

サマリー

自動車用燃料としての水素エネルギーの現状と今後の動向について

計量分析ユニット需給分析・予測グループ	研究主幹	平井晴己
同上	主任研究員	松尾雄司
同上	研究員	宇野宏
同上	研究員	永富悠

水素社会への移行を実現するには、第一に、長期的な観点から「低炭素社会」の実現を目指すことを目的とし、追加費用（ガソリンや軽油価格と比較して）は、社会全体として負担する必要がある。そのためには、燃料電池や水素貯蔵技術ばかりでなく、有効利用が期待される再生可能エネルギーも含めた技術開発の進展を促し、可能な限りコスト低減を図り、費用対効果を明確にする必要がある。第二に、石油に依存した供給体系から、水素を軸とした供給インフラへと転換していくには、インフラ設備全体を代替することになるので、長期的な社会プランとして取り進めることになり、政府のリーダーシップが必要である。さらに水素に対する安全性の確保及び法的規制の整備など、運用ルールの確立も政府が果たすべき重要な役割である。

既存の供給インフラを利用できるか、または比較的軽微な投資（充電設備など）で対応できる、ガソリンハイブリッド自動車やプラグインハイブリッド自動車などの普及拡大が燃料電池自動車（FCV）に先行して展開する可能性が高い。しかしながら、二酸化炭素排出量（LCA ベース）が少ないことや、ガソリン自動車同様に長距離走行に適していることから、内燃機関を駆動源とする自動車の究極的な代替可能性を秘めている。100 年を超える長い歴史を持つ内燃機関と比較して、FCV はわずか 20 年あまりの歴史であり、現状では克服しなければならない課題は多いものの、内燃機関同様に、様々な改良が加えられ技術的な蓄積が進み、成長・成熟していくと考えられる。

お問い合わせ: report@tky.ieej.or.jp

「自動車用燃料としての水素エネルギーの現状と今後の動向について」

計量分析ユニット	研究主幹	平井 晴己
	主任研究員	松尾 雄司
	研究員	宇野 宏
	研究員	永富 悠

第1章 水素社会とは何か

1-1 水素社会とは何か

1-1-1 水素社会の概念

「水素社会」という言葉は、エネルギー利用の多くの部分に水素が利用される社会を指しているが、水素は一次エネルギーではなく、電力と同じく二次エネルギーである。電力は既に日常生活の中で広く使用されており、その利便性についてはよく知られている。

一方、水素はいまだエネルギーとして広く利用されておらず、化学産業の原料や、ロケットの推進用および宇宙船の燃料電池の燃料として利用されているのみである。水素をエネルギー源とする理由、その利用方法ならびに利便性については、十分な議論と幅広いコンセンサスがあるわけではなく、その価値と費用対効用についての検証は、現時点では不十分と言えよう。

水素をエネルギーの主要な柱とするという構想は **Hydrogen Economy** (水素エコノミー¹⁾) と呼ばれるが、エネルギー専門家の間では、エネルギーの理想的な利用方法として、永年の夢であった。利用技術の核心は、「燃料電池」という、小さくモジュール化された電気化学装置にある(蓄電池に似ている)。水素を空気中で燃焼(酸素と結合)させることなく、水の電気分解とは逆の反応によって電気エネルギーを取り出す。反応後に生成されるのは水だけであるので、大気汚染を引き起こす排ガスも、温暖化効果ガスである二酸化炭素も生成しない、まさに「環境パラダイス」というべき社会が実現ということになる。

水素製造の原料としては、必ずしも化石燃料に依存する必要がないことから、エネルギー・資源の枯渇(ピークアウト)など、長期的なエネルギーの安定供給という観点からも脚光を浴びることになった。とりわけ、21世紀に入り、エネルギー価格の高騰や環境問題の深刻化など、水素エネルギーを取り巻く状況は大きく変わりつつある。

1-1-2 燃料電池と水素社会

(1)水素社会への道のり

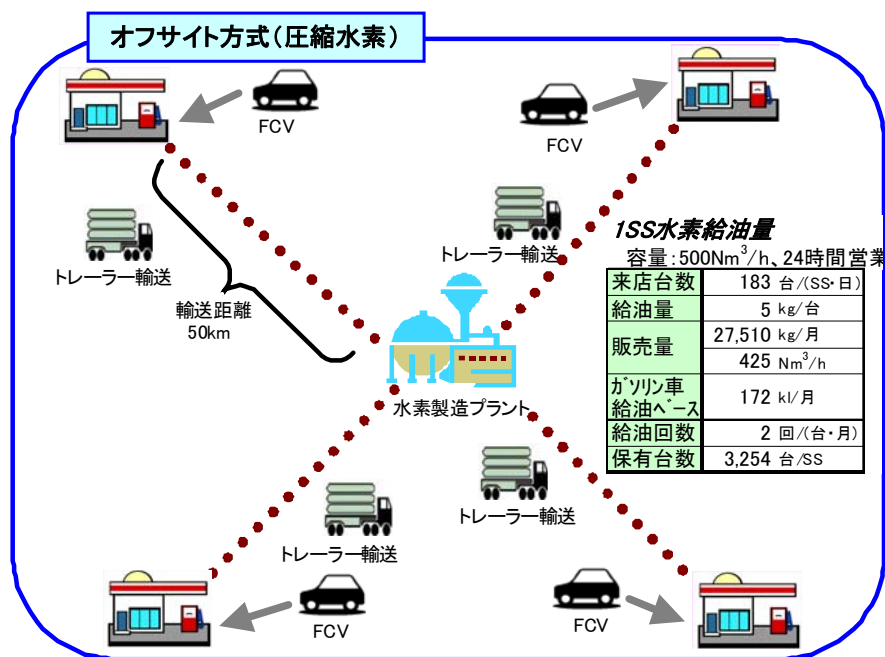
燃料電池は、1960年代に米国の宇宙船(アポロ計画)で実用化されたが、その容積は大きく重量もあることから、用途・市場は限定され、長らく普及を見ないまま、「水素社会」

¹ その他に水素経済社会、水素社会など様々な表現があるが、本報告では「水素社会」とする。

は夢物語の域を出なかった。こうした状況を大きく変えたのが、1980 年代後半、カナダのバラード・パワー・システムズ社により、固体高分子形の燃料電池 (PEMFC)²の小型化に成功したことであった。小型・軽量化とともに、動作温度は 80℃前後と低温であり、定置式 (排熱と電力を利用するコージェネレーション) としての利用だけでなく、自動車用の駆動機関として搭載可能になり、「水素社会」が一挙に現実のものとして理解されるようになったからである。

1990 年代後半には、米国をはじめ各国で、自動車業界やエネルギー業界の熱心な取り組みが行われ、内燃機関に代わる燃料電池自動車の時代は、早期に到来するという期待が高まった。

図 1-1-1 水素ステーションと FCV



(注)第 2 章の図 2-5-1

こうした状況の中で、各国の政府は、水素エネルギーの利用と FCV の開発に関する、様々な研究開発プログラムを策定し、開発企業等への財政支援³が実施されることとなったが、概ね、2010 年を FCV 導入の第 1 段階として位置付ける場合が多かった。

FCV の開発は、当初、燃料電池へ供給される水素製造用の「改質装置」を自動車に搭載

² その他に、リン酸形、アルカリ形、熔融炭酸塩形、固体酸化物形などがある (1-1-2(2)参照)。

³ 詳細は 1-2 各国における水素社会への取り組み(欧米・日本)を参照のこと。

する「オンボード型」が主流であった。これは既存のガソリンスタンドで、ナフサ（改質ガソリン）を給油する方式が採用でき、水素の最大の弱点であるインフラ整備が必要でないことから、早期の FCV 普及拡大の観点から注目を浴びた。

ただ、自動車に改質器を搭載するのはスペースや重量の面から制約が多く、また車の振動、発進・停止を繰り返す運転上の操作性に対応するには様々な技術上の問題点が指摘されるようになったこと、さらには、化石燃料から水素をつくる環境面からのデメリットが認識されるようになった。

この結果、2000 年以降、FCV の開発は水素ステーションによる水素供給をベースとした方向へと収斂することとなったが、水素の利用については、FCV 本体の開発だけではなく、水素の製造やロジスティックスの面で、様々な解決すべき技術的・経済的な課題を抱えていることが認識されるようになった。このため、多くの国では、深刻化する環境問題への当面の解決策として、水素エネルギーの利用における本質的な優位性を認識しつつも、既存の石油供給システムを利用できるガソリンハイブリッド自動車や、比較的軽微な投資で実現できる電気自動車(EV)の普及を先行させる動きが目立ち、FCV の開発とその普及・展開時期は、当初の想定よりも遅れるものと思われ、長期的な課題との考えが大勢を占めるようになってきた。

(2)燃料電池の種類と技術開発の動向

燃料電池にはいくつかの種類があり、利用する電解質に応じて、アルカリ形、リン酸形、熔融炭酸塩形、固体酸化物形、固体高分子形などに分類できる。リン酸形は 80 年代から開発され、既に定置用発電装置として商業レベルに近いが、大量に生産されてはいない。

それぞれに適した反応ガスや反応温度があり、利用特性も異なっている。以下、各々の燃料電池の形式、特徴、用途ならびに開発状況について概略する。

①リン酸形燃料電池 (PAFC)

リン酸形燃料電池は 1970 年代から研究開発され、1980 年代後半に実用化された。多くは 100-200kW クラスで、定置型の発電装置として利用されている。電解液は酸性電解質のリン酸 (H_3PO_4) であり、燃料は水素、酸化剤は酸素ではなく空気でも利用できる。動作温度が 200℃ と高いので排ガスの熱を暖房や給湯に利用することができる。電力と熱を供給するコージェネレーションとして利用されている。

全世界で 200 基以上が利用されている。発電効率は 37-42% であり、コージェネレーションにすると総合利用効率は 85% に達する。しかし、発電装置としては単位出力あたりの重量と体積が大きく、触媒に貴金属のプラチナを必要とするのが欠点である。ようやく大型火力発電所に対抗できるようになりつつあったが、固体高分子形燃料電池の可能性が知られたため、現状では開発は縮小している。

しかし、燃料電池としての実績はもっとも多くあり、寿命は 4 万時間と言われていたが、

最近では、6 万時間になってきている。ビール工場では麦かすの絞り液やビールタンク内の残さ液などの高濃度排水を嫌気性発酵させてメタンガスをつくり、これから改質装置で水素を取り出して燃料電池で発電している。半導体工場では半導体基板の洗浄工程で使用するメタノールを使用後、水素製造燃料として利用している。

自動車に搭載されたこともあるが、出力密度が小さく、全体の寸法が大きくなり、普及するには至らなかった。電解液がリン酸であること、動作温度が 200℃であることなど、管理が簡単ではないのが難しい点とされている。

②アルカリ形燃料電池 (AFC)

アルカリ形燃料電池は、電解質として水酸化カリウムというアルカリ水溶液を使用する燃料電池である。動作温度は 50-200℃であり、120℃程度で運転されている。発電効率は 60%と高く、燃料は水素であり、酸化剤は酸素を用いる。水素は高純度でなければならず、ごくわずかでも二酸化炭素が混入すると動作しない。

イギリスのベーコンは、1930 年代にアルカリ電解質を利用して 200℃以上の動作温度にし、電極には比較的安価なニッケルを利用、アルカリ電解質が沸騰しないように圧力を上げると、効率が向上することを発見した。ベーコンは、1959 年には英国政府の援助を得て 40 セルの燃料電池を製作した。これは 200℃、38 気圧で動作し出力は 6kW であった。

1970 年代には、米国クリーブランドでオーストリア生まれの科学者、コーデッシュが 61 年型オースチン、ツードア・セダン車に 6kW のアルカリ形燃料電池を搭載して走行した。タンクには 130-150 気圧の水素が 25 立方メートル充填され、走行距離は 190 マイル、時速 50 マイルであった。アルカリ形燃料電池は、宇宙開発用にも利用されている。1997 年にカリフォルニア大気資源委員会が燃料電池の調査を行った際は、アルカリ形燃料電池は、二酸化炭素に弱いという理由で、大気中では利用できない技術であり、自動車用には使えないと判定されている。

③固体高分子形燃料電池 (PEMFC)

固体高分子形燃料電池は、陽子交換膜 (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) と呼ばれる、薄い高分子膜を電解質として利用する燃料電池で、動作温度は 80℃程度である。燃料は水素、酸化剤は酸素または空気を利用する。

固体高分子形燃料電池は 1950 年代に GE(ゼネラル・エレクトリック)の科学者によって発明され、宇宙船ジェミニに搭載されたことがあったが、動作が不安定であり、出力密度が小さく体積が大きいものであった。この状況をくつがえしたのは、ジェフリー・バラードが設立したカナダの小さなベンチャービジネス、バラード・パワー・システムズ社(以下バラード社という)である。1980 年代末に、バラード社はカナダ政府の研究開発公募に応募して資金を得て開発を行った。

バラード社の若手研究陣は GE の行った過去の研究を調べて、燃料電池の反応するべき

溝の部分に水が滞留していて、大部分が機能していないことを発見した。燃料電池の反応が、反応後の不要な物質によって邪魔されていたのだった。反応が終わって不要な空気（酸素分がすくない）と水を出来る限り早く取り除いてやれば反応速度が増大した。これを改良して、1リットルあたり100W（1989年）から1,100W（1996年）へと高密度化と小型化を進展させることになった。これにより燃料電池が自動車に搭載できる可能性が開かれた³。

1993年、バラード社はダイムラーベンツ社(当時)との合弁事業に合意し、1994年には、はじめての燃料電池自動車 NECAR（純水素型、50kW、バンタイプ）を試作し、その後次々と性能を上げて行った。バラード社は燃料電池について多くの特許を出願しているが、特許の寿命が20年とすると、2010年ごろには期限がくる。2007年には、バラード社は、自動車用燃料電池部門をダイムラー社に譲渡している。

④ 熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC）

熔融炭酸塩形は、電解質として熔融した炭酸塩を利用する。移動するイオンは炭酸イオン（CO₃²⁻）である。動作温度が650℃程度であり、白金などの貴金属触媒が不要であり、燃料としては水素だけでなく一酸化炭素が利用できる。固体電解質形（SOFC）と似た性質をもっているが、空気と二酸化炭素を酸化剤として供給する。火力発電に代わるものとして研究開発され、日本では石川島播磨重工で開発されたが、NEDOのプロジェクトとして2005年度に開発が終了している。このあとは電力中央研究所（横須賀）で、コストダウンを目標に研究を実施している。2005年の愛知万博では2基の熔融炭酸塩形燃料電池が実際に稼動した。その後は日本では実際の企業化は行われていないが、米国のフューエルセル・エナジー社（FCE）が開発した熔融炭酸塩形燃料電池が、商業的な製品として輸入され、日本の各地の工場に導入されている。

⑤ 固体酸化物形燃料電池（SOFC）

固体酸化物形または固体電解質形燃料電池は、電解質が固体でイオン伝導性をもつ酸化ジルコニウムを使用するので、電解質の漏れの問題がない。移動するイオンは酸素イオン（O²⁻）である。初期動作温度は高く1,000℃であったが、最近では800℃程度に低下するようになった。白金などの高価な触媒は不要であり、発電効率は最大70%ときわめて高くできると期待されている。逆に動作温度が高いため、構成材料のセラミックスの割れなど材料の耐久性の問題が生じる。燃料は水素または一酸化炭素であり、化石燃料を改質する装置を内蔵させることも可能である。空気を酸化剤として利用する。排ガス温度が高いためガスタービン駆動するハイブリッドシステムを構成する例も考えられており、高効率の発電システムを構成できる。固体酸化物形燃料電池は、固体高分子形燃料電池と並んで、現在最も開発が進められている燃料電池である。

³ 「燃料電池で世界を変える」（T.Koppel 著、酒井泰介訳、翔泳社）

1-1-3 水素社会への移行について

(1)水素の供給インフラ

水素社会の実現への視点は、第 1 に、水素を何からつくるのか？、第 2 に、どうやって効率的に水素ステーションへ供給するのか、そして最後に、低コストかつ高性能な FCV をどうやって実現するのかという 3 点に整理できる。さらに言えば、第 1 と第 2 をあわせた「水素供給」と、第 3 の FCV の開発という 2 つの軸に集約できるが、この 2 つの軸は、相互に表裏一体の関係にあり些か事情が複雑となる。

①ニワトリと卵の関係をどう整理するか

FCV とその水素供給システムを同時に導入(石油に代替)していかなければならないことである。1 台 1 億円から数千万円と言われる FCV の価格(コスト)を 2 百万円まで低減していくためには、大量の FCV の市場が実現する(またはその可能性が高い)ことが必要である。当然、FCV への水素の供給コストは、ガソリン・軽油と同程度の価格で、かつ安定的に調達ができることが求められる。

そのためには水素ステーションを中心とした供給インフラの大規模かつ全国的な整備が必要となる。しかし、膨大なインフラ投資を実行するには、十分な FCV の市場(利用)が前提となり、「ニワトリか卵か」というジレンマに直面することになる。

②供給インフラにおける「サンクコスト(埋没コスト)」をどう考えるか

100 年を超える歴史を持つ内燃機関を駆動源とする自動車と、その燃料となるガソリンや軽油を供給する石油産業(石油の生産・物流システム)は、日本で約 50 年、米国で 100 年という、長い時間の中で、一体となって構築されてきており、効率的かつ低コストで供給できる自己完結的なサプライチェーンとして存在している。従って、部分的な代替や、一部のセグメントだけの利用は、技術的に可能であっても、全体としての効率性やパフォーマンスは損なわれる可能性が高く、全体的なシステムとして機能することが要件となる。したがって、1 台の FCV と 1 つの水素ステーションがあつて、徐々に増やしていけばコストが下がり、普及が拡大するという「逐次投入」戦略は必ずしも有効ではなく、ある程度の範囲と規模で、システムを完全かつ一気に代替することが必要となり、既存システムの膨大なサンクコスト(sunk-cost)に対応する費用が生じる。

このように、水素の供給インフラと FCV は相互に複雑に絡み合っていることが理解されようが、特に、「サンクコスト」の問題は、民間企業における投資とリスクの評価という点からは、これを超える面があるのも事実である。政府は、自動車メーカーやエネルギー産業の後押しをするだけでは十分ではない。あるべき社会システムのビジョンを示し、国民的な費用と便益の観点から、インフラ整備のための投資と助成を推進する(あるいは行わないと決定する)というコンセンサスの形成を図った上で、長期的な政策スタンスを持

つことが鍵になる。

(2)再生可能エネルギーの重要性

現在可能な技術力（経済的といっても良いが）を用いて、化石燃料（天然ガスなど）から水素を効率的かつ大量に製造して、FCV を走行させるという方式は、インフラの制約を下げるという意味で「現実的」（これでもコストは非常に高いが）と言えるかも知れないが、CO₂の排出という観点からは色々議論が出るところである。

「水素社会」という言葉を最初に生み出したと言われている、オーストラリア人の電気化学者ジョン・ボリックスは、「水素社会を必要最小限の言葉で要約すると、それは水素を再生可能なもの（原子力や太陽光）から作られたエネルギーを遠い道程を越えて伝達したり、大量に貯蔵したりするために利用する社会である⁴」と述べている。

エネルギー効率がよく、かつ CO₂排出量がミニマムになるような「低炭素社会」がベースになければならないこと、そして、極力化石燃料に依存しない社会（資源制約やエネルギーの安全保障の面からも）を目指すことが含意されているような社会を「水素社会」とすると理解するのが妥当であろう。

勿論、移行期については、様々な形態が考慮されようが、大雑把に言えば、石油（もう少し幅を広げて化石燃料）という 1 つの社会システムから離脱して、新たなパラダイムへ移行するというということであり、これは、社会システム全般の変化が含意されている。1 つの技術的なブレークスルーですべての問題が解決するようなものではなく、息の長い長期的な視点から取り組む必要のあるテーマと位置付けるべきである。その意味では、ハイブリッド自動車や、電気自動車（ある意味では）は、石油システムの一部補完（あるいは代替）と考えられ、FCV は、これらとかなり次元が異なると理解すべきであろう。

1-1-4 本報告の構成

本報告では、石油システムからの離脱云々に焦点をあてるのではなく、「FCV 用燃料として」の水素の供給システムは、構築するとしたら、どのような形で実現できるのかという実践的な点に絞りこんで検討を行っている。

現時点において、実行可能と思われる技術や、調達可能と想定できる諸資源のコストを前提として、水素社会への移行の第 1 段階を考えた場合、どういったシナリオが現実的なのかを評価し、そのための必要な対策を提示することが目的である。

具体的には、FCV への水素供給について、多様なパス（過程）を、製造・輸送・貯蔵（充填を含む）というフロー上のユニットに分解して、コスト、効率・CO₂排出量（必要に応じて、供給量の制約）を軸に分析・評価を行った。

⁴ 「水素は石油に代われるか」（ジョセフ・J・ロム著、本間琢也・西村晃尚訳、オーム社）

最後に、本報告の構成、並びに、各章・節におけるねらいについての概略を示した。

①第 1 章の第 1 節

水素社会の基本概念と歴史的経緯、燃料電池の開発状況と課題、水素社会への移行における枠組みとして、供給インフラの構築と低炭素社会という前提を明確にすること、そして、最後に、本報告の構成について概略を述べる。

②第 1 章の第 2 節

日本ならびに欧米各国の水素エネルギーへの取り組みや、エネルギー全体における水素エネルギーの位置付けについて、マクロ的な観点から整理を行う。

③第 1 章の第 3 節

水素社会への移行可能性の諸条件として、具体的な導入シナリオ(量的な見通しを含む)、政府の研究開発計画や財政支援・法的規制の整備など、水素利用に関する主要な技術的な問題点など、ミクロ的な観点から具体的に整理を行う。

④第 2 章の第 1 節

水素供給のサプライチェーンの概要を説明する。

⑤第 2 章の第 2 節

様々な水素製造方法についての技術的・コスト的評価や LCA 評価などを詳述する。

⑥第 2 章の第 3 節

水素輸送(液体輸送と圧縮ガス)についての技術的・コスト的評価や LCA 評価する。

⑦第 2 章の第 4 節

水素ステーションについて、JHFC の実証試験を整理しながら水素 SS の基本概念を整理する。

⑧第 2 章の第 5 節

移行期における水素供給ネットワークを設定し、水素供給のパス別のコスト評価、LCA 評価を整理する。また水素の供給の現実的なシナリオを絞りこむ。

⑨第 3 章の第 1 節

第 2 章第 5 節で評価したコストを欧米での試算と比較し分析する。

⑩第 3 章の第 2 節

前半で論点を整理し、後半で今後の課題をまとめる。

1-2 各国における水素社会への取り組み（欧米・日本）

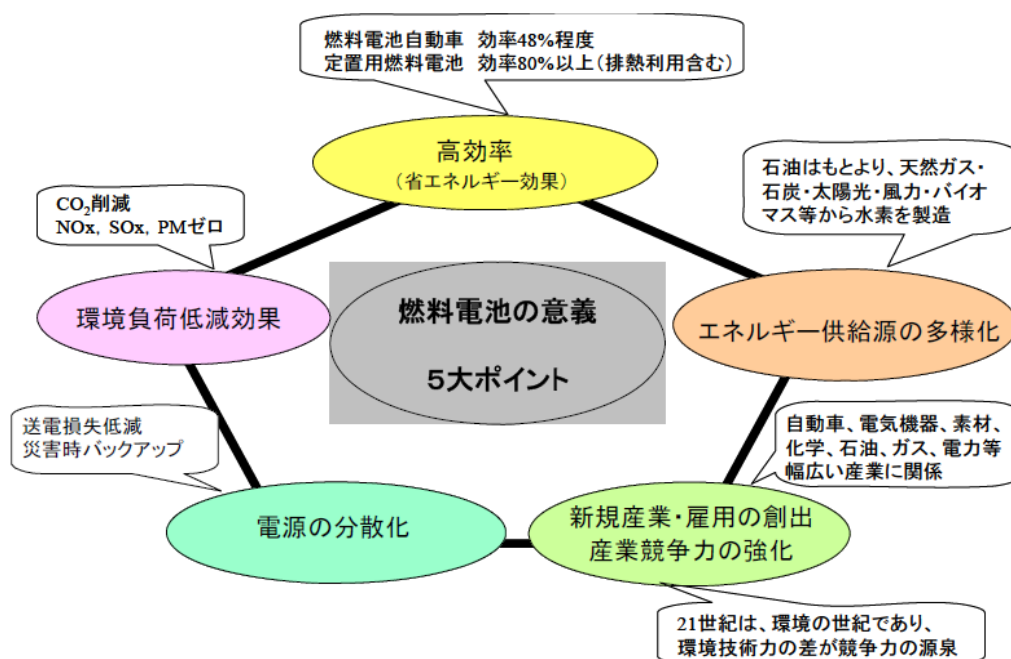
1-2-1 日本の取り組み

(1)政策概要

2006 年に策定された「新・国家エネルギー戦略」では、運輸部門における石油依存度の高さと共に伴うエネルギー需給構造の脆弱性が指摘されており、需給構造の次世代化を課題としている。しかし、現状は利便性・熱効率ともに優れ、燃料供給インフラも整っている石油に依存せざるを得ない面があるため、燃費改善に向けた取り組みを引き続き進めるとともに、バイオマス由来燃料などの新燃料を既存の石油系燃料に混合することにより、運輸部門の燃料多様化を図ることの必要性を述べている。中長期的には、次世代内燃機関等に係る技術開発の進展に加えて、電気自動車 (EV)、燃料電池自動車 (FCV) 等の次世代を担う自動車の実用化・普及によって運輸部門の燃料を電力・水素等に多様化していくことを求めており、官民一体となった意識の共有と計画的な取組を実現する。また、このために 2030 年に向けたアクションプランを策定するとしている。この中で「新エネルギーイノベーション計画」として再生可能エネルギーを普及させていく中で、中長期的な成長支援技術として、水素社会の実現を目指した燃料電池が挙げられている。

