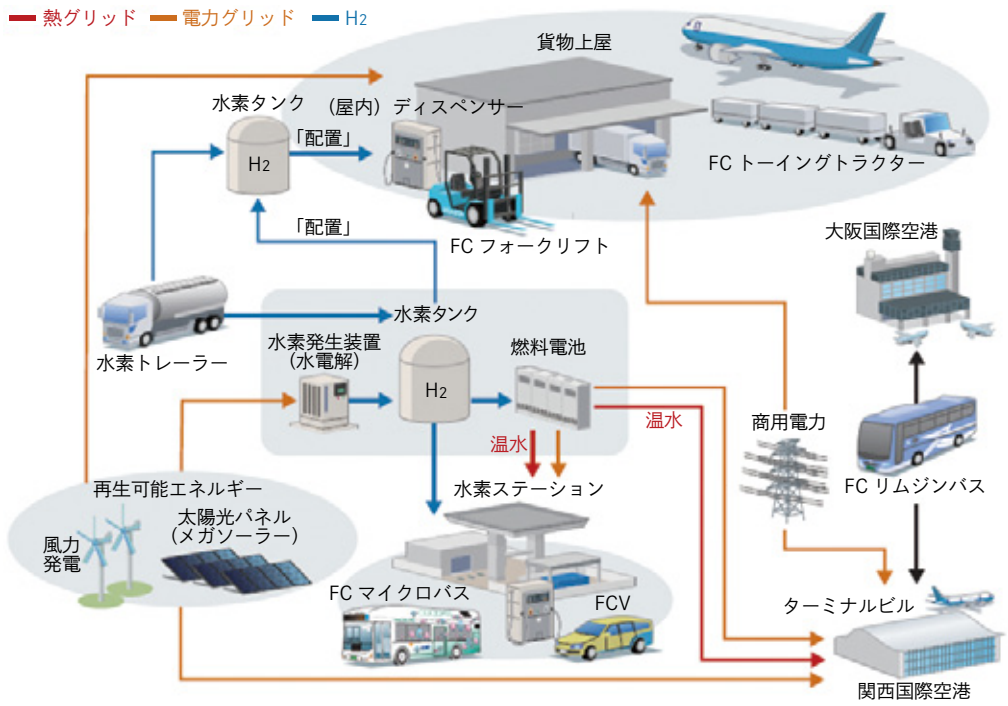


図 2-33　関西国際空港（KIX）スマート愛ランド構想「水素グリッドプロジェクト」

出典：新関西国際空港より NEDO 作成

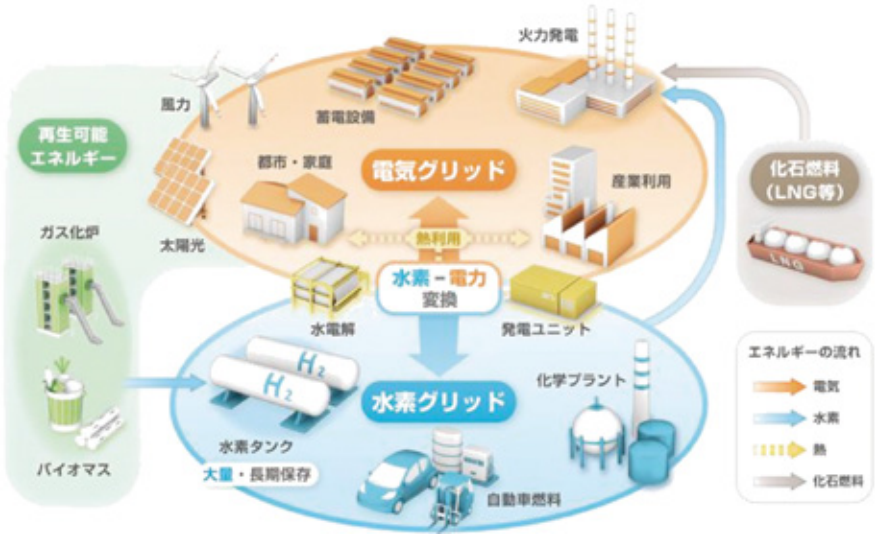


図 2-34　HyGrid 構想

出典：HyGrid 研究会

第３章

水素エネルギーに関連する各国の取り組み

世界各国で水素や水素エネルギーについての取り組みが行われている。本章では、世界各国が水素や水素エネルギーについてどのような取り組みを進めているか、どのように推進しているかについて述べる。

3-1　主要国の取り組み

3-1-1　米国

(1)　連邦政府の取り組み

米国における水素エネルギーの研究開発とデモンストレーションは、米国エネルギー省が中心となり実施されている。

米国では、クリントン政権下の 1994 年より、ハイブリッド車の開発を目的とする国家プロジェクト「新世代自動車パートナーシップ（PNGV：Partnership for a New Generation of Vehicles)」が実施されていた。目標は 2004 年までに 80 マイル／ガロンの燃費を達成することであったが、プロトタイプ開発までにとどまり、実用化には至らなかった。その一方で、トヨタ自動車が 1997 年にハイブリッド車「プリウス」を実用化したことを契機に、2000 年に本プロジェクトは終了した。

ブッシュ政権は開発目標を燃料電池自動車に切り替え、2002 年に「フリーダムカーパートナーシップ」（その後、「フリーダムカー & 水素燃料パートナーシップ」に拡大）が開始され、燃料電池自動車の実用化を推し進めた。

2009 年度には、リーマンショック後の景気刺激策の上乗せもあり、米国エネルギー省の水素・燃料電池関連予算は 2 億 4,000 万ドル（当時のレートで 250 億円）に達した。

オバマ政権は電気自動車とプラグインハイブリッド開発を優先させ、水素・燃料電池関

表 3-1　米国エネルギー省（DOE）の水素・燃料電池関連予算

	2013 年	2014 年	2015 年（要求値）
燃料電池 R&D	41,266	33,383	33,000
水素燃料 R&D	31,681	36,545	36,283
製造技術 R&D	1,899	3,000	3,000
システム分析	2,838	3,000	3,000
技術実証	8,514	6,000	6,000
安全、基準、標準	6,808	7,000	7,000
市場創出	2,838	3,000	3,000
国立再生可能エネルギー研究所の実証支援	0	1,000	1,700
合計	**95,844**	**92,928**	**92,983**

（単位　1,000US$）

出典：米国 DOE “Office of Energy Efficiency and Renewable Energy FY 2015 Budget Request”

連予算は削減されたものの、それでも毎年 1 億ドル（約 100 億円）が計上されている（表 3-1）。

(2)　カリフォルニア州の動き

2014 年現在、米国で明確に燃料電池自動車普及計画と水素ステーション整備計画を有しているのはカリフォルニア州のみである。同州はゼロエミッションビークル（ZEV）規制を導入しており、自動車メーカーが燃料電池自動車導入を予定している。

同州では、官民パートナーシップ組織であるカリフォルニア燃料電池パートナーシップ（CaFCP：California Fuel Cell Partnership）と、これを資金面で支援しているカリフォルニア州エネルギー委員会（CEC：California Energy Commission）、さらに同州の大気質改善に取り組むカリフォルニア州大気資源局（ARB：Air Resources Board）などが連携して水素インフラ展開を進めている。

CaFCP は 2010 ～ 2011 年に同州で車両を販売している大手自動車メーカーにアンケートを行ない、2017 年に 53,000 台の燃料電池自動車がカリフォルニア州に導入されるとの見通しを得た（図 3-1）。

この見通しをもとに CaFCP は 2012 年に「カリフォルニアロードマップ」を発表、2016 年初めまでに州内で水素ステーションが 68 ヶ所必要と発表した（図 3-2）。68 ヶ所の水素ステーションは、5 つのクラスタ（サンタモニカ／ウエストロサンゼルス、トーランスと沿岸部市、アーバインとオレンジ郡南部沿岸、バークレー、サンフランシスコ南湾岸地域）

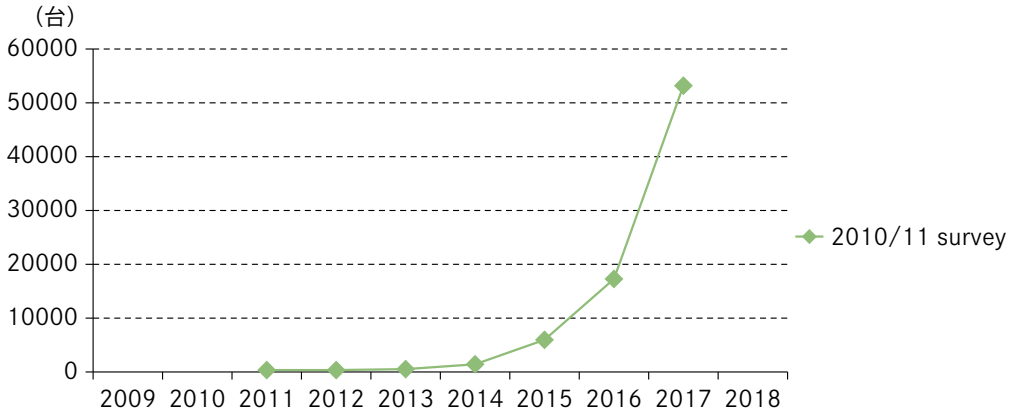


図 3-1　カリフォルニア州における燃料電池自動車普及予測

出典：カリフォルニア燃料電池パートナーシップ（CaFCP）「A California Road Map：The Commercialization of Hydrogen Fuel Cell Vehicles（Overview）」Japanese Translation より NEDO 作成

と、このクラスタを接続するハイウェイに設置することを想定している。さらにこのロードマップでは、2017 ～ 2018 年には、燃料電池自動車の普及台数次第では、合計で 100 ヶ所近くのステーションが必要となると予想している。

この水素ステーションの展開を支援するために、カリフォルニア州のブラウン知事は 2013 年 9 月にクリーン自動車の利用拡大を定めた州法に署名、毎年 2000 万ドルを投じて州内で 100 ヶ所まで水素ステーションを整備することを発表した。

なお 2014 年 12 月時点で、カリフォルニア州内で 10 ヶ所のステーションがオープンしている（図 3-2）。また、現在同州には 230 台の燃料電池自動車が運用されており、燃料電池バスも路線バスとして 16 台が導入されている。

(3)　カリフォルニア州から他の州への展開

2013 年 10 月にカリフォルニア州と 7 州（コネチカット州、メリーランド州、マサチューセッツ州、ニューヨーク州、オレゴン州、ロードアイランド州、バーモント州）は、「2025 年までに計 330 万台のゼロエミッション車（ZEV）を導入する」という覚書に署名した（ZEV には燃料電池自動車の他に電気自動車やプラグインハイブリット（PHEV）も対象となる）。特にニューヨーク州をはじめとする北東部の州は燃料電池自動車導入に積極的であり、沿岸の大都市を中心にインフラ整備を進める計画である。

やや目的が異なるが、ハワイ州は GM、米国エネルギー省、国防省と連携して、燃料電池自動車を軍用に活用するとともに、豊かな再生可能エネルギー（風力、地熱など）を活用して水素を生産するプロジェクトを実施している。



図 3-2　カリフォルニアにおける水素ステーション（2014 年 12 月時点）

出典：カリフォルニア燃料電池パートナーシップ（CaFCP）Station map より NEDO 作成

表 3-2　H2USA に設置されているワーキンググループ

ワーキンググループ	検討内容
水素ステーション ワーキンググループ	水素ステーション設備の開発、デザイン、信頼性、規制に関わる検討
市場支援・加速 ワーキンググループ	ステーションの運営や市場形成、規格・規制、教育に関わる検討
ファイナンシングインフラ ワーキンググループ	建設のための費用支援や投資支援に関わる検討
ロケーションロードマップ ワーキンググループ	水素ステーションの効果的な設置を検討に関わる検討

出典：H2USA

(4)　新しい官民パートナーシップ

このような州レベルの動きを支援しつつ、燃料電池自動車普及と水素ステーション展開を全米に拡大するために、米国エネルギー省は 2013 年 9 月に官民パートナーシップ「H2USA」を立ち上げた。これには日本の自動車メーカー（トヨタ自動車、本田技研工業、日産自動車）をはじめ、GM、Daimler（Mercedes-Benz USA）、Hyundai も参画している。事務局は米国の民間組織である燃料電池水素エネルギー協会（FCHEA：Fuel Cell & Hydrogen Energy Association）である。

この H2USA には、運営委員会とともに表 3-2 に示す 4 分野のワーキンググループが設置されている。H2USA は 2015 年までにロードマップを作成し、2020 年までには米国全土にステーションを建設することを予定している。

また、H2USA は米国北東部 4 州（ニューヨーク州、マサチューセッツ州、コネチカット州、ロードアイランド州）における水素ステーション整備検討に参画している。

3-1-2　ドイツ

(1)　連邦政府の取り組み

ドイツではドイツ連邦交通建設住宅省（BMVBS、2014 年 1 月よりドイツ連邦交通・デジタルインフラ省（BMVI）に改名）とドイツ連邦経済技術省（BMWi）が中心となり、水素・燃料電池技術革新プログラム（NIP：Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie）を推進してきた。この NIP は、2007 ～ 2016 年の 10 年間で合計 14 億ユーロ（官民が半額ずつ出資）を水素・燃料電池技術開発に投資するものである。NIP の予算推移を図 3-3 に示す。

NIP の実施とファンド管理機関としてドイツ水素燃料電池機構（NOW：Nationale Organisation Wasserstoff-und Brennstoffzellentechnologie）が設立されている。

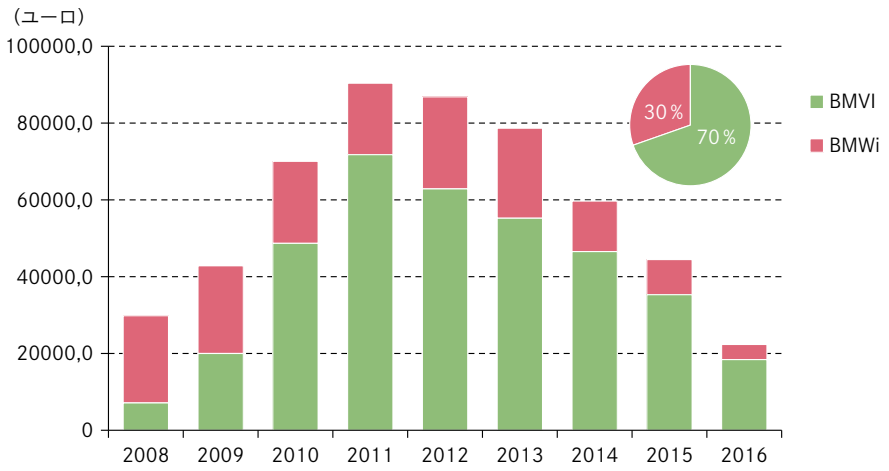


図 3-3　NIP の予算推移

出典：German Ministry of Transport and Digital Infrastructure「Towards sustainable energy systems—Overview of German HFC-Developments」より NEDO 作成

(2)　燃料電池自動車と水素インフラ整備

NIP に先立ち、ドイツでは 2004 年より燃料電池自動車と水素ステーションの実証プロジェクト「Clean Energy Partnership（CEP）」が実施されてきた。CEP はベルリンで始まり、Daimler や BMW、VW、Linde といったドイツ企業に加え、我が国の自動車メーカー（トヨタ自動車、本田技研工業、日産自動車）や GM（Opel）や Ford も参加している。現在 CEP はメンバー的にも地域的にも拡大し、2015 年までの燃料電池自動車市場立ち上げ段階までの水素ステーション整備はすべて CEP の枠で実施されることになっている。CEP の予算は NIP からファンドされている。

さらに 2009 年には、2015 年以降の水素インフラ整備を検討する組織「H2 Mobility」が結成された。Daimler や Linde などのドイツ企業に加え、我が国の自動車メーカー（トヨタ、本田技研工業、日産自動車）もアソシエートメンバーとして参画している。この H2 Mobility は、水素ステーションのビジネスプラン策定ともに、水素ステーション展開のエリア分析を行なっている。

このようにドイツの水素ステーションの整備は、CEP の枠で実施される市場立ち上げ段階と、H2 Mobility の枠で実施される 2016 年以降の市場拡大段階に分けられる。

2012 年 6 月にはドイツ政府、Daimler、Air Liquide、Linde などが共同で 2015 年までに 50 ヶ所の水素ステーションを整備することを発表している（図 3-4）。また 2013 年 9 月には H2 Mobility に参画している 6 社（Daimler、Air Liquide、Linde、OMV、Shell、TOTAL）が、2023 年までに 400 ヶ所の水素ステーションの設置を目指すと発表している（図 3-5）。

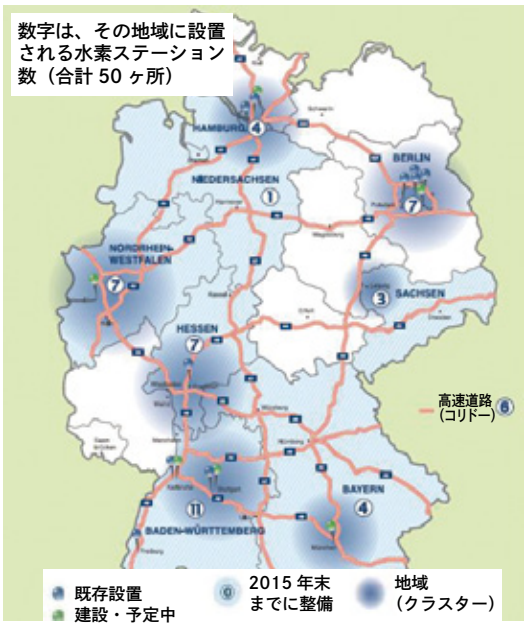
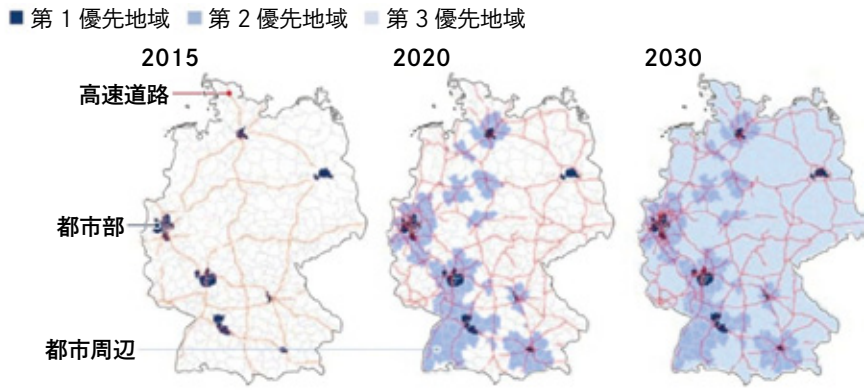


図 3-4　ドイツの水素ステーション整備計画（2015 年まで）

出典：Dr. Klaus Bonhoff（NOW GmbH）「Linking the H2 Mobility Plan to EU Deployment Strategy」（Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking（FCH JU）5th Stakeholders' General Assembly）より NEDO 作成



FCEV 台数	～5,000 台	～150,000 台	～1,800,000 台
水素ステーション数	～100 ヶ所	～400 ヶ所	～1,000 ヶ所
水素ステーションがカバーする人口	～20％	～60％	～100％

図 3-5　ドイツの水素ステーションと燃料電池自動車の整備予測

出典：Dr. Klaus Bonhoff（NOW GmbH）「Linking the H2 Mobility Plan to EU Deployment Strategy」（Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking（FCH JU）5th Stakeholders' General Assembly）より NEDO 作成

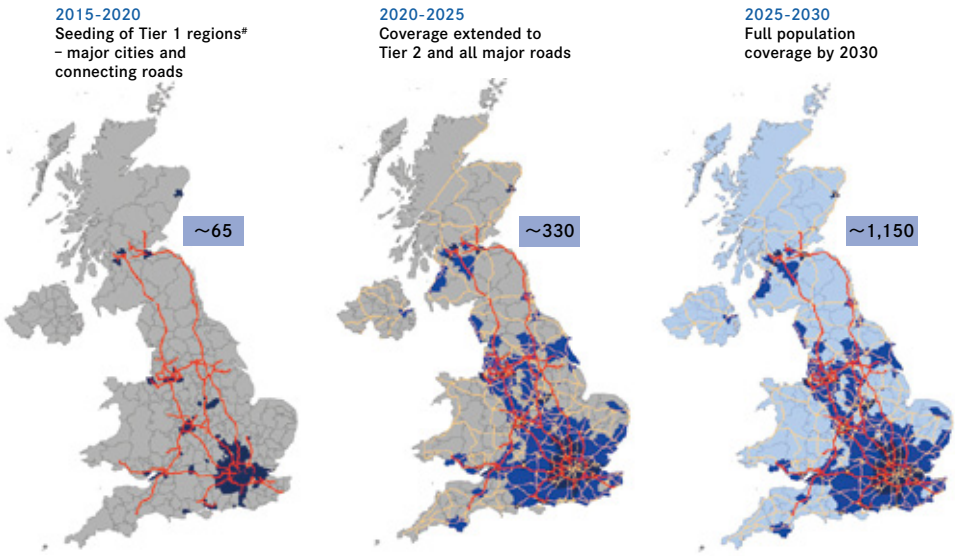


図 3-6　UK H2 Mobility におけるロードマップ

出典：UK H2 Mobility：phase 1 results より NEDO 作成

3-1-3　英国

英国は 3 つの省（運輸省、エネルギー・気候変動省、ビジネス・イノベーション・職業技能省）が連携して、水素エネルギーの実用化を目指している。特にエネルギー・気候変動省は、CO_2 削減の切り札としての水素エネルギーに注目している。

2012 年 1 月にはドイツの H2 Mobility をモデルに、英国内外の自動車メーカー、エネルギー会社とともに水素インフラ検討組織「UK H2 Mobility」を立ち上げた。この UK H2 Mobility には、我が国の自動車メーカー（トヨタ自動車、日産自動車）も参画している。

UK H2 Mobility は 2013 年 2 月にフェーズ 1 レポートを発表、2030 年には燃料電池自動車の販売台数が約 30 万台で、累積台数は 160 万台になると予測している。また、これを支える水素ステーション数は、2015 ～ 2020 年には 65 ヶ所、2020 ～ 2025 年には 330 ヶ所、2025 ～ 2030 年には 1150 ヶ所が必要としている（図 3-6）。

3-1-4　北欧諸国

ノルウェーは 2006 年より水素ハイウェイ計画「HyNor」を推進してきたが、当初その中心的役割を担ったのは国営石油会社の Statoil である。しかし Statoil が水素ビジネスから撤退したため、HyNor は計画を縮小、当面はオスロ地域に展開を集中することになった。

現在ノルウェーには 6 ヶ所の水素ステーションがある（うち 1 ヶ所は燃料電池バス専用）。なおノルウェーはその電力のほとんどを水力で賄っているため、水素ステーションの展開

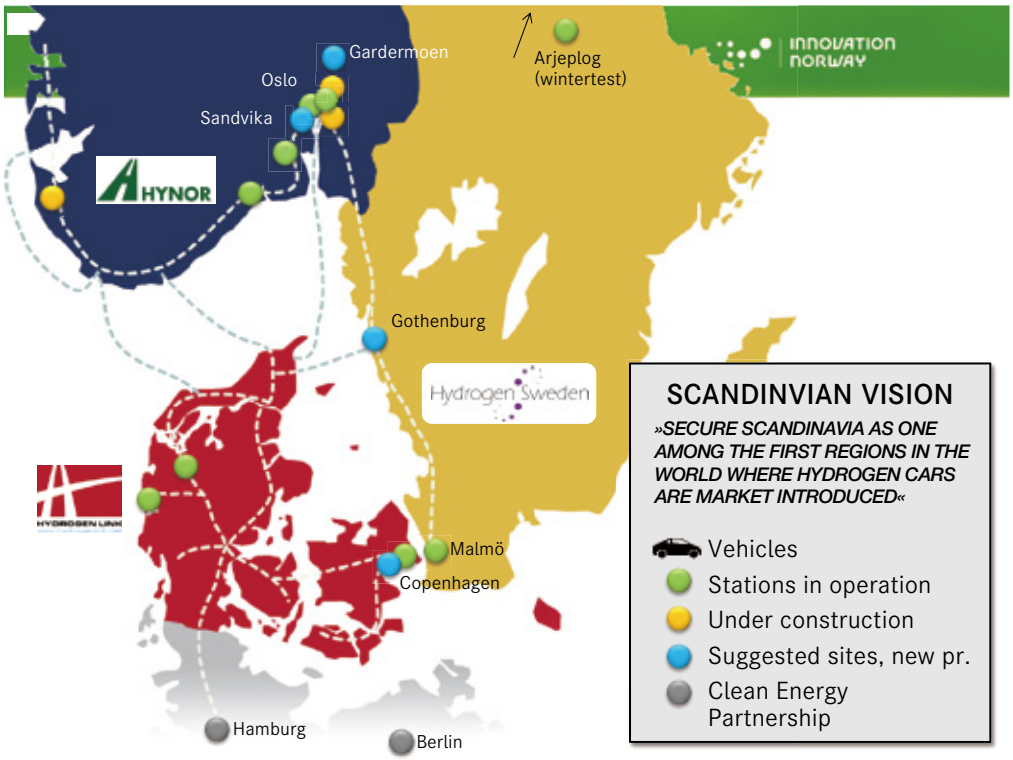


図 3-7　スカンジナビア水素ハイウェイ

出典：Sustainable energy —How Europe and Japan can work together より NEDO 作成

でも水電解を中心に考えている。

デンマークでは水素ハイウエイ計画「Hydrogen Link」を進めている。これはドイツと北欧と繋く要所としての位置付けである。現在、水素ステーションは 3 ヶ所（コペンハーゲン 1 ヶ所、西部デンマークに 2 ヶ所）が設置されているが、近い将来に 16 ヶ所まで増やす予定である。

スウェーデンは水素ハイウェイ計画「Hydrogen Sweden」を進めているが、現状で 2 ヶ所（マルメと北部スウェーデン）の水素ステーションしかない。しかし将来的には 10 ヶ所程度の設置を目指しているとされる。

これらのスカンジナビア諸国はスカンジナビア水素ハイウェイパートナーシップ（SHHP：Scandinavian Hydrogen Highway Partnership）を組み、連携して水素インフラ構築に進んでいる（図 3-7）。

2012 年 10 月には、この 3 ヶ国にアイスランドを加えた 4 ヶ国が、自動車メーカー（トヨタ自動車、本田技研工業、日産自動車、Hyundai）やインフラ会社と覚書を締結、2014 ～ 2017 年の燃料電池自動車導入を目指している。

3-1-5　フランス

フランスは、ドイツ、英国、北欧等の欧州各国と比較して、国家としての普及目標や政策はさほど明確ではなかった。

一方で、産業ガス大手の Air Liquide や石油会社の TOTAL などの企業は、海外（ドイツや米国）で水素ステーション展開を進めてきた（例えばドイツの CEP や H2 Mobility には、これらの企業が参画している）。これらの企業の意向もあり、欧州の FCH JU や IPHE の場での国際連携には継続的に参加していた。

ドイツが CEP や H2 Mobility の活動で水素ステーション整備計画や目標を発表し、また着実に水素ステーションの展開が始まったことにより、フランスの主要都市（パリ、リヨンなど）が、ドイツの燃料電池自動車の目的地となる可能性がでてきた。

従来よりフランスには、フランス水素協会（AFH2：Association Française de l'Hydrogène）が設立されていたが、この組織は学術学会に近いものであった（参加は個人）。2009 年に欧州燃料電池水素共同実施機構（FCH JU）に対応する形で、企業が主体的に参加するフランス水素燃料電池プラットフォーム（HyPaC：Plateforme technologique Hydrogène et piles à combustibles）が立ち上がった。両組織の参加者は重なるところも多く、2011 年には AFH2 が HyPaC を吸収する形でフランス水素燃料電池協会（AFHyPaC：French Association Française de l'Hydrogène et des Piles à combustibles）が誕生した。

2008 年に設置されたドイツの H2 Mobility や、2012 年に設置された英国の UK H2 Mobility の動きを受け、2013 年にフランス国内での水素インフラ整備を検討する Mobilité Hydrogène France（通称 H2 Mobility France）が AFHyPaC 傘下に設置された。参加企業・組織は当初は 25 で、最終的には 30 となっている。

H2 Mobility France はフランスの実情にあった水素インフラ整備を検討し、2014 年 10 月に、燃料電池自動車展開計画を発表している。この計画では、当面は業務用車両やタクシーを中心に燃料電池自動車を展開するとしている。初期普及には、フランス郵政公社（La Poste）がすでに導入している Renault 製電気自動車 Kangoo ZE を改良した HyKangoo で展開を行う計画である。HyKangoo は、Kangoo ZE の走行距離を伸ばすために、Symbio 製小型燃料電池（5 kW）を車載し、蓄電池に充電を行う EV レンジエクステンダーシステムである。

H2 Mobility France の特徴は、当面は HyKangoo のような業務用車両に特化し、水素ステーションは 70 MPa より低コストで導入が可能な 35 MPa で展開する点である。また、パリ、リヨン、マルセイユなどの主要都市に 1 箇所ずつ配備するとともに、ドイツやベルギーとの連結を想定した展開を計画している（図 3-8）。



図 3-8　フランスの水素ステーション整備計画

出典：H2 MOBILITÉ FRANCE　Study for a Fuel Cell Electric Vehicle national deployment plan

■ 3-1-6　欧州連合

欧州では、水素・燃料電池プロジェクトを推進する官民パートナーシップ「燃料電池水素共同実施機構（FCH JU：Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking）」が 2008 年に立ち上がった。2013 年までに 49 台の燃料電池バスと 37 台の燃料電池自動車が導入され、新規に 13 ヶ所の水素ステーションが設置された。現在、FCH JU の第二弾である「FCH2 JU」が 2014 ～ 2020 年の期間で実施されることになっている。

さらに 2013 年 1 月から、汎欧州交通ネットワーク整備計画（TEN-T：Trans-Europe Transport Network）の一環として、「交通用水素インフラ計画（HIT：Hydrogen

Infrastructure for Transport)」が開始された。この計画にはデンマーク、フランス、オランダ、スウェーデンが参加し、ドイツの CEP や H2 Mobility、英国の UK H2 Mobility を参考に水素インフラを構築することになっており、デンマークに 2 ヶ所（フレデリシア、オールボルグ)、オランダに 1 ヶ所（ロッテルダム）の水素ステーションが設置されることになっている。

また、2013 年 1 月には、交通分野でのクリーンエネルギーを推進する「交通クリーンパワーパッケージ（CPTP：Clean Power for Transport Package)」が採択され、現状で水素ステーションを有する国では 2020 年末までに水素インフラを全土に拡充することが定められている。