その後、2007 年 5 月にまとめられた「次世代自動車・燃料イニシアティブ」では、環境技術力の差が競争力の源泉である燃料電池自動車は、その高効率性から運輸部門における省エネルギー効果（総合エネルギー効率はガソリン車の約 2 倍）が期待できると共に、CO₂ の排出削減（二酸化炭素の排出量はガソリン車の約 1/2～1/3）が可能であるとしている。また、その燃料となる水素は、石油、天然ガス、石炭あるいはバイオマスや水の電気分解などから得ることができ、運輸部門の資源多様化に資するものであると位置付けられている。さらに、燃料電池は発電の過程で NO_x や硫黄酸化物などを排出せず、水のみを排出するため環境負荷低減効果も期待される。このことから、水素インフラの構築と燃料電池自動車の開発は、現在のエネルギー・環境分野での喫緊の課題である省エネルギー対策、地球温暖化防止、燃料多様化の推進を行う上でも切り札となるものであり、燃料電池の省エネルギー、環境負荷低減、エネルギー供給の多様化・石油代替効果、分散型エネルギーとしての利点や産業競争力強化と新規産業創出という 5 つの利点から、重要な技術として位置付けられている。

図 1-2-1 燃料電池の開発の意義 5つのポイント



(出所)次世代自動車・燃料イニシアティブとりまとめ、
2007年5月、経済産業省資源エネルギー庁次世代自動車・燃料に関する懇談会

(2)事業計画

2008年の「クールアース推進構想」、「洞爺湖サミット」を受けて、2050年までに世界全体の温室効果ガス排出量を現状比で半減にするという長期目標のために、世界に誇れるような低炭素社会の実現を目指して「低炭素社会づくり行動計画」が閣議決定された。その中で特に運輸部門においては、自動車産業の技術力・競争力の強化につなげつつ、二酸化炭素削減を行うため、現在は、新車販売のうち約50台に1台程度の割合である次世代自動車を、2020年までに新車販売のうち2台に1台の割合で導入するという野心的な目標の実現を目指す。具体的には、費用の一部支援などの導入支援の充実による、初期需要の創出や電気自動車、プラグインハイブリッド自動車、燃料電池自動車の基盤技術である次世代電池や燃料電池等の技術開発による高性能化や低価格化を進めるとともに、電池切れの不安感を解消するため、急速充電設備を含む充電設備等のインフラ整備、高度道路交通システム(ITS)の推進などの交通流対策、クリーンディーゼル車のイメージ改善や普及促進等の統合的な取り組みを進める。また、次世代低公害トラック・バス等についても実用化促進等を進める。

(3)技術開発目標

低炭素社会のための技術開発目標として、2008年に「Cool Earth-エネルギー革新技術

計画」がまとめられており、重点的に取り組むべきエネルギー革新技術「21」の中に燃料電池自動車、定置用燃料電池、水素製造・輸送・貯蔵などが挙げられ、技術開発が進められている。また、化石燃料改質、水電解、再生可能エネルギーの活用など水素製造のためのあらゆる方策に関して検討が行われ、長期的な技術開発目標が提示されている。

普及のためには技術開発の強化に加えて、実証試験、標準化の推進等を一体的に進めて行くことが必要である。具体的には、公共的車両への積極的導入を推進しつつ、水素ステーションを活用した実証試験で得られる成果を、適切に基礎研究にフィードバックし、コストの抜本的な低下や耐久性の向上等を目指すことが必要である。コスト面では、車両価格を 2010 年に ICEV（内燃機関自動車）比で 3~5 倍、2020 年に 1.2 倍まで低減することを目指す。耐久性については、2010 年に 3,000 時間、2020 年に 5,000 時間まで向上させることを目指す。航続距離は 2010 年で 400km、2020 年で 800km まで向上させることを目指す。また、技術開発の進捗に応じて、水素インフラの検討を進める。水素供給インフラの技術開発として、改質効率の向上やオンサイト用ステーション向け製造装置の小型化、固体高分子やアルカリ水電解といった技術に関して、効率や耐久性、経済性の向上といった課題を挙げている。再生可能エネルギー由来の水素製造技術としては、バイオマスからの水素製造等があるが、木質系原料等のガス化技術は既に熱利用で実績のある技術であるため、水素への改質効率向上等プロセスの最適化が主な課題である。また、水素の輸送方法はトレーラーによる圧縮水素輸送、液体水素輸送、有機ハイドライドによる輸送に加えて、パイプライン輸送が考えられている。貯蔵に関してはガスによる貯蔵、液体水素による貯蔵、水素吸蔵合金による貯蔵技術がある。これらは、容器の高圧化や容器の低コスト化が課題である。これらの技術開発を平行して進める事で、2020 年頃に水素価格を 40 円/N m³まで低下させることを目指す。

また本格的な水素社会実現のために、燃料の品質や水素ステーションに係る基準・標準化に関する国際的な議論にも積極的に参加する。さらに、基礎的な技術開発を加速するためには、水素経済のための国際パートナーシップ（IPHE、International Partnership for the Hydrogen Economy）といった国際的枠組みを活用し、各国が有する最先端の技術動向等を踏まえつつ、効果的に技術開発を推進していくことが必要であるとしている。

(4) 具体的取り組み

日本において具体的に進められている水素社会に向けた取り組みは、水素や燃料電池に関する基礎および応用に関する研究開発、自動車用と定置用コージェネレーションに水素と燃料電池を実際に適用する実証実験である。このうち燃料電池に関しては、自動車メーカー及び関連する企業の研究所、政府関係の研究所、大学などにおいて研究が進められている。水素供給に関する技術については、燃料電池自動車の普及のために、高圧水素を自動車の水素タンクへ供給するための施設、水素ステーションの建設が行われている。

そのため、経済産業省は燃料電池自動車の普及に向けて、燃料電池実用化戦略研究会(官)、

燃料電池実用化推進協議会(民)等の議論をベースとした官民共同プロジェクトである「水素・燃料電池実証プロジェクト」(JHFC)を平成14年度～平成17年度(第1期)、平成18年度～平成22年度(第2期)で実施している。このプロジェクトでは、内燃機関自動車にガソリンや軽油を供給するガソリンスタンドと同じような機能を持つ、水素供給ステーションを実際に建設し、水素製造・供給設備の実証実験を進めている。また、新エネルギー財団は、定置用燃料電池大規模実証事業を実施し、住宅において燃料電池コージェネレーション・システムの性能を確認する実証実験を行っている。

NEDO が発表した「2006 燃料電池・水素技術開発ロードマップ」に基づき、車両効率、耐久性、作動温度、コストについて、現状から 2030 年ごろまでの数値的目標を以下の表にまとめる。

表 1-2-1 固体高分子形燃料電池 (PEFC) 技術開発ロードマップ概要

	現在	2007 年頃	2010 年頃	2015 年頃	2020～30 年頃
		初期車実証	初期車限定導入	初期車普及・次世代車実証	次世代車本格普及
車両効率(%) LHV/HHV	約 50/42	約 50/42	約 50/42	約 60/51	約 60/51
耐久性(時間)	約 1,000	2,000	3,000	5,000	5,000
作動温度(°C)	約 80	-20～約 80	-30～約 90	-30～90-100	-40～100-120
1kW あたり 製造価格 (万円/kW)	数 10 万円		約 5～6 万円 (想定 10 万台/ 年)	約 1 万円 (想定 100 万台/ 年)	約 4,000 円 (想定 100 万台/ 年)

技術的課題としては、燃料電池の劣化・反応機構の解明、スタックの高効率化、スタック高耐久化技術(起動停止対応等)、スタック・部材の低コスト化、貴金属低減、周辺機器の部品点数削減・共通化、各種基礎解析・評価手法開発、及びスタック大量生産技術開発などが挙げられている。また特に水素の車載貯蔵に関しては、以下のような数値目標が挙げられている。

表 1-2-2 水素技術開発ロードマップ概要（水素貯蔵）

	現在	2010 年頃	2020 年頃
水素車載量目標	3kg	5kg	7kg
圧縮水素容器			
圧力	35 MPa	70 MPa	70 MPa
質量貯蔵密度	4~5%(mass%)	6.5%(mass%)	6.5%(mass%)
水素量/容積/容器質量	3kg/120L/75kg	5kg/120L/50kg	5kg/120L/50kg
ハイブリッド水素容器 (高压水素貯蔵材料容器)			
圧力	35 MPa	35 MPa	35 MPa
質量貯蔵密度	1.7%(mass%)	3%(mass%)	4%(mass%)
水素量/容積/容器質量	7.3kg/150L/420kg	5kg/100L/165kg	7kg/115L/175kg
液体水素容器			
ボイルオフ速度	3~6%/日	1~2%/日	0.5~1%/日
ボイルオフ開始時間*	30 時間程度	100 時間程度	200 時間程度
質量貯蔵密度	4.8%(mass%)	9%(mass%)	17%(mass%)
水素量/容積/容器質量	4.3kg/68L/85kg	5kg/80L/50kg	7kg/110L/35kg

(圧縮水素容器は 35~45L、アスペクト比 (L/D) : 3 程度)

(*ボイルオフ開始時間は、内容積の 50%を充填後から安全弁作動までの時間)

(いずれも本格普及時期には、自動車材料並みのコストが求められる)

1-2-2 EU の取り組み

(1) エネルギー政策概要

EU エネルギー政策の基本目標は、全ての消費者に対して妥当な価格のもとでエネルギー供給が保障され、かつ環境および欧州エネルギー市場の健全な競争が促進されることにある。また、欧州では化石燃料供給のピークが 2015 年頃に訪れ、今後化石燃料から電力を中心としたエネルギーへの移行期間が訪れるという想定もあり、エネルギーセキュリティと環境問題を中心としてエネルギー政策を打ち出している。欧州委員会は、2007 年 1 月に新たなエネルギー政策（Energy for a Changing World）を発表しており、2020 年までに EU 全体での温室効果ガス排出量を 1990 年比で 20%削減することや、供給源多角化によるエネルギー安定供給などを強調した。更に将来的には、2050 年に 60~80%削減という高い目標を掲げ、低炭素、高効率社会への転換を目標としてアクションプランを打ち出している。具体的には再生可能エネルギーに関しては、EU の再生可能エネルギー指令に基づいて開発を進めており、2020 年には一次エネルギーの 20%を再生可能エネルギーで賄うという目標を掲げている。また、2030 年までに発電部門に関しては、CCS などによっ

て火力発電所からの CO₂ 排出量を 0 にすることを目指している。運輸部門では、2012 年にまで走行距離あたりの CO₂ 排出量を 130g-CO₂/km とする目標を掲げており、そのために第二世代バイオ燃料や水素燃料電池自動車の開発を目標として挙げている。

(2)事業計画

2003 年 6 月に「水素経済—持続可能なエネルギーへの架け橋(The hydrogen economy - a bridge to sustainable energy)」と題するビジョン・レポートが発表され、水素・燃料電池に関する EU のロードマップと、今後の対応のための勧告が示された。ビジョンでは 2050 年には再生可能エネルギーのみを用いて水素生産を行う事を目標としており、化石燃料から生産する場合、CO₂ の回収が不可欠としている。需要側では 2030 年までに燃料電池自動車、2050 年までに燃料電池飛行機の普及を目指している。このビジョンを基に 2003 年 9 月に欧州委員会は技術向上と普及促進のため「欧州水素・燃料電池テクノロジープラットフォーム (European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform : HFP)」を設置した。更に 2007 年には燃料電池水素技術開発事業 (FCH JTI) が設置され、FCH JTI は公的資金を共同管理しながら燃料電池と水素技術に関する研究や実物宣伝を行っている。この中で 2008 年から 2017 年にかけて燃料電池・水素技術には 10 億ユーロの予算が付けられ、欧州委員会と新エネルギー世界規模産業グループ (NEW IG) が共有することになっている。

水素に関しては、EU 枠組の計画の中で、いくつかのシナリオ策定プロジェクトが実施されている。例えば、第 5 次計画 (FP5) の中で実施された「HyNet」プロジェクトでは、ヨーロッパにおける水素社会へのロードマップを策定し、課題を抽出している。更に第 6 次計画 (FP6) は「HyWays」が引継ぎ、欧州が水素経済に移行するためのロードマップを策定した上で、CO₂ 排出削減、エネルギー利用の多様化に加えて水素・燃料電池自動車のシェアと関連欧州産業の競争力と雇用という 3 つを、主要な課題として挙げている。

EU では、2020 年代に基礎研究、実用化研究・実証試験を行い、2030 年代から本格的な商業化を進め、2050 年には水素エネルギー経済へ移行するというロードマップを描いている。そして、水素の供給源は、長期的には再生可能エネルギーと原子力が主力になるものとしている。

EU の研究開発プログラムは、研究開発枠組みプログラム (FP) における資金調達システムによって管理されており、そのなかに水素関連のプロジェクトがある。その内訳を見ると、StorHy(水素の貯蔵)、HySafe (水素の安全性など)、NATURALHY(天然ガスパイプラインから水素改質)、HyWays(輸送用・定置用水素エネルギーロードマップ)、HyTran(自動車用 PEFC 実用化開発)、DEMAG(10kW 規模 PEFC 非常用電源開発)などがある。

(3)技術開発目標

HyWays プロジェクトのロードマップでは、2010 年から 2015 年の 1st フェーズで、小規模の水素供給ステーション(HRS)を 400 箇所を設置し、2015 年から 2025 年までの 2nd フェーズで、13,000 から 20,000 箇所に拡大することを目指している。そして、2025 年以降は、既存のステーションに近いレベルで供給区域がカバーできるようになり、2030 年には、10 カ国で 1,600 万台の水素自動車が行き、85~100%の人口が網羅されると見込んでいる。水素設備の初期の導入コストは高いものの、コストダウンのスピードは速く、本格導入から 3 年で軽油熱量等価で 1.1~1.6 ユーロ/L、(0.11~0.16 ユーロ/kWh、3.6~5.4 ユーロ/kg)に達すると見込まれている。これらステーションの普及と平行して、燃料電池自動車を始め水素自動車の開発が進められており、2010 年に商業車第一号を皮切りに 2015 年から市場が拡大していく事を目指している。再生可能エネルギー由来の水素と木材由来の BTL 燃料コストは、2010 年から 2020 年の時期にガソリン、軽油と競合する価格になると見込まれている。将来的には、原油価格は上昇していくとの想定の下、再生可能エネルギー由来の水素のコスト競争力は更に高まると見込まれる。また、価格面だけでなく、水素によるエネルギー貯蔵は圧縮空気による貯蔵よりもエネルギー密度が高いことから、電力の貯蔵用としても期待が寄せられ、技術開発が進められている。

(4)具体的取り組み

様々な都市において、以下のような実際の走行試験も進められている。

(a) CUTE(Clean Urban Transport for Europe)

ダイムラー社の FC バス「シターロ」を 27 台使用して、2001 年 10 月から 2006 年 6 月までの 5 年間に、アムステルダム、ストックホルム、ルクセンブルグ、ハンブルグ、シュトゥットガルト、マドリード、バルセロナ、ボルト、ロンドンの 9 都市で走行試験を実施。

(b) ETOS(Ecological City Transport System)

同様にダイムラー社の FC バス 3 台を利用して、2001 年 3 月からアイスランドのレイキヤビクにて実証実験が行われている。CUTE と ETOS は、5 年間で 1 億ユーロの予算で実施されている。2006 年で第一段階を終了して引き続き、5 年間のライトハウス・プロジェクトが進められている。更に、MAN 社の 14 台の水素エンジンバスが参加し、オーストラリアの STEP プロジェクト、中国の FC バス・プロジェクトも加わった。国際的な IPHE プロジェクトとなっている。HyCHAIN は、燃料電池を搭載する小型車両（車椅子、スクーター、三輪車、ミニバスなど）により 2008 年から実際の走行試験を行う計画になっている。

(c) CEP (Clean Energy Partnership)

ドイツのベルリンで 2002 年 6 月から、水素利用乗用車 16 台を利用して行われている実証実験で、BMW、ダイムラークライスラー、フォード、GM/OPEL が参加している。2006 年にはフォルクスワーゲンも参加した。

(d) Citycell プロジェクト

イタリアのトリノ、バルセロナ、マドリードにて IRISBUS 製の FC バスを用いて走行テストが行われた。マドリードではダイムラー社の FC バスも参加している。

1-2-3 米国の取り組み

(1) 政策概要

米国では、各政権が提示したエネルギー基本政策に基づき、エネルギー省(DOE)が戦略プランを策定している。これに沿って各部局が戦略プランを作成し、さらにプログラム別に中期計画と単年度の実施計画を策定する。ブッシュ政権のエネルギー政策は、基本政策である 2001 年 5 月発表の『National Energy Policy』に基づいており、その後、2005 年 8 月にはエネルギー政策法 (Energy Policy Act of 2005) が発表された。2006 年 9 月、DOE は “Climate Change Technology Program - Strategic Plan “(気候変動技術プログラム戦略計画) を発表し、需要側・供給側それぞれのサイドからの低炭素化へのアプローチ、長期的な技術開発の取組基本方針などを述べている。2006 年に発表された「Advanced Energy Initiative」では、エネルギーの信頼性と海外依存度を抑える方策として、自動車用燃料の革新と民生用電力の革新を掲げており、自動車に関する具体的な技術開発メニューとして、バッテリー開発、セルロース系エタノールに関する技術開発、そして水素燃料電池自動車の開発を掲げている。2008 年 5 月には、需要側/供給側それぞれの省エネ・低炭素化、炭素回収・貯留技術 (Carbon Capture and Storage (CCS))、及び温暖化ガスモニター方法の開発など各分野に関する短期～長期の取組方針について発表している。現在のオバマ政権下においては、現状では明確な目標は示されていないが、各種報道、大統領のコメントからは再生可能エネルギーに注力すると共にプラグインハイブリッド自動車などの低燃費自動車の開発が促進されると見られる。

(2) 事業計画

米国政府の自動車に関する計画は、1990 年代に開始された PNGV(Partnership for a New Generation of Vehicles)があったが、2002 年にこれを FreedomCAR(Cooperative Automotive Research) に組み替えている。推進母体はエネルギー省と USCAR(U.S.Council for Automotive Research)であり、水素燃料電池の開発に焦点を当て、2010 年を目標年として開発する計画が進んでいる。ブッシュ大統領は 2003 年に水素燃料イニシアチブを発表し、水素の製造・貯蔵など FreedomCAR 計画を補強している。米国

における水素エネルギーの開発の方針には、石油の輸入量が、90年代中ごろに国内産石油量より大きくなったことが背景にあり、エネルギーセキュリティの確保のために水素の開発を目指している。Advanced Energy Initiative では、プラグインハイブリッド自動車、バイオエタノール生産技術の開発が含まれ、2020年までに米国民が水素燃料電池自動車を購入できるようにする計画が盛り込まれている。2007年にブッシュ大統領は、10年以内にガソリン需要を20%削減する目標「Twenty in Ten」を発表している。政府予算の多くは大学などへの研究開発費であり、水素製造・輸送技術、水素貯蔵技術、燃料電池スタックなどの要素技術などにむけられている。こうした予算配分の結果として、水素関連技術に大きな進展が見られるかもしれない。

(3)技術開発目標

アメリカ政府は「国家水素エネルギー・ロードマップ (National Hydrogen Energy Roadmap)」を2002年11月に作成し、水素エネルギー開発における重要課題の抽出と、水素エネルギー利用を拡大するために、今後10年間に政府と企業が取るべき方向性を示した。また、2004年2月には、上記ロードマップを具体化させた Hydrogen Posture Plan (水素への取り組み計画) を公表している。この Posture Plan には、米国内を水素主体のエネルギーシステムに転換するための研究活動、マイルストーン、DOE の計画について概要が示されている。また、2005年に制定されたエネルギー政策法に基づき、電力と水素併産型の次世代原子力プラント「NGNP」の実用化計画を進めている。NGNPプラントに接続する水素製造技術に関しては、原子力水素イニシアティブにおいて、熱化学法 (ISプロセス、ハイブリッド硫黄プロセス)、高温水蒸気電気分解の3プロセスの研究開発を米国の国立研究所を中心に進めている。

水素社会への移行には、4つの段階を想定している。まず第I段階で、技術開発、第II段階で市場への初期的普及、第III段階でインフラへの投資、第IV段階で水素社会の市場およびインフラが形成される。各段階のタイミングは明確ではないが、本格的な水素社会は2020年代後半以降とみられる。

DOE は具体的な目標値として、FCV と水素インフラ普及シナリオと政府支援シナリオの検討を行い、2012年よりロサンゼルスとニューヨークを基点とした導入を始め、2025年には20の都市部と、それをつなぐ交通ルートへ発展させる目標を挙げている。FCV の目標生産台数は累積で、2020年で30万台~170万台、2025年で200万台~1,700万台、一方のステーションは2020年で最大1,300箇所、2025年で400~8,000箇所とするシナリオである。その際に必要な政府支援として、FCV の増分コストの50%補助、ステーション建設のコスト補助としては\$130万(2012-2017年)~\$30万(2022-2025年)、水素への補助金として\$0.50/kg(=約\$0.05/ N m³, 2012-2017年)~\$0.30/kg(=約\$0.03/ N m³, 2025年)等が必要としている。

図 1-2-2 水素ステーション普及シナリオとフェーズ



(出所)NEDO 海外レポート、NO.1029、2008

(4) 具体的取り組み

実証試験としては、北カリフォルニア、南カリフォルニア、デトロイト、ワシントン DC、オーランド(フロリダ州)の国内で 5 ケ所の走行実験が計画されている。2007 年時点では、燃料電池自動車は 77 台、水素ステーションは 12 ケ所、耐久時間は最大 1,200 時間である。実証試験の第 1 フェーズは、2009 年まででスタック耐久時間は 2,000 時間を、第 2 フェーズは 2010-2015 年であり 5,000 時間を目標にしている。

また、米国では地方自治体が進める独自の計画も多くある。カリフォルニア州は、ロサンゼルス特有の地形が原因で生じる大気汚染に悩まされてきたため、大気資源委員会が、1980 年代からこの問題の解決のために自動車を製造・販売するメーカーに、一定の割合の電気自動車のようなゼロエミッション・ビークルの導入を、強制的に義務づける厳しい規制案を検討してきた。しかし、当時、電気自動車の大量導入については、鉛電池の環境問題があり、1990 年代中ごろからはゼロエミッション車の中に燃料電池自動車の導入が含まれるようになった。世界の主要な自動車メーカーが、電気自動車や燃料電池自動車など環境対応車の開発を進めた要因の一つとして、市場が大きなカリフォルニア州の厳しい環境規制案が上げられる程、大きな影響力があった。

以下に、各地域での具体的な取り組みを示す。

(a) カリフォルニア・フュエルセル・パートナーシップ (CaFCP)

CaFCP は、連邦政府より早くカリフォルニア州の大気資源委員会が主体になって、1999 年に開始された燃料電池自動車の実証実験である。本部はサクラメントにあり、世界中の自動車大手 32 社が参加して、既に 100 台以上の燃料電池自動車が走行している。この計画は 2012 年まで延長されている。

(b) 水素ハイウェイ計画

CaFCP とは別に、シュワルツネッガー知事のリーダーシップにより開始された「水素ハイウェイ計画」は、2010 年までに州内に 150~200 ケ所の水素ステーションを建設する計画である。すでに 24 ケ所の水素ステーションが、建設されている。

(c) 南カリフォルニア AQMD プロジェクト

SCAQMD (South Coast Air Quality Management District) は、カリフォルニア州の南湾岸大気管理局で、ここでは 2003 年末から水素内燃機関自動車 25 台のデモ走行を行っており、水素ステーションは 5 ケ所に設置されている。

(d) ニューヨーク州

2005 年にニューヨーク州は、水素エネルギーロードマップを発表し、2020 年までに自動車用と定置型の燃料電池の導入を進めることを宣言している。計画としては、水素関連技術の実証試験、水素利用クラスター、都市、街道へと発展させ、最終的にはこれらクラスターをつないでいくことになっている。2006 年には、州内の水力発電から水素を生産する、Hydropower-to-Hydrogen プロジェクトを発表した。2007 年から水素の製造を開始し、2009 年末までには 120kg/日の水素を生産する予定である。