■ 3-1-7　韓国

韓国では、2010 年 12 月に大統領直轄組織であるグリーン成長委員会が「世界 4 強への跳躍：グリーンカー産業発展戦略と課題」を発表、2015 年には燃料電池自動車約 1 万台と水素ステーション 43 ヶ所、2020 年には約 10 万台と水素ステーション 168 ヶ所を目指すとしている。ただし、これらは前政権で掲げられた目標であり、現在見直しが進められている。

3-2　国際協調の取り組み

■ 3-2-1　国際エネルギー機関（IEA）実施協定

国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）はエネルギー分野における国際協力・諮問組織で、現在我が国を含め 28 ヶ国が加盟している。

図 3-9 に IEA の組織の概要を示す。IEA には複数の常設作業部会が設置されているが、その一つに「エネルギー研究技術委員会（CERT：Committee on Energy Research and Technology)」があり、エネルギー技術・市場の分析やロードマップの作成、国際協力の促進を行っている。

CERT 傘下には、現在約 40 の実施協定（Impleremnting Agreement）が設置されている。この実施協定は多国間エネルギー技術イニシアティブ（Multilateral Energy Technology Initiatives）とも呼ばれ、IEA で加盟国だけでなく非加盟国の研究者も参加して、特定の研究分野で国際協力・情報交換を実施している。

約 40 の実施協定のうち、水素・燃料電池分野に関係するのは以下の 2 つである。

・水素実施協定（HIA：Hydrogen Implement Agreement）
・先端燃料電池実施協定（AFCIA：Advanced Fuel Cell Implement Agreement）

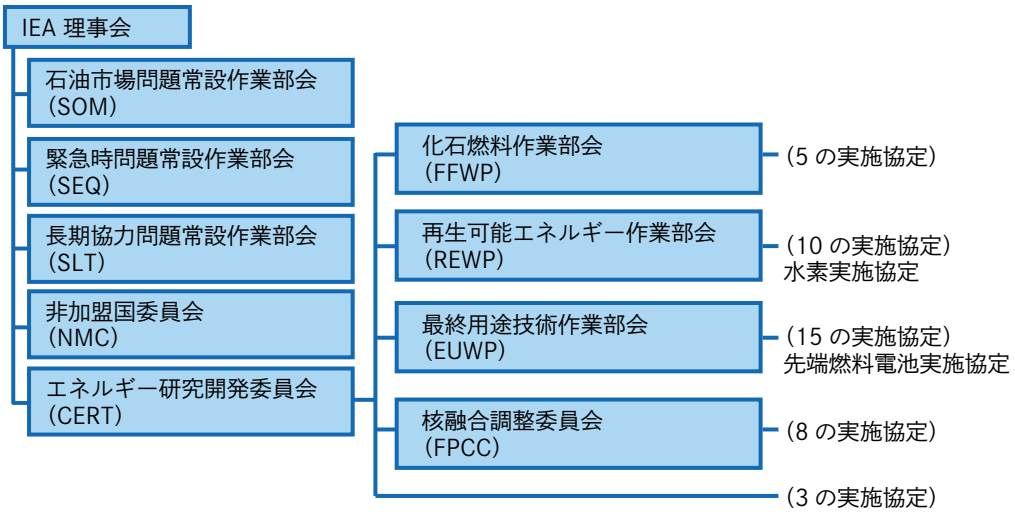


図 3-9　IEA の組織と実施協定の位置付け

出典：IEA のホームページなどより NEDO 作成

各実施協定の下には研究テーマごとに分科会が設置されており、我が国にとって有益と考えられるものについては、NEDO が専門家を派遣し、各国の専門家と直接的な意見交換を行っている。

(1)　水素実施協定（HIA）

水素実施協定（HIA）は、水素経済社会の実現に向け、研究開発の協調的推進、安全・環境を考慮した世界共通の水素関連情報の共有を目的として、再生可能エネルギー作業部会（REWP：Renewable Energy Working Party）の下に 1977 年に設立された。

2014 年 7 月現在、21 ヶ国・1 地域と 3 企業・機関（Shell、NOW、HySAFE）が加盟している（表 3-3）。また執行委員会（ExCo：Executive Committee）の下に 8 分科会（Task）が活動中である（表 3-4）。

(2)　先端燃料電池実施協定（AFCIA）

先端燃料電池実施協定（AFCIA）は、先進燃料電池分野に関する知見の前進と意見交換を目的として、最終用途作業部会（EUWP：End Use Working Party）の下に 1990 年に設立された。

2014 年 6 月現在、15 ヶ国が参加している（表 3-5）。また執行委員会の下に 7 分科会が活動中である（表 3-6）。現在、新規に水電解とモデリングの分科会の立ち上げが計画されている。

表 3-3　HIA 加盟国・地域

オーストラリア	イタリア	スペイン
デンマーク	ギリシャ	スウェーデン
欧州委員会	日本	スイス
フランス	韓国	英国
フィンランド	リトアニア	米国
ドイツ	オランダ	IA HySafe*
アイスランド	ニュージーランド	Shell*
イスラエル	ノルウェー	NOW*

出典：HIA ホームページ（*はスポンサーメンバー）

表 3-4　HIA における活動中の分科会（2013 年で終了し継続を検討しているものを含む）

分科会	検討内容	設置年
分科会 21	バイオ水素	2005 ～ 2013（後継検討中）
分科会 26	水の光分解水素製造	2008 ～ 2011（後継検討中）
分科会 28	大規模水素供給インフラ	2010 ～ 2014
分科会 29	分散型水素システム	2010 ～ 2014
分科会 30	グローバル水素システム分析	2010 ～ 2013（後継検討中）
分科会 31	水素安全	2010 ～ 2013（後継検討中）
分科会 32	水素によるエネルギー貯蔵	2013 ～ 2016
分科会 33	エネルギー用途のための水素供給	2013 ～ 2016

出典：HIA ホームページなどより NEDO 作成

3-2-2　国際水素燃料電池パートナーシップ（IPHE）

(1)　国際水素燃料電池パートナーシップ（IPHE）の枠組み

水素・燃料電池の普及促進を目指す政府政策交流会議として、「国際水素燃料電池パートナーシップ（IPHE：International Partnership for Hydrogen and Fuel Cell in the Economy）」が 2003 年 11 月に設立された。本会議体は、水素・燃料電池分野の研究・開発・実証・利用を効率的に進めるため、国際協調を促進することが目的である。現在 17 ヶ

表 3-5　AFCIA 加盟国

オーストラリア	ドイツ	メキシコ
オーストリア	イスラエル	スウェーデン
デンマーク	イタリア	スイス
中国	日本	英国
フランス	韓国	米国

出典：AFCIA ホームページ

表 3-6　AFCIA における活動中の分科会

分科会	検討内容	設置年
分科会 22	PEFC（固体高分子形燃料電池）	2009 ～ 2014
分科会 23	MCFC（溶融炭酸塩形燃料電池）	2009 ～ 2014
分科会 24	SOFC（固体酸化物形燃料電池）	2009 ～ 2014
分科会 25	定置用燃料電池システム	2009 ～ 2014
分科会 26	自動車用燃料電池システム	2009 ～ 2014
分科会 27	ポータブル用燃料電池システム	2014 ～ 2019
分科会 28	システム分析	2014 ～ 2017

出典：AFCIA ホームページ

国・1 地域が加盟しており、我が国は設立以来のメンバーである（表 3-7）。

IPHE は運営会議とその傘下に設置されたワーキンググループ（常設）とタスクフォースからなり、さらに各種のワークショップが開催されている。

(2)　運営会議

運営会議は毎年 2 回開催されており、各国の水素・燃料電池に関わる行政機関や研究機関が参加して直接意見交換を行っている。米国からは米国エネルギー省、ドイツからは連邦交通建設都市開発省、英国からはエネルギー・気候変動省が、中国からは科学技術部が参画しており、我が国からは資源エネルギー庁 燃料電池推進室が参加している。

運営会議では各メンバーからの水素燃料電池分野の最新の政策情報や研究開発実証の状況に関する報告（カントリーアップデート）や、ワーキンググループ活動の報告、さらに

表 3-7　IPHE 加盟国・地域

オーストラリア	フランス	韓国
オーストリア	ドイツ	ノルウェー
ブラジル	アイスランド	ロシア
カナダ	インド	南アフリカ
中国	イタリア	英国
欧州委員会	日本	米国

出典：IPHE ホームページ

テーマディスカッションが行われ、様々な国際連携を創出している。日本は水素エネルギー分野の先行国として、この国際連携活動において中心的な役割を果たしている。

(3)　ワーキンググループ

ワーキンググループとしては現在、教育ワーキンググループと規制・基準・標準ワーキンググループが設置されている。

教育ワーキンググループは、水素・燃料電池関連の教育を促進することが目的で、教育関連の情報の収集や、運営会議開催に合わせた教育ワークショップなどを実施している（図 3-10）。教育ワークショップでは運営会議開催地域の大学生や教育関係者と各国の政務関係者との意見交換の場を提供している。

規制・基準・標準ワーキンググループは、水素・燃料電池分野の国際的な基準・標準活動を補完する議論や活動を行っている。直近では、燃料電池自動車市販において欠かせない車載容器の性能試験に関連して、希望する国が共通の試験を行い、試験実施上の実務的な問題点の洗い出しと、試験方法の情報交換などが行われている。

(4)　IPHE ワークショップ

IPHE ワークショップはこれまでも各種行われており、その時勢における水素・燃料電池関連の政策的に重要なテーマについて政策立案者と企業・研究者が意見交換を行っている。これまでに開催された主要なワークショップを表 3-8 に示す。

なお、2011 年 3 月の定置用燃料電池ワークショップ（Workshop on Stationary Applications）と 2013 年 11 月の商用水素ステーションワークショップ（Commercially-ready Hydrogen Refueling Stations）は NEDO が主催したものである。

表 3-8　IPHE ワークショップ

開　催	内　　容
2010 年 2 月 （米国 サクラメント）	**IPHE Infrastructure Workshop** ・水素インフラ整備における課題を抽出（主に米国市場が対象）
2010 年 6 月 （ドイツ ウルム）	**Workshop on E-Mobility** ・電気自動車と燃料電池自動車の棲み分けと政策的両立に関する議論を実施
2010 年 9 月 （中国 上海）	**International Hydrogen Fuel Cell Technology and Vehicle Development Forum** ・各国の燃料電池自動車の開発状況、デモンストレーションの情報を共有
2011 年 3 月 （日本 東京）	**Workshop on Stationary Applications** ・各国の定置用燃料電池の現状と市場展開のための課題を整理
2012 年 11 月 （スペイン セビリア）	**Hydrogen —A competitive Energy Storage Medium for large scale integration of renewable electricity** ・Power-to-Gas（水素による再生可能エネルギーの水素貯蔵）を多様なエネルギー貯蔵技術と比較 ・Power-to-Gas に関する政策的課題を抽出
2013 年 11 月 （日本 福岡）	**Commercially-ready Hydrogen Refueling Stations —Design and Social Acceptance** ・商業用水素ステーションの技術的課題の抽出 ・水素の社会受容性に関する課題の抽出
2014 年 12 月 （イタリア ローマ）	**A smart role for fuel cell and hydrogen in creating liveable cities** ・スマートシティ／スマートコミュニティにおける水素・FC の展開の可能性に関する意見交換

出典：各種資料より NEDO 作成

3-3　水素エネルギーに係る国際会議

3-3-1　世界水素エネルギー会議（WHEC）・世界水素技術会議（WHTC）

世界水素エネルギー会議（WHEC：World Hydrogen Energy Conference）と世界水素技術会議（WHTC：World Hydrogen Technologies Conventions）は、ともに国際水素エネルギー協会（IAHE：International Association for Hydrogen Energy）が主催する水素エネルギー全般に関する国際会議であり、世界の水素エネルギー関係者約 1,000 名を集め

表 3-9　世界水素エネルギー会議（WHEC）・世界水素技術会議（WHTC）の開催

年	開　催	場　　所
2010 年	第 18 回 WHEC	ドイツ エッセン
2011 年	第 4 回 WHTC	英国 グラスゴー
2012 年	第 19 回 WHEC	カナダ トロント
2013 年	第 5 回 WHTC	中国 上海
2014 年	第 20 回 WHEC	韓国 光州
2015 年	第 6 回 WHTC	オーストラリア シドニー（予定）
2016 年	第 21 回 WHEC	スペイン サラゴサ（予定）
2017 年	第 7 回 WHTC	チェコ プラハ（予定）
2018 年	第 22 回 WHEC	ブラジル リオ・デ・ジャネイロ（予定）
2019 年	第 8 回 WHTC	日本 東京（予定）
2020 年	第 23 回 WHEC	デンマーク コペンハーゲン（予定）

出典：国際水素エネルギー協会（International Association for Hydrogen Energy）ホームページより NEDO 作成

る会議となっている。表 3-9 に示すように偶数年に WHEC が、奇数年に WHTC が開催されている（ただし WHTC は 2005 年から開催）。本来的には WHEC が学術会議で WHTC が技術交流・展示会であったが、近年は WHEC でも技術展示を行うようになってきている。

なお 2004 年 6 月には第 15 回 WHEC が横浜で開催された。主催は我が国の水素エネルギー協会（HESS）と NEDO、共催は燃料電池開発情報センター（FCDIC）であった。また、2019 年には WHTC が日本で開催される予定となっている（表 3-9）。

3-3-2　Fuel Cell Seminar & Energy Exposition

Fuel Cell Seminar & Energy Exposition は、米国で開催される水素・燃料電池分野の国際会議・展示会としては最大のものである。毎年 10 ～ 11 月に開催している。

1976 年に第 1 回を開催しており、この分野では草分け的存在である。隔年で開催されていたが、2002 年から毎年開催となっている（表 3-10）。2002 ～ 2005 年には 2,000 人超の参加者が集まり、最近でも 1,500 人前後の参加人数を集めている。研究発表は比較的米国のものが多い。

比較的ネットワーキングの要素が強く、本分野の研究者の交流の機会を提供している。また米国エネルギー省以外の組織（国防省など）が支援している研究開発の発表も多い。

表 3-10　Fuel Cell Seminar & Energy Exposition の開催

年	場　　所
2010 年 10 月 18 ～ 21 日	テキサス州 サンアントニオ
2011 年 10 月 31 日～ 11 月 3 日	フロリダ州 オーランド
2012 年 11 月 5 ～ 8 日	コネチカット州 アンカスビル
2013 年 10 月 21 ～ 24 日	オハイオ州 コロンバス
2014 年 11 月 10 ～ 13 日	カリフォルニア州 ロサンゼルス

出典：Fuel Cell Seminar & Energy Exposition ホームページより NEDO 作成

表 3-11　国際水素安全会議（ICHS）の開催

年	開　　催	場　　所
2005 年	第 1 回 ICHS（欧州連合プロジェクト）	イタリア ピサ
2007 年	第 2 回 ICHS（欧州連合プロジェクト）	スペイン サン・セバスティアン
2009 年	第 3 回 ICHS（欧州連合プロジェクト）	フランス コルシカ島
2011 年	第 4 回 ICHS	米国 サンフランシスコ
2013 年	第 5 回 ICHS	ベルギー ブリュッセル
2015 年	第 6 回 ICHS	日本（予定）

出典：HySAFE ホームページより NEDO 作成

3-3-3　国際水素安全会議（ICHS）

国際水素安全会議（ICHS：International Conference on Hydrogen Safety）は 2005 年から隔年で開催されている水素安全に特化した専門家会議である。

当初は、欧州連合第 6 次フレームワークプログラム傘下の水素安全に関する研究交流ネットワークプロジェクト「Network of Excellence HySafe」が実施する国際会議であったが、プロジェクトの終了後も水素安全分野で世界的に研究交流を続けていくために、国際 NPO「International Association HySafe」が設立され、ICHS を継続している（表 3-11）。

2015 年には日本での開催が予定されている。

第 4 章

水素エネルギーの市場の現状と展望

水素をエネルギーとして利用する家庭用燃料電池、業務・産業用燃料電池、燃料電池自動車や水素を供給する水素インフラについて種々の開発が進められてきている。本章ではこれらの開発の現状について、また、水素の需要供給バランス、水素コスト、規制がどのような状況かについて述べる。

4-1　水素市場の展望

水素エネルギーの市場は、現在は家庭用燃料電池システムなどの定置用燃料電池が中心であるが、燃料電池自動車の導入と水素ステーションの整備により初期市場が形成され、その後、これらの本格的な普及や、水素を利用した発電の導入により、大きく拡大することが期待される。その規模は、第 1 章でも述べたとおり、国内では 2030 年に 1 兆円程度、2050 年に 8 兆円程度である。また日経 BP クリーンテック研究所は、世界の水素インフラの市場規模は、2020 年には 10 兆円を超え、2030 年には 40 兆円弱、2040 年には 80 兆円、2050 年には 160 兆円になると予測している（図 4-1）。

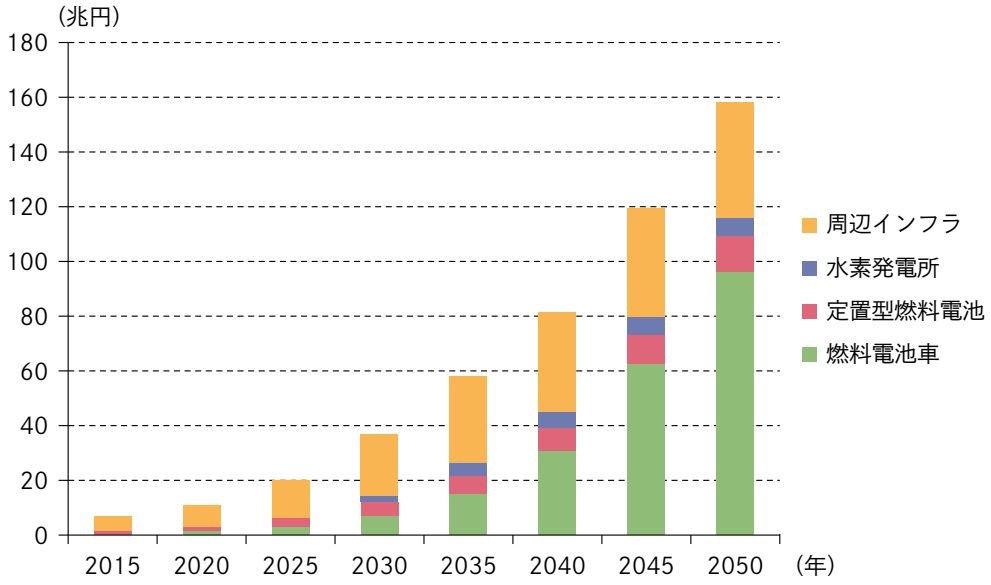


図 4-1　世界水素インフラ市場規模予測

出典：日経 BP クリーンテック研究所「世界水素インフラプロジェクト総覧より NEDO 作成

4-2　定置用燃料電池

■ 4-2-1　家庭用燃料電池（エネファーム）

(1)　メーカーと NEDO の取り組み

家庭用燃料電池の開発として、燃料電池をパッケージ化する取り組みが 1990 年頃から盛んになり、1990 年台前半に当時の三洋電機で、水素吸蔵合金内蔵タンクを活用した 250 W のリン酸形燃料電池（PAFC）ポータブルシステム、水素ボンベを搭載した 1 kW 固体高分子形可搬電源システムが開発された。松下電工では、ブタンカセットを燃料とした 250 W の固体高分子形ポータブル電源システムが開発された。

1990 年台後半には、電機メーカー各社（三洋電機、松下電器産業、松下電工、東芝）が中心となった家庭用燃料電池システムのパッケージ化開発が進められた。

1999 年からは NEDO 助成事業により実証運転が開始された。ガス事業者が中心となり、パッケージシステムの運転評価を実施した。東京ガスは同社田町研究所において松下電器産業製システムを、大阪ガスは実験集合住宅 NEXT21 において三洋電機製システムを、東邦ガスは技術研究所内の実験住宅において松下電工製システムを用い、それぞれ実証試験を実施した。

東芝燃料電池システム機
（PEFC）



定格出力	700W	
定格発電効率（LHV）	38.5％以上（都市ガス）	37.5％以上（LP ガス）
総合効率（LHV）	94％以上	
販売日	2012 年 3 月	
サイズ（mm）	FC ユニット：W780×D300×H1,000 貯湯ユニット：W750×D440×H1,760（200ℓ）	

パナソニック機
（PEFC）



定格出力	750W
定格発電効率（LHV）	39％
総合効率（LHV）	95％
販売日	2013 年 4 月
サイズ（mm）	FC ユニット：W400×D400×H1,850 貯湯ユニット：W560×D400×H1,850（147ℓ）

JX 日鉱日石エネルギー機
（SOFC）



定格出力	700W
定格発電効率（LHV）	45％
総合効率（LHV）	87％
販売日	2011 年 10 月
サイズ（mm）	FC ユニット：W563×D302×H900 貯湯ユニット：W740×D310×H1,760（90ℓ）

アイシン機
（SOFC）



定格出力	700W
定格発電効率（LHV）	46.5％
総合効率（LHV）	90％
販売日	2012 年 4 月
サイズ（mm）	FC ユニット：W600×D335×H935 貯湯ユニット：W740×D310×H1,760（90ℓ）

図 4-2　各社の家庭用燃料電池システム（エネファーム）

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ワーキンググループ（2014 年 2 月 3 日）【参考資料［3］】より NEDO 作成

固体高分子形燃料電池（PEFC）システムに関しては、2002 年度からは実証研究、2005 年度からは計 3,307 台による大規模実証試験が行われ、我が国における家庭用燃料電池の発電出力としては 0.7 kW 程度が適当であるとの示唆が得られた。これらの結果を踏まえ、2009 年 1 月にエネルギー事業者 6 社（東京ガス、大阪ガス、東邦ガス、西部ガス、新日本石油、アストモスエネルギー）によって、家庭用燃料電池「エネファーム」として固体高分子形燃料電池（PEFC）システムの販売が開始された。

固体酸化物形燃料電池（SOFC）システムに関しては、2007 年度から 2010 年度にかけて、京セラ、トヨタ自動車／アイシン精機、新日本石油などの計 233 台を用いた実証研究が行われ、実使用環境下においても高い発電効率と優れた負荷追従性を実証した。

この成果を踏まえて、2011 年には、JX 日鉱日石エネルギーより世界最初の家庭用固体酸化物形（SOFC）システム「エネファーム typeS」が発売された。2012 年には大阪ガスよりアイシン精機製システムの販売が開始され、家庭用燃料電池システムとして世界最高水準（2012 年 3 月時点）の発電効率を実現している。

2014 年 12 月時点で、エネファームは 4 社が市場に商品を提供している（図 4-2）。2011 年 3 月に発生した、東日本大震災の教訓を受け、停電時にも発電を継続できる自立運転機能付きエネファームも 2014 年度から市場投入されている。

(2)　マンション用エネファームの販売開始

これまでのエネファームは戸建住宅用であったが、東京ガスとパナソニックはマンション向けのエネファームを共同で開発し、2014 年 4 月に発売を開始した（図 4-3）。



商品外観（パイプシャフト内設置時）
パイプシャフトの扉を開いた状態



パイプシャフトの扉を閉じた状態

図 4-3　集合住宅向けエネファームの設置イメージ

出典：東京ガス、パナソニック

戸建て住宅よりも設置の制約が多い集合住宅において、機器本体の機密性を高めるなどの対策を施し、本体、貯湯ユニット、バックアップ熱源機をパイプシャフト内に設置できる仕様としている。

(3)　エネファーム出荷台数の推移

2013 年度のエネファーム出荷台数は、固体高分子形燃料電池（PEFC）システムが 32,431 台、固体酸化物形燃料電池（SOFC）システムが 1,434 台であり、2014 年 9 月には、10 万台を突破した（図 4-4）。

2009 年の市場投入当初は 300 万円程度であったユーザー負担額（設置工事費込み）は、国の補助金制度も含め、現在、概ね 150 万円程度にまで半減している。

(4)　家庭用燃料電池システム市場の見通し

家庭用燃料電池システムについては、2020 年に 140 万台、2030 年に 530 万台（全世帯の約 1 割）を普及させることを政府の目標としている（「日本再興戦略」2013 年 6 月閣議決定）。この目標の達成に向けて、コストの低減が不可欠であり、「水素・燃料電池戦略ロードマップ」において、家庭用燃料電池のエンドユーザーの設置工事費込みの負担額について、2020 年には 7、8 年で投資回収可能な金額を、また 2030 年には 5 年で投資回収可能な金額を目指すとしている。

この家庭用燃料電池システムについては、日本の市場が世界を牽引しているが、今後欧州においても市場の創出が期待され、2025 年には世界で約 1.1 兆円の市場となる民間試算もある（図 4-5）。

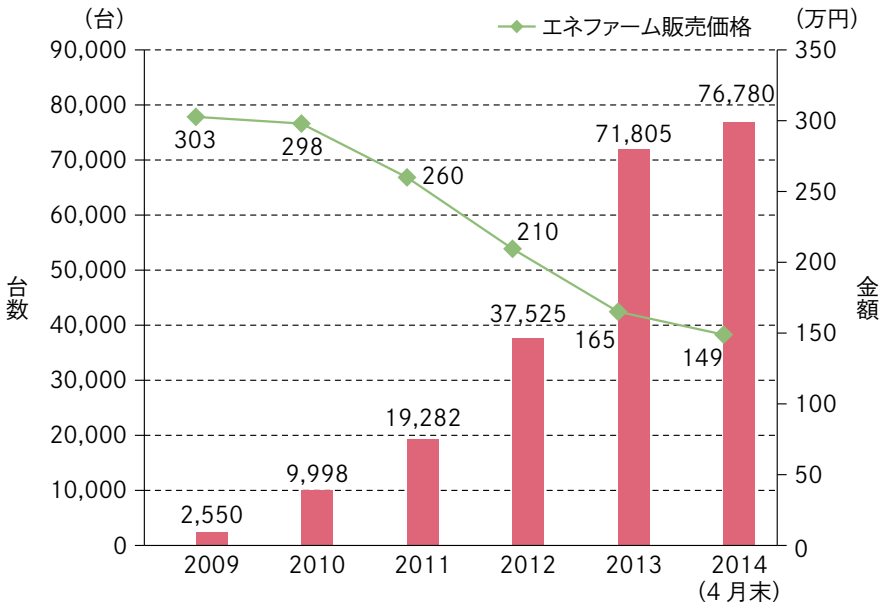


図 4-4　家庭用燃料電池システム（エネファーム）の価格・普及台数推移

出典：経済産業省「水素・燃料電池戦略ロードマップ」より NEDO 作成

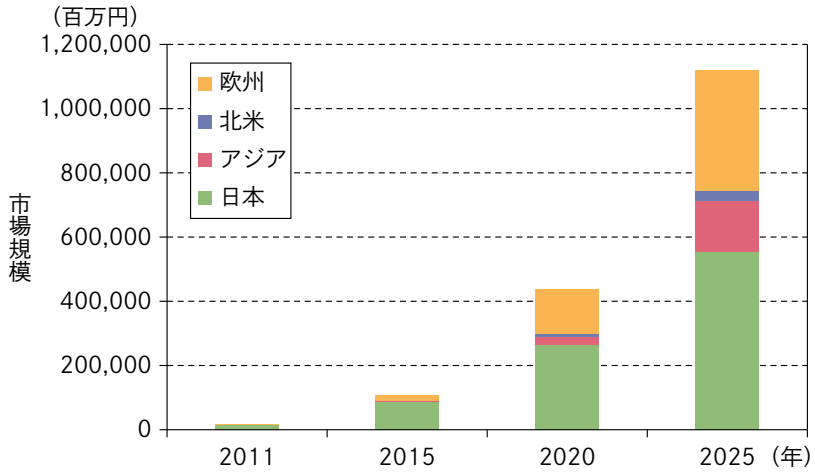


図 4-5　家庭用燃料電池システム世界市場見通し

出典：2013 年度版燃料電池関連技術・市場の将来展望（富士経済）より NEDO 作成

4-2-2　業務・産業用燃料電池

(1)　市場の現状

業務・産業用燃料電池としてリン酸形燃料電池（PAFC）、固体酸化物形燃料電池（SOFC）、溶融炭酸塩形燃料電池（MCFC）が検討されている。

リン酸形燃料電池（PAFC）については、富士電機が 1998 年に業務・産業用として 100 kW システムの販売を開始し、これまでに 42 台が導入されている（図 4-6）。同社は、2012 年 3 月には Daimler から受注し海外への販売も開始している。

固体酸化物形燃料電池（SOFC）については、2013 年、Bloom Energy とソフトバンクが、固体酸化物形燃料電池を日本市場に投入するため合弁会社ブルーム・エナジー・ジャパンを設立。同年 11 月には、第 1 号案件となる商用ビル（福岡市）に設置された燃料電池の運転が開始され、現在までに合計 3 台が導入されている。なお、Bloom Energy は米国において、Google、Apple、本田技研工業、Wal-mart、Nokia、AT&T、eBay、Bank of America などをはじめとする多数の企業の他、データセンター、病院、銀行、市庁舎などへ、累計 100 MW 超の導入実績がある。