1-2-4 その他各地域での代表的な取り組み

日米欧の他にも、カナダ、ブラジル、アルゼンチン、オーストラリアなどで水素に関する取り組みが行なわれている。主な取り組みは以下の通り。

表 1-2-3 各地域の代表的な取り組み

地域	プロジェクト
EU CUTE (FC バス走行プロジェクト)	FC バスの走行実験 アムステルダム、バルセロナ、 ハンブルグ、ロンドン、ポート、ルクセンブルグ、マド リッド、ストックホルム、シュツットガルト トリノ、パリ、ベルリン
イタリア CITYCELL ミラノ	天然ガス改質、FCV、H2 エンジン車 H2 エンジン車
ドイツ ハンブルグ ミュンヘン空港 ベルリン	H2 エンジン車 FCV、H2 エンジン車
米国 政府 シカゴ CFCP 水素ハイウェイ SCAQMD プロジェクト パームスプリングス ラスベガス ニューヨーク州	フリーダムカープロジェクト FC 市バス走行 2000 年から FCV の走行実験 カリフォルニア州水素 SS 設置計画 カリフォルニア南湾岸大気管理局、H2 エンジン FCV、 FC バス PV+水電解、ハイタン (H2 30%、メタン 70%) 利用 ハイタンエンジン車、FCV FCV、水力発電からの水素製造
カナダ NRCAN のプロジェクト 水素ハイウェイ	FC バスの走行 2010 年の冬季オリンピックにむけたバンクーバー水 素計画
アルゼンチン パタゴニア風力・水素開発	ウインドパークプロジェクト、ピコトルンカド水素研 究所、UNID-ICHT (水素エネルギー技術国際センター) のパイロットプロジェクト
オーストラリア タスマニア島	水力発電から水素の製造

(出所)水素エネルギー最前線、工業調査会、2003、水素エネルギー社会、エネルギー・資源学会、2007、
水素エネルギーシステム、NO3、水素エネルギー協会、2008

1-3 水素社会への移行可能性

1-3-1 水素社会を巡る賛否について

第 1 節で、「水素社会」の到来は、エネルギー関係者にとっては1つの理想であったと述べた。しかしながら、専門家の中には、「水素を究極のエネルギーとして利用する社会」という考え方については慎重あるいは懐疑的な論者が多いのも事実である。

社会・文明論的な視点でなく、技術的・経済的な視点で、「水素社会」に対する支持派・懐疑派の両論を以下に整理する。

(1) 支持派の見解

① 石油の代替燃料としての供給安定性

② 貯蔵の効率性・経済性

貯蔵する際のエネルギー密度は、石油よりは劣るが電池よりも高い。電池による電力貯蔵は、金属資源の大量消費となり、コストが高くつく。水素は天候に左右される再生可能エネルギーの貯蔵に利用でき、永続的なエネルギーシステムの建設に有効である。

③ クリーン性・効率性

水素の燃焼によって生じるのは水のみであり、燃料電池を利用すれば窒素酸化物などの大気汚染物質は発生しない。カルノー法則による熱から動力への転換に関する熱力学的限界に縛られないので、小型でも効率が高い。

(2) 懐疑派の見解

① LCA 評価の問題

水素は自然界にはないので、一次エネルギーを変換して作らねばならない。電気自動車 (EV) と FCV の LCA 比較を行えば、水素は非効率であり、CO₂ 排出量の観点からも優れていない。

② 水蒸気による温室効果の問題

再生可能エネルギーと異なり、燃料電池の使用で水蒸気が生成されるが、水蒸気は温室効果をもたらすと言われている¹。

③ 希少資源 (レアメタル) の供給制約

燃料電池では、高価なプラチナ (触媒として使用) するケースが多いが、プラチナの資源量は多くない。

④ 爆発の危険性

まず(1)で整理した支持派の見解については、若干の異論はあろうが、概ねコンセンサス

¹ 燃料電池にしる化石燃料の燃焼にしる、いずれにしても水蒸気が生成され、必ずしも燃料電池固有の問題ではない。

が得られる項目と考えられる。一方(2)の懐疑派のあげた項目については、LCA 評価（本報告の第 2 章で詳述）、水蒸気の温暖化効果、レアメタルの供給制約や安全性といった項目で、水素の弱点を指摘している箇所であり、論者の見解が異なるところである。

これ以外にも水素を否定するものではないが、以下に示すような別の見解もある。

(3)時期尚早論

今は水素を開発するより再生可能エネルギーの開発が先である。再生可能エネルギーを十分に利用可能にしない限り、水素社会の前提が成り立たない。よって時期尚早。

(4)水素自動車（内燃機関で駆動）の選択

FCV に利用されるプラチナを生産するためのエネルギー投入量は大きく、またコストも高くつく。資源量にも制約があり、大量の FCV の普及は難しい。従って、同じ水素を利用するにも、内燃機関である水素エンジンを利用すべきである。内燃機関の開発には長い歴史があり、プラチナのような資源制約も少なく、内燃機関の熱効率の改良には余地も多い。

1-3-2 水素社会実現のための技術的諸課題

(1)再生可能エネルギーの重要性

「エネルギー効率が高く、CO₂ 排出量の少ない社会」を目指し、安定供給や化石燃料の資源枯渇に対応するという目的のためには、再生可能エネルギーや原子力など、他にも様々な方策がある。電気自動車と FCV、電気と水素という単純な比較で、これらと競合するのではなく、寧ろ、お互いに補完しあえるものというのが「水素」である。

例えば、太陽光や風力といった再生可能エネルギーを電力に転換して、そのまま利用できれば理想的である。しかし、実際には、天候等の状況によって出力が大きく変動する。そのために電力を大量に貯蔵するシステムが必要となるのは大きな弱点でもある。

これを水素という形で貯蔵できれば、プロセス全体の効率性・経済性から見て、非常に価値の高いものとなる。すなわち、再生可能エネルギーと相互に補完する形で、エネルギーのキャリア・パスの役割を果せる（果たす必要がある）。一方、1-3-1 (3)の「時期尚早論」で述べたように、再生可能エネルギー（これに限らないが）が普及していない段階では、水素の果たす役割も小さいことから、再生可能エネルギーの普及拡大が水素利用への大きなインセンティブを与える可能性が高いと言えるであろう。

(2)水素社会実現のための技術的諸課題

これに対して、水素社会の実現のためには多くの課題が存在する。

イ. 燃料電池のコストダウン

現在、FCV は数千万円もすると言われ、普及のためには大幅なコストの低減が不可欠

である。特に燃料電池自体のコスト低減が大きな課題となる。同様の問題は定置用燃料電池についても言うことができ、2009 年には家庭用の燃料電池が発売されようとしているものの、商用化に十分なほどコストが低減しているとは言いがたい。NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）のロードマップでは 2007 年に約 480 万円である定置用燃料電池を 2020～30 年頃には 40 万円以下に、また 2007 年に数十万円/kW である自動車用燃料電池を 2020～30 年頃に 4,000 円/kW 未満にコストダウンすることが目標とされているが、このようなコストの低減が水素社会の実現のためには不可避である。

ロ. 供給インフラのコスト

燃料電池のコストダウンと同時に必要なものは、水素社会を成立させるための供給インフラのコストである。1-1 節で述べたように供給インフラの整備と FCV の利用との間には「鶏と卵」の関係があり、長期的なビジョンをもって導入を図ることが必須となる。供給インフラのコスト及びそれによる水素の供給コストについては、本報告中の第 2 章で詳述する。

ハ. 進化を続ける内燃機関技術との競争

ガソリンエンジンには効率改善の余地があり、100 年以上の歴史をもつ多くの集積されたエンジン技術の知識とノウハウは膨大であり、関連する技術者の数は非常に大きく、ここ 30 年ほどで勃興したばかりの燃料電池や水素関連技術の比ではない。

例えばガソリンエンジン車と電気自動車の特徴を合わせもつハイブリッド自動車はガソリン車の効率の 2 倍を実現し、燃料電池自動車が普及するまでの期間の主役を演じるとみられる。また現在開発が進められているプラグインハイブリッド自動車では、電気自動車のもつ環境優位性とガソリンエンジン車のもつ長い航続距離との利点を兼ね備えることができる。将来的にガソリンベースのプラグインハイブリッド自動車は燃料電池自動車に匹敵する効率となる可能性もある。

二. 技術的課題

燃料電池自動車を実用化するために乗り越えなくてはならない課題は多い。従来、耐久性、低温始動性能、出力密度（体積あたりおよび重量あたり）等の問題が指摘されてきたが、このうち低温始動性に関しては、すでに日本のメーカーは技術開発を終えてほぼ乗り越える段階に達したと言われる。

①耐久性

自動車用燃料電池を実用化するためには 5,000 時間の耐久性が必要とされているが、まだ 2,000 時間程度と言われ、改良の余地がある。

耐久性を向上させる研究開発が必要であり、とくにガス流に晒されるイオン交換膜の製

造方法の改善が重要とされている。

②触媒用貴金属

燃料電池には、触媒として白金（プラチナ）が使用されている。白金は高価な貴金属であり、この使用量の低減や代替材料の研究が行われている。

仮に大量普及するころの 1 台の燃料電池自動車には 10g の白金が使用されるとし、1g あたり 2,000~4,000 円とすると、自動車 1 台あたりの白金のコストは約 2~4 万円となる。また、100 万台の自動車に必要な白金は 10 トンになる。2007 年の白金の年間消費量は 200 トン程度に対し、白金・パラジウムの資源量は約 7 万トンといわれていることから、燃料電池自動車の大量普及は白金価格の高騰につながりかねない。但しリサイクルが行われれば、コストは数分の 1 に低下して、資源量に関する心配はないとの意見もある。

③車上の水素貯蔵

燃料電池自動車用のための水素の供給方法として、水素を自動車に直接供給する純水素方式と、液体燃料を供給して車上でこれを水素に改質する方法（車上改質）が考えられている。このうち、車上改質方式をとった場合には小型の改質器が必要となるために高温部分（500 - 700℃）が生じる。また改質効率は地上に設置する改質プラントよりも低くなることは避けられず、大気汚染物質も排出することになる。これらのことから現状では「車上改質」に対する関心は低下している。

現在もっとも期待されているのは圧縮水素タンクであり、その圧力は 35Mpa（350 気圧）とされ、現在では 70Mpa（700 気圧）まで圧力を上げることも考えられている。35Mpa のタンクで概ね 300km 以上、70Mpa では 500km 以上の走行距離が実現される。単に高压のタンクが必要であるというのみならず、水素の場合には、低温における金属の脆性の問題が残っている。他の水素貯蔵方法としては、水素吸蔵合金や、これを圧縮タンクと組み合わせたハイブリッド・タンク、水素化合物（ハイドライド）のリサイクル利用、カーボンナノチューブなどが検討されているが、いずれも貯蔵量や貯蔵速度の面から実用化には遠い。

1-3-3 政府のイニシアティブの重要性

現在の状況にあつては、直ちに水素社会に移行してゆくような条件は整っていない。また今すぐに水素社会へ転換することが必要であるという緊急の要請があるかどうかは議論の分かれるところである。水素社会への移行は、前述したように、政府が長期的なシナリオを策定し、十分な時間と準備を行いつつ進めていくものであることも事実である。石油の価格高騰や供給問題、CO₂問題が深刻になってから水素社会への移行を考えるのでは手遅れになることは明らかであり、政府の政策支援等により着実に将来必要となる技術の開

発を進め、混乱なくスムーズに水素を利用する社会へと移行できるようにすることが必要である。

また燃料電池や水素エネルギーの技術開発は、21 世紀のイノベーションとして期待されるものであり、日本の将来の産業構造の変化、国際競争力などの要素を含めて検討すべき課題である。更に、水素の安全性に関する不安を取り除いて合理的な技術基準を設ける必要があり、そのためには政府のイニシアティブが必要と考えられている。

ここでは、政府の関与として研究開発への補助と安全性に関する規制緩和の動きを検討する。

(1)政府の研究開発への関与

研究課題の多い燃料電池自動車・水素社会を導入させるためには、政府の予算により積極的に研究開発を行うことが必要である。日本の燃料電池と水素エネルギー関係の予算は、H20 年度には約 289 億円とされているが、そのうちで固体高分子形燃料電池などの研究開発と実証試験には以下のような予算が投じられている。

表 1-3-1 燃料電池と水素に関する予算の一部

(億円)

	H17 年度	H18 年度	H19 年度
水素社会構築共通基盤整備事業 (自動車用および定置用燃料電池に関する規制再点検 および標準化)	35.8	35.6	25.5
固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発	51.7	56.4	51.3
定置用燃料電池大規模実証研究事業 (定置用燃料電池を実際に設置して実証試験を行う)	25.0	34.2	27.1

また、米国では、ブッシュ大統領が 2005 年 1 月の一般教書演説において、先進エネルギーイニシアティブを発表した。水素燃料イニシアティブは、この先進エネルギーイニシアティブに含まれ、輸送用エネルギーの輸入原油への依存度を削減する手段とされている。これに基づき、2005 年から 2008 年までに、年額で 266 億円から 371 億円へと研究費が増大している。その投入先は日本とはかなり異なっており、日本の場合には、燃料電池自動車の走行実験、定置型燃料電池の実証試験、水素ステーションの建設など、かなり実用化を意識した内容であるのに対し、米国では各要素技術の研究開発に対してより大きな予算が投じられている。

表 1-3-2 米国における水素・燃料電池関連の予算の推移（部局別）

(百万ドル)

部局名	2005 年度 歳出額	2006 年度 歳出額	2007 年度 決算額	2008 年度 要求額
エネルギー効率・再生エネルギー	166.8	153.5	193.6	213.0
化石燃料	16.5	21.0	23.6	12.5
原子力エネルギー	8.7	24.1	18.7	22.6
科学	29.2	32.5	36.5	59.5
エネルギー省 (DOE) 水素関連予算計	221.2	231.0	272.3	307.6
運輸省水素関連予算計	0.5	1.4	1.4	1.4
水素燃料イニシアティブ 合計	221.7	232.5	273.7	309.0
(億円)	(266)	(279)	(328)	(371)
前年比		+5%	+18%	+13%

(注)水素エネルギー社会、エネルギー資源学会 (2008 年)

表 1-3-3 2007 年度エネルギー省・運輸省の水素・燃料電池関連予算の内訳

用 途	割合 (%)
燃料電池スタック R&D	20
技術実証	20
燃料電池システム (運輸)	4
燃料電池システム (分散電源)	4
燃料改質器 R&D	2
安全、基準、標準	7
教育	1
システム分析	5
生産技術	1
水素製造・輸送	18
水素貯蔵	18

(注)水素エネルギー社会、エネルギー資源学会 (2008 年)

(2)水素の安全性と規制

水素エネルギー利用の重要な問題は、安全性の問題であり、この点に関しては安全基準を定めるなど、政府の適切な関与が必要である。

水素が危険であるという感覚は、1937年に起きたドイツの飛行船ヒンデンブルク号の火災事故が尾をひいている。しかし、NASAの元水素計画担当官であったアディソン・ベインは、事故の原因は水素の燃焼ではなく、飛行船の船体に使われていた材料が、燃えやすいものであったという研究結果を1997年に発表している。火災事故は機体に用いられた木綿が燃えたのであって、水素が原因ではないとしている。

実際に水素は大変軽く、拡散が早い。大気に放出されると直ぐに垂直的に上昇するため、爆発しにくい。また水素の燃焼は輻射熱が少ないので輻射熱で被害を受けることは少ない。この点においては、液化水素の危険性はLNGまたはLPGと同程度あるいはそれ以下であると言える。

日本の場合には、水素の取り扱い「高圧ガス保安法」や「建築基準法」によって規制されている。高圧ガス保安法によって水素充填所から敷地境界までの距離が規制され、また、ガソリンスタンドに水素供給設備を併設できない。建築基準法により、住宅・商業地域では一定量以上の水素を貯蔵することはできず、更に、水素ステーションでの貯蔵量も燃料電池自動車に数回充填できるだけの量のみであった。

しかし、水素の安全性に関しては、規制の再点検が実施された。水素に関する各種の爆発・燃焼実験によりデータが収集され、2005年3月には、以下の各項の規制の緩和が行われた。

a. 燃料電池自動車の型式認証制度（道路運送車両法）

水素を燃料とする自動車の型式認定が可能となり、トヨタとホンダから申請が行われて、2005年6月には型式認定が行われた。型式認定とは、あらかじめ国土交通大臣が構造上の基準等、技術的基準に適合することを認定することにより、一台一台の自動車の性能検証のための計算や仕様規定との適合等を省略できる制度であり、これにより、燃料電池自動車の量産化が可能になった。

b. 燃料電池自動車用水素容器の例示基準化（高圧ガス保安法）

圧縮天然ガス容器からいくつかの変更を行って、圧縮水素容器の例示基準が作られた。最高充填圧力は35MPaになり、応力部材は炭素繊維に限定された。また耐圧試験基準は従来の3分の5倍から、欧米並みの2分の3倍に改定された。

c. 燃料電池自動車の地下駐車場への進入制限緩和（消防法）

実験の結果、地下駐車場において、容器の安全弁が作動する前に現行の消火設備または不活性ガス（窒素）消化設備により水素火災が消火できることが確認された。これにより、燃料電池自動車が駐車する駐車場に設置すべき消火設備については、現行の消防法の基準により対応可能であるとして、地下駐車場への進入規制が緩和された。

d. 燃料電池自動車輸送トレーラーの水底トンネル進行規制緩和（道路法）

東京湾横断道路などの水底トンネルにおいて、水素を燃料とする完成車両を輸送するトレーラーは、危険物積載車両として制限が行われていたが、燃料電池自動車（水素エンジン車も含む）についてはこの規制を緩和した。

以上のように水素の利用に関する規制の緩和が少しずつ行われている。また定置用燃料電池についても、規制緩和が実施されている。更に、水素の安全性に関する調査と標準規格の制定が国際的な活動によって進められている。

第2章 水素社会のインフラについて

2-1 水素のサプライチェーンの概要

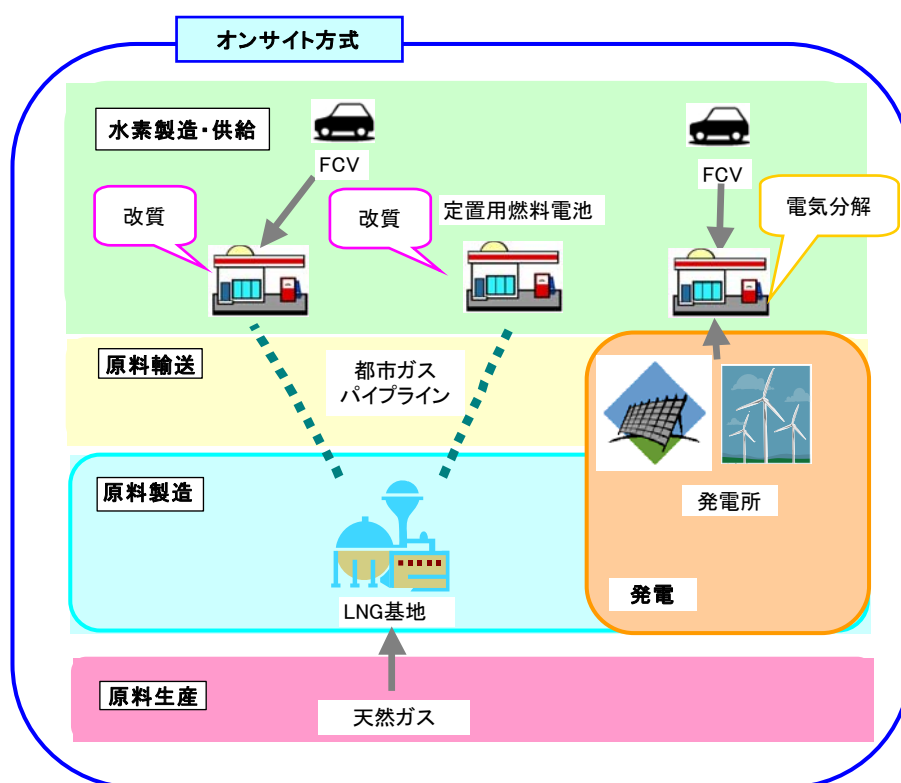
水素は二次エネルギーであるため、一次エネルギーからの変換が必要となる。また、水素は、現在燃料の主流となっている炭化水素と物理的な性質が異なっているため、新たなサプライチェーンの構築が必要になる。燃料電池自動車に水素を供給するまでのサプライチェーンの主な流れとしては、水素の製造方式、貯蔵形態、充填方式の組み合わせにより異なるが、大別すると需要地で分散的に水素を製造するオンサイト方式と遠隔地で水素を集中的に製造するオフサイト方式がある。

(1) オンサイト方式 (原料生産→原料製造→原料輸送→水素製造・供給)

オンサイト方式は、水素製造装置を燃料電池または水素ステーションと同じ場所に設置し、ステーション内で水素を製造・貯蔵し、燃料電池自動車に供給(充填)する方法である。オンサイト方式では、大規模な水素輸送システムが必要ない、必要な時に必要な量の水素を供給できるので大規模な水素の貯蔵設備が不要、などのメリットがある。オンサイト方式の代表的な供給のフロー図を下に示す。

図 2-1-1 オンサイト方式のサプライチェーン概要

(化石燃料改質例として天然ガスを表記)



オンサイト方式では図に示したように、炭化水素改質、主に天然ガス改質による水素供給と水の電気分解による水素供給が考えられる。都市ガスを既存の供給ラインを利用してステーションに供給し、水素ステーション上で各種炭化水素の改質を行い、水素製造後、PSA(Pressure Swing Absorption)装置を用いて精製し、常圧あるいは圧縮水素として貯蔵する。水電解形水素供給ステーションは商用電力利用による電気分解や太陽熱による電気分解等により水素を製造後、水分を除いて常圧あるいは圧縮水素として貯蔵するという流れになる。

以下、代表的な供給フローにおける効率を示す。

- ・ オンサイト（天然ガス改質）+圧縮貯蔵による供給

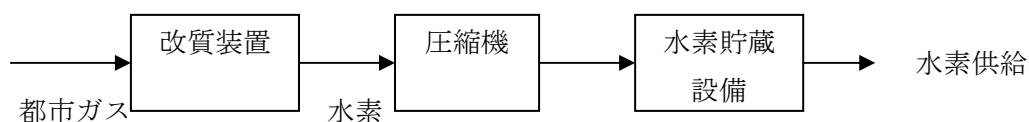


表 2-1-1 オンサイト改質+圧縮貯蔵する場合の効率

プロセス	エネルギー効率
都市ガス→改質装置→水素	54%～75%
圧縮機→20MPa	90%～93%
都市ガス～水素供給までの総合効率	48%～70%

(以下、表の効率の数値は、JHFC プロジェクトおよび各種報告を参考に作成)

水素ステーションでは、FCV の水素タンク圧を 35MPa とすると、ディスペンサーからの水素供給圧が 40MPa 程度となり、エネルギー効率はさらに低下する。(43%～65%)

- ・ オンサイト（電気分解）+圧縮貯蔵による供給

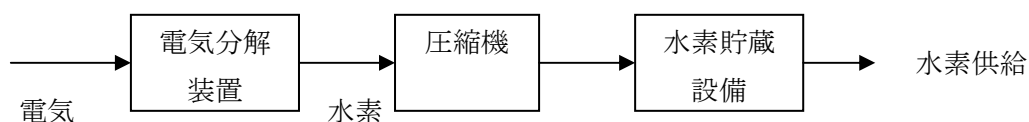


表 2-1-2 オンサイト電気分解+圧縮貯蔵する場合の効率

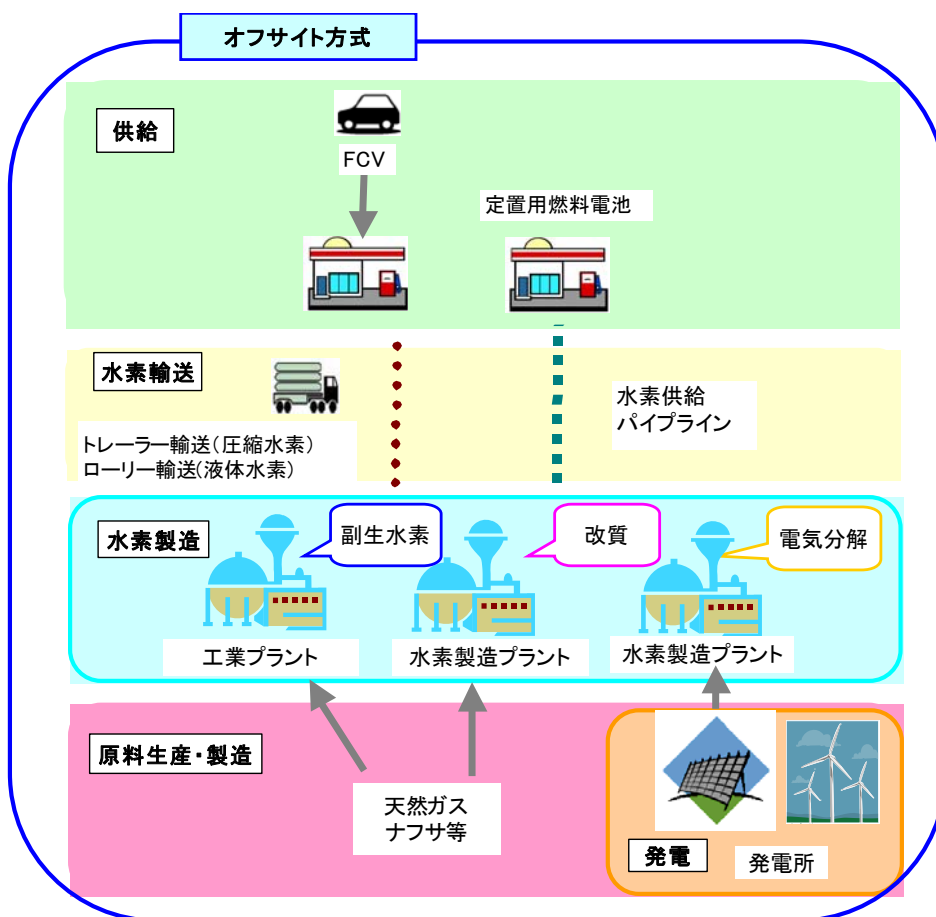
プロセス	エネルギー効率
電気→電気分解→水素	70%～80%
圧縮機→20MPa	90%～93%
電力～水素供給までの総合効率	54%～65%