溶融炭酸塩形燃料電池（MCFC）については、日本において商品化はされていないが、韓国においては国の政策の下、導入が進められている。

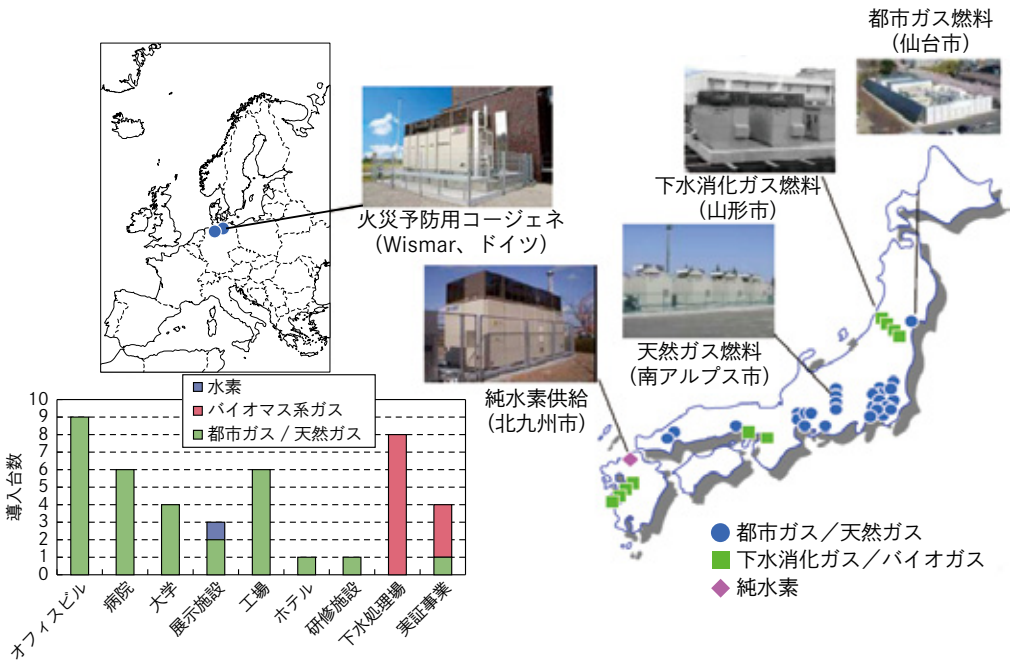


図 4-6　富士電機リン酸形燃料電池の導入状況

出典：富士電機資料
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

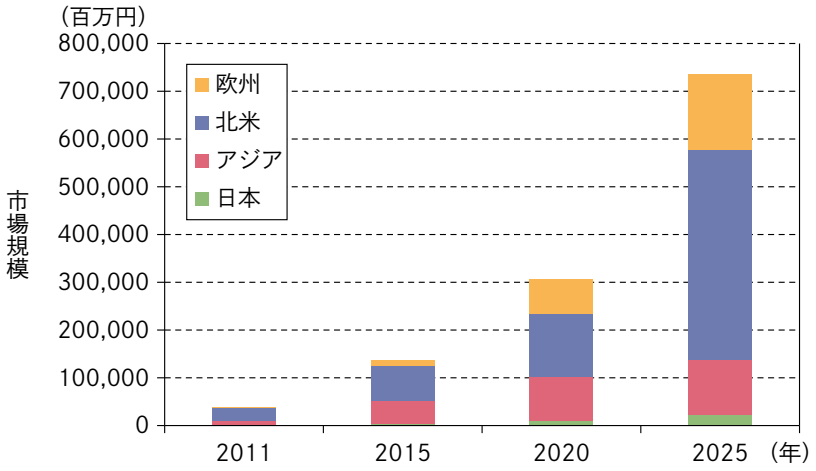


図 4-7　業務・産業用燃料電池システム世界市場見通し

出典：2013 年度版燃料電池関連技術・市場の将来展望（富士経済）より NEDO 作成

(2)　今後の見通し

業務・産業用燃料電池については、既に実用化されているリン酸形燃料電池に続き、2017 年には発電効率が比較的高い固体酸化物形燃料電池の市場投入を目指すこととしており（「水素・燃料電池戦略ロードマップ」）、NEDO 事業による実証研究が進められている。

業務・産業用燃料電池の世界市場は、北米において市場拡大が先行し、国の政策として燃料電池による発電事業を進める韓国が続いている。業務・産業用燃料電池の 2025 年の市場規模は、日本で 226 億円と試算されている一方、諸外国では約 7,000 億円との試算もある（図 4-7）。

4-3　燃料電池自動車

(1)　市場の現状

現在、国内においてはトヨタ自動車、本田技研工業、日産自動車が燃料電池および燃料電池自動車の開発を行っている。

トヨタ自動車は 1992 年に開発を開始し、1996 年 10 月に水素貯蔵方法として水素吸蔵合金を用いた燃料電池自動車を一般に公開後、2002 年 12 月に国内でリースを開始、2005 年 7 月には型式認証を取得した。2008 年 6 月には氷点下始動性を大幅に向上させた FCHV-adv の発表を行っている。トヨタ自動車は開発当初から自社開発の燃料電池を搭載しているが、燃料電池自動車の発表に合わせて燃料電池の小型・高性能化の改良が図られ、最新

型の燃料電池自動車に搭載された燃料電池システムは、単位容積あたりの発電出力が 3.1 kW/L に達しており、開発当初に比べ大幅な性能向上が図られている。さらに、2013 年 10 月の東京モータショーにて新しい燃料電池自動車のコンセプトカー「FCV Concept」を発表し、2014 年 12 月 15 日には燃料電池自動車「MIRAI」の一般販売を開始した。この価格は約 723 万円であり、経済産業省の購入補助金 202 万円を加味すると約 521 万円となる。

本田技研工業は 1999 年に自社開発の燃料電池を搭載したメタノール改質型燃料電池自動車と Ballard Power Systems の燃料電池を搭載し水素吸蔵合金を水素貯蔵材として用いた直接水素型の燃料電池自動車をそれぞれ発表した。2000 年には Ballard Power Systems の燃料電池を用い、4 人乗車可能な直接水素型燃料電池自動車を開発し、北米のカリフォルニア州の CaFCP に参加した。2001 年に航続距離を 180 km から 300 km に向上させた燃料電池自動車を開発した。さらに、2002 年には自社開発の燃料電池を搭載した改良型の燃料電池自動車を開発し 2002 年 12 月にはトヨタ自動車と同時に国内のリース販売を開始した。2003 年には－20℃からの起動が可能な燃料電池自動車を発表している。2006 年に 9 月に FCX Concept の発表を行い、2007 年には FCX クラリティを発表し、リースを開始した。さらに、2013 年 12 月のアメリカのロサンジェルスモータショーにて FCEV Concept を発表し、2014 年 11 月 17 日には、このコンセプトカーをベースとした市販車を 2015 年度内に市販すると発表した。

日産自動車は 2001 年に、Ballard Power Systems の燃料電池を用いた直接水素形燃料電池自動車を発表した。その後、米国 UTC-FC の燃料電池を搭載した燃料電池自動車を 2002 年に、UTC-FC と共同開発した燃料電池を搭載した燃料電池自動車を 2003 年に発表した。2005 年には自社開発した燃料電池を搭載した燃料電池自動車を発表した。2008 年、2010 年には性能向上・小型化を図った新しい自社開発の燃料電池を発表している。

(2)　今後の見通し

燃料電池自動車の普及拡大のカギとなる燃料電池システムのコストについて、「水素・燃料電池戦略ロードマップ」では 2020 年頃に市場投入されるモデルでは、2015 年に販売されるものと比較して半減、2025 年頃にはさらに半減することを目標としている。また燃料電池の適用分野の拡大のため、2016 年には燃料電池バスが市場投入される見通しである。

この燃料電池自動車を含む次世代自動車の普及台数に関する政府の目標は、「2030 年までに次世代自動車の新車販売に占める割合を 5 割から 7 割とすること」（「日本再興戦略」平成 25 年 6 月）としている。

燃料電池自動車の世界市場は、日本と欧州において立ち上がり、2020 年以降急速な拡大が見込まれており、2025 年における市場規模は、日本において約 1 兆円、世界では約 3 兆円との試算もある（図 4-8）。

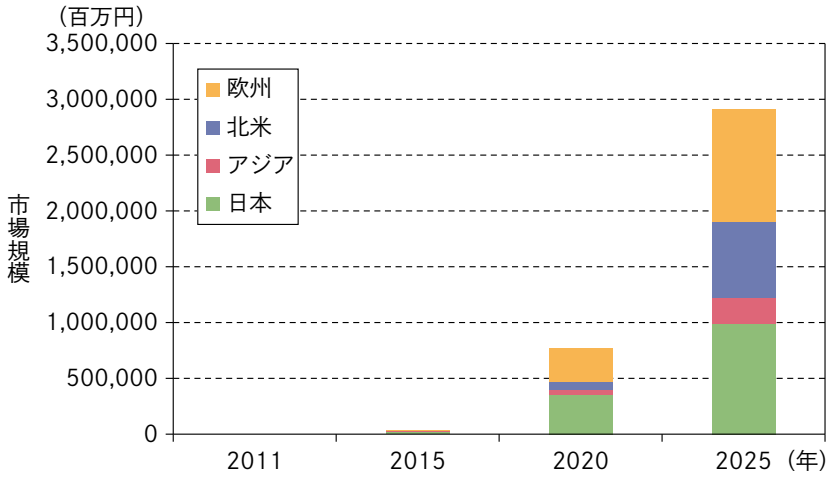


図 4-8　燃料電池自動車世界市場見通し

出典：2013 年度版燃料電池関連技術・市場の将来展望（富士経済）より NEDO 作成

4-4　水素供給インフラ

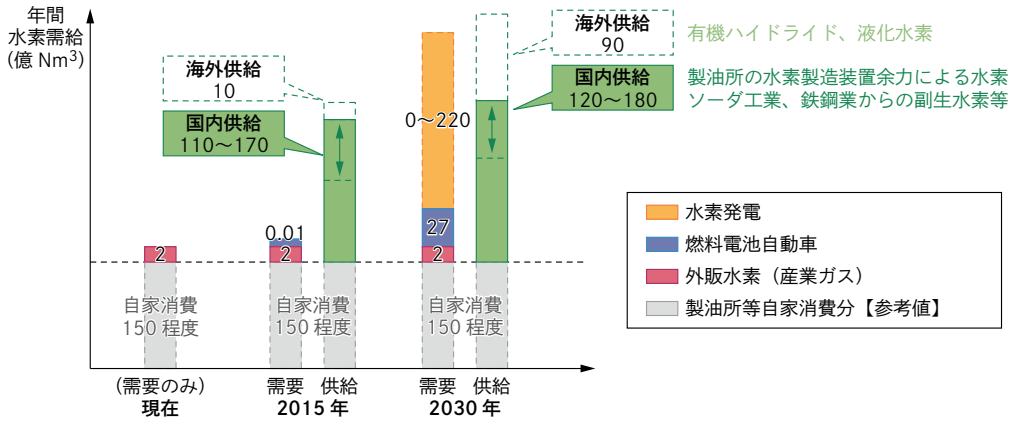
4-4-1　水素供給の見通し

現在、国内の水素供給は 150 億 Nm^3 程度であり、その大半は製油所における脱硫プロセスや工場におけるボイラーなどの燃料として自家消費されており、産業ガスとして外販されている水素は 2 億 Nm^3 程度にとどまっている。

しかしながら、製油所の水素製造装置を用いた追加的な水素製造や、苛性ソーダ製造に伴って発生する副生水素の外販、さらには追加的に導入される水素製造設備による水素製造などによって、2030 年頃の追加の供給ポテンシャルは 120 ～ 180 億 Nm^3 程度になるとの試算がある（図 4-9）。

この追加的な水素供給量は、燃料電池自動車換算で 900 万～ 1,300 万台程度であることから、当面の間は国内の水素供給能力で対応可能とも考えられる。

しかし、水素発電が現実化すると、より大きな水素需要が発生することになる。仮に 2030 年までに新設・リプレースされる LNG 火力発電に 50％の水素が混合された場合（混焼）、水素需要は最大で 220 億 Nm^3 が必要になり、我が国の供給ポテンシャルを超過する可能性があるとの試算もある。



（※1）外販水素（産業ガス）の主な用途は、半導体生産や金属熱処理等であり、2030 年までの需要量に大きな変化はないと仮定。
（※2）FCV は、2015 年に 1000 台、2030 年に 200 万台普及すると仮定。
（※3）水素発電は、水素と LNG の混焼によるものであり、2015 年時点での導入は想定せず、今から 2030 年までに新設・リプレースされる LNG 火力発電に最大で 50％の水素が混合されると仮定。

図 4-9　水素需給ポテンシャル（試算の一例）

出典：みずほ情報総研
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

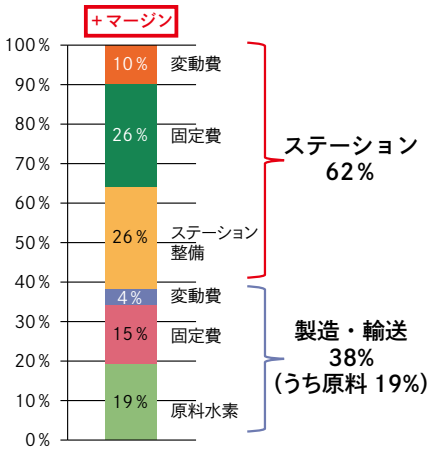
4-4-2　水素コスト

現状では燃料電池自動車向け水素のコストの約 6 割を水素ステーションの整備・運営費が占めている（図 4-10）。また、水素ステーションの稼働率の高低によって水素コストは大きく変動することから、市場初期の稼働率が低い期間の水素ステーションを如何に下支えし、稼働率を如何に早期に高めていくかが重要となる（図 4-11）。

今後、水素発電の導入により、安定的かつ大規模な水素需要が生じ、これに対応するための大規模な水素サプライチェーンが構築されることによって水素コストが下がり、燃料電池自動車などの他の水素利活用分野への波及効果も期待される。

水素の製造方法の違いによる、水素製造コストの違いを表 4-1 に示す。副生水素や既存設備を使った石油精製からの製造コストがほぼ同程度のコストである。また、電力料金、化石燃料価格などの上昇などに伴い、現在ではコストが高くなっているものもあると推定される。

2010 年に作成した NEDO 燃料電池・水素技術ロードマップ 2010 では、水素供給コストの目標として 2015 年頃で 90 円/Nm^3、2020 年頃で約 60 円/Nm^3、2030 年頃で約 60 ～ 40 円/Nm^3 と提示している。この目標値は、2010 年当時の LNG 価格、ガス価格、電気代など及び水素ステーション設置コストの現状値、予測値を用いて試算した値となっている。



＊稼働率を 100％としたときのコスト構造（≠価格）

図 4-10　水素コスト構造（ナフサ改質）

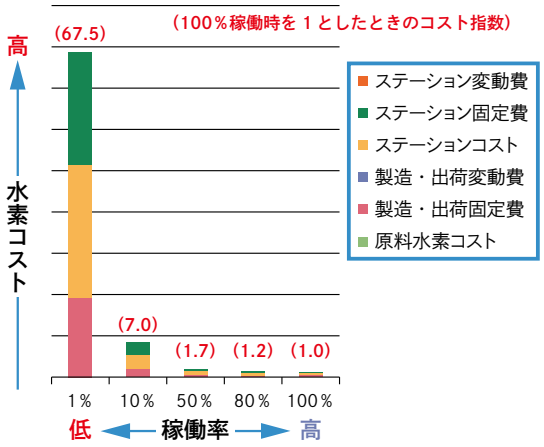


図 4-11　燃料電池自動車向け水素のコストと稼働率

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

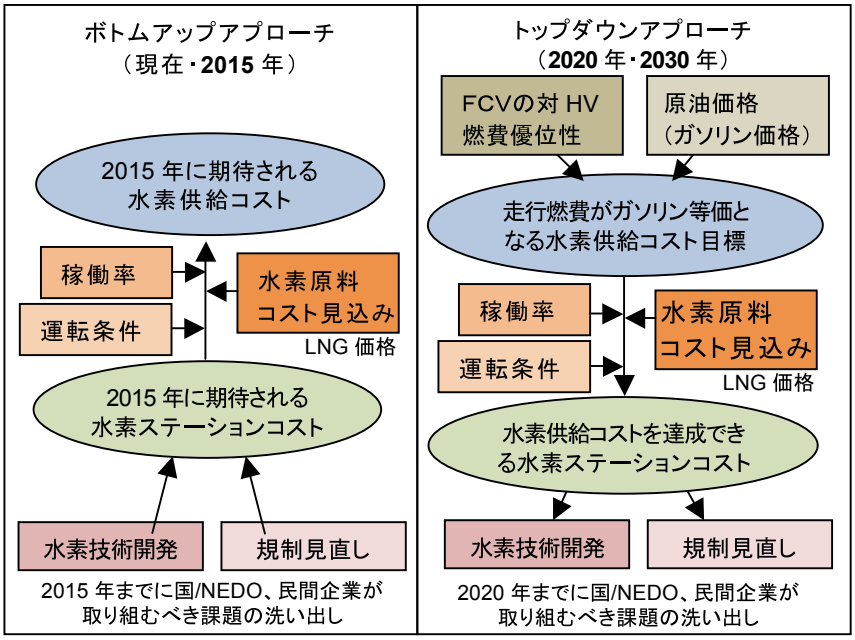


図 4-12　NEDO 燃料電池・水素技術ロードマップ 2010 における水素コストの考え方

出典：NEDO 燃料電池・水素技術ロードマップ 2010

表 4-1　各種製造法の違いと製造コストの関係

		製造コスト (円/Nm^3)	備　　考
副生水素	苛性ソーダ	20	・各種資料からの引用であり、詳細は不明。
	鉄鋼	24 ～ 32	・各種資料から 12 ～ 20 円/Nm^3。 ・「水素社会における水素供給者のビジネスモデルと石油産業の位置付けに関する調査報告書」（石油産業活性化センター、平成 15 年）では 16.3 円/Nm^3 であるが、最新のエネルギー価格に基づくと 28.1 円/Nm^3 となり、上記の価格に比べ 12 円の上昇。
	石油化学	20	・各種資料からの引用であり、詳細は不明。
目的生産（既存設備）	石油精製	23 ～ 37	・各種資料から 10 ～ 24 円/Nm^3。 ・「水素社会における水素供給者のビジネスモデルと石油産業の位置付けに関する調査報告書」（石油産業活性化センター、平成 15 年）では 11.1 円/Nm^3 であるが、最新のエネルギー価格に基づくと 23.7 円/Nm^3 となり、上記の価格に比べ 13 円の上昇。
	アンモニア	N.A.	
目的生産（新規設備）	化石燃料等改質	31 ～ 58 (※)ランニングのみ	・改質器の設備費などは含まない。 ・改質効率を 70％と想定。 ・都市ガス（工業・商業用）1.7 円/MJ、A 重油 1.4 円/MJ、LPG2.9 円/MJ、ナフサ 1.8 円/MJ。 ・PSA 用電力は 0.33kWh/Nm^3-H2。2012 年の電力平均単価 16.5 円/kWh。
	水電解	84 （系統電力） 76 ～ 136 （風力～太陽光） (※)ランニングのみ	・電解装置の設備費などは含まない。 ・電解効率を 70％と想定。 ・系統電力は 2012 年の電力平均単価 16.5 円/kWh。 ・調達価格算定委員会資料に基づき、風力発電は 30 万円/kW、太陽光は 10kW 以上を 29 万円/kW、10kW 未満を 38.5 万円/kW とし、コストなど検証委員会の手法により発電単価を推計すると、各々 14.9 円/kWh、23.6 円/kWh、26.8 円/kWh。 ・水素製造は発電サイトでの電解を想定していることから、送電コストは含まない。

(※)過去の各種調査より抜粋しており、必ずしも同じ前提に従って計算されたものではない。

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］】

試算方法としては、2015 年頃の目標値は水素ステーションコストから水素供給コストを計算するボトムアップアプローチ、2020 年頃の目標値は、燃料電池自動車の燃費優位性も考慮した上でガソリン等価となる水素供給コストを求め、その水素供給コスト目標から水素ステーションコストを求めるトップダウンアプローチを用いている（図 4-12）。

今後、最新の各種原料価格及び水素ステーションの設置コストをベースに、経済産業省の「水素・燃料電池戦略ロードマップ」に記載された 2020 年頃、2025 年頃のマイルストーンに即した形で水素供給コストの試算を行っていく必要がある。

4-5　水素ステーション

■ 4-5-1　現状

我が国としては、現在、四大都市圏を中心に 2015 年度内に 100 ヶ所程度の水素ステーションを展開することを目指している。

現在の水素ステーションの整備費は 4 ～ 5 億円程度（供給能力 300 Nm^3/h の固定式ステーションの場合）であり、一般的なガソリンスタンド（整備費 1 億円程度）と比べると、非常に高額となっている（図 4-13）。

規模や仕様が異なるため単純な比較が困難であるが、同一の水素供給能力で比較した場合、我が国のステーションは欧米の水素ステーションより 1.5 億円高いとの試算がある（表 4-2）。

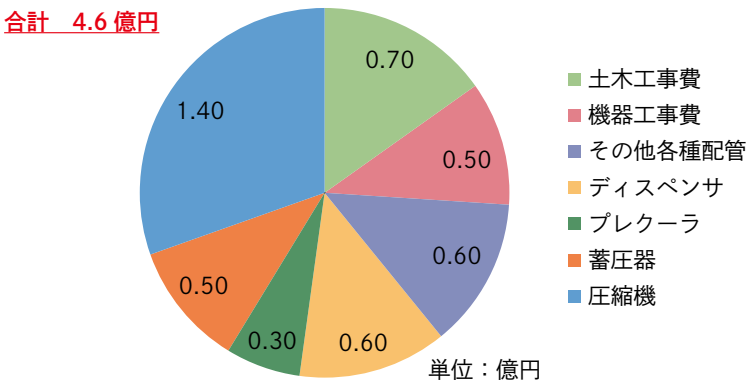


図 4-13　水素ステーションの整備費の内訳
（2013 年度水素供給設備整備補助金申請額の平均値）

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］】より NEDO 作成

表 4-2　水素ステーションの構成機器に関する日本と欧州の比較

※水素供給能力を 340 Nm^3/h に揃えた場合（単位：億円）

費目	日本	欧州		差異の理由
圧縮機	1.3	0.8	−0.5	・欧州は量産を見込んだ価格設定 ・使用材料、設計基準の差
蓄圧機	0.6	0.1	−0.5	・欧州は安価な type2 容器の使用 ・欧州は汎用材を使用
プレクーラ	0.4	0.2	−0.2	・欧州は量産を見込んだ価格設定
ディスペンサー	0.5	0.2	−0.3	・欧州は汎用材を使用
合　計	**2.8**	**1.3**	**−1.5**	

（注 1）各国の商慣行などによって工事費は大きく異なるため、上記表は工事費を含まない金額。
（注 2）（　）内は、日本との比較。
出典：燃料電池実用化推進協議会
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］】

4-5-2　今後の展開

まずは、技術開発を通じて低コスト化を進めるとともに、水素ステーションに係る規制の見直しを通じて、より安価な設計や材料が使用できるようにすることが必要である。水素ステーションコストの低減は、そのまま水素供給コストの低減につながる。

また、水素ステーションの適切な配置も必要である。初期段階においてユーザーに不安感や過度な不便を感じさせないように、適切なロケーションに配置することが必要である。

NEDO 燃料電池・水素技術ロードマップ 2010 では、水素供給コストの目標として 2020 年頃で約 60 年/Nm^3 と提示しているが、この水素供給コストを実現できるオンサイトステーションコスト目標を約 2 億円（500 Nm^3/h 規模）と見積もっている。また、同時に約 2 億円で 500 Nm^3/h ステーションを実現できた場合には、300 Nm^3/h ステーションは約 1.5 億円程度で実現可能とも見積もっている。（これは、一般にプラントの規模拡大時のコスト上昇では 0.7 乗則が当てはまるため、300 Nm^3/h から 500 Nm^3/h へのスケールアップでのコストアップは $(500/300)^{0.7} = 1.4$ 倍と予測できるためである。）。ただし、2010 年当時からステーション仕様も変わってきていることから、これらの数値についても今後、検証が必要である。

国内の水素ステーションの設置見通しについては、富士経済は累積件数として 2020 年に 519 ヶ所、2025 年に 1,169 ヶ所と市場見通しを示している（2012 年版　水素燃料電池関連市場の将来展望　富士経済）。

またデロイトトーマツコンサルティングは、2013 年 8 月のニュースリリースで 2025 年の水素ステーション数は日本国内で 493 ヶ所、日本、米国、欧州で総計 3,098 ヶ所と見通している。

第５章

水素エネルギーの社会受容性

水素利用を普及させるためには、一般市民の燃料電池及び水素に関する認識向上や安全性に関する危機意識低減など、水素についての社会的な受容性の向上が必要不可欠と考えられる。本章では水素エネルギーに関しての安全性確保のための取り組みの現状や、社会受容性向上に向けた取り組みについて述べる。

5-1　水素の性質

水素と身近なエネルギーであるガソリン・天然ガス（都市ガスの主成分）などとの物理的性質の比較を表 5-1 に示す。

水素はガソリン・天然ガス同様に可燃性ガスであり、高圧下においては金属材料を脆化するという特徴がある。一方で空気中での拡散が速く、着火温度が高いことから自然発火しづらい、熱放射による被害や類焼が少ないという特徴もある。

水素もガソリンや天然ガスと同様に、その性質、特徴を踏まえ、安全に使いこなす技術と社会制度を確立することが必要である。

表 5-1　水素・メタン・プロパン・ガソリンの物理的性質の比較

	水素	メタン	プロパン	ガソリン	水素の特性
拡散係数（空気中）[cm^2/s]（1atm、20℃）	0.61	0.16	0.12	0.05（ガス状）	拡散しやすい。小孔から透過しやすい。
金属材料を脆化	あり	なし	なし	なし	金属をもろく、割れやすくする。
最小着火エネルギー（mJ）	0.02	0.29	0.26	0.24	着火しやすい。
燃焼範囲（下限―上限）[vol%]	4.1―75	5.3―15	2.1―10	1.0―7.8	燃焼可能濃度範囲が広い。
熱放射（輻射率ε）	0.04～0.25	0.15～0.35	ガソリン並	0.3～0.4	熱放射による被害や類焼は少ない。
最大燃焼速度 [cm/s]	346	43.0	47.2	42.0	爆風圧が大きい。ジェット火炎が保炎しやすい。
燃焼熱[MJ/Nm^3]真発熱量	10.77	35.9	93.6	―	熱量を確保するのに高圧を要す。

出典：エネルギー総合工学研究所
「エネルギー総合工学研究所における水素拡散、燃焼基礎物性の研究について」（2008 年 7 月 30 日）

5-2　水素の安全利用のための規制

5-2-1　高圧ガス保安法

水素に適用される法律などの規制の中では、「高圧ガス保安法」が中心的な役割を果たす。高圧ガス保安法は、高圧ガスによる災害を防止するために定められた法律であり、高圧ガスの製造・輸入から貯蔵、販売、移動、消費、廃棄に至るまでの、ライフサイクル全般にわたって、

- 高圧ガスの製造、貯蔵、販売、移動その他の取扱及び消費並びに容器の製造及び取扱を規制
- 民間事業者及び高圧ガス保安協会による高圧ガスの保安に関する自主的な活動を促進

することを通じて、公共の安全を確保することが目的である。この「高圧ガス保安法」を補完するものとして、技術上・保安上の基準が政令、省令・規則、告示などにより定められている（表 5-2）。

表 5-2　高圧ガス保安法の構造

政令	・高圧ガス保安法施行令 ・高圧ガス保安法関係手数料令	内閣で制定する、製造・貯蔵の許可・届出の必要な値などの定め
省令・規則	・一般高圧ガス保安規則 ・液化石油ガス保安規則 ・コンビナート等保安規則 ・冷凍保安規則 ・容器保安規則 ・特定設備検査規則	経済産業大臣が制定する技術基準や申請手続などの定め
告示	・高圧ガス保安法施行令関係告示 ・製造施設の位置、構造及び設備並びに製造に方法等に関する技術基準の細目を定める告示 ・高圧ガス設備等耐震設計基準 ・保安検査方法を定める告示 など	経済産業大臣が制定する技術基準の細目の定め
その他	・高圧ガス保安法及び関係政省令の運用及び解釈について ・高圧ガス保安法令関係例示基準 ・保安検査基準（KHKS シリーズ） など	省令に定める技術的要件を満たす詳細基準を例示するもの（例示基準など） など

出典：各種資料より NEDO 作成

高圧ガス保安法では、高圧ガスを製造、貯蔵、消費、移動する者が、取り扱う高圧ガスの種類、供給する設備の製造能力、高圧ガスの貯蔵量などに応じて安全上講じるべき措置が定められている。また、業務の実施にあたっては、その内容によって事業所ごとに都道府県知事からの許可が必要となっている（表 5-3）。

また、製造、貯蔵、販売、消費、廃棄それぞれにおいて、安全上の規制として、省令などによって定められた技術上の基準への適合、災害発生防止や保安活動に係る規定の整備、従業者への保安教育、保安検査の実施、保安に係る責任者統括者の選任などが定められている。

表 5-3　高圧ガスを取り扱う事業者の種類と許可・届出の要否

事業者の種類	条　件	許可／届出	備考
第 1 種製造者	以下の高圧ガス製造者 第 1 種ガスの製造≧ 300 m^3／日 第 1 種ガス以外の製造≧ 100 m^3／日 第 1 種ガスとそれ以外のガスの製造（略）	許可	第 1 種ガス： ヘリウム、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン、ラドン、窒素、二酸化炭素、フルオロカーボン（可燃性のものを除く）または空気。
第 2 種製造者	高圧ガスの製造の事業を行う者（第 1 種製造者以外）	届出	
第 1 種貯蔵所	以下の量の高圧ガスを貯蔵する事業所 第 1 種ガスの貯蔵量≧ 3, 000 m^3 第 1 種ガス以外のガスの貯蔵量≧ 1, 000 m^3 第 1 種ガス及びそれ以外のガスの合計（略）	許可	
第 2 種貯蔵所	合計貯蔵量≧ 300 m^3	届出	
その他貯蔵所	0. 15 m^3 ≦合計貯蔵量＜ 300 m^3	不要	
特定高圧ガス消費者	次の高圧ガスを下記の貯蔵能力以上で消費する者 圧縮水素≧ 300 m^3 圧縮天然ガス≧ 300 m^3 液化酸素≧ 3, 000 kg 液化石油ガス≧ 3, 000 kg その他　省略	届出	特定高圧ガス： ①モノシラン、ホスフィン、アルシン、ジボラン、セレン化水素、モノゲルマン、ジシランの圧縮ガスおよび液化ガス。 ②圧縮水素および圧縮天然ガスの容積 300 m^3。液化酸素、液化アンモニアおよび液化石油ガスの 3, 000 kg 以上､液化塩素の 1, 000 kg 以上。
その他消費者	可燃性・毒性ガス及び酸素の高圧ガスの消費者	不要	

出典：各種資料より NEDO 作成

5-2-2　その他の規制

水素の安全に関しては、高圧ガス保安法以外にも様々な法律によって規制が定められている。関係する法律を表 5-4 に示す。

表 5-4　高圧ガス保安法以外の水素安全に関係する主な法律

消防法	水素ガス施設（高圧ガス製造所、貯蔵所）と、危険物施設（製造所、貯蔵所及び取扱い所など）との間に保安距離を設けることなどが定められている。
建築基準法	可燃性ガスである水素について用途地域毎に最大貯蔵量の制限が定められている。
石油コンビナート等災害防止法	水素の大量処理の場合、処理量により第一種・第二種に区別され、災害防止基準などが定められている。
道路運送車両法・道路交通法・港則法	高圧ガスの輸送時に起こり得る危険事態を予測し、重量制限や使用車両及び船について規制が定められている。