同様に水素ステーションでは、FCV の水素タンク圧を 35MPa とすると、ディスペンサーからの水素供給圧が 40MPa 程度となり、エネルギー効率はさらに低下する。(49%～60%)

(2)オフサイト方式 (原料生産→原料製造→水素製造→水素輸送→供給)

オフサイト方式は、水素ステーション以外の場所で水素を大規模に生産し、水素ステーションに輸送、貯蔵した後、燃料電池自動車に供給(充填)する方法である。工場からの副生水素や大規模風力発電等で製造された電気分解水素等は、水素の製造場所と需要地が離れている。このため、水素はパイプラインで輸送するか、高圧ガスにしてボンベで輸送するか、液化してタンクローリーで輸送することになる。オフサイト方式では、大規模集中的に水素の生産が行えるため、高い効率で水素の製造が可能となるメリットがある。

図 2-1-2 オフサイト方式のサプライチェーン概要



水素を輸送する方式には液体水素（LH2）、圧縮水素（GH2）の他に、パイプラインでの輸送あるいは炭化水素に添加（水素化、ケミカルハイドライド）し、水素ステーションへ運搬する方法がある。水素の貯蔵にも、液体水素、圧縮水素、水素吸蔵合金（Metal Hydride）、ケミカルハイドライドなどの方法があるが、ケミカルハイドライドは現在実証段階であり、また水素吸蔵合金は冷却ユニットが必要である。輸送、貯蔵いずれもコスト削減、安全性の向上など技術開発段階にあるため、今後の技術開発が期待される。

- ・ オフサイト（副生水素） + 圧力容器輸送による供給

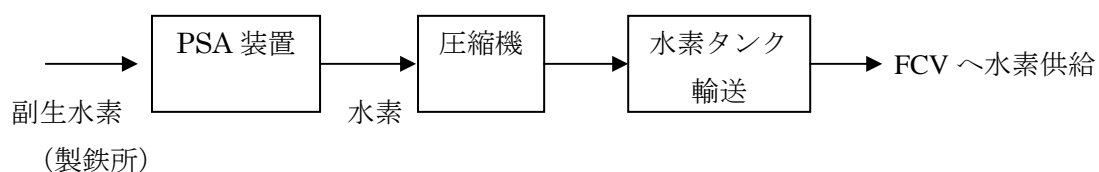


表 2-1-3 オフサイト副生水素を圧力容器輸送する場合の効率

プロセス	エネルギー効率
副生水素→PSA→水素	80%～90%
圧縮機→20Mpa	90%～93%
輸送（100km 輸送で約 3%のエネルギー消費）	97%
副生水素～水素供給までの総合効率	70%～81%

水素ステーションでは、FCV の水素タンク圧を 35MPa とすると、ディスペンサーからの水素供給圧が 40MPa 程度となり、エネルギー効率がさらに低下する。（63%～75%）

- ・ オフサイト（電気分解） + 液化水素による供給



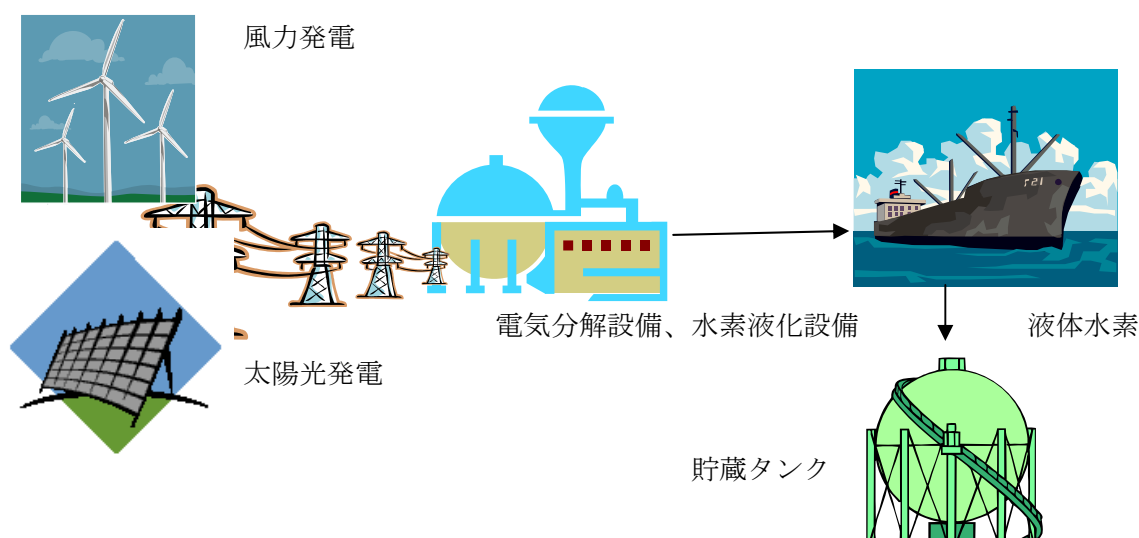
表 2-1-4 オフサイト電気分解水素を液化して輸送する場合の効率

プロセス	エネルギー効率
電気→電気分解→水素	60%～70%
液化装置	70%～80%
輸送（100km 輸送で約 0.7%のエネルギー消費）	99.3%
ボイルオフ（輸送・貯蔵時）	0.06%～0.1% / 日
副生水素～水素供給までの総合効率	48%～56%

- ・長距離、大規模な供給システム

将来的には大規模な風力発電施設を強風域に設置し、その電力で電気分解水素を製造する方式や、大規模な太陽光発電設備を砂漠地帯や海洋上に設置し、その電力で水素を製造する方式が検討されている。通常のオフサイト方式よりも更に水素の製造場所と需要場所が離れることから、水素を液化して専用船や専用トレーラーで輸送するなどの方法が考えられている。

図 2-1-3 長距離・大規模な水素供給システム



オフサイト水素生産では、需要地まで水素を輸送することになるが、この際に水素パイプラインが実際に欧米において広く利用されている。

○水素利用社会システムの構想

水素サプライチェーンの更なる進化と最適化を目指す中で、水素を利用した新たな社会システムを構築する構想がある。これは、二次エネルギー媒体としての水素の優れた特性に着目し、製造から利用に至るエネルギーシステムを現在のエネルギーシステムに有機的に組み込み、また置き換えていくことで、より高効率でクリーンなエネルギーシステムを構築しようとするものである。

例として、水素マルチエネルギーステーション構想や水素ホロニックエネルギーシステム構想があり、これらは、多様な一次エネルギー源から水素を製造し、また、水素と熱の供給・融通を含めて需要側と供給側、集中と分散を調和させることで、エネルギーの安定供給、省エネルギー、環境性の向上を目指した最適エネルギーシステムの構築を目指す構想である。

2-2 水素の製造について

2-2-1 水素の製造方法

水素の製造は一次エネルギーからの変換であり、大きく分けて改質水素、電気分解、副生水素など以下の方法に分類される。

- ・改質（天然ガス、LPG、灯油）

既存の都市ガス、灯油、LPG などのエネルギーを、改質装置で水素に変換して供給する。石油業界のナフサ改質による水素化精製装置を利用して水素を製造することも検討されている。

- ・電気分解

アルカリ水の電気分解により、容易に水素を製造できる。カナダの水素製造の例では水道水を利用している。しかし、この方法で電気分解の効率が 70~80%、燃料電池の発電効率が 50%と仮定すると、100 の電気から 35~40 の電気が生成されることになり、電気エネルギーは約 1/3 に減ってしまう。この点が電気自動車と燃料電池自動車との効率の議論を引き起こす原因になっている。

- ・副生水素

製鉄所のコークス炉から出る COG に水素ガスが 50%~60%程度含まれているので、これを PSA（圧カスイング吸着）で精製する。このほかにも、ソーダ工場で食塩水の電気分解から発生する水素がある。

- ・その他

他に研究開発中の水素製造技術として熱化学分解法、生物的水素生産等がある。熱化学分解法は原子炉等から得られる 1,000℃以下の熱を用い、複数の化学反応を組み合わせ水素を製造する方法である。

生物的水素生産としては、微生物の利用により水素を製造する方法が研究されている。メタン発酵はよく知られた方法で廃棄物などからメタンを製造しこれを改質して水素にでき、下水汚泥からの水素生産が試みられている。また嫌気性条件下、常温、常圧で、微生物の働きにより光合成によって水から水素と酸素を発生させる方法が注目されている。水素の発生効率は低いとされてきたが、太陽光をエネルギー源として、10%近い水素生成効率が報告されつつあり、ブレークスルーが生まれる可能性がある。

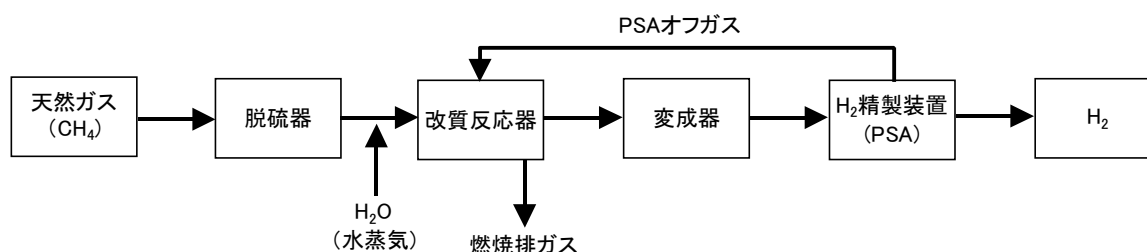
2-2-2 天然ガスの改質

化石燃料から水素を取り出す方法として、水蒸気改質（スチーム・リフォーミング）がある。原料の炭化水素と水蒸気を 10~20 気圧、800~850℃、ニッケル触媒上で反応（吸

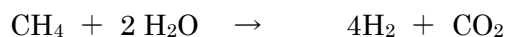
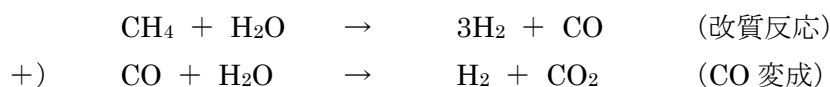
熱反応：外部から加熱）させて改質する。原料の炭化水素としては、ガス状炭化水素から重質ナフサまで使用可能であるが、天然ガスの水蒸気改質法がもっとも広く実用化されている。

都市ガス（13A）はメタンを主成分として、少量のエタン、プロパン、ブタンおよび極微量の硫黄分（付臭剤）を含んだガスである。このうち硫黄分については、改質器において用いられる改質触媒の活性を著しく低下させることから、原料の都市ガスは脱硫器により付臭剤（硫黄成分）を除去しておく必要がある。その後、水蒸気を加えて改質器に導入し、水素濃度約 60%のガスに改質する。次に、水蒸気改質されたガスの中の水素量を増加させるため CO 変成器に導入され、一酸化炭素を水素に変成して約 70%まで水素濃度が高められる。CO 変成された水素リッチなガスは改質ガス圧縮機によって加圧し、PSA(Pressure Swing Absorption)吸着槽に導入され、高純度の製品水素ガスを分離精製する。PSA による水素精製は、吸着剤を用いて高圧下で一酸化炭素や二酸化炭素等の不純物を吸着除去し、常圧あるいは減圧下で不純物を吸着剤から脱着・再生を行う循環操作により高純度の製品を得ることができる。水素を分離後の PSA オフガスは、改質器バーナーに戻して改質用熱源として利用する。図 2-2-1 に改質プロセスのフロー例を示す。

図 2-2-1 都市ガス水蒸気改質法による水素製造プロセス例



水蒸気改質反応の反応式は、メタンを原料とした場合、以下の通りとなる。



また、上記のプロセスの他に、原料の炭化水素を部分酸化することにより水素を製造することもできる。



この反応は発熱反応であるため、温度上昇に外部からの加熱が必要でなく、水蒸気改質に比べて起動時間が短くなる。水蒸気改質は吸熱反応、部分酸化は発熱反応であるため、導入する酸素（空気）の量を調節することによりこれらの反応のバランスをとり、熱バランスを成立させて原理的に外部との熱交換なしに改質を行うことができる。このような改質法はオートサーマル法（Auto-thermal reforming : ATR）と呼ばれている。

現在、工業的水素製造では化石燃料の改質が多く採用されている。反応プロセスとしても十分に確立され、また装置の実用性も高く、現時点では最も経済的かつ現実的な方法である。

水素製造装置の概観を図 2-2-2 に示す。工業用水素製造の普及に伴い水素製造ユニットの完成度は高まっており、写真の大阪ガス・HYSERVE-30（水素製造量 30m³N/h）では設置面積 5m² というコンパクト化を達成すると同時に、燃焼ガス廃熱やオフガスの有効利用、PSA の水素回収率の向上なども実現し、99.999vol%以上の高純度の水素を得ることができる。水素製造量 30m³N/h 規模の HYSERVE-30 では原料原単位は 0.42m³N-原料/m³N-H₂、電力原単位は 0.20kWh/m³N-H₂ であり、100m³N/h 規模の HYSERVE-100 では原料原単位は 0.40m³N-原料/m³N-H₂、電力原単位は 0.16kWh/m³N-H₂ となっている。JHFC の水素ステーションでこの装置が採用されており、現在のこの技術の延長上に将来のオンサイト水素製造装置があると言える。

水蒸気改質装置のメーカーとしては国内に大阪ガスエンジニアリング、三菱化工機、コスモエンジニアリング、エア・ウォーター (ATR) など、海外では米国の H₂GEN 社、Hyradix 社 (ATR)、ドイツの Mahler 社などがある。

図 2-2-2 水素製造装置概観（大阪ガス・HYSERVE-30）



(出所) 大阪ガスホームページ

2-2-3 水の電気分解

水素製造のための化石燃料以外の原料として、水が考えられる。水は世界中のどこにでも存在し供給面の制約がない上に、 NO_x 、 SO_x 、 CO_2 等の有害物質を排出しない。主な方法としては電気により水を分解する方法が挙げられるが、その他に原子炉の高温核熱を利用する方法などが考えられている。

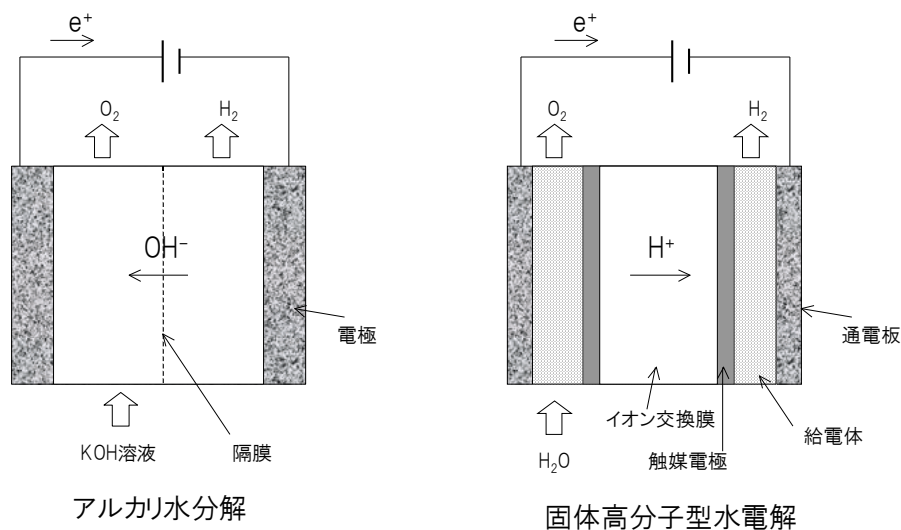
(1)概要

a. 水の電気分解

水からの水素製造法として長い実用化実績をもち、現在も有力視されているのは水の電気分解である。水の電気分解は 1800 年に英国のニコルソンとカーライルが初めて行って後、20 世紀前半から既に工業的に用いられはじめ、アンモニア合成や化学工業において利用されてきた。最近ではシリコンウェーハ、半導体デバイス等の分野のプロセスガスとしての水素需要拡大を背景に、オンサイト型の水電解水素製造装置の普及が進んでいる。

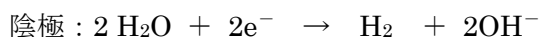
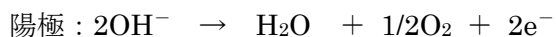
この方法では、電気を水に流すことにより水を分解し、水 1mol から水素 1mol 及び酸素 1/2mol を生成する。副次的に発生するものは酸素のみであり、有害な物質を全く排出しないことが特徴である。現在、アルカリ水電解と固体高分子型水電解の 2 種が多く用いられている。

図 2-2-3 水の電気分解の概念図



・アルカリ水電解

アルカリ水を電解質溶液として用いる方法が広く行われ、現在商品化している水電解の殆どはこの方法を用いている。ここでは、陽極及び陰極で以下の反応が行われている。



この二つの反応をトータルで見ると 1 分子の水から 1 分子の水素と 1/2 分子の酸素が生じたことになる。電解質として最も多く用いられるものは KOH の溶液であり、25% 程度のものが用いられることが多い。水以外の原料を必要としない反面、膨大な電力を要するため、エネルギー消費が大きい。このため、コスト低減のためには電解効率を上げることが最も重要な課題となる。一般に、高温で水電解を行うほど理論電解電圧が低下し必要な電力量を低減することが可能である。

電解効率は現在 60% (LHV) 程度、装置価格は 1Nm³-H₂ 当り 60 万円程度と言われるが、NEDO のロードマップでは 2010 年にこれを 40 万円程度、2015-20 年には 25 万円程度まで低減することを目標としている。また JHFC の相模原水素ステーションではアルカリ水電解による水素製造の実証試験が行われ、ここでの効率は 61% 程度であったが、JHFC で想定する実証化段階では効率が 71% 程度まで向上することが期待されている。

・固体高分子形水電解

これに対し、更なる効率向上とコスト低減を目指し、1970 年代より固体高分子形水電解法の開発が行われている。これは燃料電池 (PEMFC) と逆の反応により水素を製造する方法であり、陽子を選択的に透過する 0.1mm 程度の厚さの弗素樹脂系のイオン交換膜を白金族の触媒電極、多孔質系の給電体及び主電極ではさんだ構造となっている。ここでは、陽極側に供給された水が電気分解されて酸素、陽子と電子が生成し、この陽子が電解質膜を通過して陰極側に移動し、電子と結合して水素を発生する。この方法では腐食性の水溶液を用いないため取り扱いが容易であり、電流密度やエネルギー効率が高くコンパクト化も可能となる。一方で燃料電池と同様に白金族の触媒を用いるなどコストがかかり、その低減や耐久性の向上などが技術的な課題となる。理論的には燃料電池と同じ装置で逆の反応を行わせることが可能であることから、夜間の電力で水素を製造・貯蔵し、昼間に燃料電池として発電させるシステムも検討されている。

設備費は現在 140 万円/Nm³-H₂ 程度であるが、NEDO のロードマップではこれを 100 万円程度まで低減することを目標としている。

・高温水蒸気電解

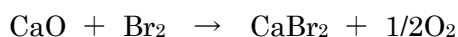
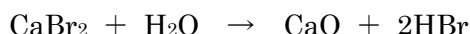
水の電気分解は高温になるほど、理論電解電圧が低下し効率が向上することが知られている。これを利用して、例えば原子炉から得られる 900~1,000°C 程度の高熱などを利用し、高温の水蒸気を電解する方法が検討されている。ここでは酸化物イオンの伝導性を有する安定化ジルコニアなどを電解質隔膜とし、これを隔てた電極の陰極側に高温の水蒸気を流過させることにより電気分解を行う。この方法では高温運転に付随する耐久性とコストの

低減に課題が残されており、現状では実験室レベルの実証に止まっている。

b. 水の熱分解

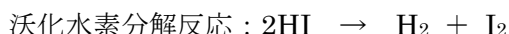
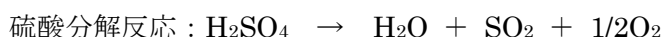
水を原料として水素を製造する方法として、上記の電気分解の他に熱分解の手法の開発が進められている。代表的な方法としては、UT-3 や IS プロセスが挙げられる。

UT-3 は東京大学 (University of Tokyo) により開発が進められてきたプロセスであり、臭素・カルシウム及び鉄の化合物を作業媒体とした以下の 4 つの要素反応からなる。



この反応は全てが固体とガスだけの反応であり、固体反応物の周囲にガスのみを循環させて水素と酸素を発生させることができる。本方法は 700°C 程度の比較的低い温度で熱分解が可能であり、高温ガス炉のほかに、太陽熱あるいは製鉄高炉から得られる熱の利用など種々の熱源との接続が検討されている。

IS プロセスは沃素と硫黄の化合物を循環物質として用いる熱化学法である。この方法では、以下の 3 つの化学反応を用いる。



このプロセスに必要な熱は 900°C 程度であり、原子力 (高温ガス炉) を利用した水素製造が検討されている。わが国では日本原子力研究開発機構の高温工学試験研究炉 (HTTR : 茨城県大洗町) での実証試験が行われており、同機構の開発する GTHTR300C (水素・電力コージェネレーション高温ガス炉システム) では、熱出力 60 万 kW の高温ガス炉を用いて 24,000Nm³/h の水素と 20 万 kW の発電を同時に行うことが想定されている。

これらの熱分解のプロセスは何れも現在研究段階のものであり早急な実現は見込めないが、原子力や太陽熱の利用など化石燃料以外のエネルギー源からの水素の大規模製造を可能とするものであり、水素社会が実現した場合には大きな役割を担う可能性がある。

(2) 供給可能量

化石燃料から発電を行って電気分解により水素を製造する場合、発電時に大量の二酸化炭素を発生すると同時に、一般的には直接改質する方法に比べて効率は悪いものとなる。

そのため、電気分解が特に大きなメリットを発揮するのは発電源として原子力や再生可能エネルギー等の非化石燃料由来のエネルギー源を用いた場合であると言える。

1km 当りの水素消費量を 0.01kg (0.111Nm³) と想定し、1 台当りの走行距離を年間 10,000km と仮定すると、燃料電池自動車の普及に応じた水素・電力・水の所要量は表 2-2-1 の通りとなる。

表 2-2-1 燃料電池自動車の普及に伴う水素・電力・水の必要量

自動車	百万台	100	200	500	1,000
	占有率(%)	5	10	25	50
総走行距離	億km/年	10,000	20,000	50,000	100,000
必要水素量	億Nm ³	1,113	2,225	5,563	11,125
必要電力量	TWh	496	992	2,480	4,960
必要水量	億Nm ³	0.98	1.97	4.92	9.85

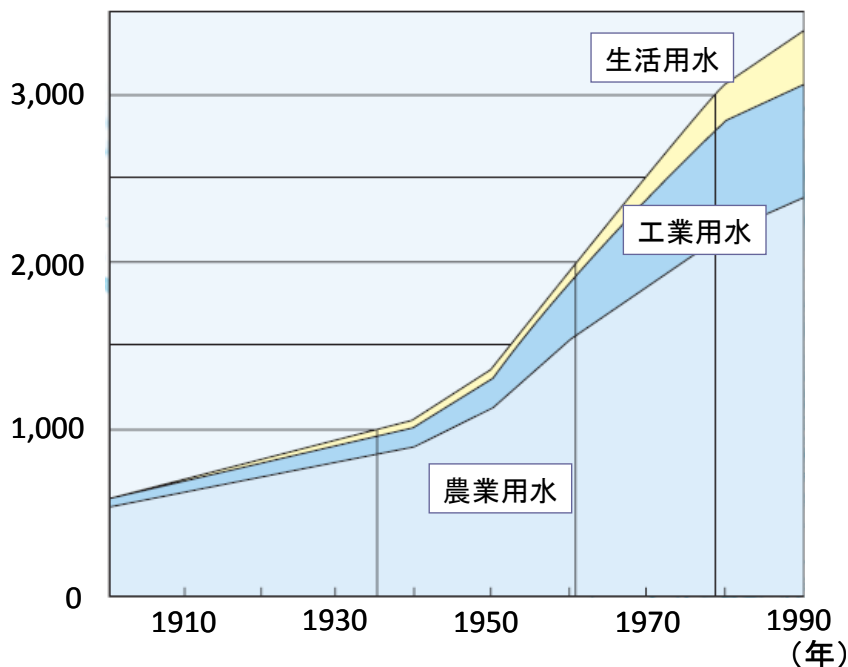
世界で 10 億台の燃料電池自動車の導入のために必要な電力量は 4,960TWh、必要な水量は 9.85 億 Nm³となる。

原子力発電の供給可能量を 2,291TWh、風力・太陽光発電の供給可能量を 4,695TWh と想定し、JHFC の実用化段階程度のエネルギー効率 (71%) を仮定すると、これによる水素の供給可能量は 1.6 兆 Nm³/年、14 億台程度の供給が可能となる。即ち、低炭素電力の供給可能量は、大規模な燃料電池自動車の普及に対して十分にあると考えられる。

但し電源の開発は国の供給計画や電源構成に基づいて決められるものであり、例えばわが国ではベースロードとしての利用の面から原子力発電の比率を 70%程度まで上昇させることは難しいとともに、立地制約や系統安定性の面からも再生可能エネルギーによる発電の比率を極端に大きくすることも困難である。発電時に化石燃料を使用した場合には水素の利用は環境負荷の低減にはつながらないため、系統電力の電源構成の中で非化石燃料のシェアを上昇させることが重要になる。

図 2-2-4 に示すように、世界の生活用水の使用量は 1990 年に 300km³/年程度である。仮にこの 1%が水素製造に用いられるとすると 30 億台の燃料電池自動車への水素が供給可能となる。このように、世界全体で見れば水資源の制約は燃料電池自動車の普及に大きな障害とはならないと考えられる。しかし水の不足する地域においては、水資源の不足が電気分解による水素製造・供給のネックとなることも考えられる。

図 2-2-4 世界の水使用量の推移



(出所) 農林水産省

2-2-4 副生水素

石油精製、粗鋼生産、苛性ソーダ生産の過程において、水素もしくは水素を含むガスが大量に発生する。これらの副生水素は、現在は主に脱硫等の工業用原料やボイラ用としての熱エネルギーとして利用されるほか、純度の高いものは高純度水素として外販されている。副生水素は、絶対量が多く、副産品であるということから重要な水素供給源として期待されている。本項では代表的な副生水素として石油精製、製鉄所、ソーダ工業における副生水素の概要について示す。

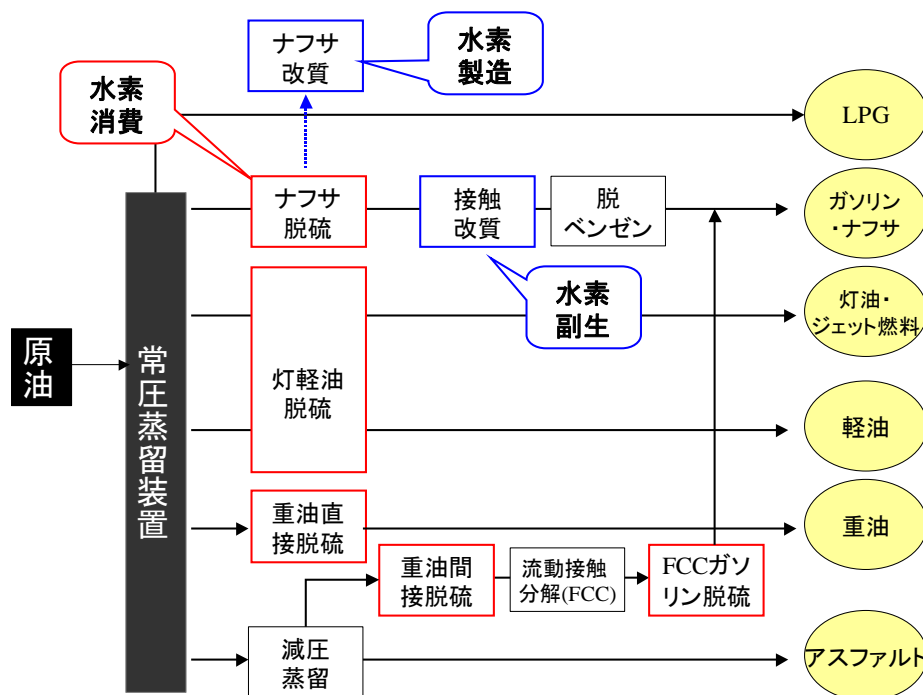
(1) 石油精製業

(a) 概要

石油精製では、水素は主に製品の脱硫や重質油の軽質化、重油の分解などに用いられている。一方で、消費される水素を賄うために、製油所内で水素が生産されている。水素生産には大きく分けて二つのプロセスがある。一つはガソリン成分のオクタン価向上のために行われる接触改質(リフォーミング)プロセスで、飽和炭化水素をオクタン価の高い芳香族に変換する際に大量の水素が発生する。もう一つは、ナフサの水蒸気改質プロセスで、余剰となったナフサを改質することで水素を生産している。石油精製過程においてはこの

ようにプロセス内で水素の製造及び発生した水素の有効活用を図っている。一方で、設備の運用上、水素製造設備にはある程度の余力がある。この水素製造設備の余力を活用する事は、新たな設備投資を必要としないため、この余力を活用して水素生産を行う事が期待されている。

図 2-2-5 石油精製フロー概略図



(b) ポテンシャル

2007 年に石油産業活性化センター(PEC)がまとめた報告書¹では、国内製油所における水素供給余力を以下のように定義して、ポテンシャルの推計を行っている。

$$\text{水素供給余力 (能力)} = \text{水素発生装置 (接触改質装置、水素製造装置) の製造能力} - \text{水素消費装置 (脱硫装置、水素化分解装置) の水素消費量}$$

同報告書では、各製油所の設備能力を積み上げた上で、各種統計データを用いて稼働率を推算している。その上で、稼働率情報と各装置のプロセス概要及び水素原単位を用いて、各装置での水素発生量と水素消費量を推算している。推算結果に拠れば、2004 年度の水素発生装置の設備容量は 189 億 N m³、消費装置は 142 億 N m³であり、水素製造装置には余力があった。水素製造装置の設計能力は 103 億 N m³、実際の水素製造量は 56 億 N m³であり、差し引きで水素供給余力は 47 億 N m³と推計している。内訳は以下の表の通り。

¹出所：平成 18 年度 調査事業成果発表会資料集、財団法人 石油産業活性化センター

表 2-2-2 装置別の水素消費量及び水素発生量

(億 Nm³)

装置	水素量	装置(内訳)	水素量(内訳)
水素消費装置	142	ナフサ灯軽油脱硫	51
		水素化分解	19
		重油脱硫(直接脱硫)	33
		重油脱硫(間接脱硫)	39
水素発生装置	189	水素製造	103 (実績 56)
		接触改質	86
水素供給余力 (能力)	47	水素製造装置余力	103 - 56 = 47

(出所)平成 18 年度 調査事業成果発表会、「将来の製油所における高純度水素供給能力の動向に関する調査」、資料集、財団法人 石油産業活性化センター、に加筆

(c) まとめと課題

○今後の供給余力

製油所では、製油所内部で水素を生産した上で、脱硫及び重質成分の分解のために大量に水素を消費している。水素は石油精製過程における副産物であると共に精製に必要な原料として用いられているため、原油の性状、目的生産物によって水素の生産量、消費量は決定される。このため、外部に供給可能な水素の量は石油製品に対して二次的に決まる。ただし、バッファとして水素製造装置の余力が存在するため、これを用いて水素を製造する事は可能である。今後は脱硫の強化が進むと共に原油が重質化していくという見通しもあるため、今以上に製油所内で水素が消費され、供給余力が減少していく事も考えられる。また、水素の原料として考えられるナフサが不足する可能性もあり、将来的な水素供給余力の予測には不確実性がある。

○輸送

製油所は主に湾岸に位置しているため製造された水素を内陸部まで運ぶ事は難しい。一方で、製油所は施設としてインフラが充実している事などから、近距離のパイプライン、ローリー輸送などによって製油所周辺地域への供給が期待される。

○経済性

炭化水素の改質による水素製造プロセス自体は、ほぼ確立した技術であるため、水素の製造コストは大よそ原料である原油価格に依存すると考えられる。このため 2008 年のように原油価格が乱高下する市場では、炭化水素由来の水素価格も乱高下する事が予想されるため、状況によっては電気分解によって製造される水素よりも製造コストが高くなる局

面も想定される。

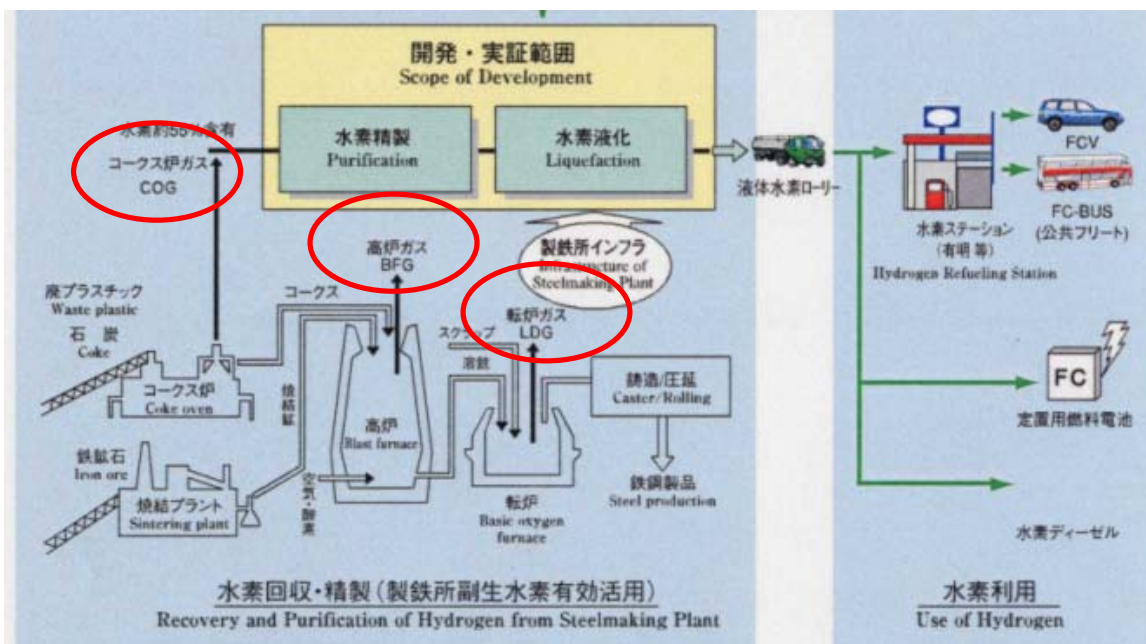
(2)鉄鋼業

(a) 概要

製鉄所では、鉄鉱石を還元する際に大量の石炭を使用するが、その石炭から副生するガスを回収し、自家用燃料として活用すると共に、蒸気、電力、酸素、窒素等のエネルギーに変換して、エネルギーの利用を図る効率の良いエネルギー自給システムを構築している。

高炉一貫製鉄プロセスにおいては、水素を多く含む 3 種類の副生ガスが発生している。これらのガスが持つ熱量は膨大であり、一般的に製鉄プロセス内で燃料として利用されるなど、副生ガスの効率的な利用が図られている。この中でもコークス炉から発生するコークス炉ガス(COG)は体積比率で 50%~60%程度の水素を含んでいるため、これを精製することで燃料電池で利用できる水素を製造することができると期待される。製鉄プロセスのフローにおける 3 種類のガスの発生ポイントは図の通りとなる。

図 2-2-6 製鉄プロセスのフローと副生ガス



(出所)JHFC 資料に加筆

1) コークス炉ガス(COG)

コークス炉では、石炭(主に原料炭)を乾留して、コークスを製造する際に石炭中の揮発分由来のガスが発生している。これがコークス炉ガス(COG)であり、主成分は水素(55Vol%)、メタン(30Vol%)である。COG はガス発生量の多さ、水素含有率の高さから鉄鋼プロセスにおける副生水素の供給源として最大のポテンシャルを有している。

2) 高炉ガス(BFG)

高炉では、コークス(一部微粉炭)を還元剤として鉄鉱石の還元を行っており、その際に副生するガスが高炉ガス(BFG)である。可燃性ガスとしての主成分は一酸化炭素(20Vol%)、水素は 1%であり、残りは窒素と二酸化炭素である。

3) 転炉ガス(LDG)

転炉では、高炉で製造された銑鉄を鋼に精錬しており、その際銑鉄中の炭素が吹き込んだ純酸素と反応して精製するガスが転炉ガス(LDG)である。主成分は一酸化炭素(70Vol%)であり、水素は 4%である。

表 2-2-3 鉄鋼系ガスの組成

	vol%						
	H2	O2	N2	CO	CO2	CH4	CnHm
コークス炉ガス	56%	0%	2%	6%	3%	29%	3%
高炉ガス	1%	0%	13%	71%	14%		
転炉ガス	4%	0%	52%	23%	21%		

(出所)エネルギー資源学会、水素エネルギー社会、2008

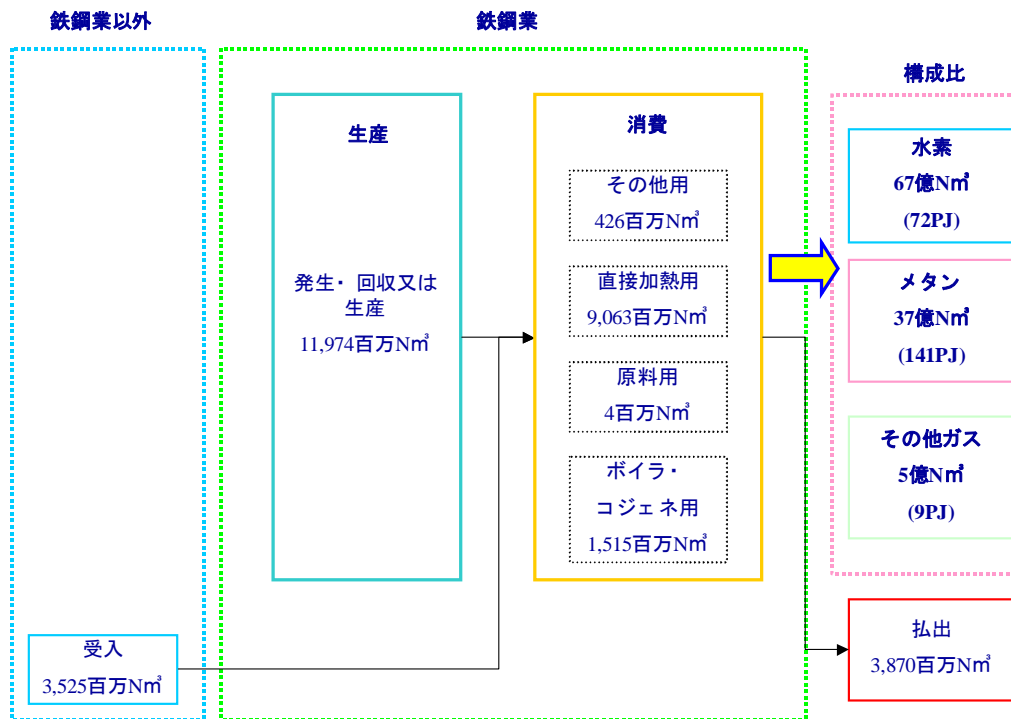
(b) ポテンシャル

コークス炉ガス、高炉ガス、転炉ガスのそれぞれの発生量、消費量から水素発生量を推算する。水素の利用可能量として、燃料として消費されているものを計上し、外販されている水素などは除く。

3 ガスの中でも、コークス炉ガス由来の水素のポテンシャル量は多く、約 67 億 Nm³程度であると推計される。一方で、高炉ガス、転炉ガスはそれぞれ約 2 億 Nm³、14 億 Nm³程度である。三つのガス合わせて 80 億 Nm³程度に及ぶと推測されるが、水素の含有率の高さからもコークス炉ガスが主な供給源になると考えられる。

一方で、コークス炉ガスを燃料として用いる際にコークス炉ガスに含まれる水素が持つ熱量は 72PJ になり、水素を回収する際には、この熱量をなんらかの形で埋め合わせる必要があるといえる。仮に、これを C 重油で代替することを想定すると 172 万 kl(BC 重油の国内生産量の約 6%)となり、C 重油を燃やす事によって排出される CO₂は 517 万トンに上るため、水素代替の燃料には注意が必要になる。

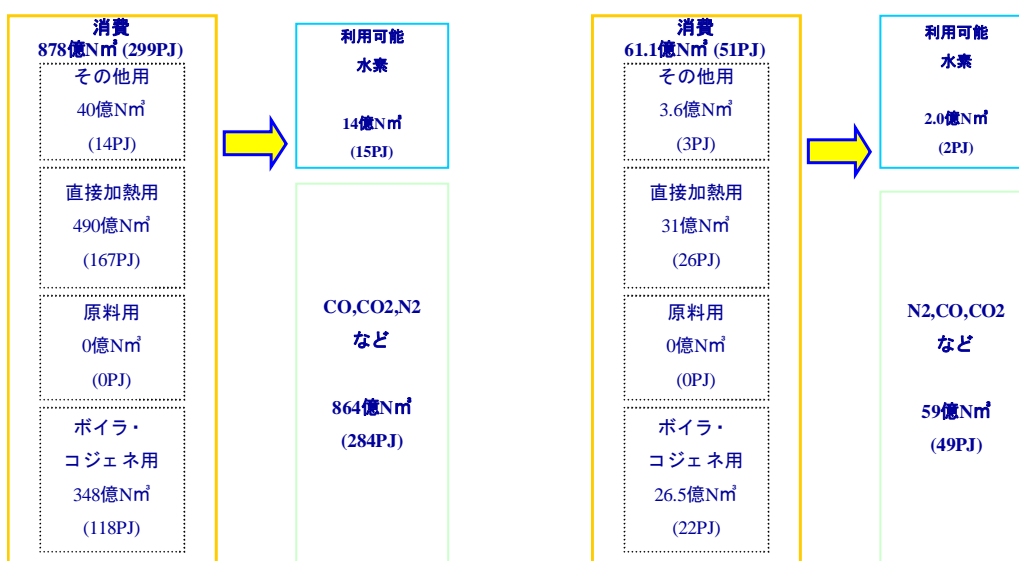
図 2-2-7 コークス炉ガスのバランス (2006 年)



(出所)H18 年石油等消費動態統計年報、鉄鋼統計要覧 2005 より作成

図 2-2-8 高炉ガス、転炉ガスのバランス (2006 年)

(左図：高炉ガス、右図：転炉ガス)



(出所)H18 年石油等消費動態統計年報、鉄鋼統計要覧 2005 より作成

(c) まとめと課題

○経済性

石油、天然ガスと比較して安価な石炭が原料となっているために、相対的に原料調達コストが安価である。副生品の有効活用を図ることで付加価値の向上を図る事ができる。また、発生プロセスが大規模であり、一つの拠点で集中して水素生産を行えるなどのメリットがある。

○高効率水素製造技術の開発

水素精製に用いられる PSA 法は吸着剤の性能限界から、現状で回収率は 60~80%程度である。この回収率を向上させると共に、メタンなど鉄鋼系ガスに含まれる水素以外のガスを改質することで更に水素回収を行う技術の開発も期待される。

○水素供給システムの構築

製鉄所は比較的大都市圏近郊にあるが、燃料電池自動車の普及と共に需要地へ水素を輸送する必要が生じるため、輸送インフラの整備が問題となる。

○その他

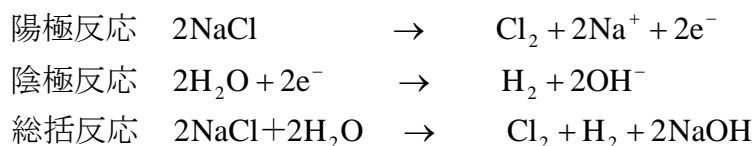
コークスによる還元以外にも低炭素化、還元スピードが速いなどの利点から水素に拠る還元法が研究されている。これが実用化することになれば、鉄鋼業内での水素需要が高まるため、副生水素としての余剰分が期待できなくなる可能性がある。

(3) ソーダ工業

(a) 概要

ソーダ工業では塩を原料として、苛性ソーダ(水酸化ナトリウム(NaOH))、塩素、ソーダ灰(炭酸ナトリウム)等を製造している。製造法として主に「電解法」と「アンモニア・ソーダ法」があるが、水素が副生されるのは「電解法」であり、その中でも近年は「イオン交換膜法」によって電気分解が行われている。

イオン交換膜法の電解槽では、塩化ナトリウム水溶液を電気分解する事により、主に以下の式で表される化学反応が起こる。



上記の電解槽の総括反応式から、苛性ソーダ 1mol に対して 1/2mol の水素ガスが発生す

ることがわかる。また、この水素の飽和水蒸気圧分の水分を除いた水素純度は 99.9%以上であり、ほぼ燃料電池動作に必要な純度を満たしている。高い純度を有しているため、半導体産業等向けとして外販もされている。その他にも、合成塩酸の原料やソーダメーカーの工業用、燃料用原料として用いられている。

(b) ポテンシャル

国内における苛性ソーダの生産量は、近年およそ 440 万 t 程度で推移している。ソーダ生産量より前述した反応式を用いて併産される水素量が推計される。平成 19 年の 448 万 t をベースにすると、水素の生産量は 12.5 億 Nm³ と推計される。この水素が自家燃料消費、外販、合成塩素生産用などに振り向けられていると考えられる。

表 2-2-4 苛性ソーダ（液体 97%換算・固形有姿）の生産量

年 月	生産 (t) Production Quantity	受入 (t) Receipt Quantity	消費 (t) Consumption Quantity	出 荷 Shipments			在庫 (t) Inventory Quantity
				販 売 Sales		その他 (t) Others Quantity	
				数量 (t) Quantity	金額 (百万円) Amount (¥ million)		
平成 15 年	4,368,922	607,884	1,002,038	3,378,185	128,975	583,206	100,017
16	4,492,947	635,297	986,123	3,514,318	131,465	603,267	124,574
17	4,552,299	643,454	979,447	3,602,611	136,540	617,921	119,528
18	4,453,020	633,169	995,491	3,505,264	132,054	564,241	140,718
19	4,481,657	529,186	1,004,199	3,462,981	126,018	564,278	120,055

(出所)化学生産統計(2007)より作成

表 2-2-5 圧縮水素出荷実績

単位:1000Nm³

分 野	2003年		2004年		2005年		2006年		2007年	
	数 量	前年比	数 量	前年比	数 量	前年比	数 量	前年比	数 量	前年比
弱 電	44,266	103%	49,672	112%	46,319	93%	51,098	110%	54,359	106%
化 学	28,546	104%	28,858	101%	28,686	99%	27,354	95%	22,732	83%
金 属	31,648	106%	32,404	102%	32,719	101%	43,531	133%	41,232	95%
硝 子	12,688	99%	11,327	89%	16,391	145%	18,540	113%	16,025	86%
その他	13,638	98%	17,734	130%	22,559	127%	15,633	69%	15,036	96%
合 計	130,786	103%	139,995	107%	146,674	105%	156,156	107%	149,384	96%

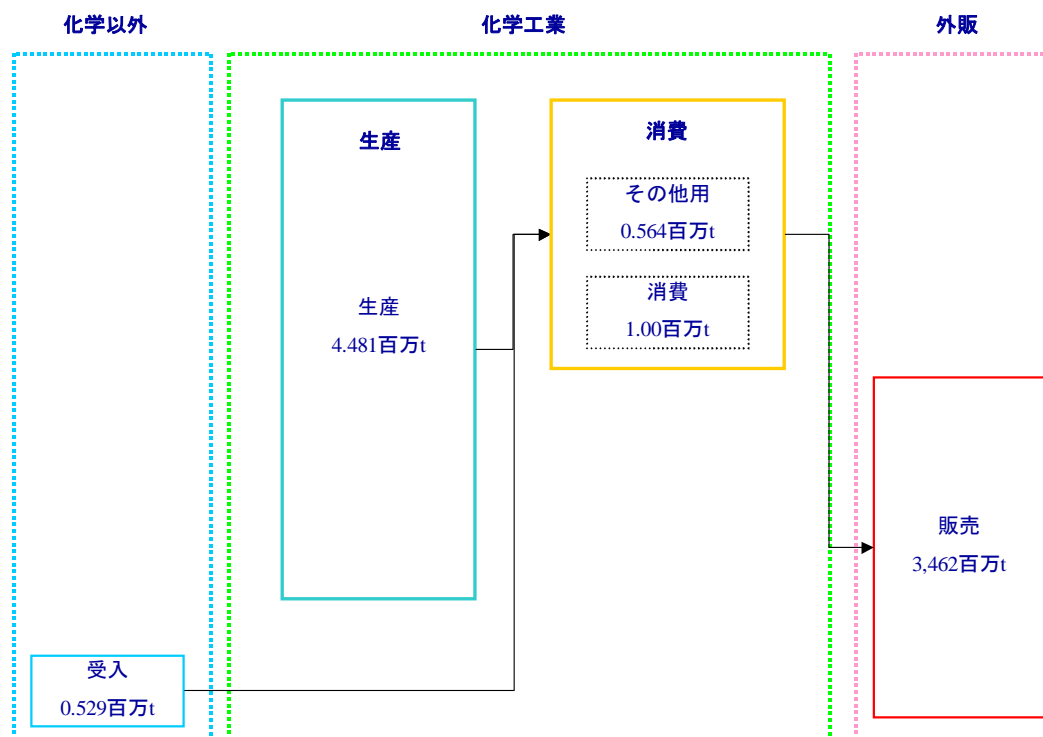
(出所)有限責任中間法人 日本産業・医療ガス協会 水素分科会 資料に加筆

ソーダ工業における自家燃料消費の水素の割合に関して、約半分程度とする報告²があるが、統計調査によって明確な値が示されたものはない。仮に報告のとおり、自家燃料消費分を生産量の半分とすると、約 6.3 億 Nm³ が燃料用になっていると考えられる。これ以外