出典：各種資料より NEDO 作成

5-3　水素に関する安全対策の現状

5-3-1　基本的な考え方

水素は、滞留させてしまうと一定の割合で空気と混合した状態となり、引火によって爆発するが、水素は最も軽い気体であり空気拡散性が高い。安全に利用するためには、まずは漏洩の防止に努め、仮に漏洩した場合でも速やかに拡散させ、滞留を防ぐことが必要である。

現在、水素を利活用しようとする設備は、部屋の天井に隙間を設けたり、強制換気を行ったりして、仮に水素が発生・漏洩しても、部屋の中に滞留しないように工夫されている。

例えば、福岡県糸島市にある水素エネルギー製品研究試験センター（HyTReC）の場合、高圧水素試験室には外れやすい折板屋根を採用、さらに連続の強制換気によって、常に室内の空気が入れ替わり、万が一水素が試験設備から漏れた場合でも室内に滞留しない工夫がされている（図 5-1）。

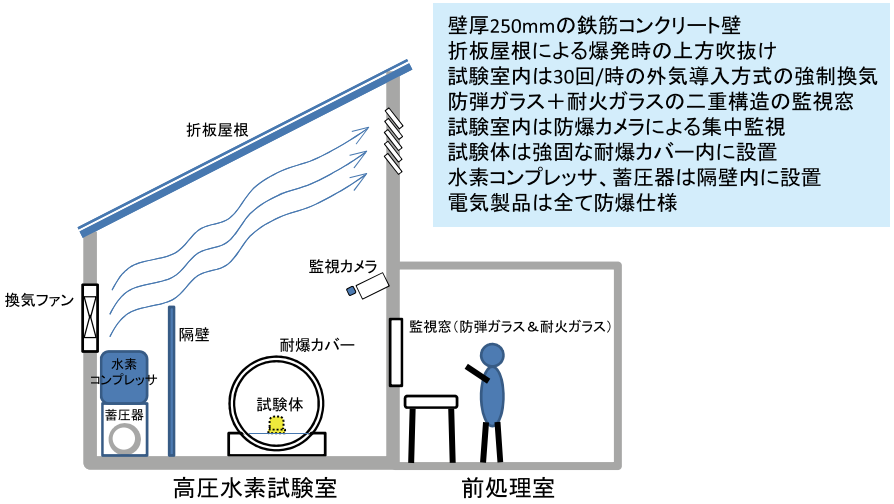


図 5-1　水素エネルギー製品研究試験センターの高圧水素試験室における安全対策

出典：水素エネルギー製品研究試験センター「水素エネルギー製品研究試験センターの紹介」

5-3-2　水素ステーションにおける安全対策

現在、水素ステーションを設置する場合は、水素ステーションの関連法規である高圧ガス保安法、消防法及び建築基準法の遵守が不可欠であり、この法令において設置・運用に関する安全性が担保されている。現在、これら関連規制については、実際の水素ステーション建設・運用の効率化に向けた見直し（市街地における水素貯蔵量の増加、設計係数の見直し、使用可能鋼材の種類の拡大など）が進められているが、この場合にあっても、技術的に安全性を証明することが前提となっている。

実際の水素ステーションにおける安全対策を図 5-2 に示す。漏洩防止、早期検知、滞留防止、引火防止及び火災時の影響軽減を基本的な方針とした上で、水素ステーションを構成するそれぞれの機器において対策を講じている。

この他の取り組みとしては現在、NEDO 事業の一環として水素ステーションの緊急時対応ガイドラインの整備が進められている。

今後、さらに安全性を高めていくため、トラブルの未然防止や発生時の迅速な対応を効率的に実施する方法の確立が必要であり、これまでの水素ステーションの運用上得られた知見や、今後建設される商用ステーションにおける情報をデータベース化するとともに、これを日々の運用やメンテナンスに活用するツールや、情報を活用した運用のための人材教育・育成手法のツールなどの開発が NEDO 事業によって進められている。

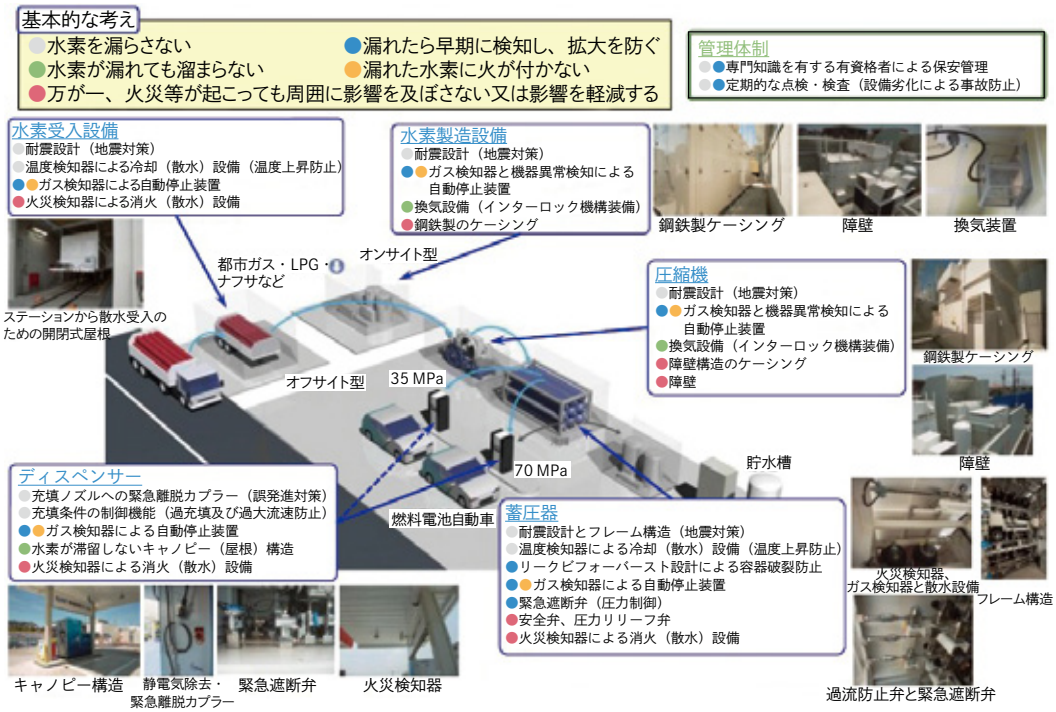


図 5-2　水素ステーションの安全対策

出典：水素供給・利用技術研究組合資料より NEDO 作成

5-3-3　燃料電池自動車における安全対策

燃料電池自動車に関する安全対策については、日本は 2005 年に世界で初めてその基準を策定した（「圧縮水素ガスを燃料とする燃料電池自動車等の基準」）。この基準では、衝突時の安全を含む水素安全と高電圧（感電保護）に関する安全基準が盛り込まれており、水素安全関係については、

- 水素ガスを漏らさない、漏れても滞留させない、漏れたら検知し遮断する
- 水素を含むガスを排出する場合には、安全に排出する
- 衝突時でもガソリン車などと同等の安全性確保（水素ガス漏れ抑止）を行う

を基本的な考え方とし、配管やその接続部の気密性能、水素漏洩時の滞留や車室内侵入防止のための機器取り付け位置や方法、水素漏洩検知器の取り付け位置及び性能、衝突（前・後面衝突、側面衝突）時の水素漏洩抑止方法などの技術的要件が規定された。

この基準をもとに、燃料電池自動車の車両については道路運送車両法、水素タンクについては高圧ガス保安法によって安全に対する措置が規定されている（図 5-3）。

現在、燃料電池自動車の安全対策としては、水素による脆化を受けない金属材料（ステンレス SUS316 など）の使用、センサーを用いた水素漏洩防止システム、火災時における

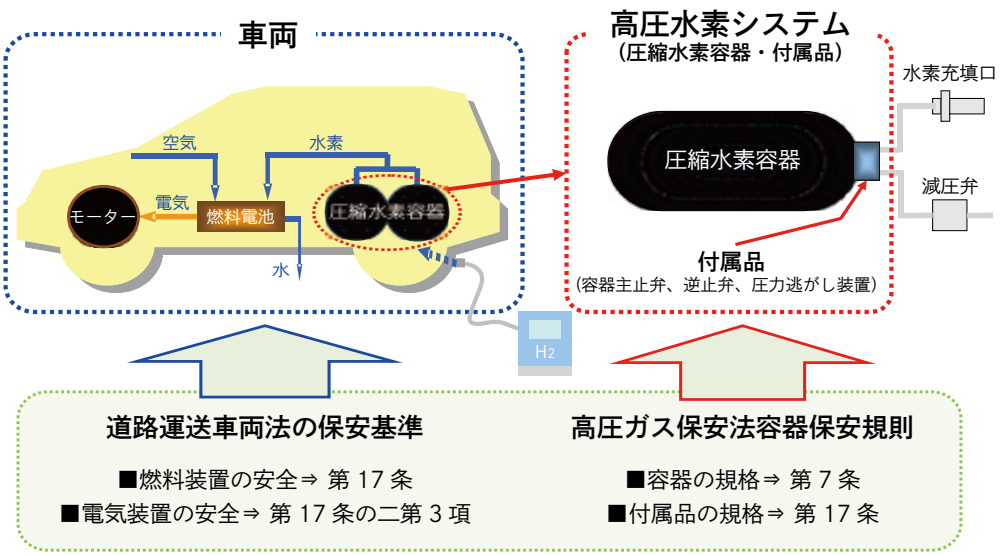


図 5-3　燃料電池自動車に関する法律

出典：経済産業省「（審議）燃料電池自動車からの一般住宅等への給電（V2H）の実施に向けた法的環境整備について」より NEDO 作成

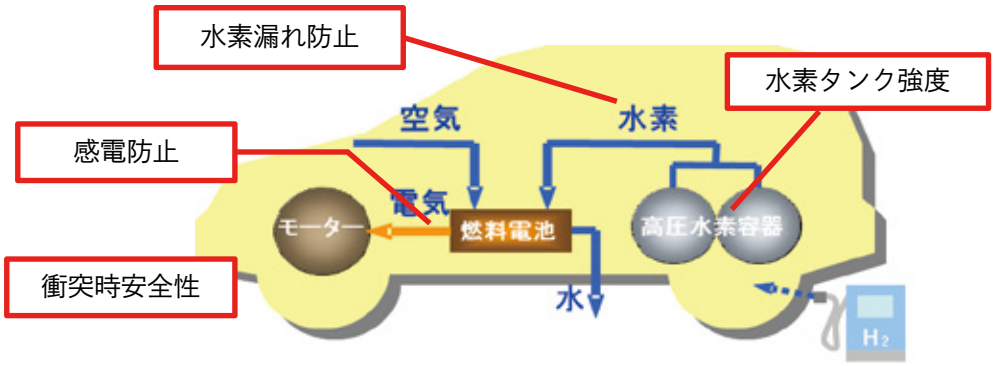


図 5-4　HySEF 全景

出典：日本自動車研究所

水素容器の破裂を避けるための一定温度でタンク内のガスを放出させる熱作動式の安全弁の設置などが講じられている。

2003 年には、NEDO の支援により日本自動車研究所（JARI）に設置された水素・燃料電池自動車安全評価試験施設（HySEF）において、車両衝突試験や耐爆火災試験など、安全性の評価が実施されている（図 5-4）。この安全性評価試験によって得られたデータは、規制の見直しや安全性基準の策定などに活用されている。



主な基準内容

水素漏れ防止	・排気される気体の水素濃度が 4％を超えないこと。
感電防止	・高電圧の電気装置に直接接触できないよう被覆すること。
衝突時安全性	・車両衝突後 60 分間の水素放出が、1 分当たり 118NL※を超えないこと。
水素タンク強度	・22,000 回の圧力サイクルに耐える耐久性を備えること。

※NL：ノルマルリットル（0 度 1 気圧時の容量）

図 5-5　世界統一基準の概要

出典：国土交通省「燃料電池自動車の安全性（四輪）」
2013 年度　第 1 回車両安全対策検討会（2013 年 7 月 1 日）より NEDO 作成

一方、自動車や自動車部品については、国際商品として世界的に流通することを踏まえて、各国で異なっている環境・安全性に関する技術基準を国際的に調和させることを目的に、国連において統一的な基準が策定されている。燃料電池自動車の安全性に関する技術的な基準についても国連において議論が行われ、2013 年 6 月に「水素燃料電池自動車の安全性に関する世界統一基準（HFCV-gtr）」が成立した（図 5-5）（HFCV-gtr：Hydrogen Fuel Cell Vehicle ―Global Technical Regulations）。

5-4　水素の社会受容性

新規のエネルギーに対して、人がなんらかの不安を感じるのは一般的な心理である。必要なことは、そのエネルギーを安全に使いこなす技術を確立し、実績を積み、それを正しく知ってもらうことで、人の安心を育成することである。これらを合わせて一般に社会受容性（Public Acceptance）という。

水素エネルギーに対する社会受容性を調査し、これを高めるためのプロジェクトが世界各国で実施されている。

5-4-1　水素エネルギーに関する見方

日本においては NEDO 事業として、水素供給・利用技術研究組合（HySUT）が、水素エネルギーや燃料電池自動車に対する意見や見方についてアンケート調査を行っている（表 5-5）。この調査では、東京モータショーでの HySUT の展示ブースへの来場者や燃料電池バスの試乗者に対してアンケートを実施し、755 の回答数を得た。

調査結果によると、水素の特性やクリーンであるというイメージは概ね認識されているが、2 割強の人がガソリンなどに比べて危険とのイメージも持っている。一方で、正しく使えば他の燃料と同じように使用して問題ないと思う人は 7 割強となっている。

表 5-5　HySUT による社会受容性アンケートの回答者数と結果

群	回答者	回答数	時期
A	展示会訪問者	431	2012 年 11 月― 2013 年 2 月
B	リムジンバス搭乗者など	324	2012 年 12 月― 2013 年 2 月
計		755	

（%）

項目	質問	そう思う 知っている		そう思わない 知らない		わからない 無回答	
		A	B	A	B	A	B
水素エネルギー	様々な資源から作り出せる	65.2	34.9			34.8	65.1
	クリーンなエネルギー	81.2	71.0	6.0	6.2	12.8	22.8
	ガソリンより危険	26.9	16.4	41.1	49.4	32.0	34.2
	正しく取り扱えば問題ない	80.0	65.1	4.6	5.3	15.4	29.6
燃料電池自動車	知っている	97.7	81.5			2.3	18.5
	水素エネルギーを用いる電気自動車	85.4	47.2			14.6	52.8
	長距離の走行時に不安	55.2	22.8			44.8	77.2
	ガソリン車と同程度の所要時間で充填可（約 3 ～ 5 分）	29.9	6.8			70.1	93.2
水素ステーション	知っている	86.1	49.4			13.9	50.6
	ガソリンスタンドより危険	27.9	9.6	34.6	44.8	37.5	45.6
	様々な安全対策が設けられている	61.3	42.9	7.0	5.9	31.7	51.2
	自宅や職場の近くに建設する事には反対	28.1	20.7	44.3	44.1	27.6	35.2
	（ガソリンスタンドについて）自宅や職場の近くに建設する事には反対	(27.1)	(26.2)	(47.3)	(43.8)	(25.6)	(30.0)

出典：水素供給・利用技術研究組合

また、自宅・職場の近くでの建設には 3 割程度が反対となっており、これはガソリンスタンドに対する意識とほぼ同等である。

社会受容性に関する同様な調査は、ドイツにおいても行われている。ドイツでは 2009 ～ 2013 年に、市民の水素エネルギーに対する意見や見方に関する全国的な調査「HyTrust」が実施された。この調査では、少人数のグループによるインタビュー、全国 1,000 人以上の電話インタビュー、ランダムに選ばれた市民 16 人による週末セミナー（市民会議）などを行った。

その結果、市民の大半は燃料電池自動車の導入には賛成で、燃料電池自動車を安全と考えており、また水素ステーションについてもガソリンスタンドよりも心配という意見は少数であった（図 5-6）。

また市民会議では、6 日間にわたる週末セミナーと自由討議を通じて、賛成・反対意見を盛り込んだ最終報告「市民の意見表明」を発表し、水素の社会受容性を高めるための提案を行っている（表 5-6）。

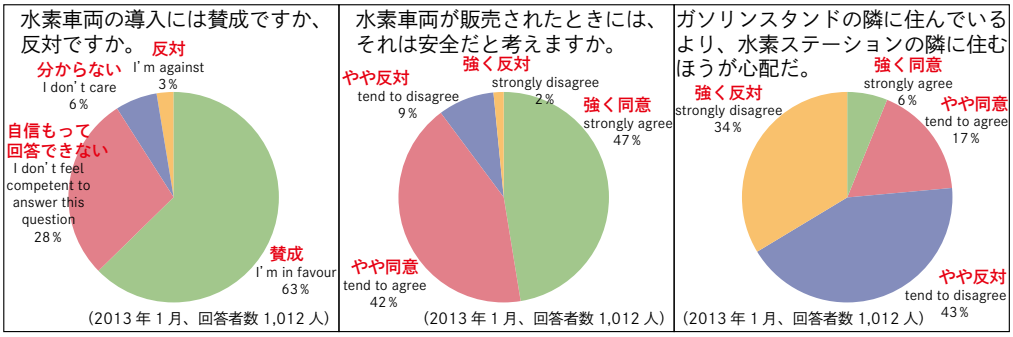


図 5-6　ドイツ「HyTrust」プロジェクトでの電話インタビュー調査結果

出典：HyTrust「Social acceptance of hydrogen mobility in Germany」（2014 年 6 月 24 日）より NEDO 作成

表 5-6　HyTrust の市民会議での知見

- 環境適応性、安全性、取り扱い、コスト、エネルギー技術革新を市民に伝える。
- 行政やメディアは市民への情報提供を自動車メーカーや電力会社に任せない。
- 意思決定プロセスに多くの人を参加させるようにしなければならない。これにより新技術は消費者に拒絶されずに導入されるチャンスが拡大。
- 市民や消費者は、明確で正確な情報を受け取る権利がある。一部の利益団体・企業の宣伝情報のみではいけない。
- 情報発信は行政およびメディアの責任。
- 技術革新がもたらす利益が、公共に資するという利益分配の合意があるならば、市民と消費者の社会受容性は向上する。

出典：HyTrust「Citizens' statement on hydrogen mobility (Berlin conference, 2011)」より NEDO 作成

5-4-2　社会受容性の向上に関する取り組み

社会受容性の向上のためには、水素の安全性を高めて信頼を獲得することや、燃料電池や水素に関する理解増進のための積極的な情報発信が必要である。このうち、水素の安全性を高めるための仕組みや技術については 5-2、5-3 で述べたとおりである。

燃料電池や水素に関する理解増進のための情報発信については、燃料電池自動車の実用化が近づいている段階において、一般の方を対象とした取り組みが重要である。このため、NEDO 事業の一環として、これまでの研究開発の成果などを活用し、実物に触れる機会を設けるといった、より伝わりやすい取り組みを進めている（図 5-7）。

米国では、エネルギー省（DOE）を中心に社会受容性向上の取り組みが行われている。市民や地方政府、企業に対する情報発信の他、事故時の初期対応者（First Responder）である消防士や救命士に対するトレーニングを国家的に進めていることが特徴である。また、だれでも参加できる WEB セミナーやオンラインツールを充実させるとともに、スマートフォン向けの水素アプリや、水素ステーションなどの代替燃料スタンドのロケーションを示したアプリを公開している（図 5-8）。



FC-EXPO における燃料電池自動車試乗会



小学生を対象とした見学・体験会

図 5-7　社会受容性向上に向けた情報提供の取り組み

出典：水素供給・利用技術研究組合、JX 日鉱日石エネルギー



消防士に対するトレーニング



水素アプリ「Hydrogen Tools」

図 5-8　米国エネルギー省の取り組み

出典：米国エネルギー省 Pacific Northwest National Laboratory「Scientists create new hydrogen fuel safety app」／ iPhone「Hydrogen Tools-iTunes」

第 6 章

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
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。 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_2 フリー化して輸入することも計画されている。	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。 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。 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。	水素をエネルギーとして最終的に利用する。 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。 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。 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。

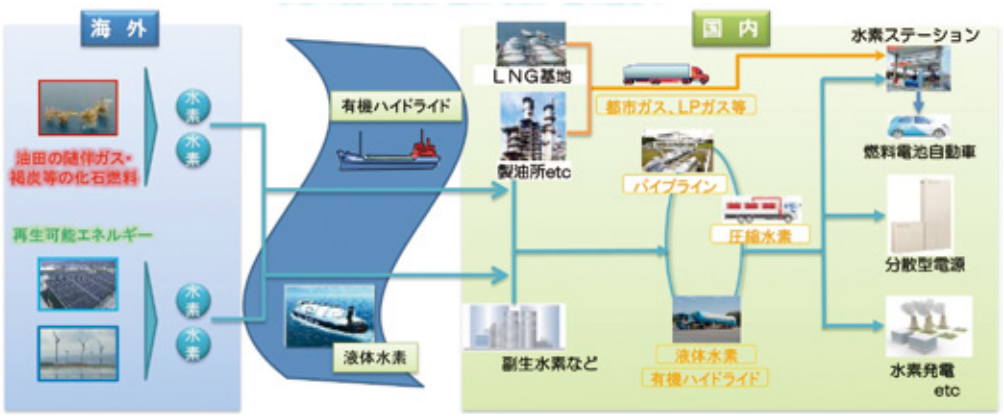


図 6-1　水素の製造・貯蔵・利用に係る将来イメージ

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_2 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_2 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多い。	本来の目的となる製品の生産量に左右される。	CO_2 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_2 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_2 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_2 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_2 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（現在の変換効率は 0.5％程度）。	気象条件に左右される。	CO_2 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^3）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_2 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_2 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。

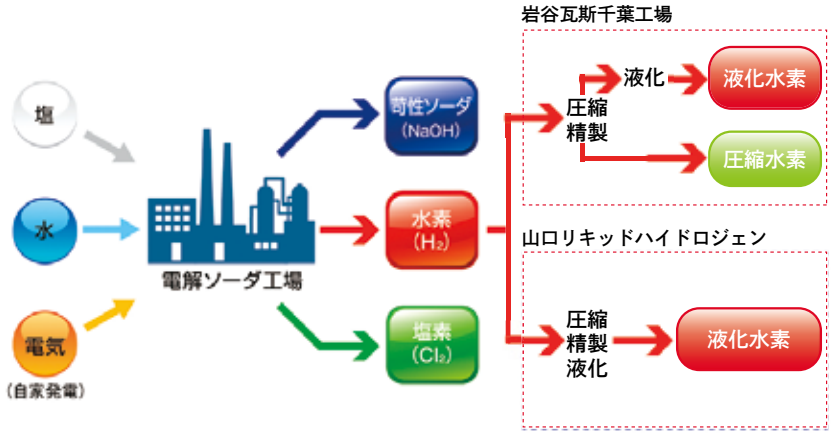


図 6-2　ソーダ電解からの副生水素：岩谷瓦斯千葉工場と山口リキッドハイドロジェン

出典：岩谷産業「水素エネルギーハンドブック 第 3 版」

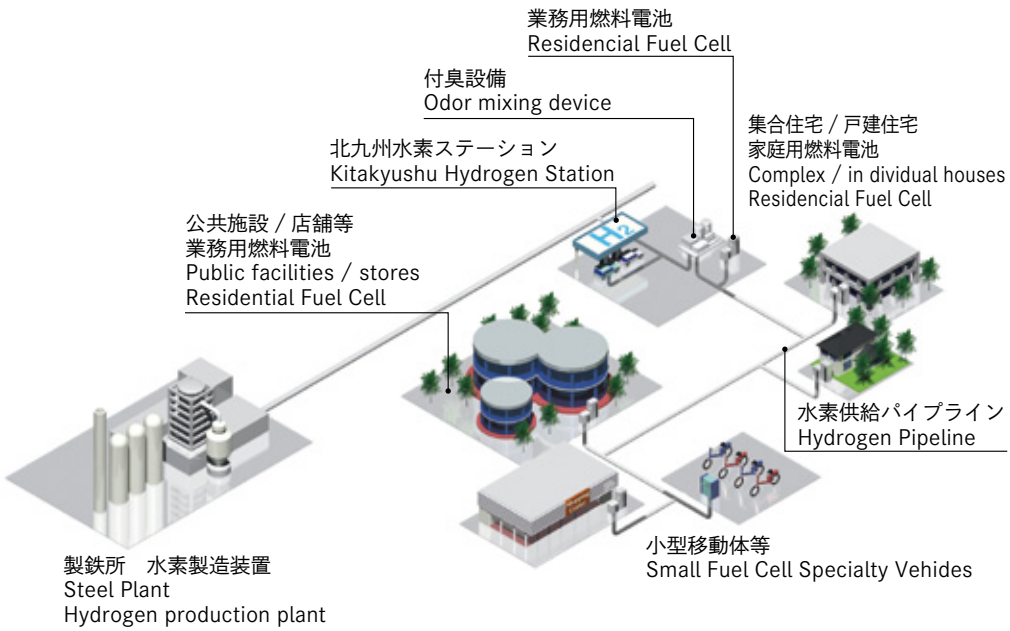


図 6-3　製鉄所からの副生水素：北九州水素タウン

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。

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$$

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。

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

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。

$$R\text{—}S\text{—}R' + 2H_2 \rightarrow R\text{—}R' + 2H_2S \quad (R：有機基)$$

$$H_2S + ZnO \rightarrow H_2O + ZnS$$

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

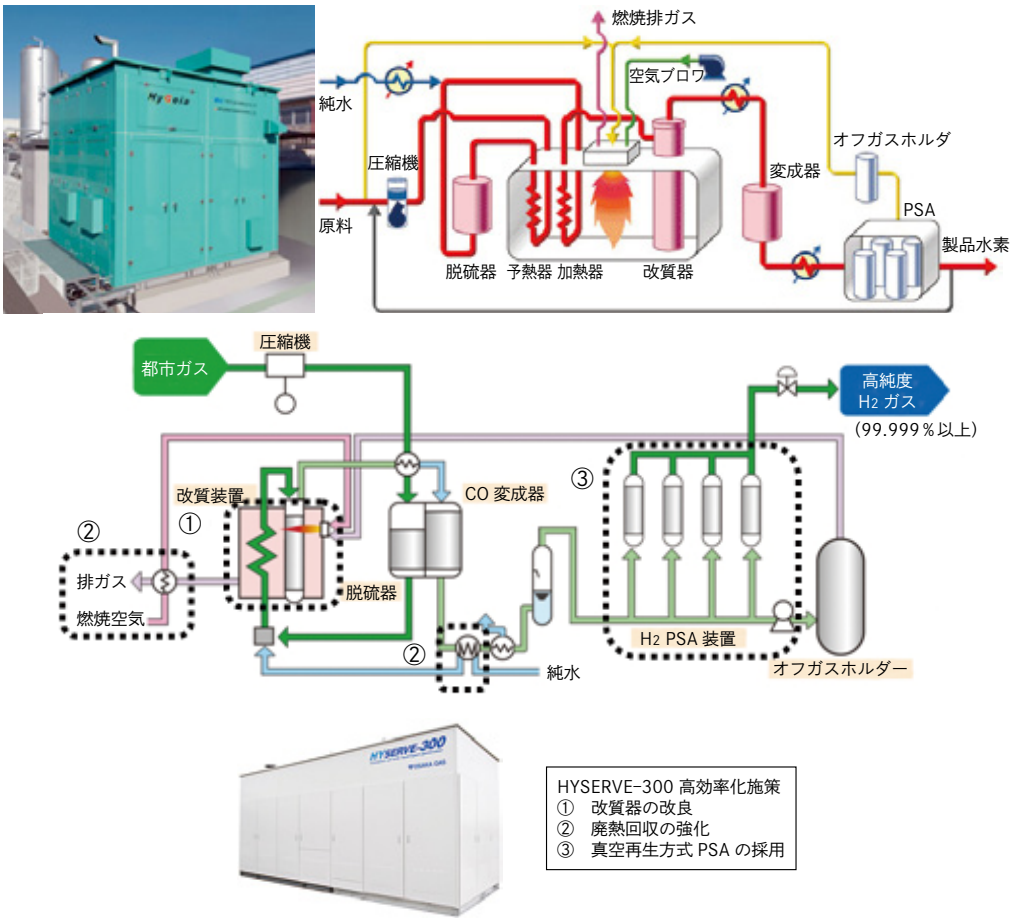


図 6-4　小型水蒸気改質装置の例（上：三菱化工機製 HyGeia　下：大阪ガス製 HYSERVE）

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_2 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

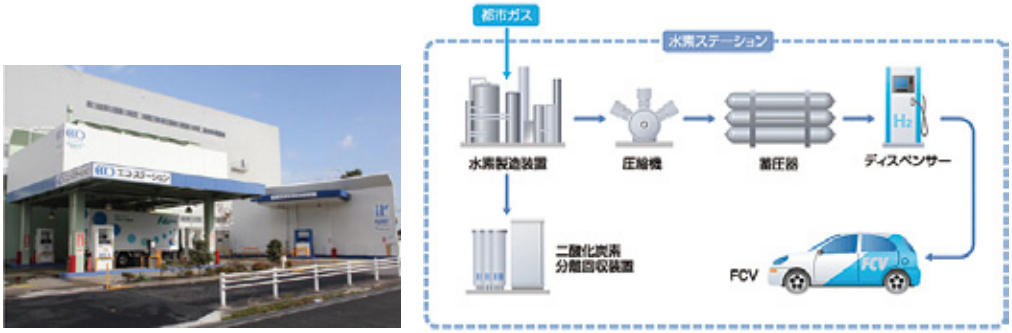


図 6-5　羽田水素ステーション

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 CO_2 を回収して工業利用しており、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

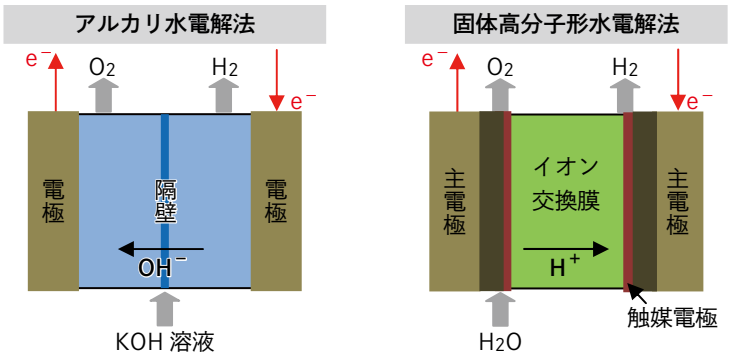


図 6-6　水電解の仕組み

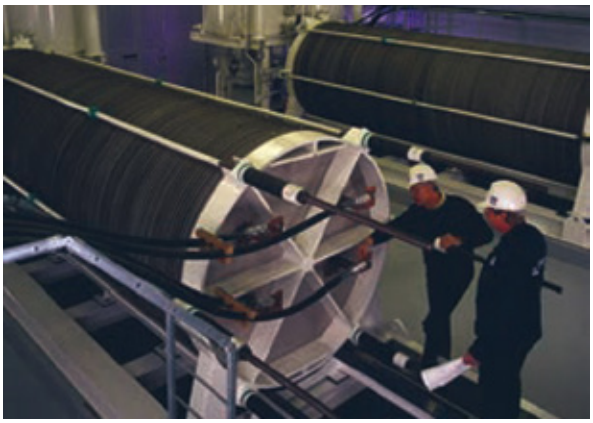


図 6-7　工業用アルカリ水電解の例　NEL Hydrogen（ノルウェー）

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^3	5.0 ～ 6.5 kWh/Nm^3
システム規模	大型化可能	50Nm^3/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

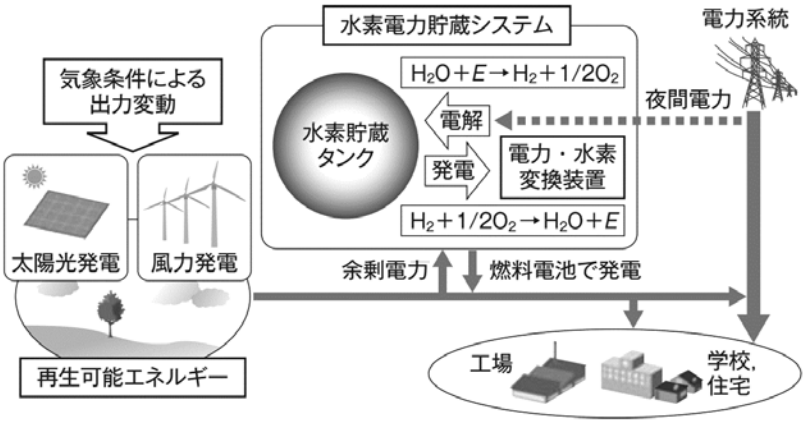


図 6-8　固体酸化物形水電解セル（SOEC）の例

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

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）。

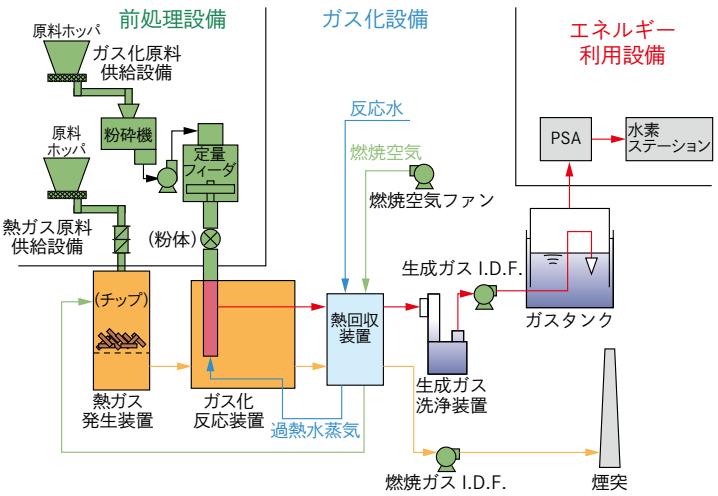


図 6-12　鳥栖水素ステーションでの木質チップによる水素製造

出典：鳥栖環境開発綜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（$H_2O \rightarrow H_2 + 1/2\ O_2$）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。

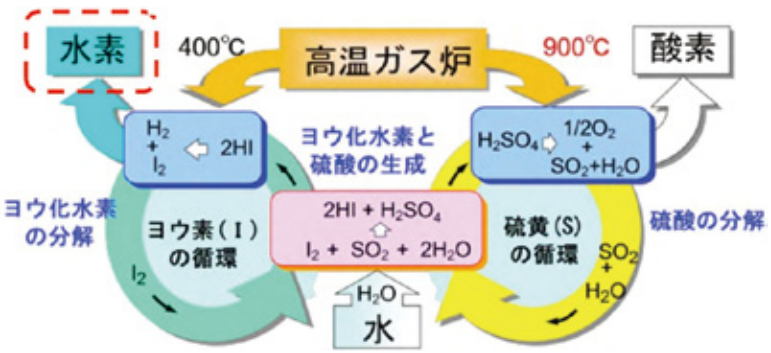


図 6-13　IS サイクル

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］】

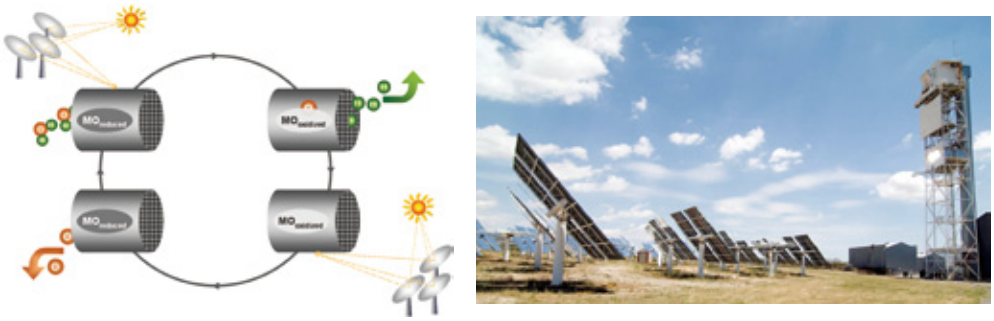


図 6-14　HYDROSOL II

出典：Final Report – HYDROSOL II

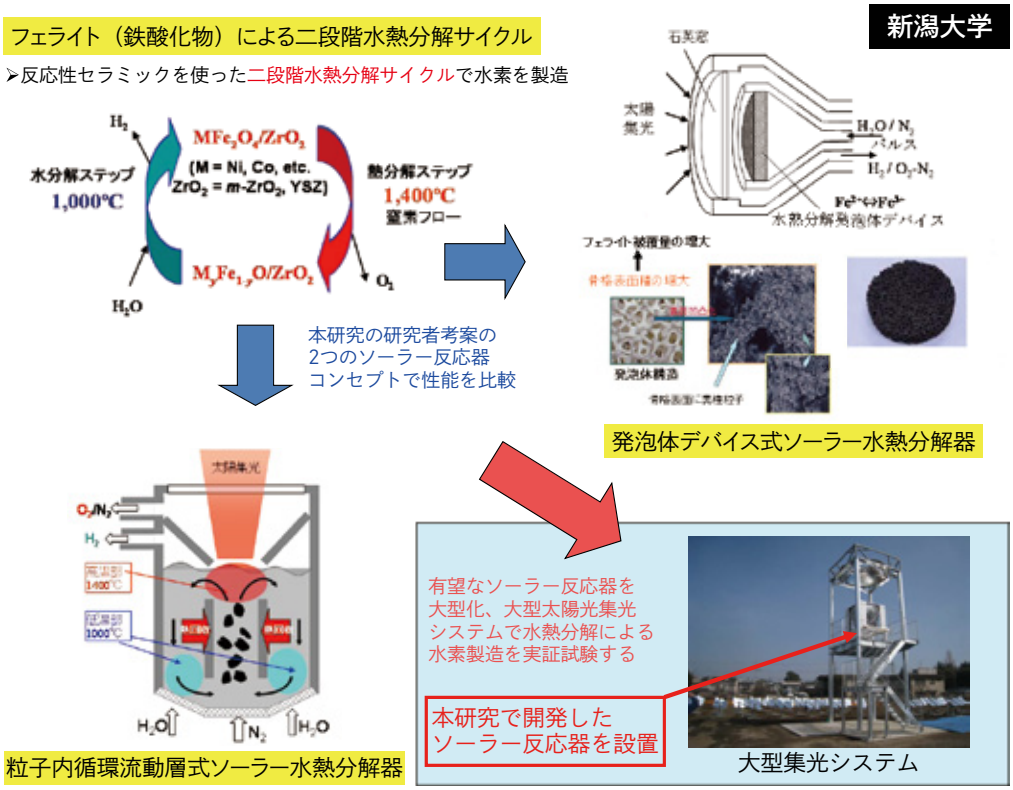


図 6-15　新潟大学による太陽光集光システムを用いた水素製造実証

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により、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

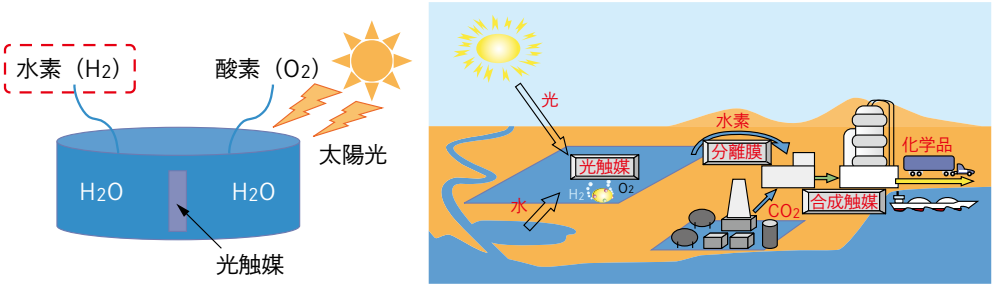


図 6-16　光触媒による水分解の観念（左）と人工光合成プロジェクト（右）

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_2 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_2 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。

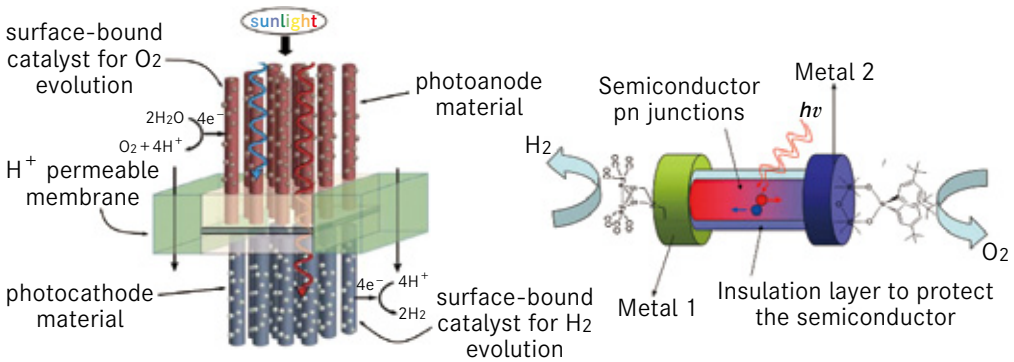


図 6-17　米国における人工光合成の研究例

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 1/000 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、耐酸素性、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_2 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、

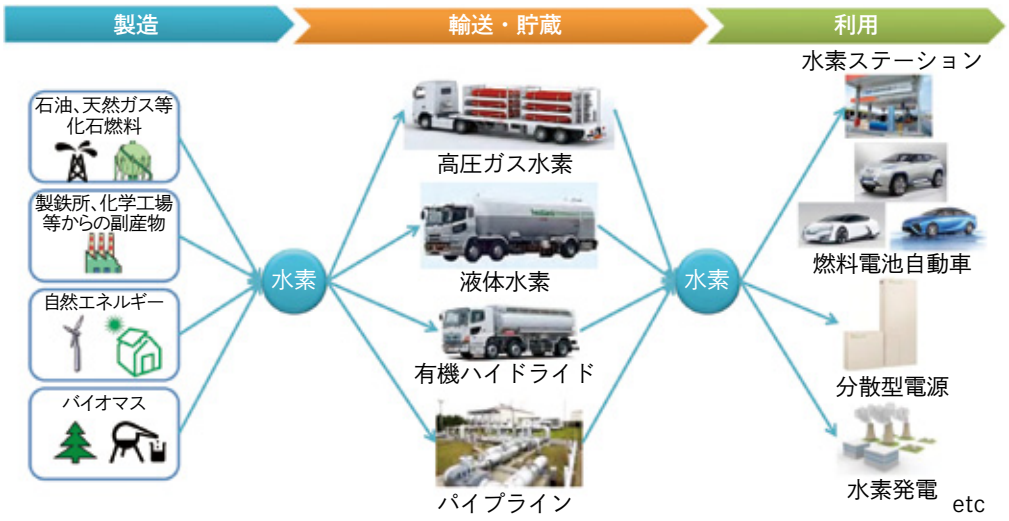


図 6-18　水素の輸送・貯蔵方法

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

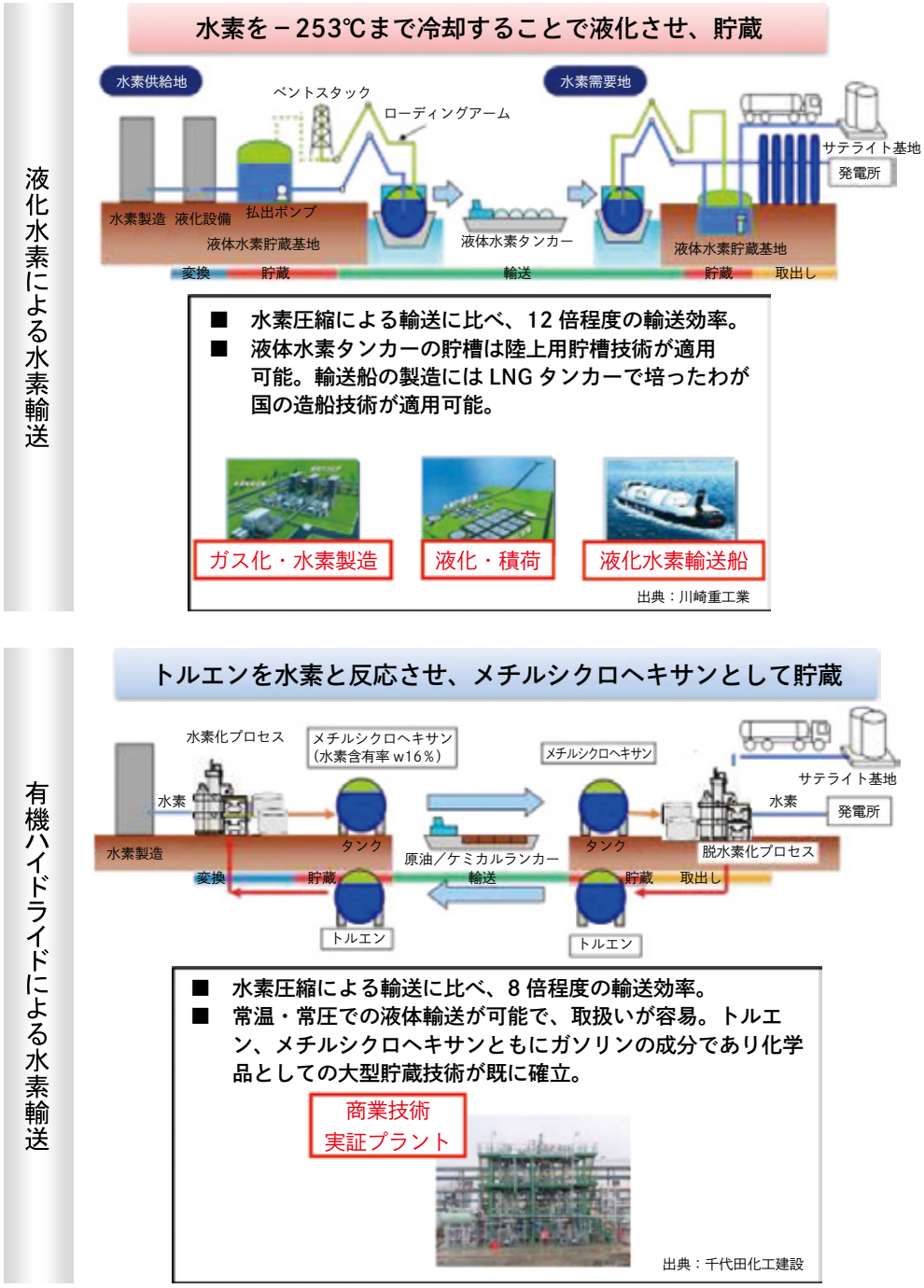


図 6-19　液化水素や有機ハイドライドによる水素輸送（海外からの水素輸入）

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、現段階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。

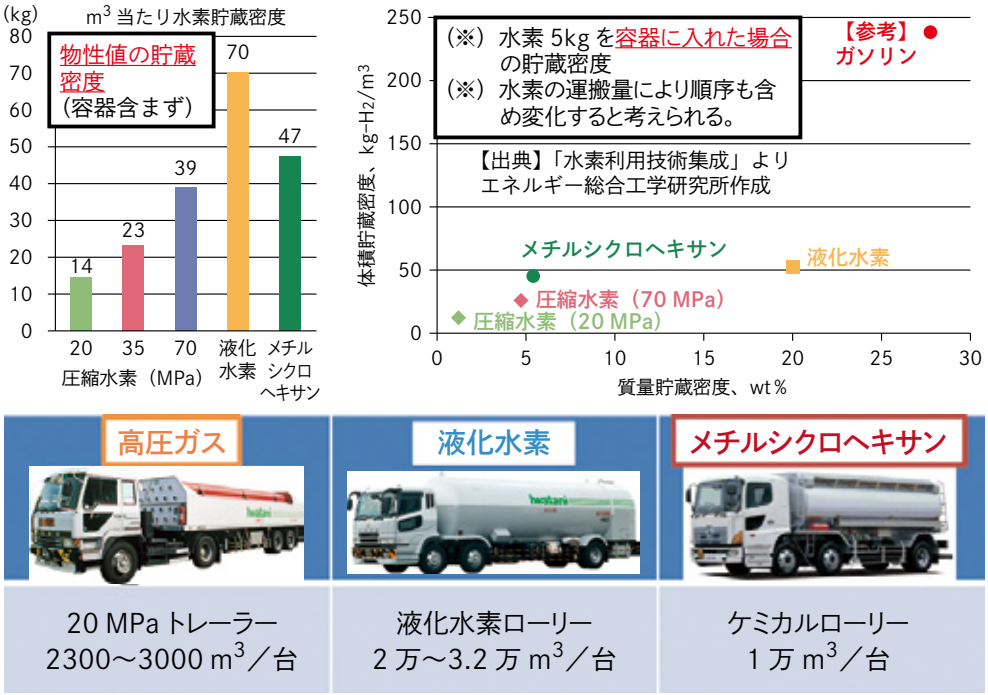


図 6-20　各水素キャリアの貯蔵密度の比較

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_2 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：$kg\text{-}CO_2/m^3\text{-}H_2$）
（※ 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、

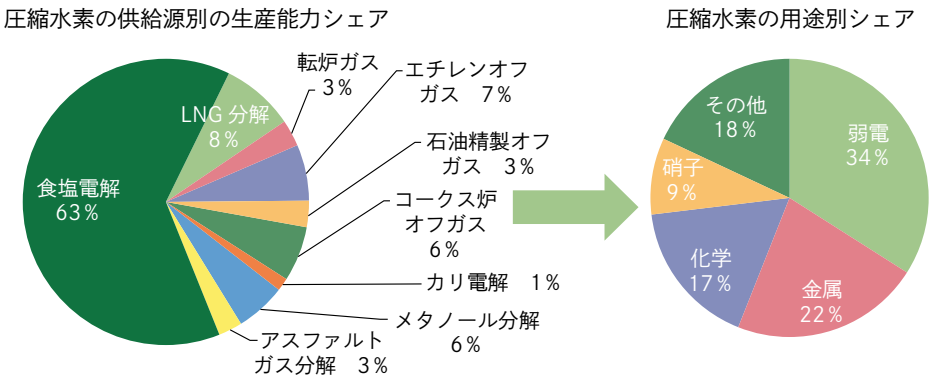


図 6-23　圧縮水素の生産能力シェアと用途シェア

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

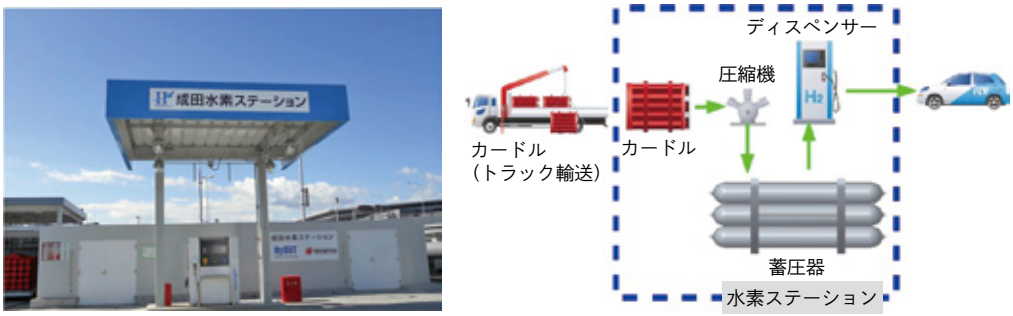


図 6-24　成田水素ステーション

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℃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 ～ 350 L）、コンテナ（2 ～ 46 m^3）、ローリー（23 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℃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）。

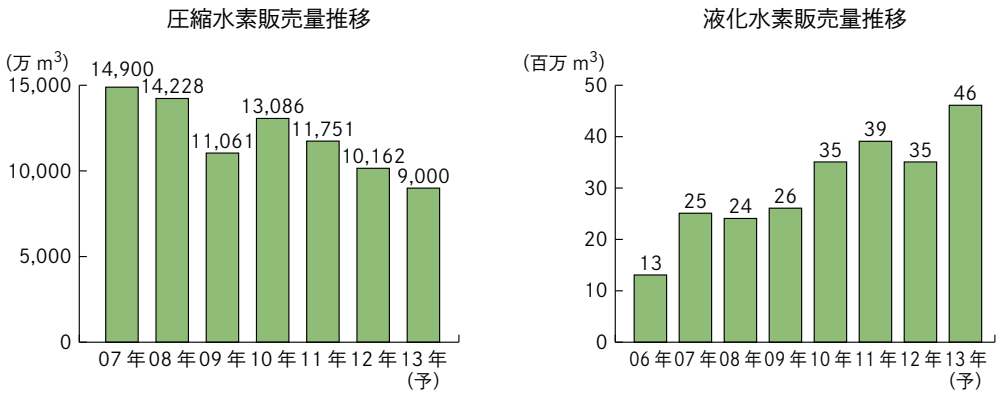


図 6-25　圧縮水素と液化水素の販売量の推移

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

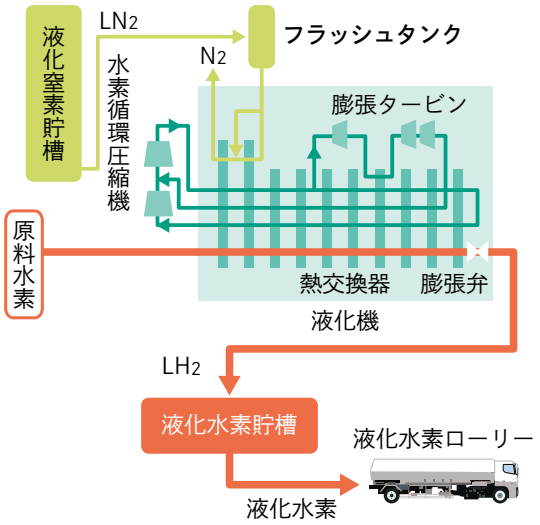


図 6-27　水素の液化

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℃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^3）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^3）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

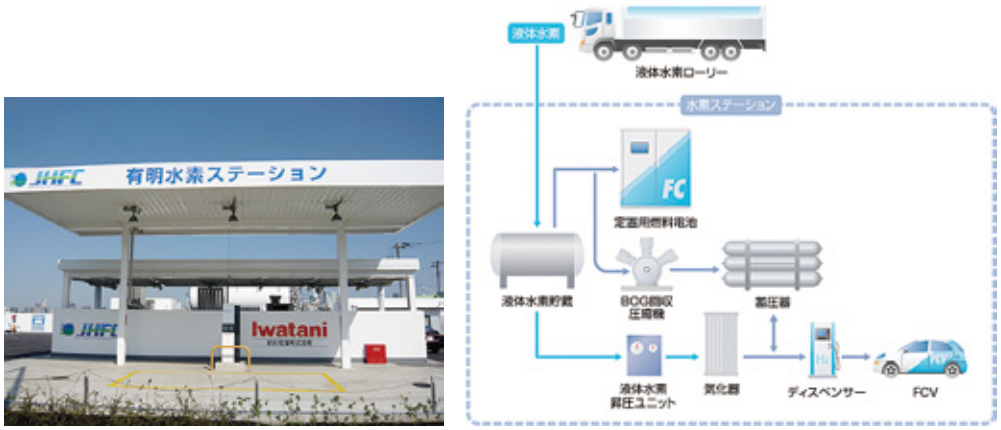


図 6-28　有明水素ステーション

出典：水素供給・利用技術研究組合



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、国際標準化を図るとしている。

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。

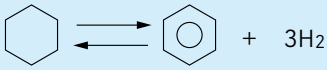
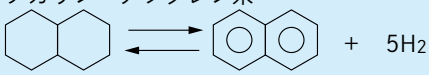
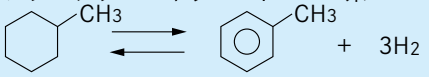
複数の系があるが、安全性や利便性などの点からメチルシクロヘキサン＝トルエン系の実用化が進められている。ともに汎用化学品であり、既存の社会インフラが利用可能である。この系では、水素化反応段階と輸送の実績はあったが、脱水素化反応段階における転化率と寿命が問題であった。しかしながら、最近になり耐久性が高く、選択性に優れた脱水素触媒が日本で開発され、実用化の見通しが立った。

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^3/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^3/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^3/L	常温常圧でともに液体

出典：各種資料より NEDO 作成

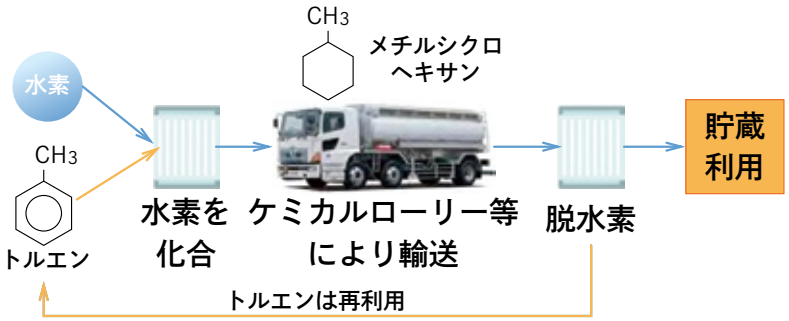


図 6-30　メチルシクロヘキサン＝トルエン系有機ハイドライドを利用した輸送システム

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 40 kW 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ンエナジーは、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^3/h の水素貯蔵と水素発生



■タンク
水素貯蔵能力：20 m^3–MCH タンクに約 10,000 Nm^3–H_2 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



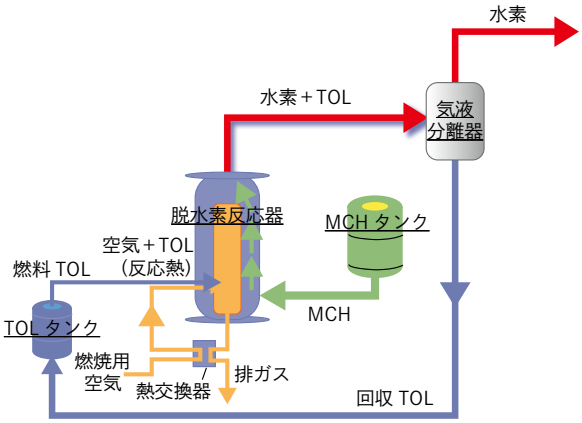


図 6-32　日立製作所の有機ハイドライド実証プラントとフレインエナジーの脱水素コンセプト

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」
フレインエナジー　ホームページより NEDO 作成

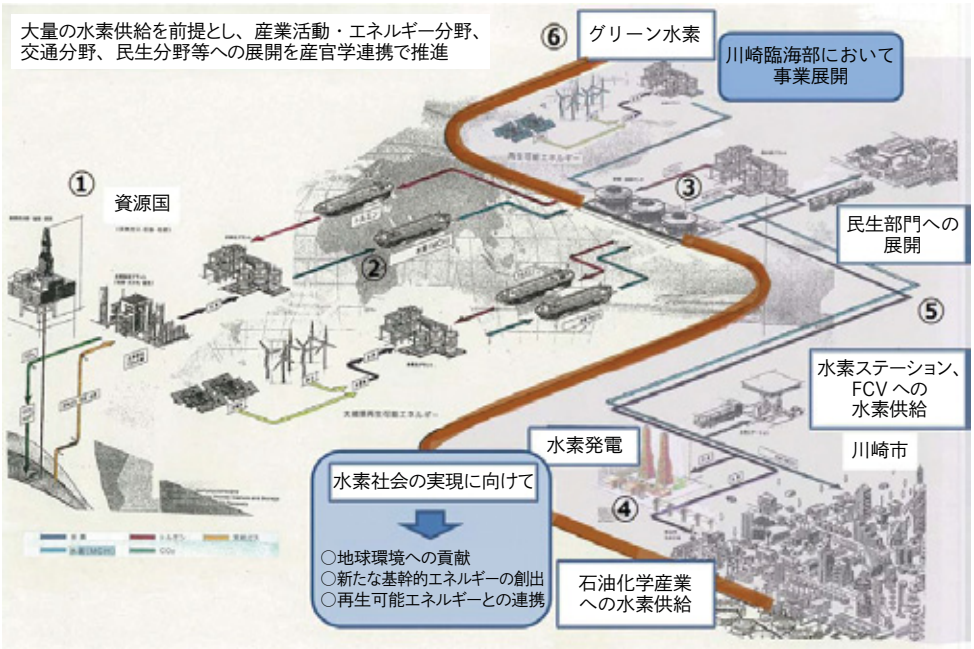


図 6-33　川崎市臨海部での水素ネットワークのイメージ

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ウ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