² 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(WE-NET)第Ⅱ期研究開発タスク 1 システム評価に関する調査・研究、NEDO、平成 13 年度

の水素は、圧縮水素として約 1.8 億 Nm³(1996 年データ)³程度、合成塩素生産用として約 2.2 億 Nm³(1996 年データ)程度用いられていると推定される。以下に苛性ソーダのバランスを示す。

図 2-2-9 苛性ソーダのバランス (2007 年)



(出所)化学生産統計(2007)

燃料として用いられている水素は 6.3 億 Nm³(熱量換算 6.8PJ)になり、これを C 重油で代替すると想定すると、必要となる C 重油は 16 万 kl となる。C 重油を燃やす事によって排出される CO₂は 48 万トンに上るため、水素代替の燃料の選択には注意が必要になる。また、ソーダの工業の水素は純度が高いために、大規模な精製装置を特に必要としないというメリットがあり、他の副生水素に比べても付加価値が高いと考えられる。

(c) まとめと課題

○水素の増産余地

ソーダ工業の目的生産物である苛性ソーダの生産量はおよそ 440 万トン程度で推移しており、大幅な増産は考えにくい。また、副産品のひとつである塩素需要が苛性ソーダ需要を上回っており、今後も合成塩酸製造に水素が使われることになれば、副生水素の大幅

³ 水素エネルギー社会、エネルギー資源学会、2008 年

な増産・供給の増加は期待できないといえる。

○絶対量と工場の分布

苛性ソーダの電解工場は、製鉄所と同様に比較的大都市近郊を中心に、全国に 30 工場(平成 19 年度現在)ある。全体としての水素の製造量も相対的に小さいため、製鉄所・製油所よりも一ヶ所あたりの規模が小さい。このため、まとまった量の水素供給が難しく、燃料電池に供給する際には、分散的に小規模な形になることが予想される。

(4)副生水素の評価

(a) 供給可能量

代表的な副生水素の供給ポテンシャルと関連の文献値を示す。供給可能水素量の定義などが各文献で若干違うものの、三つの業種でおよそ 100 億 N m³ 程度の水素供給力があると考えられる。

表 2-2-6 副生水素から供給可能な水素量

(億 Nm³)

副生水素	WE-NET 試算	水素エネルギー社会	本試算 (石油は PEC 試算)
鉄鋼(製鉄所)	47	86	83
ソーダ(電解水素)	11	11	6
石油	24	64	47
合計	82	161	136

(出所)WE-NET (タスク 1) 平成 12 年度報告書。水素エネルギー社会、エネルギー資源学会、2008 年。「将来の製油所における高純度水素供給能力の動向に関する調査」、PEC、2007 年

燃料電池実用化戦略研究会⁴の試算によれば、2020 年で、燃料電池自動車が 500 万台走っているという想定下での水素需要は約 62 億 N m³ と推算されており、物量としては今回示した供給量で、500 万台分を大よそ賄うことができると考えられる。ただし、鉄鋼、石油で示した水素は燃料電池自動車用の仕様を満たすために、純度を上げる必要がある。その過程でのロスを考慮すると、実際の利用可能量は発生量よりも小さくなるため注意を要する。

(b) 副生水素のコスト評価

「NEDO WE-NET タスク 1 システム評価に関する調査・研究(平成 12 年度報告書)」によると、副生水素のコストについて以下のように分析している。

ソーダ工業の電解水素の場合、工場の近隣に配管で輸送し自動車の水素吸蔵合金タンク

⁴ 第 12 回燃料電池実用化戦略研究会、2004 年

に充填するケースと水素を高圧容器（20 MPa）に圧縮充填し、トレーラーを用いて自動車向け水素供給ステーションに輸送、減圧弁を用いて自動車の水素吸蔵合金タンクに充填するケース（吸蔵合金への供給圧力は 0.99MPa 以下、高圧容器の残留水素は 5%程度となる）の 2 ケースを検討した。その結果、前者のケースで水素供給ステーションでのガス水素供給コストは約 34 円/N m³-H₂、後者のトレーラーを用いるケースでは 50km の輸送を前提とした場合水素供給ステーションでの水素ガス供給コストは約 45 円/N m³-H₂ という結果となった。

コークス炉ガスの副生水素の経済性評価でも、工場の近隣に高圧ガスとして配管で輸送するケースと四国で製造した水素を液体水素として東京まで輸送するケースの 2 ケースを想定し評価した。その結果、工場近隣へ高圧ガスで輸送をするケースで水素製造規模 120ton/day の場合、水素供給ステーションでのガス水素供給コストは 40 円/Nm³-H₂、1.2ton/day の場合、58 円/N m³-H₂ となった。液体水素を遠距離輸送するケースでは、液水製造規模 120ton/day とした場合、水素ステーションでの液体水素供給コストは 55 円/L（リットル液体 H₂）（ガス水素換算 71 円/N m³-H₂）となった。製造規模が 1/10 になると供給コストは 66 円/L（リットル液体 H₂）という結果となった。

上記報告書では副生の水素価格が 40 円/N m³~60 円/N m³ と試算されている。これはガソリンと熱量等価で比較しても競合可能なコスト試算値となっている。

(c) 副生水素の評価に関して

水素の輸送コスト等に関しては他の水素とほぼ同程度であると推測されるが、特に副生水素の供給コストに関しては、水素原料の評価と各工業プロセスにおける自家燃焼分の評価がポイントになる。

○原料の評価

副生水素はあくまでも目的生産物に付随するものとして発生するものであるから、原料自体のコストは 0 であり、その他の輸送などに係るコストのみを計上すれば良いと捉えるのか、熱量按分等なんらかの形で原料製造に係るコストを計上するのかという点でコスト評価結果は異なる。

○自家燃消費分の評価

副生される水素は工業プロセスに組み込まれているため、ムダに使用されている例は少なく、最低でも自家燃料として用いられている。副生水素を回収することは、この自家用燃料の熱量を奪う事であり、水素分を補完する熱量の調達が必要になる。この分を重油、都市ガスなどの燃料で補完した場合のコストを水素供給のコストに含めるか否かもポイントになる。

これらを整理した上で、電気分解、化石燃料の改質を含めたコスト、CO₂排出量などの

IEEJ : 2009 年 4 月掲載

評価結果に関して 3 章に示す。

2-3 水素の輸送について

燃料電池自動車は現在、車上に水素タンクを搭載し、水素ステーションから水素供給を受けるタイプの開発が主流となっている。このため車上およびオフサイト方式水素ステーションと水素製造プラントの間における水素の輸送手段が重要な課題となる。水素の輸送手段としては、気体で輸送する方法、液化して輸送する方法、水素吸蔵合金を利用する方法などが考えられている。また、欧米では、工業原料としての水素ガス輸送のための水素パイプラインも広く建設されている。

2-3-1 圧縮水素

密閉された容器に水素を圧縮して詰める方法で、水素の貯蔵方法としては一般的であり、技術的な歴史が長い。

(1)輸送用圧縮水素容器

圧縮水素はその使用量等に応じて、いくつかの形態の容器で供給がなされる（図 2-3-1 参照）。

小型で $10\text{S m}^3(10.6\text{N m}^3)$ 以下程度の輸送に使われるものにシリンダーがある。一般的なシリンダーは内容積が 50 リットル以下のものであり、現状では内容積 46.7 リットル、圧力 14.7Mpa 充填で水素容量 $7\text{S m}^3(7.4\text{N m}^3)$ のものが主流となっている。特に実験室等での少量用途で使用されている。

中型の輸送容器として、シリンダーを集結させたカードルがある。内容積は 46.7 リットル×10 本=467 リットル、充填圧力は 14.7Mpa で水素容量 $70\text{S m}^3(74.0\text{N m}^3)$ のものが主流である。使用場所を移動させて使いたい場合は、ホイストクレーンやフォークリフトなどの簡単な設備で移動させることができる。

大型の水素容器には長尺容器を集結したトレーラー等がある。長尺容器とは 1 本の長さが 6 メートル以上もある大型容器であり、1 本あたりの容量も $60\sim 140\text{S m}^3(63.4\sim 148.0\text{N m}^3)$ と大きく、重量も重いことから、集結されることを前提に製作された容器である。現在、最も大きいトレーラーは、715 リットル×22 本=15,730 リットル、充填圧力 19.6Mpa で $3,200\text{S m}^3(3,382.2\text{N m}^3)$ であり、車両総重量も 20 トンを超える。

図 2-3-1 圧縮水素輸送に関わる設備



トレーラー



カードル・・・シリンダーを集結したものの。中型輸送に使われる



シリンダー(7~10m3)

(出所) 岩谷産業株式会社ホームページ

(2)自動車貯蔵用圧縮水素容器

自動車に水素を貯蔵する方法としては、圧縮水素を搭載するのが実用上最も現実的な方法ではある。しかしながら、圧縮水素は体積密度が小さいため、車両の航続距離の確保に課題がある。

現在わが国で走行している燃料電池自動車は、この圧縮水素を搭載して走行するタイプがほとんどである。充填圧力 35Mpa 仕様のポンペは開発済みであり、車載水素量増加を図るために 70Mpa 仕様の開発が進められている。現在開発されている 70Mpa 仕様の高圧水素容器は、35Mpa 使用の容器に比べて、水素貯蔵量の約 30%の増加が実現されている。ただし、水素の高圧力化については、圧力が高くなるにつれて圧力と体積の関係が線形領域を外れていき、70Mpa 以上に高圧化してもそのメリットはほとんどないとも言われている。

図 2-3-2 70Mpa 仕様の高圧水素容器の外観



(出所) JFE スチール株式会社ホームページ

2-3-2 液体水素

水素をマイナス 253℃で液化して液体水素の状態に貯蔵する方法であり、水素の輸送手段としては、質量的にも体積的にも最も優れている。体積は気体状態と比較して約 1/800 になるが、液化の段階で 30%のエネルギーロスがあり、充填や保存時においても一部が気化するという欠点がある。また、マイナス 253℃という極低温では、水素、ヘリウム以外のガスは全て固化してしまうため、液化する前に不純物を除去して高純度の水素にしておく必要がある。

(1)輸送用圧縮水素容器

輸送用容器としては、壁面から外部熱が入るのを防ぐためにタンクを二重にしたり、外部と内側のタンクの間には断熱層を入れたり、液体の振動を抑えるような構造が検討されている。現在、国内では、可搬式小型容器、コンテナ、ローリーの3種類が利用されている(図 2-3-3 参照)。容器の容量は、それぞれ 145~350 リットル、2 (小型) ~46 m³、23 m³ であり、ローリーによる輸送は圧縮水素のトレーラーと比較して最大約 12 倍の輸送効率となる。また、可搬式小型容器とコンテナは、輸送用としてだけでなく、そのまま消費先に置いて消費先容器として使用することもできる。

図 2-3-3 液体水素輸送に関わる設備



液化水素ローリー
(23,000リットル)



小型コンテナ
(1,900リットル)



液化水素LGC容器
(可搬式超低温容器)
(145リットル)

(出所) 岩谷産業株式会社ホームページ

(2)水素の海上輸送

水素を大量に海上輸送する場合、液体水素タンカーも検討がなされている。原理的には LNG 船と同様である。しかし、マイナス 253℃まで冷却して液化するためには多くのエネルギーを要し、液化装置の建設も必要となる。このほかにも輸送中のボイルオフを低減できる液体水素ローリーの確保、液体水素の貯蔵タンクなど初期投資が大きくなってしまふ。また、天然ガスをマイナス 163℃で液化して輸送している LNG 船よりも厳しい極低温に

耐えうる設計も必要となってくる。

2-3-3 水素パイプライン

日本国内では、石油精製所内で 100m 程度の脱流用水素を輸送する水素パイプラインがある。また、製鉄所の敷地内で約 10km の距離の水素パイプラインがあり、コークス炉ガスを改質した水素を輸送するのに利用されている。

海外では、欧米を中心に多くの長距離輸送パイプラインがある。フランスには 290km、ドイツには 240km の水素パイプラインがあり、合計すると総延長は世界全体で約 3,000km に達するとされている。多くは化学原料や燃料として水素を工場間で輸送する目的のものである。パイプ口径は 100~300mm 程度、7Mpa 以下の圧力で利用されている。パイプ材質は天然ガス用と同じく炭素鋼管が使用されている。鋼管は水素脆化の問題が危惧されるが、すでに建設されてから 20~30 年経過しているものの、大きな事故は報告されていない。

2-3-4 有機ハイドライド（有機系水素化物）

有機ハイドライドは、水素の貯蔵方法として注目されている。有機ハイドライドは、水素を安価な化学物質に閉じ込めて長期にわたって安定に大量貯蔵でき、船やトラックや鉄道などで簡単に輸送できるところに利点がある。貯蔵と輸送の面で、目的に応じて有効な手段として利用される可能性がある。

代表的な有機ハイドライドとして、デカリンはナフタレンになるときに 5 分子の水素を、メチルシクロヘキサンはトルエンになるときに 3 分子の水素を放出する。この反応を正逆方向に利用して、放出・吸蔵のサイクルを実現する。有機ハイドライドを自動車に搭載するアイデアは、燃料電池の排熱¹で放出サイクルを行って水素を取り出し、車上に残った反応の残存物はカセットにしてガソリンスタンドで新規のハイドライドと交換して石油会社へもどす、という構想である。しかし、このような物質のリサイクルを含んだエネルギーの販売利用方法は今までにないもので、周辺施設や輸送に関する負担が極めて大きなものになる可能性がある。

¹ 脱水素反応の温度は、現状では 250℃程度であるので、PEMFC の作動温度（常温～現状 100℃程度）では、脱水素に必要な熱供給（水素(LHV)の約 20%相当）として排熱の利用ができない。従って、補助熱源が必要となる。

2-4 水素ステーションについて

2-4-1 水素ステーション

水素の製造、貯蔵、充填等に関わる各技術の組み合わせで様々な水素供給方式が考えられるが、水素をどこで製造するかによって、オンサイト方式とオフサイト方式に分けられる。

オンサイト方式では個々の水素ステーションで水素を製造し、貯蔵・供給する。オフサイト方式では、水素は水素ステーションから離れた場所で大規模に製造され、それぞれの水素ステーションにタンクローリーなどで輸送される。

(1) オンサイト方式

オンサイト方式は、水素製造装置を水素ステーションと同じ場所に設置し、製造した水素を直接供給するシステムであり、水素の輸送システムは必要とされない。オンサイト方式では、必要な時に必要な量だけ水素ステーションの現場で水素を製造できるというメリットがある。

オンサイト方式の水素ステーションのシステムは、水素製造装置、圧縮機、蓄ガス設備、ディスペンサーなどで構成されている。(図 2-4-1)

都市ガス、LPG、メタノールなどの燃料を改質して水素を製造する場合、水素製造コストが比較的安価であり、また既存インフラ（都市ガス改質の場合は既存の都市ガスパイプライン）を活用できるという長所がある。短所としては、起動に時間を要するという点があげられる。

水電解により水素を製造する場合、起動時間が短く運転の自由度が大きいという長所がある。また、夜間電力を利用すれば電力負荷の平準化にも貢献することができる。

図 2-4-1 オンサイト方式水素ステーションシステム概要

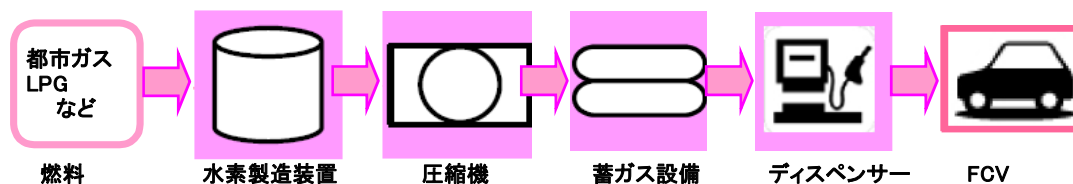


図 2-4-2 水素ステーションの設備



(出所) JHFC ホームページより作成

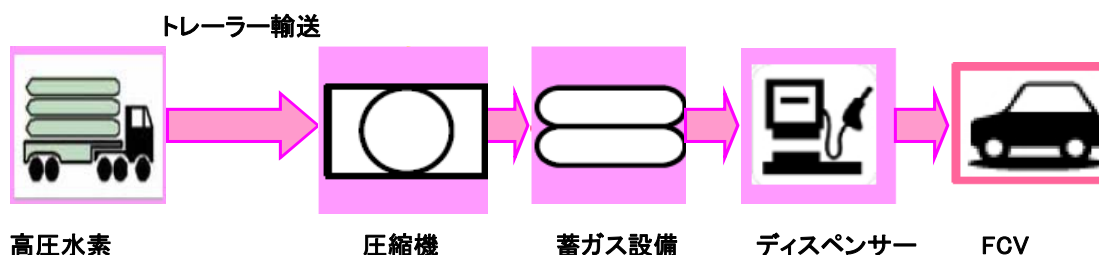
(2) オフサイト供給

オフサイト方式は、水素の製造場所と水素ステーションの場所が離れているので、製造された水素はパイプラインで輸送するか、高圧ガスにしてポンペで輸送するか、液化してタンクローリーで輸送するなどの、水素の輸送供給体制が必要となり、これがオフサイト方式における最大の課題である。

水素ステーションのシステムは、圧縮機、蓄ガス設備、ディスペンサーなどで構成されている。(図 2-4-3)

高圧ガスで運搬貯蔵する場合、ステーションにおける設備コストが安価で取り扱いが容易であるという特徴がある。輸送に用いるトレーラーについては車両の大きさや重さから約 3,000 m³ を一度に運ぶのが限界とされる。また、液体水素で運搬貯蔵する場合は、ステーションにおける設備コストが高価であるが貯蔵量が多いという特徴がある。輸送に用いるローリーは圧縮水素トレーラーに比べて最大約 12 倍の水素ガスを一度に運ぶことが可能であるが、運搬容器の断熱性能を高め、気化による損失・拡散を防ぐことが課題である。

図 2-4-3 オフサイト方式水素ステーションシステム概要 (高圧水素貯蔵方式)



2-4-2 JHFC の実証試験の概要

平成 14 年度より実施されている「固体高分子形燃料電池システム実証等研究」、通称水素・燃料電池実証プロジェクト（JHFC プロジェクト、以下同）における水素ステーションの実証試験結果の概要を以下に示す。

(1)水素ステーションの概要

JHFC プロジェクトでは、さまざまな燃料・方式による水素ステーションが設置され、水素ステーションの運用・評価を実施している。

水素ステーションは JHFC プロジェクト第 1 期（平成 14 年度～17 年度）が開始された平成 14 年度から建設され、平成 16 年度までに首都圏、中部地区において 12 箇所の水素ステーションと 1 箇所の液体水素製造設備が建設され、運用が開始された。JHFC プロジェクト第 2 期（平成 18 年度～22 年度）では、関西地区で新たに 2 箇所の水素ステーションが建設された。各水素ステーション等の概要を表 2-4-1 に、所在地を図 2-4-4 に示す。

水素ステーション 14 箇所のうち、13 箇所は圧縮水素を使用するステーション、1 箇所（有明）は液体水素を使用するステーションである。また、ステーションの方式から見ると、9 箇所はステーションで水素を製造するオンサイト方式、5 箇所（霞ヶ関、有明、横浜・鶴見、愛・地球博/瀬戸北、関西空港）は外部から水素を搬入するオフサイト方式である。

霞ヶ関、有明、横浜・鶴見の 3 箇所のオフサイト式ステーションでは、化学工場・製鉄所からの副生水素が使用されている。また、液体水素製造設備では製鉄所副生水素を液化して、有明ステーションにローリー輸送されている。

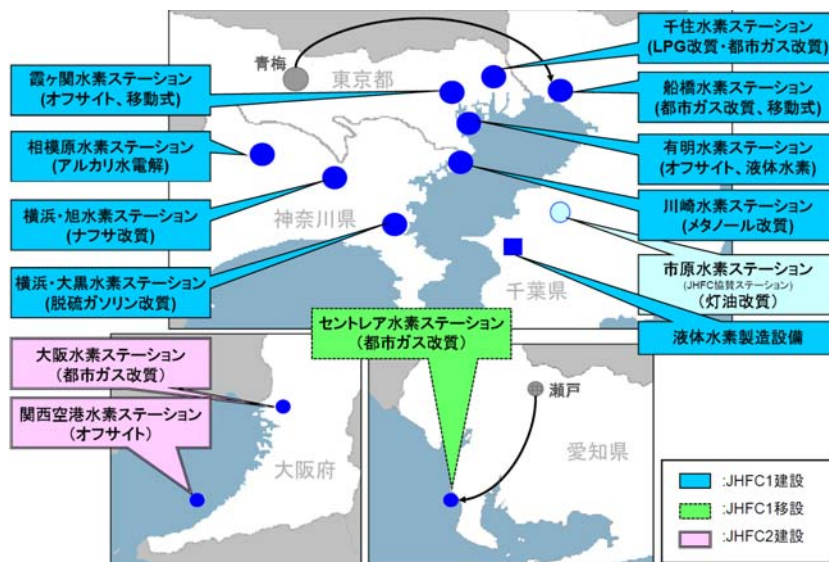
なお、運用実績は表 2-4-2 に示すとおりである。平成 14 年末から燃料電池自動車への充填を開始して、平成 20 年 3 月末までに 14,830 回の充填を行い、37,715kg の水素を供給した。平成 20 年 12 月には、セントレアステーションが国内の水素ステーションとしては初めて、水素充填量累計が 10,000kg に到達した。

表 2-4-1 JHFC プロジェクトにおける水素ステーション等の概要

	ステーション名	水素製造・供給方式	運用	備考
1	霞ヶ関	オフサイト水素・移動式	大陽日酸	
2	横浜・大黒	脱硫ガソリン改質	コスモ石油	
3	横浜・旭	ナフサ改質	新日本石油	
4	千住	LPG改質、都市ガス改質	東京ガス、大陽日酸	
5	有明	液体水素貯蔵・ローリー供給	岩谷産業、昭和シェル石油	
6	川崎	メタノール改質	ジャパン・エア・ガシズ	
7	横浜・鶴見	オフサイト水素(副生水素)	岩谷産業、鶴見曹達	NEDO WE-NETより移管 現在は運用終了
8	秦野	灯油改質	出光興産	現在は運用終了、市原ステーションに移設
9	相模原	水電解・移動式	栗田工業、シナネン、伊藤忠エネクス	
10	青梅	都市ガス改質・移動式	バブコック日立	平成19年度船橋に基地移転
11	愛・地球博瀬戸・南	都市ガス改質	東邦ガス、新日本製鐵、大陽日酸	現在は運用終了、セントレアに移設
12	愛・地球博瀬戸・北	オフサイト水素(副生水素)		現在は運用終了
13	大阪	都市ガス改質	大阪ガス	第2期プロジェクト、平成19年度運用開始
14	関西空港	オフサイト水素	岩谷産業、関西電力、栗本鐵工所	第2期プロジェクト、平成18年度運用開始
15	液体水素製造設備	液体水素製造	新日本製鐵	有明ステーションに供給

(出所) 「第1期 JHFC プロジェクト報告書」等より作成

図 2-4-4 JHFC プロジェクトにおける水素ステーション等の所在地



(出所) 平成 19 年度 JHFC セミナー・活動報告資料「水素ステーション実証試験」

表 2-4-2 JHFC プロジェクト水素ステーション運用実績 (平成 20 年 3 月末)

ステーション名	水素 充填量(kg)	水素 充填回数
霞ヶ関	4,461	2,569
横浜・大黒	2,342	1,809
横浜・旭	1,021	681
千住	1,769	1,330
有明	5,510	2,669
川崎	524	386
横浜・鶴見	53	46
秦野	304	213
相模原	123	107
青梅&船橋	598	396
瀬戸・南	6,730	1,349
瀬戸・北	6,312	1,224
セントレア	7,463	1,747
大阪	214	114
関西空港	64	41
市原	229	149
合計	37,715	14,830