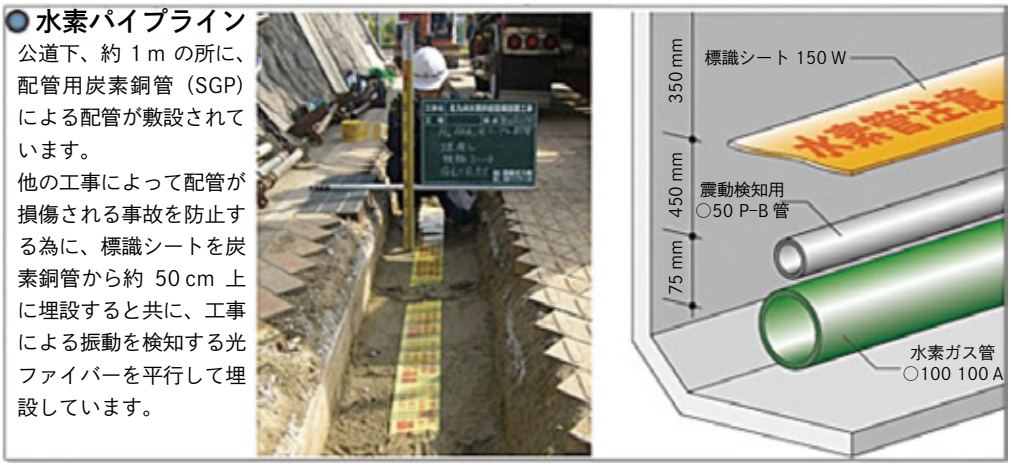


図 6-35　北九州水素タウンでの水素パイプライン実証

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（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。

$$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$$

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。

・**加安分解**　（水素放出）$LiH + NH_3 \rightarrow LiNH_2 + H_2$

（水素付加）$LiNH_2 + H_2 \rightarrow LiH + NH_3$

・**電気分解**　$NH_3\,(l) \rightarrow 1/2N_2\,(g) + 3/2\,H_2\,(g)$　（図 6-36）

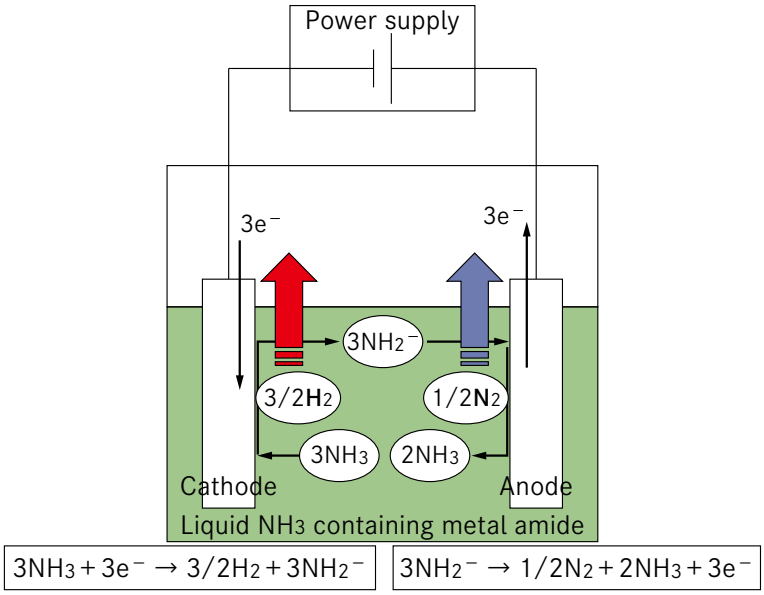


図 6-36　電気分解による水素脱離プロセス

出典：広島大学「アンモニアによる水素貯蔵」
高圧水素貯蔵・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^3 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ィアはたびたび提案されてきた。これらは、水素離脱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）。

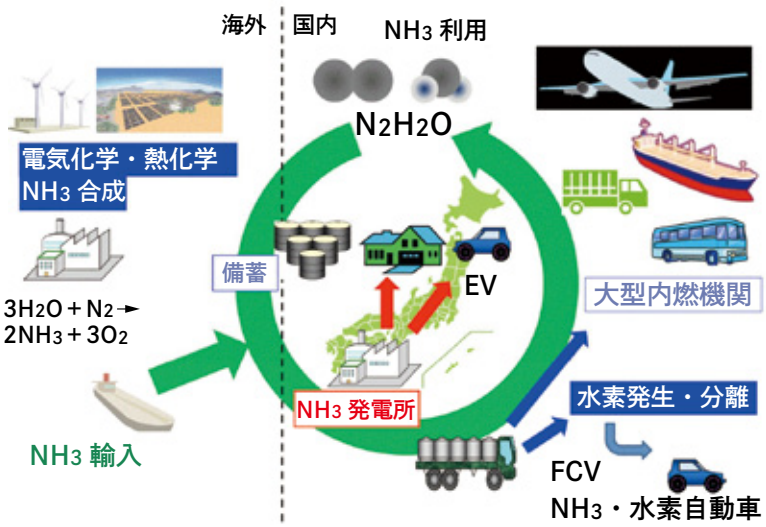


図 6-37　アンモニアによる水素の利活用のコンセプト

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 kg-H_2/m^3 以上であり、液化水素の密度（70.8 kg-H_2/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（Al_2Cu）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_5 型合金	$LaNi_5$ など	1 重量％
AB_2 型合金	$TiCr_{1.8}$、$ZrMn_2$ 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_2B 型）	Mg_2Ni、Mg_2Cu など	～ 4 重量％

出典：各種資料より NEDO 作成

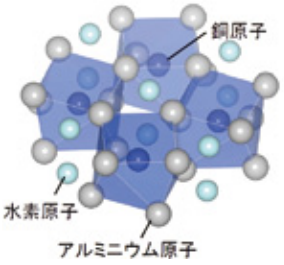


図 6-38　アルミニウム合金系水素吸蔵合金

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）に車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 mmΦ
接続方式	ワンタッチ交換式専用カプラ
材料	水素吸蔵合金
安全機構	圧力逃がし弁





水素ボ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 m³、13 MPa 高圧ボンベ 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
ボンベ交換	ワンタッチ操作で交換、専用カプラ使用
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_2 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_2 をエネルギーとして再活用できるため、CO_2 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。

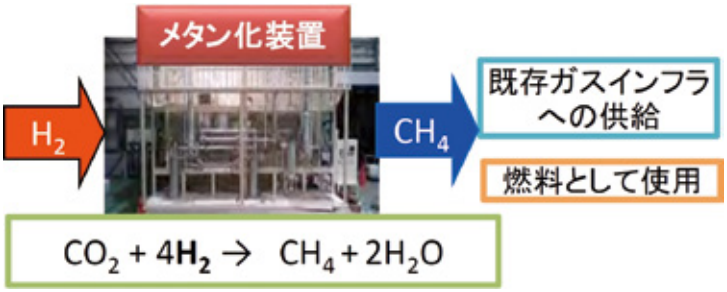


図 6-41　メタン化装置

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_2 が必要であり、低コストで効率のよい CO_2 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。

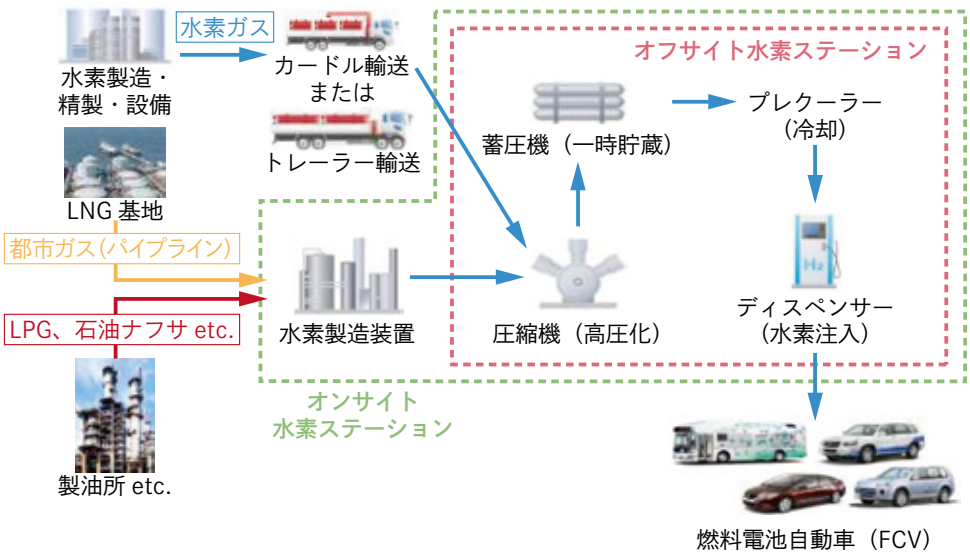


図 6-43　水素ステーションの構成

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、高圧蓄圧器（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圧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 という高圧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

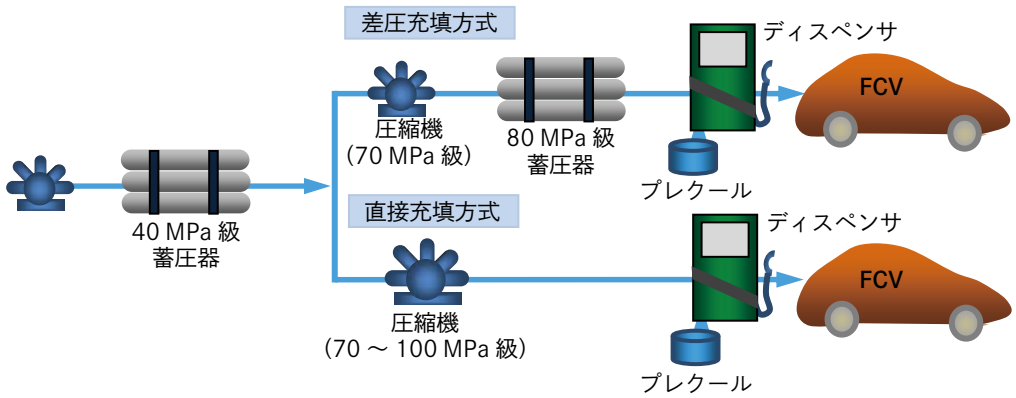


図 6-44　水素ステーションにおける充填方式

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。

重量測定のト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ト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）。

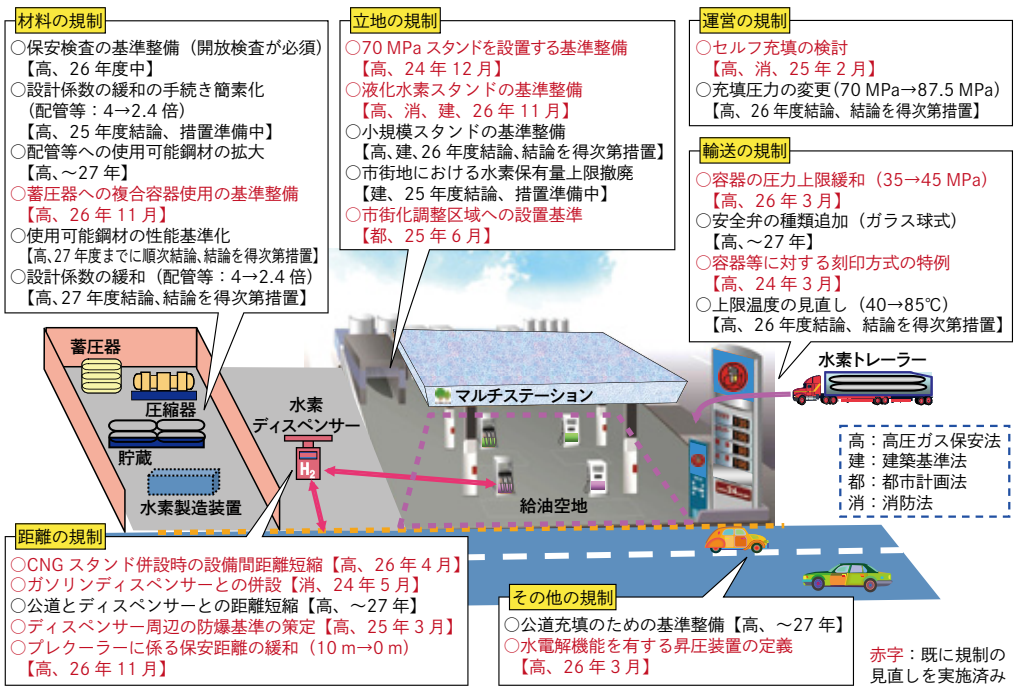


図 6-45　水素ステーションにおける各種規制の見直し（平成 26 年 11 月時点）（再掲）

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 300 Nm^3/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 10 ppm 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、

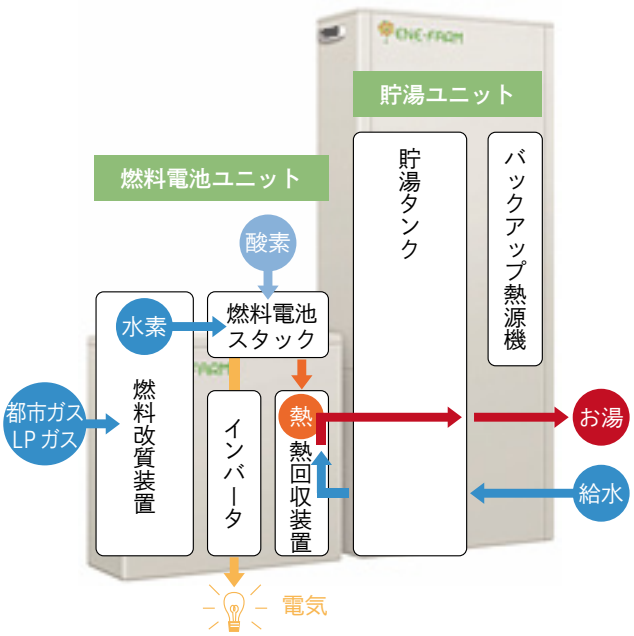


図 6-48　エネファームの仕組み

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_2 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_2 削減量は 1,330 kg-CO_2/年（2,460 m_2 の森林が吸収する CO_2 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_2 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。

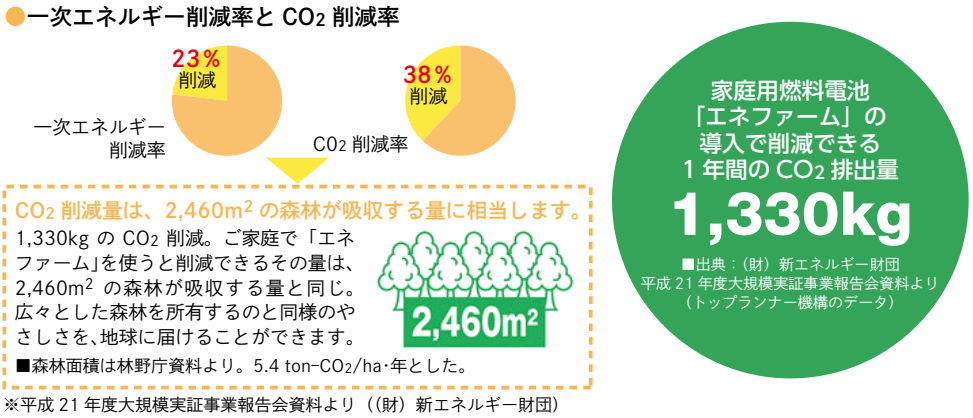


図 6-49　エネファームによる一次エネルギー削減率と CO_2 削減率

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

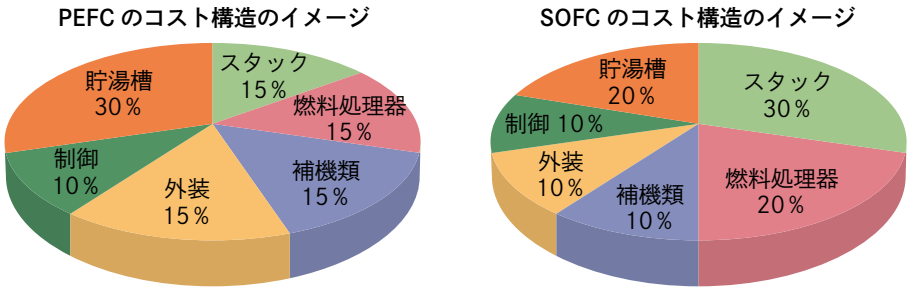
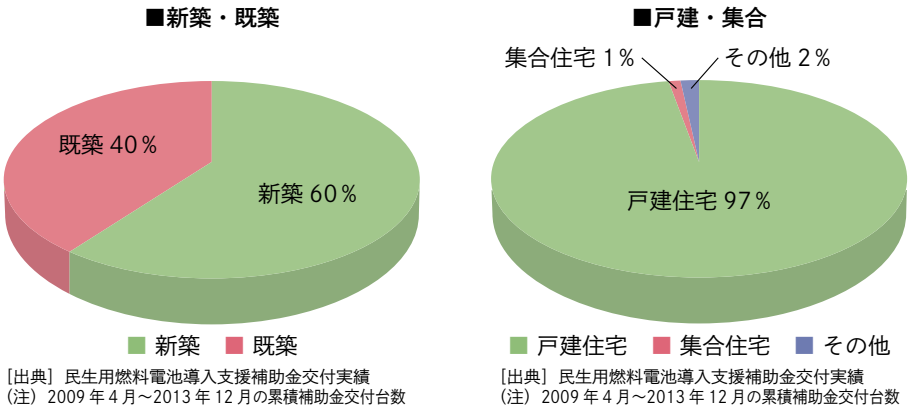


図 6-50　エネファームのコスト構造

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



［出典］民生用燃料電池導入支援補助金交付実績
（注）2009 年 4 月～2013 年 12 月の累積補助金交付台数

［出典］民生用燃料電池導入支援補助金交付実績
（注）2009 年 4 月～2013 年 12 月の累積補助金交付台数

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）や溶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、現在は溶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、溶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、イニシャ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^2（m2/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	コジェネ	コジェネ	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弁	韓 Posco にライセンシング	—	Rolls Royce と合弁	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

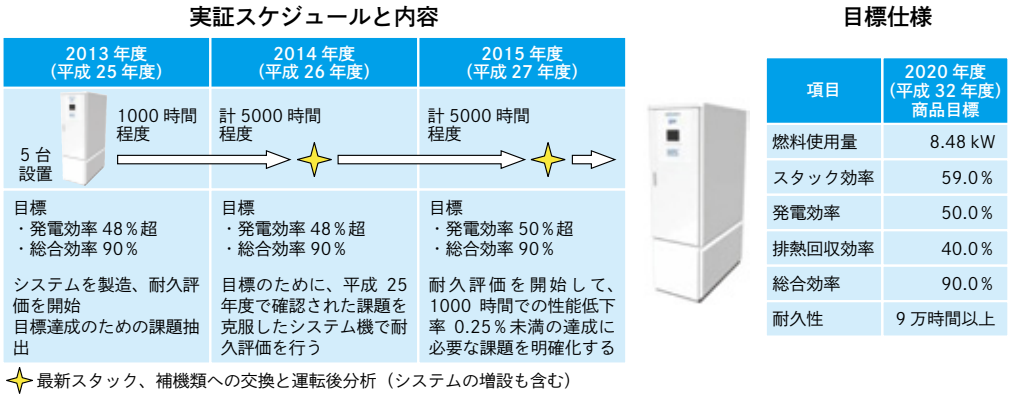


図 6-52　5kW の SOFC システムの実証（NEDO 事業）

■ 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 250 W 級リン酸形燃料電池（PAFC）や、カセットコンロ用ブタンボンベを燃料に用いた 250 W 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 20 W 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 2 W 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 200 W）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



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）

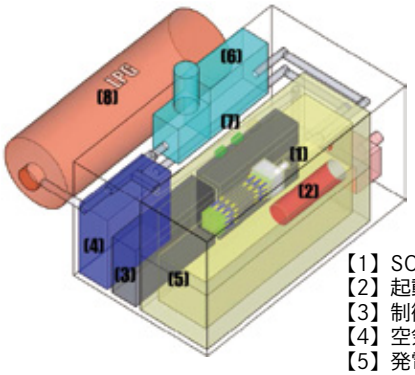
出典：資源エネルギー庁 燃料電池推進室「燃料電池の新たな用途について」
第 4 回水素・燃料電池戦略協議会（2014 年 3 月 26 日）【参考資料［3］】

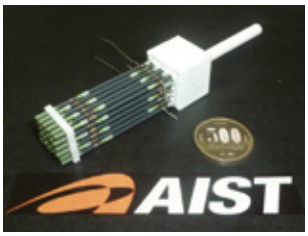
ることにより、LPG（液化石油ガス）を直接内部改質可能な、マイクロチューブ SOFC を開発した（図 6-55）。このマイクロチューブ SOFC は、2005 年度から 2009 年度の NEDO「セラミックリアクター開発」にて開発したものである。

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）。







【1】SOFC スタック　【6】マスフローコントローラー
【2】起動バーナー　【7】USB 端子
【3】制御盤　【8】LPG ガスボンベ
【4】空気ブロワー
【5】発電ユニット　（幅 170×奥行き 160×高さ 80 mm）

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_2 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

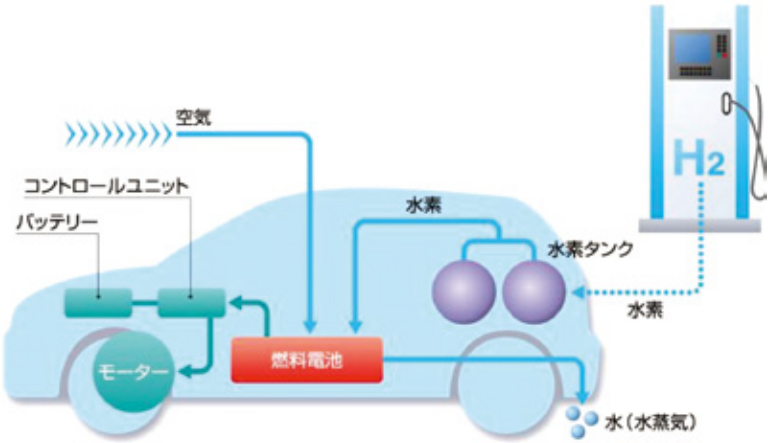


図 6-57　燃料電池自動車の仕組み

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）。

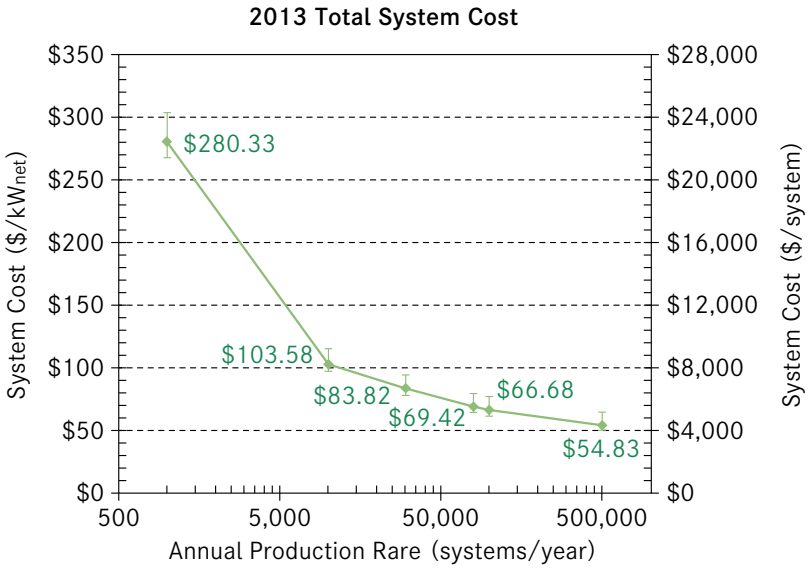


図 6-58　車両用燃料電池システムの量産時コスト試算

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、放熱の為のラジエターシステムが大型になってしまう。このため、ラジエ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^+）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型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。

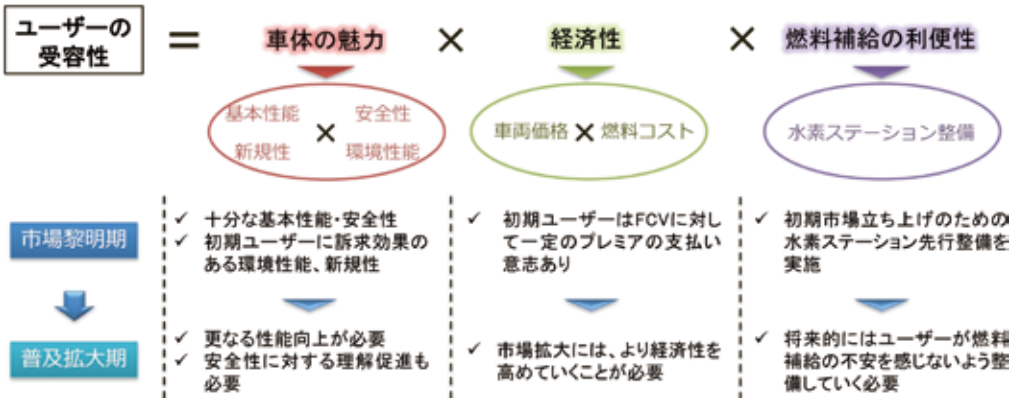


図 6-59　燃料電池自動車の消費者にとっての受容性

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、車のイニシャ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
・2014 年 12 月 15 日 国 内 市販開始 ・水素：70 MPa 対応 ・航続距離約 650 km ・4 名	・2015 年度市販開始 ・水素 70 MPa 対応 ・航続距離 480 km 以上 ・5 名	・2014 年に米国でリース開始 ・水素 70 MPa 対応 ・水素を無料提供
		

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	・2006 年からサンフランシスコ周辺で実証を開始。 ・12 台の路線バスが運行中。	・2010 年から欧州の各地で実証を開始。 ・37 台の路線バスが運行中。2016 年までに 26 台を追加予定。	・2006 年から 2010 年にかけて実証を実施。 ・4 台のシャトルバスが運行。
政府支援	・連邦政府： ―資金支援（エネルギー省（DOE）、国家公共交通局（FTA）） ―データの分析支援（国立再生可能エネルギー研究所（NREL）） ・州政府： ゼロエミッション車導入の規制	・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。	・政府はプロジェクト総額 4660 万ドルの半分を補助。

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%）

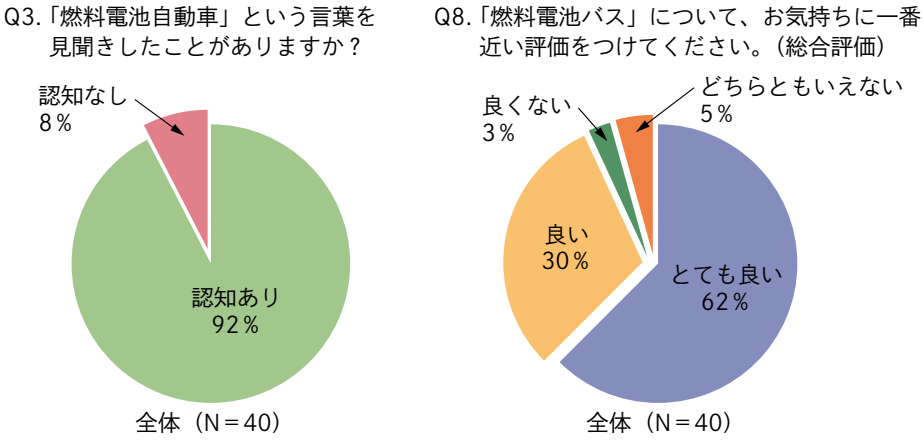


図 6-61　燃料電池バス利用者のアンケート結果

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

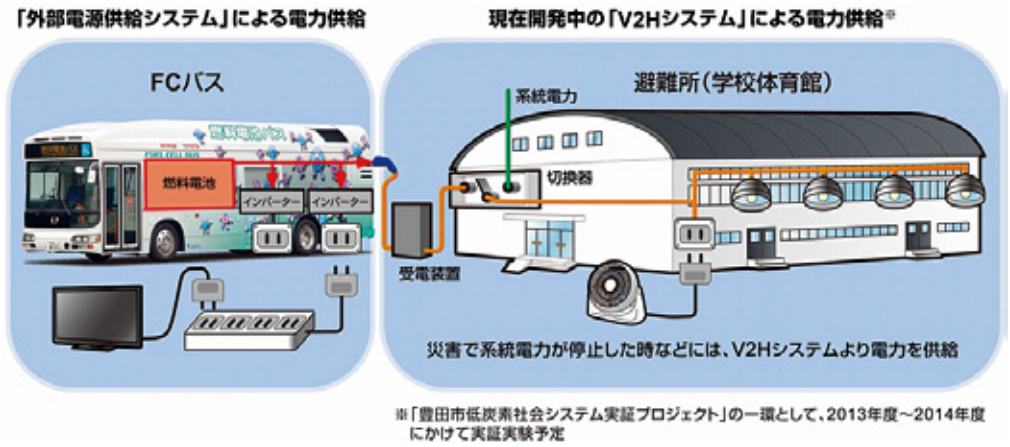


図 6-62　燃料電池バスの外部電源供給機能・V2H システムによる電力供給のイメージ

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ところも大きい（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_2 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 ライプチッ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 ライプチッ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」

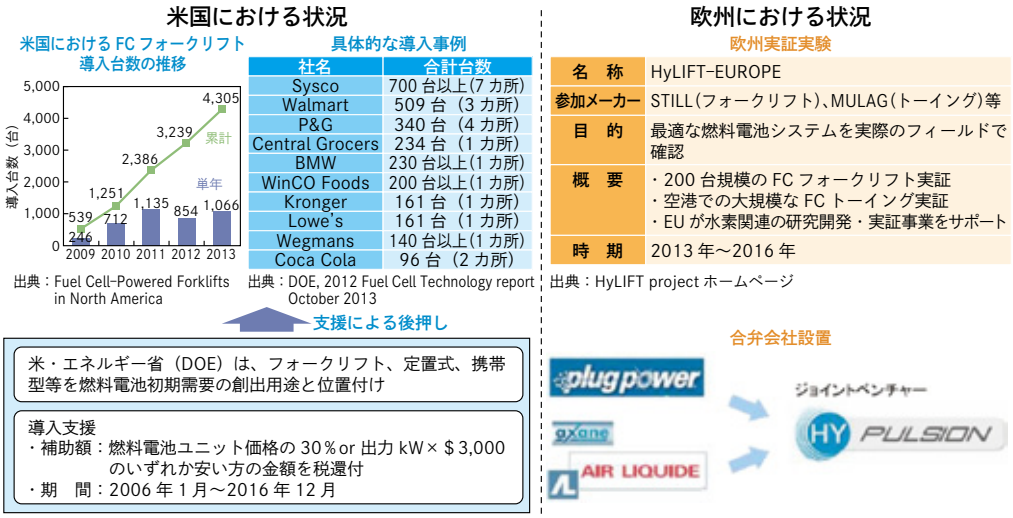


図 6-65　海外における燃料電池フォークリフトの導入状況

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・信頼性が必要となる。

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。

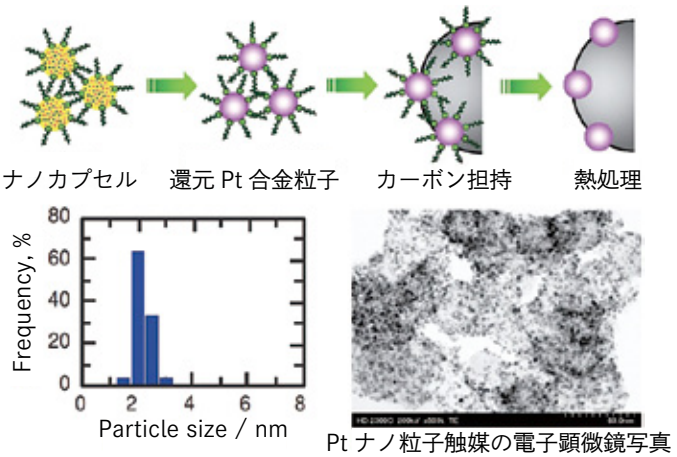


図 6-67　ナノカプセル法の概念と開発触媒の粒子分布

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、カーボンを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。

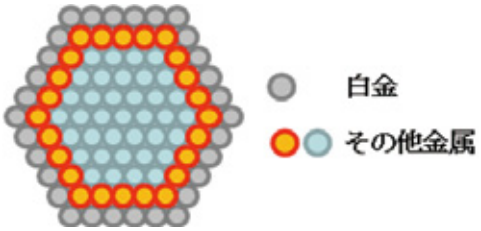


図6-68　コアシェル構造の概念図

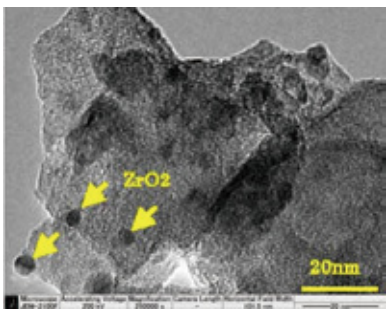


図6-69　Zr系酸化物非貴金属触媒

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

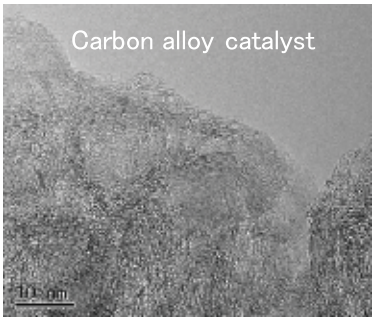


図6-70　カーボンアロイ触媒

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

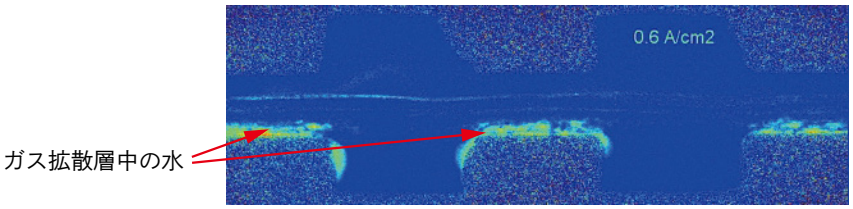


図 6-71　発電中セル内に滞留する水の可視化

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

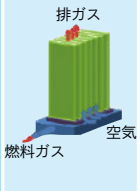
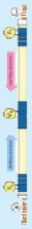
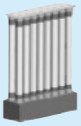
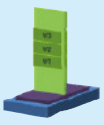
一例として燃料電池セル中での水分布計測の結果を図 6-71 に示す。運転中に水がどこに多く分布しているかがわかり、材料構成との関係からセル構造、MEA 構造などへの最適化に活用されている。

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_2	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_2 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_2 を排出せず、水素の製造方法によっては、CO_2 フリーの電源となる。また、従来のガ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、NOx 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、NOx の発生が問題となるため、水・蒸気噴射などにより NOx 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 NOx 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、天然ガス焚き並みの低 NOx 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

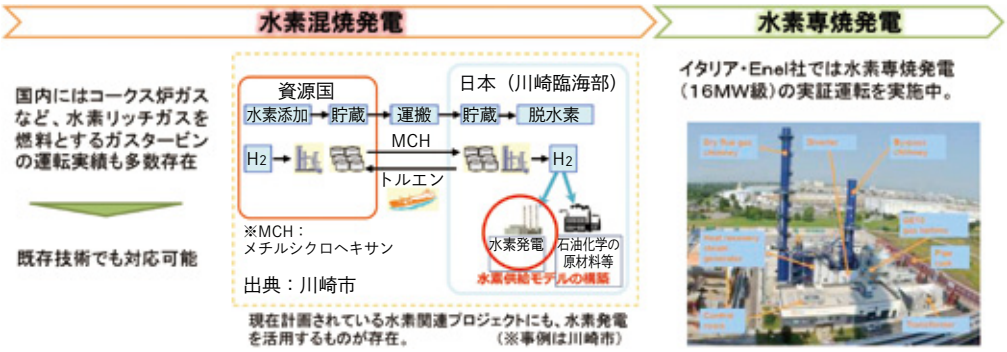


図 6-72　水素発電

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

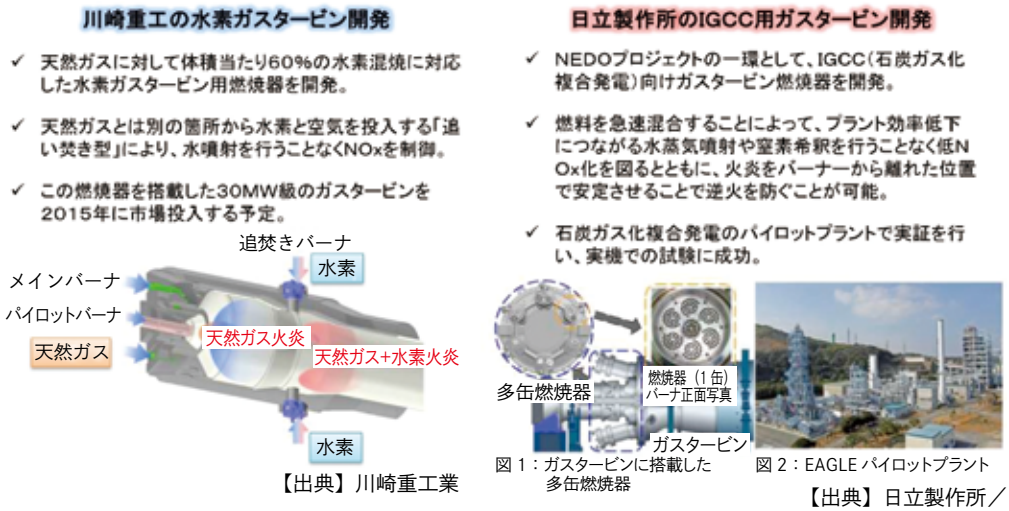


図 6-73　川崎重工業・日立製作所の水素ガスタービン

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

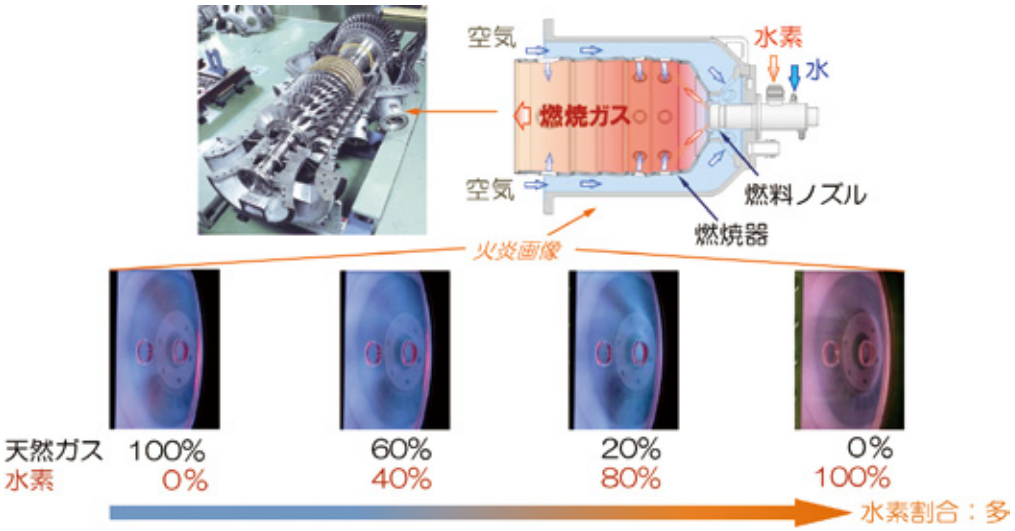


図 6-74　川崎重工業のデュアル水噴射型水素ガスタービン

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 NOx 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）。

第７章

水素社会実現を目指して

水素エネルギーの最大限の利活用を図る水素社会の実現は、気候変動などの地球環境への対応、エネルギー・セキュリティの確保、新たな市場の創出・産業競争力の強化に繋がるものであり、その意義は大きい。その中で、2000 年代初頭には未来の技術であった燃料電池は、既に家庭用燃料電池システムとして製品化され、また 2014 年 12 月には燃料電池自動車の販売が開始され、我々の身近なものとなりつつある。

しかしながら、水素エネルギーを社会に定着させていくためは技術、コスト、制度、インフラなどで取り組むべき課題が多く存在している。本章では、現状の課題と今後の取り組みの方向性について述べる。

7-1　水素社会実現に向けた課題

水素社会実現に向けては、燃料電池の耐久性や信頼性などの技術面の課題、コスト面の課題、水素を日常生活や産業活動でエネルギー源として使用することを前提とした制度整備などの制度面の課題、水素ステーション整備といった水素供給体制などのインフラ面の課題といった、多くの課題が存在しており、これらの課題の一体的な解決に向けた取り組みが必要である。「水素・燃料電池戦略ロードマップ」ではフェーズ毎に次のとおり示している。

7-1-1　フェーズ 1（水素利用の飛躍的拡大）〈2014 ～〉

(1)　定置用燃料電池

●課題 1：家庭用燃料電池の経済性の向上

現在、設置工事費を含んだユーザー負担額は、概ね 150 万円程度と販売開始時期から半

減しているが、ユーザーの投資回収期間を短縮する観点から、イニシャルコストの一層の低減が必要である。その際、固体高分子形燃料電池や固体酸化物形燃料電池それぞれについてコスト低減効果が大きい分野に集中して取り組みを進めることが重要である。

●課題 2：家庭用燃料電池の対象ユーザーの拡大

現在、家庭用燃料電池の主なユーザーは、大都市を中心とする都市ガス使用地域における新築の戸建て住宅のユーザーであるが、戸建て住宅と集合住宅の比率は、住居形態として集合住宅が 4 割を占めていることも踏まえ、集合住宅への展開が重要となる。

●課題 3：家庭用燃料電池の海外展開

電力価格に比べてガス価格が比較的安く、熱需要が多い欧州などの地域においては家庭用燃料電池の潜在的なニーズは高いと考えられ、日本が技術的に大きく先行しているこの時期に、海外展開をさらに積極的に進めることは重要である。

●課題 4：業務・産業用燃料電池の経済性や耐久性などの向上

業務・産業用として期待される固体酸化物形燃料電池はイニシャルコストの問題が大きくユーザーへの訴求力が不十分であることから、一層の経済性の向上が必要である。加えて、耐久性のさらなる向上や、既存のコージェネレーションと同様に活用することができる環境の整備を行うことなども必要である。

(2)　燃料電池自動車（その他輸送用車両を含む）

●課題 1：燃料電池システムなどのさらなるコスト低減

燃料電池自動車の燃料電池システムは依然としてユーザーの許容額を超過すると考えられるため、燃料電池システムなどのさらなるコスト低減が必要となる。この際、燃料電池システムについて、初期段階では電解質膜のコストが、普及段階では触媒やセパレータのコストが、それぞれ大きな割合を占めると考えられ、これらの部材を中心に低コスト化を進めることが重要である（図 7-1）。

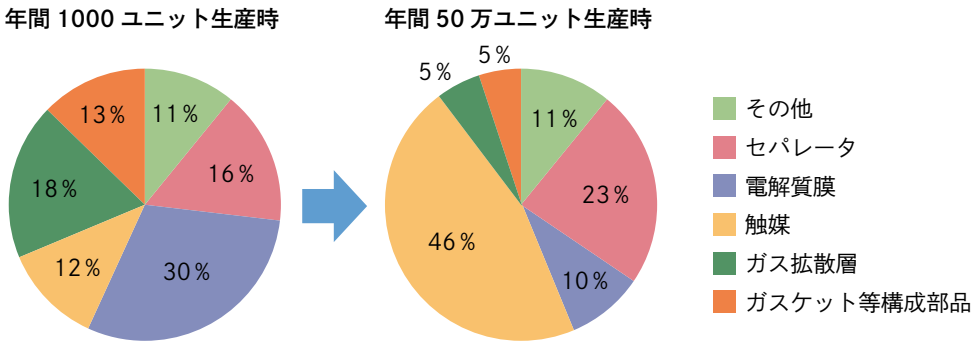


図 7-1　燃料電池システムのコスト構造

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

●課題 2：燃料電池自動車の基本性能などの向上

安定的に特に大きな水素需要の期待されるバスやタクシーなどの業務車両へ適用分野を拡大するため、特に長い走行距離を保証する耐久性と経済性を実現する必要がある。また、普及本格期においては、比較的小型の普通乗用車などのマーケットニーズに合った車種へ適用分野を拡大することも重要である。

●課題 3：燃料電池自動車の海外展開

我が国が競争力を有する燃料電池自動車分野において将来の輸出拡大に繋げるため、安全性能などの基準や相互承認といった国際市場の創出に向けた議論に引き続き参加、主導していくことが重要である。

●課題 4：燃料電池自動車の認知度や理解度の向上

工業用途など限られた用途でしか用いられてこなかった水素が新たに日常の生活でも用いられることを踏まえ、市場投入直後に円滑に普及を拡大するためには、社会一般にとっての水素や燃料電池自動車に対する認知度や理解度を向上させことが必要である。

●課題 5：燃料電池の適用分野の拡大

燃料電池自動車に活用される燃料電池の用途はフォークリフトなどの産業用車両、船舶、燃料電池スクーター、燃料電池鉄道車両など、多様な輸送用途に拡がる可能性があることから、実機による実証や燃料電池の耐久性向上に取り組む必要がある。

●課題 6：従来のガソリン車などと遜色のない燃料代となる水素価格の設定

現状では燃料電池自動車向け水素のコストの約 6 割を水素ステーションの整備・運営費が占めており、それぞれ半額程度まで低減することが必要である。水素ステーションの稼働率によって水素コストは大きく変動することから、市場初期の稼働率が低い期間の水素ステーションの下支えを行うとともに、稼働率を早期に高めていくことが重要である。

●課題 7：水素ステーションの戦略的な整備

2013 年度から商用水素ステーションの先行整備を進めているが、四大都市圏の間で整備箇所数に格差があり、また東京 23 区内などの燃料電池自動車の高い需要が見込まれる地域や、四大都市圏を結ぶ高速道路沿いにおいて、水素ステーションが求められているなかで、戦略的な整備が重要である。

7-1-2　フェーズ 2（水素発電の本格導入／大規模な水素供給システムの確立）〈2020 年代後半に実現〉

●課題 1：発電事業用水素発電の導入に関する具体的な検討

水素発電の導入に検討を行うにあたり、水素の供給サイドと発電事業者などの需要サイドが一体的に取り組んでいくことが必要である。

●課題 2：水素発電ガスタービンに関する制度的・技術的な環境整備

自家発電用水素発電の本格的な普及に向け、NOx の排出量を抑制しつつ、水素混合割合や発電効率をさらに向上させることなどが必要である。発電事業用水素発電については、

一定程度の水素混焼が可能であるが、実運転による検証や水素発電に関する技術基準などが必要である。

●課題３：海外からの水素供給に関する制度的・技術的な環境整備

技術的には実用段階にある有機ハイドライドについては、トルエンを循環的に使用するなどの制度的な対応を行うことが必要である。液化水素については、液化水素のローディングや運搬船などに関する技術的、制度的な課題への対応が必要である。いずれの方法についても、供給規模の拡大によって、設備機器の大型化や大量輸送などによるコストダウンが見込まれるが、市場が自律的に拡大していくまで多くの投資と時間を要することが予想されることから、この間の下支えが必要である。

■ 7-1-3　フェーズ３（トータルでの CO_2 フリー水素供給システムの確立）〈2040 年頃に実現〉

●課題１：水素供給国における CCS

海外の副生水素、原油随伴ガス、褐炭などの未利用エネルギーから製造された水素を国内に輸送する場合、地球規模での二酸化炭素排出量削減を目指すためには、水素供給国において排出される二酸化炭素を回収・貯留する CCS を行うことが必要である。

●課題２：再生可能エネルギー由来の水素製造などに関する技術開発・実証

水電解による水素製造について、大規模で安定かつ安価な水素製造技術、風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーの出力変動への対応といった技術開発が必要である。また、再生可能エネルギー由来水素を有効活用するため、欧米各国でも取り組みが進められている Power to Gas に関する技術開発・実証が必要である。

●課題３：その他の中長期的な技術開発

CCS や再生可能エネルギー由来電気の活用に加え、現時点では基礎的な段階にあり、実現までは一定程度の時間を要すると考えられる技術についても、中長期的な視点から必要な取り組みを行っていくべきである。

7-2　課題克服に向けた取り組み

■ 7-2-1　技術課題の克服

(1)　技術課題の特定

水素社会を実現するための克服すべき技術課題は、基礎から実用化段階、水素エネルギーの製造、輸送・貯蔵、利用と幅広く多岐に渡っているが、これら課題を明らかにするとともに、達成すべき時期といった時間軸や産学官の役割分担を明確にして取り組む必要が

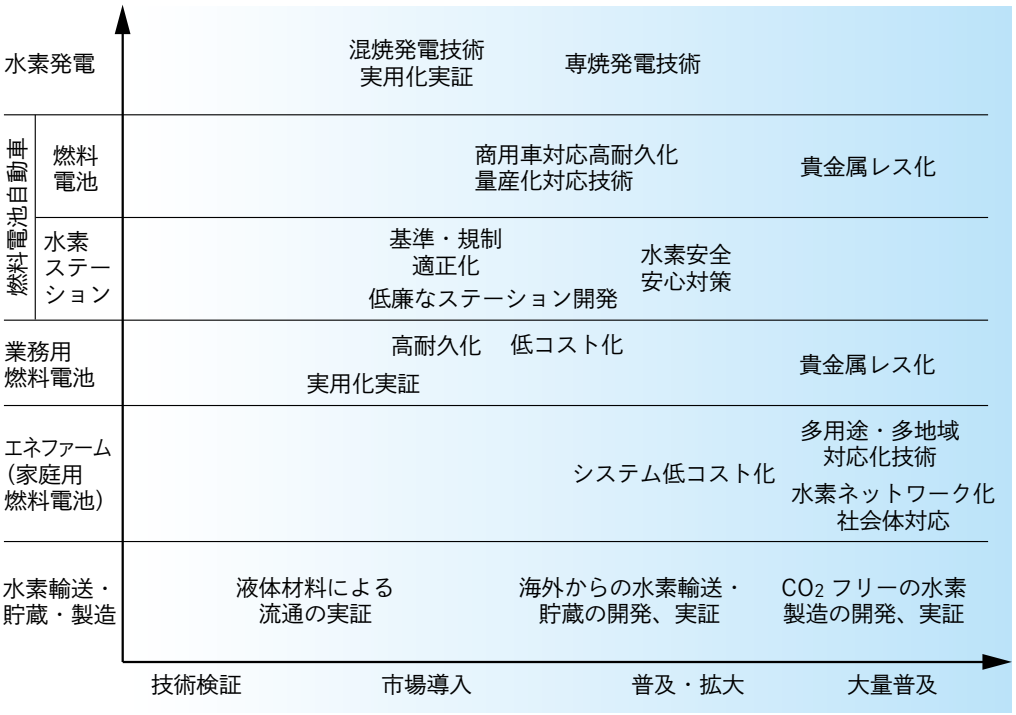


図 7-2　水素社会実現に向けた技術課題

ある。

技術領域と市場の状況によって求められる技術課題に着目して整理したものを図 7-2 に示す。NEDO では今後「燃料電池・水素技術ロードマップ」の改定に取り組み、より詳細な課題の特定を行う。

(2)　技術開発の方向性

①　燃料電池の技術開発

水素エネルギー利用の拡大に向けて、定置用燃料電池や燃料電池自動車の活用を大きく広げていくため、低コスト化、高耐久化といった課題の克服に向けた研究開発を引き続き推進していくことが重要である。家庭用燃料電池や燃料電池自動車に用いられる固体高分子形燃料電池（PEFC）についてコスト低減と技術課題の相関をまとめたものを図 7-3 に示す。

固体高分子形燃料電池（PEFC）の低コスト化・高耐久化・性能向上などに向け、触媒として使用されている白金の使用量低減やこれを代替する貴金属レス触媒、低コストかつ高耐久な電解質材料、燃料電池内での物質移動特性向上（ガス・水分・プロトン・電子）のための技術開発や、これらの技術開発を支える、物質移動機構、電極反応機構、電極・

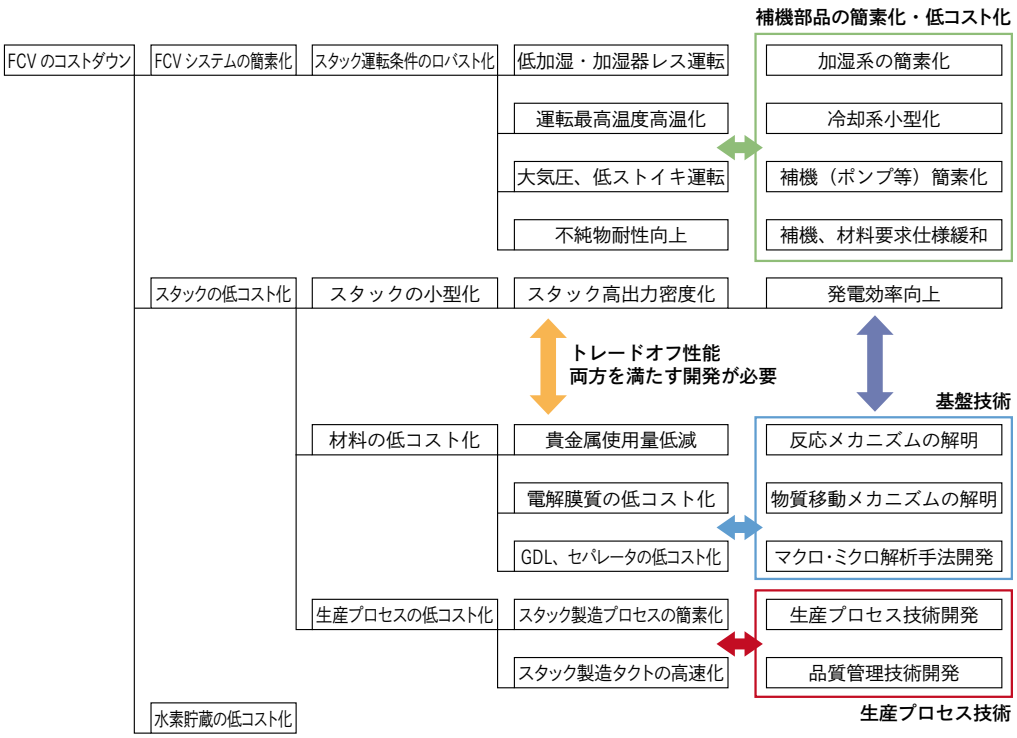


図 7-3　コスト低減と主な技術課題の相関

電解質膜劣化機構の解明を可能とする計測・解析技術の基盤的な技術開発が必要である。

一方、業務または産業用として期待される固体酸化物形燃料電池（SOFC）については、セルスタック・モジュールの高性能化（高出力密度化、部分負荷効率向上など）、耐久性・信頼性の向上、新規電解質材料の開発に取り組むと同時に、この技術開発を支える燃料電池の劣化機構の解析、耐久性迅速評価手法など基盤的な技術開発に取り組む必要がある。また、早期実用化に向けて、実環境化での電気・ガス制御の最適化手法の確立、信頼性の確保が必要である。

②　水素発電の導入と水素供給システムの確立

水素発電については、水素混焼発電では数十 MW 規模での実運転による検証、水素専焼発電では蒸気や水を噴射することなしに NOx の排出量を抑制できるドライ型水素専焼発電ガスタービン用燃焼器の開発、水素ガスの特性を踏まえた安定的な燃焼方法、NOx などの排出量の制御方法などに関する技術開発・実証が必要である。

サプライチェーンの構築について、初期市場創出の観点から一定量の水素需要が見込める地域（例：市街地、空港、湾港、工場など）や地域資源（例：下水汚泥消化ガスなど）の周辺において、自治体、地元企業、公共交通事業者と連携し水素利用技術を集中的に導入する技術実証が有効である。

また、海外からの水素供給に関して、褐炭や副生物などの未利用資源を用いた、安価で安定的な水素の製造技術や貯蔵・輸送技術の確立に向けた技術開発・実証が必要である。

③　トータルでの CO_2 フリー水素供給システムの確立

再生可能エネルギーを利用した水素製造技術については、電解電流密度の向上や電解セル大型化などによる設備コストの低減、変動する再生可能エネルギーへの追従などの技術開発が必要である。また、再生可能エネルギーの短長期的な出力変動、供給地の偏在といった時間的、地理的な偏在性を吸収する手段として、再生可能エネルギーからの水素製造から輸送・貯蔵、利用まで含めた技術開発・実証を計画的に行うことが必要である。

CCS については石油随伴ガスや褐炭などの未利用エネルギーを用いた水素供給システムに関する技術開発・実証と一体となって、二酸化炭素分離・回収プロセスの効率向上、コスト低減などの CCS に関する技術開発・実証を行うことが必要である。

■ 7-2-2　制度面の課題の克服

水素・燃料電池技術の社会への導入にあたり、例えば家庭用燃料電池では、常時監視の不要化、設置保有距離の省略といった規制の見直しに取り組み、これを実現してきた。

現在、燃料電池自動車や水素ステーションに関する規制の見直しについて、「規制改革実施計画」（2013 年 6 月 14 日閣議決定）に基づき進められている。この規制の見直しが計画どおり進められるため、特に安全性に関するデータの取得、試験方法の確立などの取り組みが必要である。また、新たな技術の導入による一層のコスト低減は引き続き重要な課題であり、この活用のための技術の開発・実証と安全基準の早期確立などに向けた取り組みを並行的に進めることが必要である。

さらに、水素発電や海外の未利用資源を利用した水素の輸入など、これまで想定していなかった新たな利用形態の導入にあたり、規制や基準・標準など制度面の課題について、実証段階から特定しつつ取り組むことが必要である。

■ 7-2-3　水素供給体制などのインフラ面の課題の克服

水素ステーションの整備について、その設置コストの大幅な削減に向け、主要な構成機器である水素製造装置、圧縮機、蓄圧器などの構成機器の低コスト化のための技術開発や、これら構成機器を一体化したパッケージ型水素ステーションの積極的な活用のための取り組みを進める。一方、短期的には燃料電池自動車の普及台数が限定的であると見込まれるなか、水素ステーションの設置に係るコストや利便性の確保などを踏まえ、最適な規模の水素ステーションの仕様を確立するとともに、新たに確立される仕様に必要となる技術を開発する。

また、市場初期においては、燃料電池自動車の販売状況に応じて、一つの設備で複数地域での営業が可能となる移動式水素ステーションの活用を進める。

さらに、水素ステーションを実際に設置し、運用していくため必要となる、水素品質や計量の校正、簡易なメンテナンス技術といった基盤的な技術についての開発・整備を行う。

水素ステーションのような新たなインフラの導入にあっては、社会的な受容性の確保が重要であり、このための取り組みを進める。具体的には、水素ステーションで発生したトラブルと対処策などの情報をデータベース化し、水素ステーション運営事業者が運用やメンテナンスのために活用できるツールを早期に作成、供与する。また、このデータベースも活用しつつ、都道府県、地域住民、警察・消防、自動車販売店、エネルギー供給施設などの職員に対して、燃料電池自動車や水素ステーションに関する情報提供や人材育成を行う。

7-3　まとめ

国家プロジェクトを中心とした技術の進展や導入・普及施策を通じて、水素エネルギーの社会への実装が始まりつつある現在、水素社会の実現に向けた入り口に到達したといえるが、今後はこれを本格的な水素社会の実現に結実させていくための絶え間ない取り組みが必要である。

その際、産学官の関係者間で目標と時間軸を共有した上で役割分担を明確化し、優先順位を付して資源を重点配分しながら、協力して取り組んでいくことが不可欠である。

水素は、エネルギー・セキュリティを高め、環境問題に貢献し、かつ日本の産業競争力を高める極めて重要な技術領域である。NEDO は水素社会の実現に向けて、これまで家庭用燃料電池システムで市場を造り、燃料電池自動車と水素ステーションでインフラを整えることにより、水素社会の立ち上げに貢献してきた。今後はさらに、水素発電といった新たな用途の開拓やサプライチェーンの構築を一体的に進めることにより、水素をエネルギー・ミックスの一翼を担う存在に押し上げ、究極的には、カーボン・フリーの水素社会の実現を目指す。このため、NEDO は本章で示した技術課題について産学官の叡智を結集してその解決を図るとともに、規制や基準・標準といった、新技術の導入に不可欠な社会基盤の整備についても関係機関との密接な連携のもと、その整備が円滑に進むような取り組みを進める。

一方で水素エネルギー分野は、短期的には経済性が成立しづらい領域であるなかで、民間企業を刺激し、積極的な参画やチャレンジを称揚するため、水素社会に対する社会の理解や期待の高まりが必要である。

このような背景のもと「NEDO 水素エネルギー白書」は、水素の特徴からエネルギーとしての意義、国内外の政策動向、課題と取り組みの方向性について取りまとめたものであり、水素に対する社会の理解を深めることを目的としたものである。

現在、我々は天然ガス、液化石油ガス、ガソリンといった可燃性のエネルギーを、安全

を確保するための技術や規制などの制度によって、特段の安全に対する意識を持たず安心して利活用している。NEDO が目指す水素社会は、「水素」をこのレベルまで到達させ、ユーザーが特別な意識を持つ必要が無く、利便性の享受や環境問題・エネルギー・セキュリティへの貢献を果たす社会である。