(出所) 平成 19 年度 JHFC セミナー・活動報告資料「水素ステーション実証試験」より作成

(2)水素ステーションのエネルギー効率

「車両の燃料タンクに投入した水素ガスの保有エネルギー/水素ステーションへの全投入エネルギー」と定義した各水素ステーションのエネルギー効率を見てゆく。

オンサイト改質によるエネルギー効率を表 2-4-3 に示す。実験データによると、改質装置で水素を製造・圧縮して燃料電池自動車へ供給するまでのエネルギー効率は 55~65%程度である。

表 2-4-3 オンサイト改質方式ステーションのエネルギー効率

ステーション名	設備方式	エネルギー効率 (%) LHV(HHV)	投入エネルギーの種類	投入エネルギー原単位(MJ) LHV(HHV)
横浜・大黒	脱硫ガソリン改質	58.7 (64.1)	脱硫ガソリン	191 (207)
			電気	25
横浜・旭	ナフサ改質	60.4 (66.2)	ナフサ	187 (202)
			電気	23.6
千住	LPG改質	58.7 (63.8)	LPG	193 (210)
			電気	23.6
	都市ガス改質	60.7 (65.2)	都市ガス	182.07 (201.38)
			電気	27.00
川崎	メタノール改質	65.0 (68.8)	メタノール	151 (170)
			電気	42.6
秦野	灯油改質	54.6 (61.1)	灯油	209.5 (220.5)
			電気	23.4
相模原	アルカリ水電解	60.9 (71.4)	水	-
			電気	208.7
瀬戸・南	都市ガス改質	62.5 (66.7)	都市ガス	184 (204)
			電気	19.5
セントレア	都市ガス改質	62.0 (65.6)	都市ガス	183 (205)
			電気	22.0
大阪	都市ガス改質	60.4 (64.7)	都市ガス	183 (203)
			電気	27.4

(注)Charge Tank to Fuel Tank で定義した実証水素ステーションのエネルギー効率

電力エネルギー：3.6MJ/kWh

原料のエネルギー：高圧ガスの場合、水素ガスの発熱量と圧力エネルギーの和で評価

水素が保有するエネルギー：127MJ/kg(LHV)、149MJ/kg(HHV)

(水素ガスの条件：温度 25℃、圧力 35Mpa)

(出所) 第 1 期 JHFC プロジェクト報告書、

平成 19 年度 JHFC セミナー・活動報告資料「水素ステーション実証試験」

オフサイト改質によるエネルギー効率を表 2-4-4 に示す。オフサイトで製造された水素を高圧貯蔵し、高圧水素を輸送した場合のエネルギー効率は 90～99.8%程度である。液体水素貯蔵の場合は、75%程度である。

表 2-4-4 オフサイト改質方式ステーションのエネルギー効率

ステーション名	設備方式	エネルギー効率 (%) LHV(HHV)	投入 エネルギー の種類	投入エネルギー 原単位(MJ/kg) LHV(HHV)
横浜・鶴見	高圧水素貯蔵	98.3 (98.6)	19.6MPa水素	126 (148)
			電気	2.85
有明	液体水素貯蔵 (高圧水素0.8kg、 液体水素0.2kg)	75.2 (74.8)	液体水素	165 (195)
			電気	1.94
瀬戸・北	高圧水素 (製鉄COG精製) 貯蔵	89.8 (91.2)	19.6MPa水素	126 (148)
			電気	15.39
霞ヶ関 (改造前)	高圧水素貯蔵	95.8 (96.4)	19.6MPa水素	126 (148)
			電気	6.59
霞ヶ関 (改造後)	高圧水素貯蔵	94.1 (94.9)	35MPa水素	127 (149)
			電気	7.96
関西空港	高圧水素貯蔵	99.8 (99.8)	39.5MPa水素	127 (149)
			電気	0.16

(注)Charge Tank to Fuel Tank で定義した実証水素ステーションのエネルギー効率

電力エネルギー：3.6MJ/kWh

原料のエネルギー：高圧ガスの場合、水素ガスの発熱量と圧力エネルギーの和で評価
水素が保有するエネルギー：127MJ/kg(LHV)、149MJ/kg(HHV)

(水素ガスの条件：温度 25℃、圧力 35Mpa)

(出所) 第 1 期 JHFC プロジェクト報告書、

平成 19 年度 JHFC セミナー・活動報告資料「水素ステーション実証試験」

2-5 水素供給（サプライチェーン）の評価について

2-5-1 移行期における水素の供給ネットワーク

(1)はじめに

繰り返しになるが、第 1 章第 1 節の 1-1-3 を再録する。

100 年を越える歴史を持つ内燃機関を駆動源とする自動車と、その燃料となるガソリンや軽油を供給する石油産業（石油の生産・物流システム）は、日本で約 50 年、米国で 100 年という、長い時間の中で、一体となって構築されてきており、効率的かつ低コストで供給できる自己完結的なサプライチェーンとして存在している。従って、部分的な代替や、一部のセグメントだけの利用は、技術的に可能であっても、全体としての効率性やコスト面でのパフォーマンスは損なわれる可能性が高く、全体的な社会的システムとして機能している。したがって、1 台の FCV と 1 つの水素ステーションがあつて、徐々に増やしていけばコストが下がり、普及が拡大するという「逐次投入」戦略は必ずしも有効ではなく、ある程度の範囲と規模で、システムを完全かつ一気に代替することが必要となり、既存システムの膨大なサンクコスト（埋没コスト、*sunk-cost*）に対応する費用が生じる。

単なる技術検証やシステム要素評価のための実証テストではなく、一定の規模と範囲を持つ、自己完結的な供給体系（システム）として、水素エネルギーの評価をすることが必要となる。1 つの参考になるのが、地方各地で検討されている、「水素タウン構想」である。1 つのニュータウン全体、さらに進んで地方都市全体という規模（人口にして数万～数十万）を対象として、都市ガスを供給源とした分散型燃料電池(定置式)¹によって、水素から電力を発生させ、同時に熱を回収して利用する（これに水素ステーションが加わる）供給システムがこれに当たる。

まず、FCV と水素ステーション（水素 SS）の供給ネットワークを具体的に設定する。次に、様々なインフラへの設備投資額を想定し、それを踏まえて、エネルギー効率・エネルギーコストを試算し、水素の供給コストを試算する。最後に CO₂ の排出量を試算・評価し、ハイブリッド自動車、電気自動車など競合者との比較を行いつつ、全体としての費用対効果を検討評価するという手順で進めることとする。

(2)FCV の走行距離・走行燃費

表 2-5-1 に基本的な水素ステーション及び FCV の仕様値を設定した。FCV は 1 回の給

¹ 第 1 章第 1 節で述べた水素社会は、極力化石燃料に依存しない社会と定義し、天然ガスを原料として改質する、自動車用燃料電池は総合効率が 40～50%程度であり、二酸化炭素排出抑制の観点からは好ましくないと述べた。しかし、これは排熱利用ができないためであつて、家庭用では熱の利用が可能な、いわゆる、コージェネレーションシステムとなることから、総合効率は約 80%近くに達することとなり、低炭素社会においてもその利用と普及には十分な価値がある。

油で約 5kg (満タン) の充填が可能で、約 500km の走行²が可能とすれば、現行の小型乗用車クラスのガソリン・軽油自動車と同等の性能となる。

表 2-5-1 水素ステーション(SS)と燃料電池自動車 (FCV) の諸元

(24 時間営業 : 水素充填可能能力 500Nm³/時)

稼働率		%	85%	50%
1SS	来店台数	台/(SS・日)	229	135
	給油量 ^{*1}	H ₂ -kg/台	4	4
	販売量	H ₂ -kg/月	27,528	16,200
		Nm ³ /h	425	250
	(ガソリン車給油ベース) ^{*2}	kl/月	172	101
	給油回数 ^{*3}	回/(台・月)	2.1	2.1
保有台数 ^{*4}	台/SS	3,256	1,916	
100SS	月間販売量	H ₂ -kg/月	2,752,800	1,620,000
	年間販売量	トン/年	33,034	19,440
FCV	FCV燃費(水素)	km/H ₂ -kg	100	
	FCV燃費(ガソリン車換算) ^{*5}	km/l	26.0	
	既存ガソリン車 ^{*6}	km/l	15.5	
	走行距離 ^{*7}	km/(年・台)	10,144	
	燃料消費量 ^{*8}	H ₂ -kg/(台・月)	8.5	

(注 1)FCV のタンク貯蔵量 (35MPa、有効貯蔵量 100%)、満タン 5kg(1 回充填量 4kg)

(注 2)充填水素量を発熱量等価でガソリンに変換後、走行燃費差 (26.0÷15.5) で補正

(注 3)年間走行距離÷12 カ月÷走行燃費÷燃料タンク充填量(4kg)

(注 4)1 日来店台数*30 日÷給油回数(2.1)

(注 5)発熱量等価、(注 6)平成 19 年度の乗用車の走行燃費 (国交省)

(注 7)平成 17 年度の乗用車(軽自除く)年間走行距離、(注 8)年間走行距離÷12 カ月÷走行燃費

(3)ガソリン SS の販売規模

- ① ガソリンステーション (ガソリン SS) の場合、1 日の来店数(平均)を約 200~300 台、1 回の給油量を 30~40L とすれば、月間販売量は 180~360kl 程度となり、関東地域での生活道路沿いにあるスタンドの標準サイズと言ってよい。
- ② 表 2-5-2 に都道府県別の SS 数、1SS あたりのガソリン月間販売量、1SS あたりのガソリン車台数 (登録ベース) を記載したが、関東圏、名古屋圏、京阪神、九州(福岡) の 4 大地域で SS は約 1 万 5 千件、販売量は全国の約 51%、1SS あたり約 180kl/月となる。山間部も存在するので、約 1 万 5 千件のうち約 75%にあたる 1 万件程度の SS が、立地的に見て、水素 SS へリプレースされる潜在的な最大数と見ることができる。

² 水素ステーションに来店する FCV の平均的な充填量は、ガソリン車同様、3~4kg (空容量の 60%~80%) 程度と考えるのが妥当であろう。

表 2-5-2 1 SS あたりの月間ガソリン販売数量 (平成 19 年度)

	SS数	1,000KL/年	KL/(月・SS)	台数/SS
1関東				
埼玉	1,551	2,862	154	2,271
千葉	1,798	2,740	127	1,705
東京	1,701	7,265	356	2,350
神奈川	1,374	3,282	199	2,606
小計	6,424	16,149	209	2,205
2名古屋				
愛知	2,110	4,080	161	2,106
三重	855	1,671	163	1,518
小計	2,965	5,751	162	1,937
3京阪神				
滋賀	463	412	74	1,844
京都	604	830	115	1,940
大阪	1,474	3,744	212	2,267
兵庫	1,401	2,150	128	1,885
小計	3,942	7,136	151	2,032
4九州				
福岡	1,330	2,401	150	2,065
小計	1,330	2,401	150	2,065
4地区合計	14,661	31,437	179	2,092
その他	29,396	29,848	85	1,298
全国計	44,057	61,285	116	1,562

(出所) SS 数 (METI : 登録ベース)、販売量 (都道府県販売実績)、ガソリン車保有台数 (国交省)

(4)水素 SS の販売規模

- ① FCV の走行距離はガソリン車と同等の走行距離と見ているので、年間の走行距離は表 2-5-1 に示したとおり、年間で約 1 万 km となり、1 台あたりの月間水素充填量は 8.5kg となる。1 回の充填 4kg とすると、月間の充填回数は約 2.1 回となる。
- ②水素 SS サイドで見ると、1 時間あたり定格で 500N m³ の水素充填能力とし、24 時間営業で平均稼働率 85% とすると、1 水素 SS あたりの FCV 来店数 (約 230 台/日)、月間水素販売量は約 2,750kg となる。1 水素 SS への固定客数 (FCV オーナ) は約 3,300 台という結果となる。1 世帯=1FCV 保有、1 世帯=3.3 人という大雑把な仮定をおけば、1 水素 SS あたりの人口約 1 万人となる。ガソリン SS の第 1 次商圈は 2~3km 程度であるが、水素 SS の高稼働率を考慮して、2 倍程度の半径 5km と見た。

(5)水素供給のネットワーク

- ① オフサイト型の水素 SS を考え、横浜(あるいは千葉湾岸)に水素製造拠点を設定し、石油ローリーによる物流と同等と考えた場合、平均で片道 50km(東京~成田間、最長で 100km、最短で数 km)、往復 100km、1 日 2 トリップの輸送を配送圏とすれば、京浜湾内地域の東または西半分での供給が可能というイメージとなる。

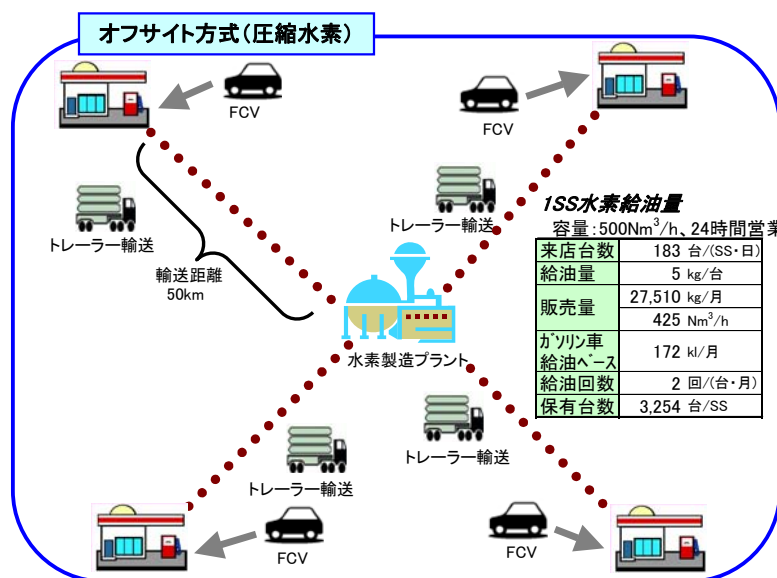
- ② 1 供給拠点から半径約 50km とした場合、そのエリア内の水素 SS は、1 水素 SS の商圏を 5km で計算すれば、概ね 100SS となり、必要となる水素供給量は月間で約 2.8 トン、年間で約 3.3 万トン（約 3.7 億 $N m^3$ ）となる。
- ③ 100SS を 1 ユニットと考えると、FCV 約 33 万台、人口 100 万人が対象となり、地方の 1 政令都市分の規模となる。
- ④ 都市ガス改質の場合で、年間約 1.5 億 $N m^3$ （東京ガスの平成 19 年度販売量の約 1%）の天然ガスが、あるいは、電気分解に要する電力で年間約 15.7 億 kWh（東京電力の平成 19 年度販売量の約 0.5%）が投入される勘定となる。

以上のことから、1 ユニット 100SS を最少の水素供給ネットワークとして概念化したのが図 2-5-1 である。表 2-5-3 に示すように、1 ユニット（100SS）から 100 ユニット（1 万 SS）へとユニット単位で拡大して行き、日本に水素社会への移行が実現とすれば、現時点での物量ベースを前提にした場合³、以下の通りとなる。

- ① FCV 約 3,300 万台（小型・軽乗用車の約半分）、1 万件の水素 SS
- ② 天然ガス約 150 億 $N m^3$ /年（あるいは電力約 1,570 億 kWh）の原料投入
- ③ 約 330 万トン/年（約 370 億 $N m^3$ /年）の水素を製造供給

図 2-5-1 水素供給のネットワーク（1 ユニット=100SS）

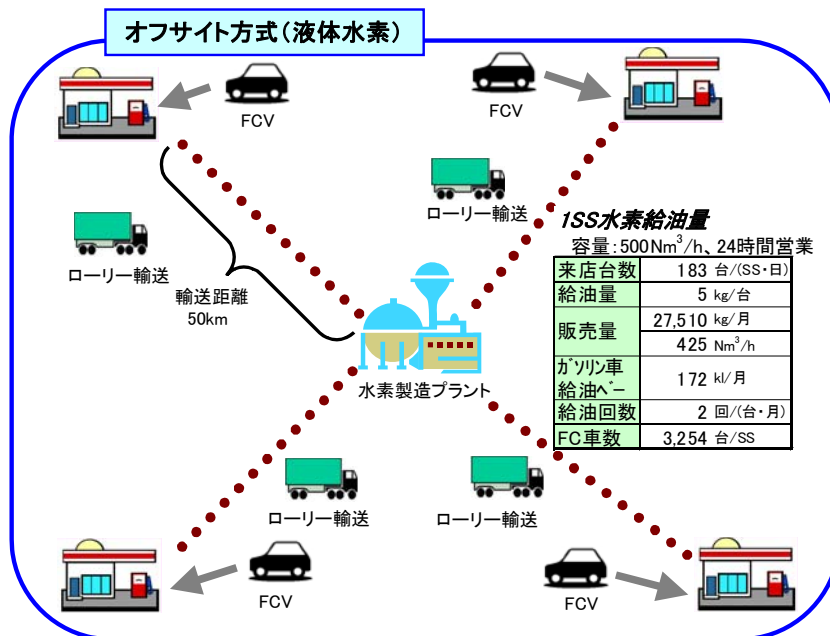
（その 1）



³ 水素社会が展開すると想定される 2050 年には、日本の人口は 1 億人を下回るといわれているので、実際には、ここで試算した規模の 80~60%程度と考えるべきかも知れないが、本報告では現状ベースを前提条件で試算を行うものとする。

水素供給のネットワーク (1ユニット=100SS)

(その 2)



水素供給のネットワーク (1ユニット=100SS)

(その 3)

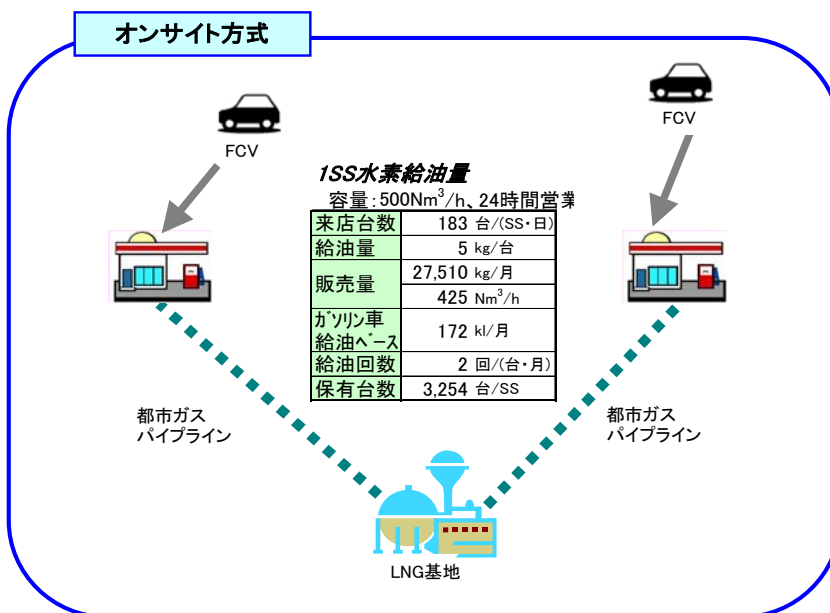


表 2-5-3 水素の供給ネットワークの拡大

	導入期	展開期	普及期
ユニット数	1	10	100
水素SS数	100	1,000	10,000
FC車(千台)	326	3,256	32,565

2-5-2 水素供給におけるプロセス別コスト

(1)前提条件

第 1 章第 1 節で述べたように、「現時点において実行可能と思われる技術や調達可能と想定できる諸資源のコスト」を前提とすることから、微生物や原子力の熱利用による水素製造など現状では技術的にブレークスルーが必要な手法、あるいはオンサイト型の新エネ（風力発電など）による電気分解などやパイプラインによる水素の輸送など、可能であっても、現状ではコスト評価が難しいケースは対象外とした。したがって、検討対象とした主要なものは以下の通りである。

- ①製造方法：天然ガスなどによる水蒸気改質、アルカリ水電気分解、高炉やソーダ工業・石油精製などからの副生水素の回収
- ②輸送方法：高圧圧縮水素（400 気圧）を充填したボンベ輸送、または液化水素によるローリー輸送
- ③水素ステーション：オンサイト型（電気分解や改質を現場で行う）、オフサイト型

(2)水素供給プロセスの各工程について

水素供給プロセスの詳細なフローチャートは、付属資料「プロセス別水素供給フローチャート」に記載したが、比較検討がし易いように、各工程を集約して4つの機能に整理すると、以下の通りとなる。

- ①原料の製造と水素製造プラントまでの輸送（天然ガス、電力など）
- ②水素の製造（水素が製造されるまで）
- ③水素輸送（水素を圧縮または液化、水素ステーションまでの輸送）
- ④貯蔵・充填（水素ステーション：受入れ・貯蔵・FCV への充填）

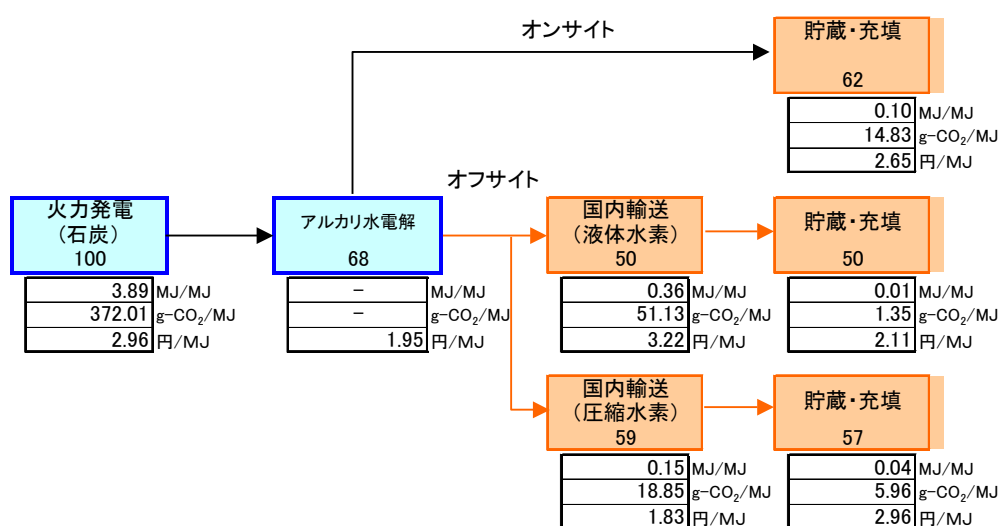
図 2-5-2 は、付属資料のフローチャートの一部を切り取ったもので、石炭火力により生産された電力が、水の電気分解により水素が製造され、輸送・貯蔵・充填されていくフローを示している。天然ガス（水蒸気改質）であれば、海外から LNG を輸入し、ガス化して、水素製造プラントまで既存の配管網を利用して供給することになる。電気分解²の場合

² ここでは、電気分解の場合は、厳密に言えば、原料は水で、投入エネルギーが電力となるが、あるプロセスに投入するユーティリティ（動力・照明、加熱など）に利用する電力と区別する意味で、原

は、図に示すように、原子力や石炭火力により発電され、既存の電力供給網を介して、水素製造プラントに電力が供給されることになる³。水素ステーションがオンサイト型の場合は、②の水素製造と、④の水素の貯蔵・充填が一緒となり、途中の輸送である③がないということになるが、後ほどコスト比較をする際の便宜を考慮して、水素製造分について、④ではなく②に計上記載する方式をとった。さらに、①と②を合体して、最終的に、水素製造（原料製造・輸送含む）、輸送、充填の3つに区分して水素供給コストの分析を行うこととした。

なおユーティリティ（動力・照明・加熱・輸送）については、平均的な電源構成、都市ガス、軽油（輸送用ローリー・トラック）を使用したとして、効率、CO₂排出量、コストなどを計算している。

図 2-5-2 水素供給プロセス（工程別）の参考例（電気分解）⁴



(3)輸送・水素ステーション設備

イ. 輸送設備

液体輸送及び圧縮輸送の設備コストを試算したものを、以下に示した (①、②)。液化水素は 1 台あたりの配送量が多く効率は良いが、液化設備にコストがかかるので、長距離輸送に向いている。一方、圧縮輸送は 1 台あたりの配送量が輸送効率は低い、圧縮コストは少ないことから、近距離の少量輸送には適している。

料的な扱いで述べている。

³ オンサイト型の電気分解の電力供給については、実際には平均的な電源構成となる電力ということになるが、グリーン電力の利用的な、「風力による電力使用により電気分解を行う」という形とした。

⁴ 電気分解の工程でのコストは記入されているが、水素 1MJ あたりの投入エネルギーと CO₂ 排出量については、便宜上、石炭火力発電の工程に合算して計上されているので注意を要する。

①液体輸送

水素液化設備	約 346 億円
輸送ローリー	約 24 億円
合計	約 370 億円

(注)ローリー35台(水素 1,465kg/台、7,000万円/台⁵)、1日2回配送、走行距離 50km(片道)

②圧縮輸送

水素圧縮設備	約 25 億円
輸送トラクター・トレーラー(ボンベなど)	約 143 億円
合計	約 168 億円

(注)トラクター206台(水素 250kg)、トレーラー406台⁶、1日2回配送、走行距離 50km、トラクター及びトレーラーの単価は 1,600万円、2,700万円(ボンベ込み)