用　語　集

用　　語	意　　味
3E + S	エネルギー基本計画などの我が国のエネルギー政策の基本的な考え方で、安全性（Safety）を前提に、エネルギーの安定供給（Energy Security）、経済効率性の向上（Economic Efficiency）、環境への適合（Environment）の同時達成を図るとしている。
AFC	Alkaline Fuel Cell。アルカリ電解質形燃料電池。電解質にアルカリ電解液を用いており、常温にて使用可能。航空宇宙用として最初に実用化された燃料電池。
AFCIA	Advanced Fuel Cells Implementing Agreement（先端燃料電池実施協定）。1990 年に IEA 傘下に設置された燃料電池に関する研究交流組織。我が国からは NEDO が中心になり専門家を派遣して情報交換を行っている。
BOG	Boil Off Gas。水素やメタンなどの気体を低温で液化させた場合に、外部からの自然入熱などによって気化したガス。過剰に発生すると、液体貯蔵タンクが破壊されないように放出しなければならず、ロスになる。最近の液化水素タンクでは断熱性が高くなり、BOG 率は 1％/日以下となっている。
CaFCP	California Fuel Cell Partnership。カリフォルニア燃料電池パートナーシップ。1999 年に Daimler Chrysler（当時）、Ford、カリフォルニア州大気保全局（CARB）による FCV デモンストレーションとして発足、その後に GM や日本の自動車メーカーも参画し、世界最初の本格的燃料電池自動車デモンストレーションとなった。当初は 2003 年までであったが、燃料電池自動車の実用化目標が先に延びるにつれて継続されてきた。実際の燃料電池自動車デモンストレーションは終了しているが、その活動は拡大し、教育・社会受容性プロジェクトや水素ステーションの基準標準活動も行っている。2012 年には燃料電池自動車普及に備えた水素ステーションの整備に関するロードマップ（California Road Map）を発表した。現在のパートナーは、米国エネルギー省やカリフォルニア州エネルギー委員会（CEC）、世界の主要の自動車メーカーを含む 37 企業・団体。

用　語	意　味
Callux	ドイツ水素・燃料電池技術革新国家プログラム（NIP）の一環として実施されている定置用燃料電池のフィールド実証プログラム。「熱（Cal）」と「電気照明（Lux）」からなる造語。主な燃料電池コジェネレーションのサプライ ヤ は、Baxi Innotech（PEFC）、Hexis（SOFC）、Vaillant（SOFC）。2014 年で 650 台を設置する予定。
CCS	Carbon Capture and Storage（炭素隔離貯留）。様々なプロセスから発生する二酸化炭素を分離し、枯渇した油田やガス田などに圧入して閉じ込める技術。
CEC	California Energy Commission。カリフォルニア州エネルギー委員会。カリフォルニア州の行政組織で、エネルギー政策を担当する。カリフォルニア州における水素ステーションの設置補助金を拠出している。
CEP	Clean Energy Partnership。ドイツで 2002 年より開始された燃料電池自動車と水素ステーションのデモンストレーションプロジェクト。ドイツの自動車メーカーやエネルギー供給会社が中心となってベルリンで始まり、その後ドイツ水素・燃料電池技術革新国家プログラム（NIP）に組み込まれた。現在は我が国の自動車メーカーや米国・韓国の自動車メーカーも参加している。ドイツ全土における 2015 年までの燃料電池自動車市場立ち上げ段階までの水素ステーション整備（50 ヶ所）は CEP の枠で実施されることになっており、設置・運用補助金が提供されている。
CHIC	Clean Hydrogen In European Cities Project。欧州燃料電池水素共同実施機構（FCH JU）が実施している燃料電池バスの実証プロジェクトで、欧州 5 都市（スイス アーラウ、イタリア ボルツァーノ、イタリア ミラノ、英国 ロンドン、ノルウェー オスロ）で 26 台の燃料電池バスを運用する。シックと発音する。
CO_2 フリー水素	再生可能エネルギー由来電力による水電解で製造した水素や、化石燃料の改質で製造した水素に CCS や EOR を組み合わせることで事実上 CO_2 フリーとした水素。水素・燃料電池戦略ロードマップでは、2040 年頃に CO_2 フリーの水素供給システムの確立を目指すとしている。
DOE	Department of Energy（米国エネルギー省）。水素燃料電池のプログラムは、エネルギー効率・再生可能エネルギー局（Office of Energy Efficiency & Renewable Energy：EERE）にある Fuel Cell Technology Office が実施している。
Ene.Field	欧州燃料電池水素共同実施機構（FCH JU）によって 2012 年に開始された定置用燃料電池の大規模実証プロジェクト。1, 000 台の燃料電池（高温型 SOFC、中温型 SOFC、高温型 PEFC、低温型 PEFC）を欧州の 12 ヶ国に設置する。
EOR	Enhanced Oil Recovery。石油増進回収法。CO_2 を油田に埋め戻すことで油田の残存原油を回収する方法。

用　語	意　味
FCCJ	Fuel Cell Commercialization Conference of Japan（燃料電池実用化推進協議会）。2001 年に民間によって設立された組織。目的は「我が国における燃料電池の実用化と普及に向けた課題解決のための具体的な検討を行い、政策提言としてとりまとめ、会員企業自ら課題解決に努力するとともに、国の諸施策へ反映させることにより、我が国における燃料電池の普及と実用化を目指し、もって、我が国の燃料電池産業の発展に寄与すること」としている。
FCH JU	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking（欧州燃料電池水素共同実施機構）。欧州連合の多年度研究開発プログラム（フレームワークプログラム）のうち、水素燃料電池関係の公募・補助金管理・R&D 政策を行う官民パートナーシップ（「共同技術イニシアティブ」ともいう）。従来は欧州委員会の研究総局（DG Research）が公募と助成を行っていたが、より企業ニーズを R&D に反映させるために 2008 年に設置された（なおこのような官民パートナーシップが設置されたのは、水素・燃料電池分野を含め 5 分野のみである）。資金は研究総局の第 7 次フレームワークプログラムから拠出するものの、最高意思決定機関である欧州運営委員会の委員の半数以上が民間企業となっており、民間主導で助成が行われるようになっている。2013 年に終了し、2014 年に後継組織である FCH 2 JU（Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking）が 2020 年までの予定で設置されている。
FCV	Fuel Cell Vehicle。「燃料電池自動車」参照。
H2 Mobility	ドイツで 2009 年に、2016 年以降の水素ステーション整備を検討するため結成された組織。我が国の自動車メーカーも参画。ビジネスプランやエリア分析を実施している。その後、この官民パートナーシップをモデルとして、英国に UK H2 Mobility が、フランスで H2 Mobility France が発足した。
HIA	Hydrogen Implementing Agreement（水素実施協定）。1977 年に IEA 傘下に設置された水素エネルギーに関する研究交流組織。我が国からは NEDO が中心になり専門家を派遣して情報交換を行っている。
Hydrogenius	九州大学水素材料先端科学研究センター。産業技術総合研究所が九州大学と連携して 2006 年 7 月に設置した水素材料の研究拠点。2013 年 4 月から九州大学が運営を引き継いでいる。
HySUT	The Research Association of Hydrogen Supply / Utilization Technology（水素供給・利用技術研究組合）。2009 年に設立され、2015 年の燃料電池自動車の一般ユーザーへの普及開始を目指した、水素供給インフラの社会的受容性と事業成立性の課題の検証・解決のための実証研究の実施と、水素タウンにおける水素パイプラインによる純水素型燃料電池などへの水素供給実証研究の実施を行っている。

用　語	意　味
HyTReC	Hydrogen Energy Test and Research Center（公益財団法人水素エネルギー製品研究試験センター）。2009 年 3 月に設置されたもので、水素エネルギーの開発促進、水素エネルギー新産業の育成、集積により、福岡県の産業の活性化と県民生活の質的向上を目指すとしている。
HyTrsut	ドイツ水素・燃料電池技術革新国家プログラム（NIP）の一環として 2009 ～ 2013 年に実施された水素エネルギーに対する意見や社会受容性に関する全国的な調査。少人数のグループによるインタビュー、全国 1,000 人以上の電話インタビュー、市民 16 人による週末セミナー（市民会議）などを実施。
ICHS	International Conference on Hydrogen Safety。国際水素安全会議。2005 年から隔年で開催されている水素安全に特化した専門家会議。当初は欧州連合第 6 次フレームワークプログラム傘下の水素安全に関する研究交流ネットワークプロジェクト「Network of Excellence HySafe」が実施する国際会議。現在は国際 NPO「International Association HySafe」が主催している。
IEA	International Energy Agency（国際エネルギー機関）。第 1 次石油危機を契機にアメリカの呼びかけで設立された。エネルギー安全保障、気候変動政策、再生可能エネルギー技術開発を実施。加盟国は 28。傘下に約 40 の実施協定（Impleremnting Agreement）が設置され IEA 加盟国だけでなく非加盟国の研究者も参加して、特定の研究分野で国際協力・情報交換を実施。
IPHE	International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy（国際水素燃料電池パートナーシップ）。2003 年に設立された政策面の国際連携組織で、水素・燃料電池分野の研究・開発・実証・利用を効率的に進めるために国際協調を促進することが目的。現在 17 ヶ国・1 地域が加盟しており、我が国は設立以来のメンバー。
IS プロセス	水の熱分解において、循環物質に硫黄とヨウ素を用いるもの。我が国で研究されており、実現性が高いと考えられる。
JHFC	水素・燃料電池実証プロジェクト。2002 年度から 2010 年度まで実施された FCV と水素ステーションの実証試験プロジェクト。経産省が実施していたが、2009 ～ 2010 年度は NEDO の「燃料電池システム等実証研究」として実施。2011 ～ 2013 年度は NEDO の「地域水素供給インフラ技術・社会実証」に引き継がれた（JHFC-3）。
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell（溶融炭酸塩形燃料電池）。電解質に溶融した炭酸塩（炭酸リチウム、炭酸カリウムなど）を用いており、作動温度は 600 ～ 700℃程度。燃料には水素の他に天然ガスなどが利用可能。
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）。

用　語	意　味
NIP	National Innovation Programme Hydrogen and Fuel Cell Technology。ドイツ水素・燃料電池技術革新プログラム。2007 ～ 2016 年の 10 年間で合計 14 億ユーロ（官民が半額を出資）を水素・燃料電池技術開発に投資する。現在、後継プログラムである NIP 2.0（2016 ～ 2023 年）の立ち上げが予定されている。
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff-und Brennstoffzellentechnologie（ドイツ水素燃料電池機構）。ドイツの国家プロジェクトである水素・燃料電池技術革新プログラム（NIP）の実施とファンド管理（公募）、政策提言のための機関。その後、電気自動車プログラムである National Development Plan Electromobility の実施も担当することになった。
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell（リン酸形燃料電池）。電解質にリン酸水溶液を用いており、作動温度は約 200℃。白金を触媒に使用するので燃料ガス中の CO 除去が必要。
PEFC	Polymer Electrolyte Fuel Cell、あるいは Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell（固体高分子形燃料電池）。欧米では PEMFC ということが多い。電解質にプロトン交換膜を用いており、作動温度は室温～ 80℃程度。白金を触媒に使用するので水素中の CO 除去が必要。プロトン交換膜には、フッソ系膜と炭化水素系膜がある。市販が予定されている燃料電池自動車や燃料電池バスに搭載される燃料電池は基本的に PEFC である。
PEM 水電解	電解質に固体高分子膜を用いた水電解。
Power-to-Gas	再生可能エネルギー由来の電力（Power）で水電解し、水素やさらにメタンを生産する技術。ドイツが国家的進めているほか、米国、カナダ、フランスなどでも研究を進めている。
PSA	Pressure Swing Adsorption（圧力変動吸着法）。各物質の吸着剤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。
SHHP	Scandinavian Hydrogen Highway Partnership（スカンジナビア水素ハイウェイ・パートナーシップ）。スカンジナビア 3 ヶ国が連携して進めている水素ハイウェイ計画。ノルウェーの HyNor プロジェクト、スウェーデンの Hydrogen Sweden プロジェクト、デンマークの Hydrogen Link プロジェクトから構成される。ドイツとのリンクを目指している。
SMR	Steam Methane Reforming（水蒸気メタン改質）。メタンガスに水蒸気を反応させ、水素を製造する技術。
SOEC	Solid Oxide Electrolyzer Cell（固体酸化物形電解セル）。SOFC の逆反応で水電解を行う。水電解が、高温ほど理論エネルギーが小さいことに着目した技術。
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell（固体酸化物形燃料電池）。電解質としてイオン伝導性セラミックスを用いており、作動温度は 700 ～ 800℃。燃料には水素の他に天然ガスなどが利用可能。

用　語	意　味
Type 1	高圧ガスの貯蔵容器で、金属製のもの。
Type 2	高圧ガスの貯蔵容器で、金属ライナーにカーボン FRP をフープ巻き（円筒胴の周方向に沿った巻き）をしたもの。
Type 3	高圧ガスの貯蔵容器で、金属ライナーにカーボン FRP を全体に巻いた（フルラップ）もの。複合容器の一種。
Type 4	高圧ガスの貯蔵容器で、プラスチックライナーにカーボン FRP を全体に巻いた（フルラップ）もの。複合容器の一種。
UT-3	水の熱分解において、循環物質にカルシウム、鉄、臭素などの化合物を用いるもの。
V2H	Vehicle to Home。車両（FCV、PHEV、BEV）から電力を家に供給する技術。緊急時対策や家庭用電力のロードレベリングに利用することが考えられており、実証実験が進んでいる。FCV を用いる場合は FCH2H という場合もある。
Well-to-Wheel	自動車のエネルギー効率を、燃料の採掘・生産段階である Well（井戸元）から走行段階の Wheel（車輪）までの総合として計算したもの。多様な燃料や車両のタイプのエネルギー効率を同じ尺度で比較できるようになる。車両への燃料充填・充電段階で分けて、Well-to-Tank（燃料効率）と Tank-to-Wheel（走行効率）と表現する場合もある。
WE-NET	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。NEDO が 1993 ～ 2002 年に実施したもので、再生可能エネルギーから水素を製造し、日本に輸送して、発電や自動車用燃料などで利用するための研究開発を行った。
WHEC WHTC	World Hydrogen Energy Conference（世界水素エネルギー会議）、World Hydrogen Technologies Conferences（世界水素技術会議）。ともに国際水素エネルギー協会（International Association for Hydrogen Energy：IAHE）が主催する水素エネルギー全般に関する国際会議。WHEC は偶数年に、WHTC は奇数年に開催。
圧縮機	コンプレッサー。水素ステーションに設置される場合は、70MPa での充填を可能にするために、水素を 80 ～ 90MPa に加圧を行う。
アルカリ水電解	電解質にアルカリ水溶液（KOH）を用いた水電解。
液化水素	液体水素ともいう。水素は－252.6℃で液化する。密度は 70.8 kg/m^3。
エネファーム	家庭用燃料電池の共通ブランド。当初は PEFC タイプだけであったが、その後に発売された SOFC タイプは「エネファーム Type S」と呼んでいる。
エネルギー基本計画	我が国のエネルギー政策の基本方針で、定期的に改訂されている。最新の改訂は 2014 年 4 月で、「“水素社会”の実現に向けた取組の加速」という章が設けられている。

用　語	意　味
オフサイト	水素ステーションで、水素を外部から供給する方式。通常は水素トレーラーなどを用いて水素を供給する。
オルト水素、パラ水素	水素分子中の 2 個の陽子の核スピンの向きが同方向のものをオルト水素、反対方向のものをパラ水素という。常温では 75：25 の割合にある。液化水素ではパラ水素が安定であるが、オルト水素からパラ水素に変換するときの放熱で液化水素が蒸発してしまうので、液化前に触媒によってパラ水素に変換しておく。
オンサイト	水素ステーションで、水素を現地で改質や水電解などの方法で製造する方式。
火気距離	火気を取り扱う場所、多数の人が集まる場所、引火性の物質を堆積した場所からの離隔距離。
褐炭	石炭化度が低い石炭で、水分や不純物が多い。乾燥すると自然発火するのでそのままでは輸送には適さない。現在、オーストラリアの褐炭を現地で水素に変換し、CCS を適用することで、CO_2 フリーな水素を日本に輸入するプロジェクトが進められている。
コークス炉ガス	コークス精製する過程で生産されるガス。COG とも呼ばれる。主成分は水素 55％、メタン 30％。
コージェネレーション	電力と熱を同時に発生させるシステム。熱併給発電とも言う。米国では CHP（Combined Heat & Power）と呼ぶことが多い。
シフト反応	水性ガスシフト反応ともいう。化石燃料の改質において、生じた CO に水を反応させ、水素と二酸化炭素を得る反応。 $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$
社会受容性	特定の技術の普及のためには、市民に対して正しい情報を伝え、誤解や先入観のないように啓発していく必要がある。水素エネルギーでは、水素の性質に加え、安全に利用する技術、方法などを正しく伝えていく必要がある。
出発地ステーション・目的地ステーション・ブリッジステーション	水素ステーションのロケーション検討においては、初期オーナーが多いと思われる地域に水素ステーション（出発地ステーション）を置き、さらに観光地やショッピングエリアなどのトリップ目的地にもステーション（目的地ステーション）を置くことが考えられる。出発地ステーションの間や都市間も水素ステーション（ブリッジステーション）が必要になる。カリフォルニア州のロードマップはじめ、我が国の北部九州燃料電池自動車普及促進構想、愛知県水素ステーション整備・配置計画などでも同様の考え方を踏襲している。
人工光合成	一般には植物の光合成を人工的に模して多様な物質を作る技術だが、これを二段階化することで水素を製造する研究が行われている。第一段階では光が当たることで水を酸化し電子を放出する。第二段階でこの電子を用いて水を還元して水素を製造する。

用　語	意　味
水蒸気改質	炭化水素や石炭に水蒸気を反応させ、水素を製造する方法。工業的に大規模に利用されている。メタンを利用する場合は水蒸気メタン改質（SMR）という。
水素	原子番号 1 で、宇宙で最も豊富にある元素。地球上では化合物として存在する。気体としては軽く、無色、無味、無臭。火炎は透明で、燃焼すると酸素と反応して水になる。－252.6℃で液化する。
水素安全	水素を安全に扱う技術やその観念。水素もエネルギーである以上、ガソリンと同様に正しく使う必要があり、事故防止のための安全技術や従業員に対する安全教育が必要になる。
水素エネルギー	水素を特にエネルギーとして活用する場合に水素エネルギーという。水素は電気同様に二次エネルギーとしても活用できる。
水素吸蔵合金	水素を可逆的に吸蔵する金属。金属水素化物中の水素原子密度は概ね 90 kg-H_2/m^3 以上であり、液化水素の密度（70.8 kg-H_2/m^3）よりも高いとされる。
水素ステーション	燃料電池自動車などに水素を供給するための拠点となるもので、ガソリン自動車のガソリンスタンドに相当する。
水素脆化	吸収された水素により鋼材の強度が低下する現象。
水素発電	天然ガス火力発電において水素を混焼、または水素だけを専焼させて発電させる技術。水素が大量に使用されるため水素の低コスト化につながると期待されている。
随伴ガス	原油の生産に随伴して発生するガスで、天然ガスの一種でもある。現在、中東地域の随伴ガスを現地で水素に変換し、EOR を適用することで、CO_2 フリーな水素を日本に輸入するプロジェクトが進められている。
スタック	燃料電池スタックや単に燃料電池ともいわれる。燃料電池の最小単位であるセルを直列に複数枚積層したもの。
大規模実証	NEDO が 2005 ～ 2009 年度に実施した「定置用燃料電池大規模実証研究事業」で、約 3,300 台の 1 kW 級定置用燃料電池（PEFC）の実証を行った。
蓄圧器	蓄ガス器ともいう。水素ステーションに設置され、水素を高圧で貯蔵する。クロムモリブデン鋼（SCM435 鋼、SNCM439 鋼）を用いることが多いが、複合容器の使用が検討されている。
ディスペンサー	Dispenser。燃料を車両などに充填する装置。水素ディスペンサーでは、圧縮水素用と液化水素用がある。
定置用燃料電池	家庭用や業務用に使用される燃料電池。通常はコージェネレーション（熱電併給）となる。
燃料電池	Fuel Cell。電気化学反応によって水素などから電力を取り出す装置で、AFC、PAFC、PEFC、MCFC、SOFC などの種類がある。

用　語	意　味
燃料電池自動車	Fuel Cell Vehicle。水素を燃料として車載し、燃料電池スタックで発電することで走行する自動車。モーターで走行するので、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。
燃料電池バス	水素を燃料として車載し、燃料電池スタックで発電することで走行するバス。2016 年に市販されることが期待されている。
燃料電池フォークリフト	水素を燃料として車載し、燃料電池スタックで発電することで駆動するフォークリフト。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なうえ、水素充填も短時間であることから、バッテリー式フォークリフトに比べ作業効率、経済効率の向上に寄与することが期待される。
バイオマス	生物資源や生物燃料のことで、化石燃料と対比して使用される。特に木材、廃材などを木質バイオマスという。木質の場合、光合成により CO_2 から合成された有機物で構成されているので、これが燃えて発生する CO_2 は大気中の CO_2 量には影響しない（カーボンニュートラル）。
複合容器	コンポジット容器、FRF 容器ともいう。ライナーと呼ばれる薄肉の金属（アルミ）またはプラスチックの外を、樹脂を含浸させたカーボン繊維（カーボン FRP）を巻き付けることで耐圧性を高めた容器。金属製ライナーを Type3、プラスチック製を Type4 という。
副生水素	多様なプロセスから副産物として生産される水素。我が国では、主にソーダ産業から副生される水素、製鉄所からの副生水素、製油所からの副生水素がある。
プレクーラー	プレクールともいう。水素は断熱膨張するとジュールトムソン効果により温度が上昇するため、空に近い車載タンクに充填した場合にタンクの上限温度 85℃を超えないように、あらかじめ－20 ～－40℃に冷却しておく必要がある。冷却にはフロン冷媒や液体窒素などを用いる。
保安距離	一定規模以上の高圧ガス設備を設置する場合に、周囲にある保安物件（重要施設や民家など）に対する危害を防止するために確保すべき距離。
補機プロ	家庭用燃料電池の補機（バルブ、ポンプなど）のコスト低減を目指して、家庭用燃料電池メーカーが協力して行ったプロジェクト。2005 年 4 月に「家庭用燃料電池システム関連補機類の共通仕様リスト」を完成。その後、NEDO が引き継ぎ、改訂を行っている。
有機ハイドライド	芳香族系有機化合物で、水素を可逆的に放出するもの。多様な系が検討されているが、特にトルエン＝メチルシクロヘキサン系が、脱水素触媒の新規開発により実用化が期待されている。このトルエン＝メチルシクロヘキサン系を用いて中東の随伴ガスから水素（CO_2 フリー水素）を日本に輸入するプロジェクトが実施されている。

用　語	意　味
水素安全利用等基盤技術開発	NEDO が 2003 ～ 2007 年度に実施したプロジェクトで、水素エネルギー社会の実現に必要となる要素技術の研究開発と水素エネルギー社会実現のためのシナリオ検討などを行った。
水素社会構築共通基盤整備事業	NEDO が 2005 ～ 2009 年度に実施したプロジェクトで、燃料電池自動車や定置用燃料電池システムの普及とインフラ整備に向け、法令などの再点検、基準・規格作りなどを実施した。
水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発	NEDO が 2008 ～ 2012 年に実施したプロジェクトで、水素供給インフラ市場立ち上げのために、水素製造・輸送・貯蔵・充填・車載技術の低コスト化・高性能化を行った。
水素先端科学基礎研究事業	NEDO が 2006 ～ 2012 年度に実施したプロジェクトで、水素挙動や水素脆化などの現象の確認を通じて、水素の基本的性質の解明を行った。
水素貯蔵材料先端基盤研究事業	「Hydro ★ Star」ともいう。NEDO が 2007 ～ 2011 年度に実施したプロジェクトで、水素貯蔵材料に関する基本原理の解明と材料開発を発生させるための基礎技術開発を行った。
水素利用技術研究開発事業	NEDO が 2013 年から実施しているプロジェクト。国内規制適正化と国際基準調和、燃料電池自動車及び水素ステーション用低コスト機器・部品などの研究開発を行っている。
東京オリンピック・パラリンピック	2020 年に東京で開催されるオリンピック・パラリンピック。2014 年 4 月に公開されたエネルギー基本計画では、燃料電池自動車が活躍できれば世界が水素の可能性を確信するための機会になるとしている。
日本再興戦略	2013 年 6 月に発表されたアベノミクスの第三の矢。燃料電池の普及拡大と 2015 年の燃料電池自動車導入と世界最速普及が明確に謳われている。
民間 13 社の共同声明	2011 年 1 月に日本の 13 社（トヨタ自動車、日産自動車、本田技研工業、JX 日鉱日石エネルギー、出光興産、岩谷産業、大阪ガス、コスモ石油、西部ガス、昭和シェル石油、大陽日酸、東京ガス、東邦ガス）が燃料電池自動車の国内市場導入と水素供給インフラ整備に関する共同声明を発表した。

参考資料

［1］　経済産業省（2014）「水素・燃料電池戦略ロードマップ」
http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140624004/20140624004.html

［2］　経済産業省（2014）「エネルギー基本計画」
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf

［3］　資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー対策課 燃料電池推進室（2014）

・「第 1 回水素・燃料電池戦略協議会　配布資料」
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/001_haifu.html

・「第 1 回　水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ　配布資料」
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/001_haifu.html

・「第 2 回　水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ　配布資料」
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/002_haifu.html

・「第 3 回　水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ　配布資料」
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/003_haifu.html

・「第 4 回　水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ　配布資料」
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/004_haifu.html

・「第 5 回　水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ　配布資料」
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/005_haifu.html

・「第 6 回　水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ　配布資料」
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_

nenryodenchi_wg/006_haifu.html
［4］ 財団法人 日本自動車研究所（2011）「総合効率と GHG 排出の分析報告書」
［5］ 特許庁（2012）「平成 23 年度 特許出願技術動向調査報告書（概要）燃料電池」
［6］ FCCJ 燃料電池実用化推進協議会　FCV と水素ステーションの普及に向けたシナリオ（2010）
http://fccj.jp/pdf/22_csj.pdf
［7］ 財団法人 新エネルギー財団（2010）「平成 21 年度定置用燃料電池大規模実証事業報告書」
［8］ CaFCP「A California Road Map：The Commercialization of Hydrogeb Fuel Cell Vehicles（Overview）」
［9］ NOW「Hydrogen Mobility gets going」
http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user_upload/RE_Publikationen_NEU_2013/Publikationen_NIP/Hydrogen_Mobility_gets_going.pdf
［10］ 一般社団法人 日本電機工業会（2014）「2013 年度定置用燃料電池発電システム出荷量統計調査報告」
［11］ みずほ情報総研株式会社（2013）「水素需給の現状と将来見通しに関する検討」 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 平成 24 年度成果報告書
［12］ NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2010（2010）
［13］ 株式会社富士経済　2012 年版 水素燃料電池関連市場の将来展望（2012）
［14］ 株式会社富士経済　2013 年版 燃料電池関連技術・市場の将来展望（2013）
［15］ デロイトトーマツコンサルティング株式会社 ニュースリリース　世界の燃料電池自動車の販売台数予測（2013.8.19）
https://www.tohmatsu.com/view/ja_JP/jp/industries/mf/2963161887a70410VgnVCM1000003256f70aRCRD.htm
［16］ 岩谷産業株式会社（2014）、「水素エネルギーハンドブック　第 3 版」
http://www.iwatani.co.jp/jpn/h2/pdf/hydrogen_handbook.pdf
［17］ NEDO（2009）「固体高分子形燃料電池産学連携プロジェクト（Ver5）―コンソーシアムによるメカニズム徹底解明とコストダウンへの挑戦―」
http://www.nedo.go.jp/content/100079678.pdf
［18］ UK H2Mobility（2013） UK H2 Mobility Phase 1 results
https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/192440/13-799-uk-h2-mobility-phase-1-results.pdf
［19］ DOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Fy 2015 Budget Request
［20］ 平成 22 年度 JHFC 国際セミナー（2011） セミナー資料集
http://www.jari.or.jp/portals/0/jhfc/data/seminor/fy2010/lecture.html
［21］ 岩谷産業株式会社ホームページ
http://www.iwatani.co.jp/jpn/h2/index.html

［22］ 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
［23］ NEDO 燃料電池・水素技術開発 平成 23 年度成果報告シンポジウム 平成 23 年度要旨集
［24］ NEDO「固体高分子形燃料電池実用化推進技術／基盤技術開発／酸化物触媒」平成 24 年度分中間年報
［25］ HySUT 水素供給・利用研究組合 ホームページ
http://hysut.or.jp/
［26］ 一般社団法人 燃料電池普及促進協会（FCA）ホームページ
http://www.fca-enefarm.org/
［27］ 一般社団法人 次世代自動車振興センター（NEV）ホームページ
http://www.cev-pc.or.jp/
［28］ 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「固体高分子形燃料電池実用化推進技術開発」ホームページ
http://www.nedo.go.jp/activities/FF_00142.html
［29］ 新関西国際空港株式会社 スマート愛ランド推進計画 ホームページ
http://www.nkiac.co.jp/env/kix/eco/index.html
［30］ 日本ガス体エネルギー普及促進協議会
http://www.gas.or.jp/collabo/
［31］ 一般社団法人 日本自動車研究所（JARI） 水素・燃料電池 ホームページ
http://www.jari.or.jp/tabid/103/Default.aspx
［32］ 公益財団法人 水素エネルギー製品研究試験センター（Hy Trec） ホームページ
http://www.hytrec.jp/

【自治体】

［33］ 東京都環境局
https://www.kankyo.metro.tokyo.jp/energy/tochi_energy_suishin/hydrogen/index.html
［34］ 福岡水素エネルギー戦略協議会 ホームページ
http://www.f-suiso.jp/
［35］ 愛知県 産業科学技術課 新エネルギー関連産業の振興 ホームページ
http://www.pref.aichi.jp/san-kagi/shinene/
「愛知県水素ステーション整備・配置計画」
http://www.pref.aichi.jp/0000069141.html
［36］ 佐賀県 新エネルギー関連 ホームページ
http://www.pref.saga.lg.jp/web/shigoto/_32796.html
［37］ 川崎市総合企画局 スマートシティ戦略室 ホームページ

http://www.city.kawasaki.jp/200/soshiki/2-7-0-0-0.html

【海外】

［38］ 米国エネルギー省（DOE） Hydrogen and Fuel Cell program ホームページ
http://www.hydrogen.energy.gov/index.html

［39］ NOW ホームページ
http://www.now-gmbh.de/en.html

［40］ UK H2 Mobility ホームページ
http://www.ukh2mobility.co.uk/

［41］ Scandinavian Hydrogen Highway Partnership ホームページ
http://www.scandinavianhydrogen.org/

［42］ IPHE ホームページ
http://www.iphe.net/index.html

［43］ IEA AFC（Advanced Fuel Cells Implementing Agreement） ホームページ
http://www.ieafuelcell.com/

［44］ IEA HIA（Hydrogen Implementing Agreement） ホームページ
http://ieahia.org/