ロ. 水素ステーション

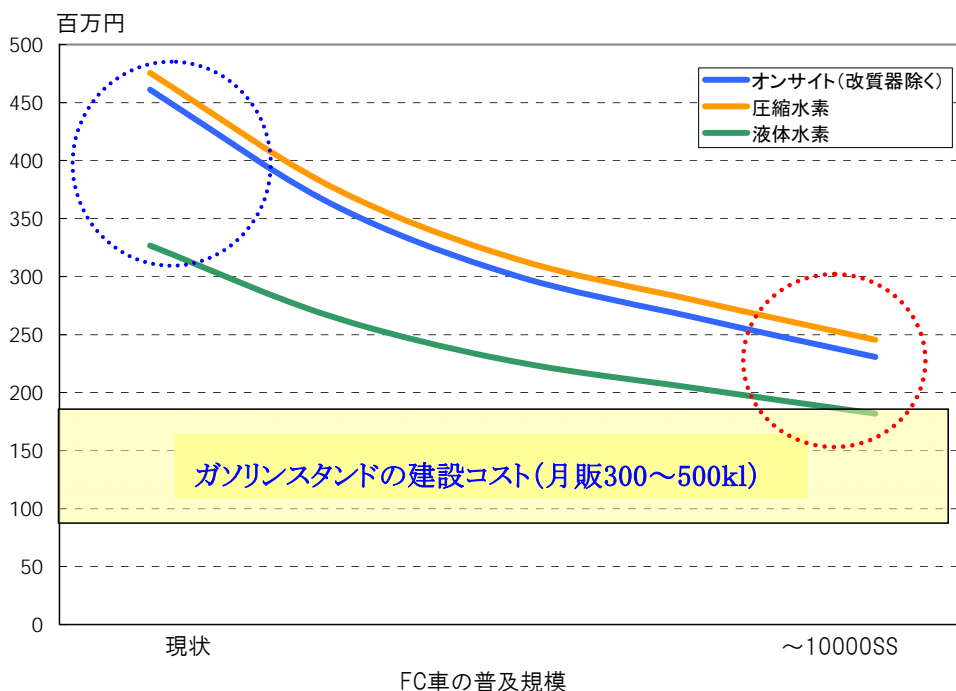
水素ステーション(500N m³/h)の建設コストは、現状で、1SSあたり、約3億3千万円～約4億5千万円と試算され、同一クラスのガソリンSSの建設コスト(約1億円～2億円)と比較してかなり割高となっている。図 2-5-3 に示すように、水素ステーションが普及(約1万件)する時期には、概ねガソリンSSとほぼ同程度までコストは下がる⁷ことが期待できる。

⁵ 商業用のLNGローリーは約4,000～4,500万円といわれている。

⁶ 1台のトレーラーと圧縮ボンベを積んだトレーラー1組で水素SSまで輸送し、トレーラーを切り離して配置、代わりに空になった水素ボンベを積んだトレーラーを回収するという仕組み。トラクター203台にトレーラー406台とし、トラクターについては予備3台を計上した。

⁷ ガソリンステーションにおける経験から判断すると、ステーションのレイアウトの標準化による設計・施工費用(土木・建築)の低減や部品類などの量産化・標準化によりコストは大幅に低下すると思われる。

図 2-5-3 水素 SS (ステーション) 建設コスト



(4) プロセス別の水素供給に関する設備投資額 (製造・輸送・充填)

1 ユニット(100SS)あたり合計 5 万 $N m^3/h$ の水素供給能力を持つ設備額を表 2-5-4 に示した。投資金額は 643 億円~1,087 億円である。水素社会へ移行した場合は、前述したように 100 ユニット (1 万 SS) となるので、約 6.4 兆円~10.9 兆円となる。普及拡大にともなうコスト低減を約 40%としても、約 4 兆円~7 兆円規模の巨大な投資額となる。

① 副生水素の回収

製造部門での設備投資が少ないためコストは 643 億円~765 億円

② 天然ガスから製造

輸送部門の投資額が高いため、オンサイトが有利、コストは 761 億円~892 億円

③ 電気分解から製造

輸送部門の投資額が高いため、オンサイトが有利、コストは 761 億円~1,087 億円

表 2-5-4 プロセス別水素供給に関するインフラ設備投資額一覧(1ユニット=100SS)

エネルギー源 製造方式 輸送方法	天然ガス		回収						電気分解										
	オン サイト	オフサイト		オフサイト						オンサイト			オフサイト						
		液体 水素	圧縮 水素	コークス炉ガス (COG)		苛性 ソーダ		石油精製		石炭 火力	風力	原子力	石炭 火力		風力		原子力		
				液体 水素	圧縮 水素	液体 水素	圧縮 水素	液体 水素	圧縮 水素				液体 水素	圧縮 水素	液体 水素	圧縮 水素	液体 水素	圧縮 水素	
投資額 (100SS当り 億円)	製造	300	195	195	68	68					300	300	300	390	390	390	390	390	390
	輸送		370	167	370	167	370	167	370	167				370	167	370	167	370	167
	充填	461	327	476	327	476	327	476	327	476	461	461	461	327	476	327	476	327	476
	合計	761	892	838	765	711	697	643	697	643	761	761	761	1,087	1,033	1,087	1,033	1,087	1,033

(出所) NEDO 研究報告書「WE-NET」他を参考に試算

(注) オンサイト型の水素製造ユニットは充填設備の項に計上せず製造設備の項に記載

(5) コスト試算条件

供給コストを計算するための主要な条件を以下に記した。

イ. マクロ経済指標

為替 100¥/US\$、金利 5%

ロ. エネルギー価格

原油価格(輸入 CIF) : 54 \$/bbl (WTI40 \$/bbl)

石炭価格 78 \$/t、天然ガス価格 15.4 \$/10⁶btu、電力価格⁸12.3 円/kWh (国内)

ハ. 償却、金利他

ローリー・トラクターなど輸送機器 : 4 年償却、その他設備 : 10 年~15 年償却

固定資産税等・火災保険等 (設備金額の 2%)、維持修理費 (設備金額の 3%)

(6) プロセス別の水素供給コスト

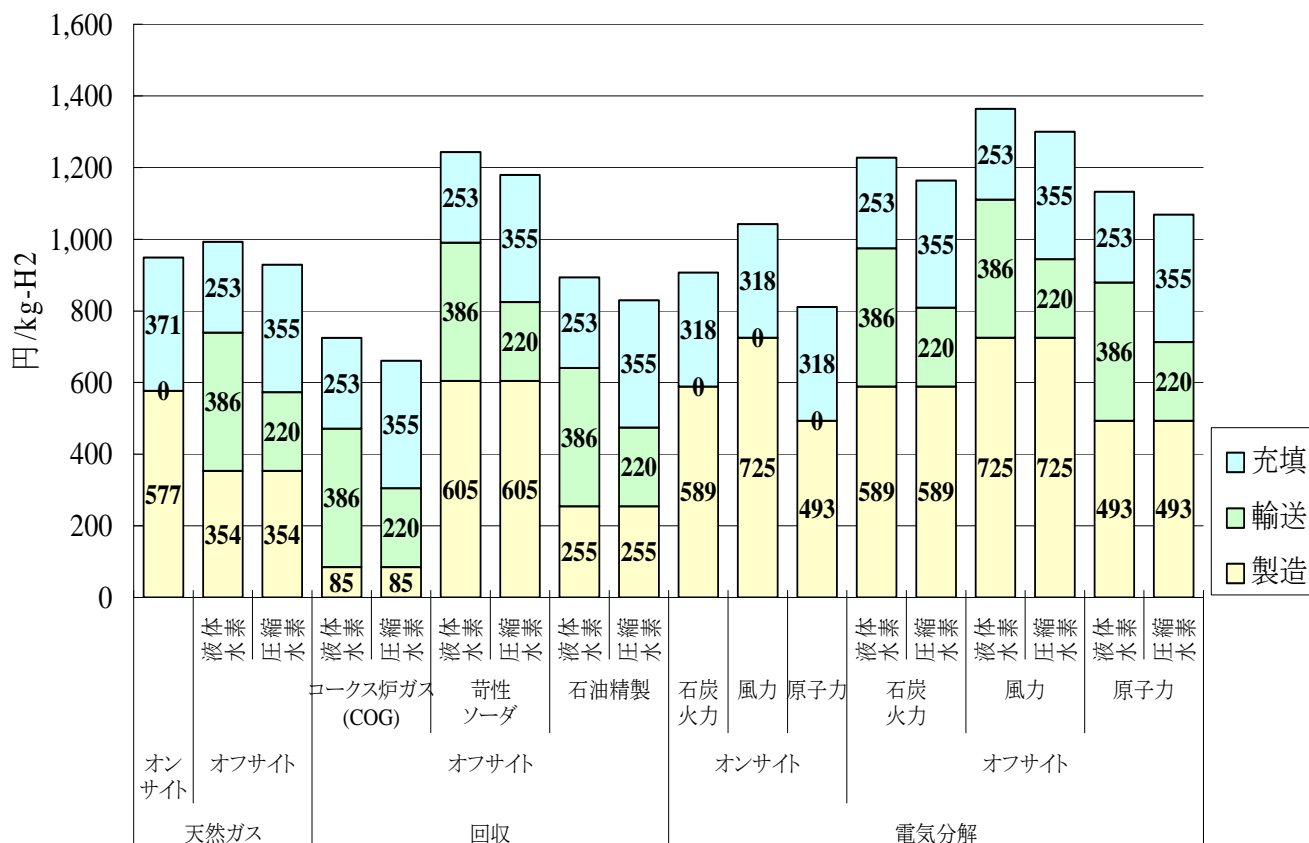
各工程別に年間経費 (償却・金利費、維持修理費、税保険料、電力・燃料・水道費、人件費) を試算し、供給プロセス別に、全工程(原料から水素が FCV に充填されるまでの工程)の費用の集計を行った⁹。例えば、付属資料の図の一部である、図 2-5-2 には、工程ごとの、製造された 1MJ あたりの水素の供給コストが記載されていることが分かる (例えば、圧縮水素(輸送)は 1.83 円/MJ)。

供給プロセス別のコストを比較するために、製造・輸送・充填の 3 つに区分して、水素 1 kg あたりの水素供給コストを図 2-5-4 に示した。

⁸ 平均的な電源構成を前提とした電力価格で、電気分解用を除く、動力・照明・加熱などユーティリティー利用の際に使用。電気分解に使用する電力コストとは、図 2-5-2 で言えば、火力発電(石炭)の項に記載したのがそれにあたる。また、その場合の CO₂ 排出原単位も平均的な電源構成を前提として計算した (144g-CO₂/MJ (518g-CO₂/kWh))。

⁹ プロセス別に各工程の費用を全て記載したのが付属資料である。

図 2-5-4 水素供給に係るコスト(Well-to-Tank) (稼働率 85%)



①天然ガスを原料とした場合

原料コストが必ずしも安くないことから 1kg あたり 928～948 円とやや割高である。

②副生水素を利用した場合

コークス炉ガスや石油精製から回収される場合のコストは 1kg あたり 660～893 円と安い。

③電気分解を利用した場合

オンサイトの場合、原子力が最も安く 1kg あたり 811 円、風力は 1,043 円と割高である。オフサイトの場合、輸送コストは、液体水素（液化を含む）の場合、1kg あたり 386 円、圧縮水素の場合で 1kg あたり 220 円と高いため、1kg あたり 1,068～1,364 円と最もコストが高くなる。

表 2-5-5 水素供給に係るコスト(Well-to-Tank) (稼働率 85%)

-水素の発熱量等価でガソリンに換算した場合-

エネルギー源 製造方式 輸送方法	天然ガス			回収						電気分解									
	オン サイト	オフサイト		オフサイト						オンサイト			オフサイト						
		液体 水素	圧縮 水素	コークス炉ガス (COG)		苛性 ソーダ		石油精製		石炭 火力	風力	原子力	石炭 火力		風力		原子力		
				液体 水素	圧縮 水素	液体 水素	圧縮 水素	液体 水素	圧縮 水素				液体 水素	圧縮 水素	液体 水素	圧縮 水素	液体 水素	圧縮 水素	
コスト (円/L-ガソリン)	製造	155	95	95	23	23	162	162	68	68	158	195	133	158	158	195	195	133	133
	輸送	-	104	59	104	59	104	59	104	59	-	-	-	104	59	104	59	104	59
	充填	100	68	95	68	95	68	95	68	95	85	85	85	68	95	68	95	68	95
	揮発油税	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
	合計	308	320	303	248	231	388	371	294	277	297	334	272	383	366	420	403	358	341

表 2-5-5 に、熱量等価でガソリンに換算して、ガソリン 1L 熱量等価のコストを示した。輸入 CIF 原油 54 \$/bbl(為替 100¥/\$) の場合、ガソリンの末端価格 1L あたり約 126 円(揮税込み)となるが、水素の供給コスト 1 L あたり 231~420 円となり、約 1.8~3.3 倍のコストとなる。表 2-5-1 に示したように、ガソリン車に換算した FCV の燃費は 26km/L、既存の乗用車の燃費は 15.5km/L(H17 年度乗用車平均燃費)であるから、FCV は 1.67 倍の燃費の良さを示すことになる。従って、ガソリン価格は 1L あたり 126 円と設定しているので、1.67 倍の 210 円が、ガソリン車と同一走行距離を走る際の水素供給コストの上限となるが、この条件を満たすものはなかった。

表 2-5-6 水素供給に係るコスト(Well-to-Tank) (稼働率 50%)

-水素の発熱量等価でガソリンに換算した場合-

エネルギー源 製造方式 輸送方法	天然ガス			回収						電気分解									
	オン サイト	オフサイト		オフサイト						オンサイト			オフサイト						
		液体 水素	圧縮 水素	コークス炉ガス (COG)		苛性 ソーダ		石油精製		石炭 火力	風力	原子力	石炭 火力		風力		原子力		
				液体 水素	圧縮 水素	液体 水素	圧縮 水素	液体 水素	圧縮 水素				液体 水素	圧縮 水素	液体 水素	圧縮 水素			
コスト (円/L-ガソリン)	製造	188	117	117	30	30	162	162	81	81	200	236	174	200	200	236	236	174	174
	輸送	-	142	68	142	68	142	68	142	68	-	-	-	142	68	142	68	142	68
	充填	150	114	154	114	154	114	154	114	154	126	126	126	114	154	114	154	114	154
	合計	338	372	338	286	252	418	384	337	303	325	361	299	455	421	492	458	430	396

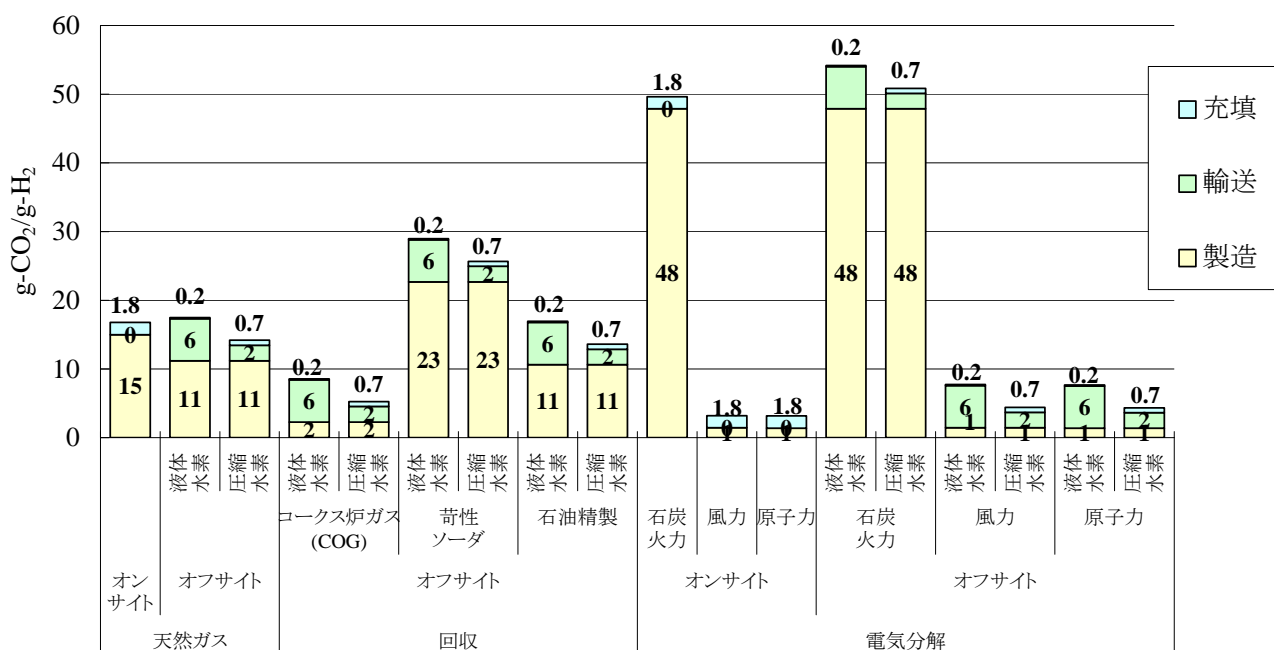
水素 SS の稼働率が 85% から 50% に低下した場合 (425Nm³/h から 250Nm³/h に供給量が減少)、表 2-5-6 に示すように、供給コストは 2~3 割程度上昇する。

2-5-3 水素供給のプロセス別 LCA 評価

供給プロセス別に全工程を、水素 1MJ あたりの投入エネルギー量、CO₂ 排出量を計算

し集計したのが、付属資料「プロセス別水素供給フローチャート」である。この試算結果に基づき、水素製造(原料製造を含む)・輸送・充填の3つの区分に整理して、供給プロセス別に、水素 1kg あたりの CO₂ 排出量を示したのが図 2-5-5 である。また、水素 1MJ あたりのプロセス別の投入エネルギー量及び CO₂ 排出量を示したのは、表 2-5-7 である。

図 2-5-5 水素供給に係る CO₂ 排出量(Well-to-Tank) (稼働率 85%)



①天然ガスの場合

天然ガスの改質及び天然ガスの生産過程での CO₂ 排出が多く、LCA 評価 (FCV への水素供給まで: Well-to-Tank) 上の CO₂ 排出量は水素 1kg あたり 14.2~17.5kg(1MJ あたり 118.1~145.8g)となる。FCV の燃費を 100km/H₂-kg とすると、CO₂ 排出量は 142~175g/km となる。

②副生水素の回収

コークス炉ガス(COG)、苛性ソーダの製造過程での CO₂ 排出量のうち水素回収分については、主製品と副製品(水素)のエネルギー量で按分して求めた。石油精製の場合は、水素製造装置の余力を利用して、ナフサまたは LPG などを原料とした水蒸気改質にともなう CO₂ 排出量として定義した。この結果、コークス炉ガスの CO₂ 排出量は小さく、

石油精製・苛性ソーダでは大きくなり、LCA 評価では、水素 1kg あたり 5.2~29kg(1MJ あたり 43.7~241.5g)となった。FCV の燃費を 100km/H₂-kg とすると、CO₂排出量は 52~290g/km となる。

③電気分解の場合

電気分解に利用する電源の CO₂排出量が高い石炭火力の場合は、LCA 評価における CO₂排出量は水素 1kg あたり 49.6~54.1kg(1MJ あたり 413.9~451.6g)と大きいのに 対し、原子力や風力といった再生可能エネルギー利用の場合は、CO₂排出量は水素 1kg あたり 3.2~7.7kg (1MJ あたり 26.3~64.3g) と小さい。石炭火力の場合、FCV の燃費を 100km/H₂-kg とすると、CO₂排出量は 496~541g/km となる。

表 2-5-7 プロセス別水素供給に関わる水素 1MJ あたりの投入エネルギー及び CO₂ 排出量

エネルギー源 製造方式 輸送方法	天然ガス			回収						電気分解									
	オン サイト	オフサイト		オフサイト						オンサイト			オフサイト						
		液体 水素	圧縮 水素	コークス炉ガス (COG)		苛性 ソーダ		石油精製		石炭 火力	風力	原子力	石炭 火力		風力		原子力		
				液体 水素	圧縮 水素	液体 水素	圧縮 水素	液体 水素	圧縮 水素				液体 水素	圧縮 水素	液体 水素	圧縮 水素	液体 水素	圧縮 水素	
エネルギー 消費量 (MJ/MJ)	製造	0.44	0.32	0.32	0.14	0.14	1.51	1.51	0.66	0.66	4.07	3.60	3.60	4.07	4.07	3.60	3.60	3.60	3.60
	輸送	-	0.36	0.15	0.36	0.15	0.36	0.15	0.36	0.15	-	-	-	0.36	0.15	0.36	0.15	0.36	0.15
	充填	0.10	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.04	0.10	0.10	0.10	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.04
	合計	0.54	0.69	0.52	0.51	0.34	1.88	1.71	1.03	0.85	4.17	3.71	3.71	4.44	4.26	3.97	3.80	3.97	3.80
CO ₂ (g-CO ₂ /MJ)	製造	124.9	93.3	93.3	18.9	18.9	189.1	189.1	88.6	88.6	399.1	11.9	11.5	399.1	399.1	11.9	11.9	11.5	11.5
	輸送	-	51.1	18.8	51.1	18.8	51.1	18.8	51.1	18.8	-	-	-	51.1	18.8	51.1	18.8	51.1	18.8
	充填	14.8	1.3	6.0	1.3	6.0	1.3	6.0	1.3	6.0	14.8	14.8	14.8	1.3	6.0	1.3	6.0	1.3	6.0
	合計	139.8	145.8	118.1	71.3	43.7	241.5	213.9	141.1	113.4	413.9	26.7	26.3	451.6	423.9	64.3	36.7	63.9	36.3
CO ₂ (g-CO ₂ /g-H ₂)	製造	15.0	11.2	11.2	2.3	2.3	22.7	22.7	10.6	10.6	47.9	1.4	1.4	47.9	47.9	1.4	1.4	1.4	1.4
	輸送	-	6.1	2.3	6.1	2.3	6.1	2.3	6.1	2.3	-	-	-	6.1	2.3	6.1	2.3	6.1	2.3
	充填	1.8	0.2	0.7	0.2	0.7	0.2	0.7	0.2	0.7	1.8	1.8	1.8	0.2	0.7	0.2	0.7	0.2	0.7
	合計	16.8	17.5	14.2	8.6	5.2	29.0	25.6	16.9	13.6	49.6	3.2	3.2	54.1	50.8	7.7	4.4	7.7	4.3

④風力を利用した電気分解の場合、オフサイト方式の 1MJ あたりの CO₂排出量は 64.3 ~36.7g となり、オンサイト型の 26.7g に対して多い。最大の原因は水素の輸送過程に あり、液体輸送の場合は 51.1g と全体の約 79%、圧縮輸送の場合で 18.8g と全体の約 51%を占める。表 2-5-8 に示すように、液体輸送の場合は、水素を液化するのに 1MJ あたり 0.35MJ の投入エネルギーが必要となり、CO₂の排出量も 50.4g となる。この部 分が輸送部門の殆どを占めることが分かる。圧縮輸送の場合は、圧縮に要するエネルギ ーは 1MJ あたり 0.11MJ、CO₂排出量は 1MJ あたり 15.9g と液体水素の場合に比較し て小さくなるものの、輸送部門の約 85%と大半を占めることには変わりはない。輸送 距離が伸びるに従い、液体水素輸送と圧縮水素輸送のエネルギー投入量及び CO₂排出 量の差は縮小していくこととなる。

表 2-5-8 液体水素輸送及び圧縮水素輸送における投入エネルギー量及び CO₂ 排出量

	液体水素			圧縮水素		
	液化	輸送	合計	圧縮	輸送	合計
水素1MJあたりの投入エネルギー(MJ)	0.35	0.01	0.36	0.11	0.04	0.15
水素1MJあたりのCO ₂ 排出量(g)	50.4	0.7	51.1	15.9	3.0	18.9

⑤ガソリンの LCA 評価と比較した場合

CO₂ 排出量はガソリン精製時に 11.3g/MJ(WtT)し、燃焼時に 73.5g/MJ(TtW)排出するので、合計で 84.8g/MJ(WtW)となる。表 2-5-7 に示す水素 1MJ あたりの CO₂ 排出量 (WtT)と比較すると、コークス炉ガスの水素を回収する場合(43.7~71.3g)と、原子力・風力による電気分解の場合(26.3~64.3g)のみがガソリンの 84.8g を下回り、その他はこれを上回る。

2-5-4 まとめ

2-5-1~2-5-3 で示した水素供給プロセスのうち、代表的なプロセスのコストを選んで、ガソリン車と比較したのが表 2-5-9 である。

(1)インフラ投資

水素供給のインフラ整備には、100SS 規模で約 711 億円~761 億円の投資となり、水素社会へ移行するには 1 万 SS 相当、約 7.7 兆円の投資が必要となる。当然のことながら、既存のガソリン車やハイブリッド自動車の場合は、インフラ投資は必要がない。

(2)水素供給コスト

ガソリンの小売価格(揮発油税を含む)が 1L あたり 126 円に対し、副生水素を回収する場合の水素供給コストは、ガソリン(熱量等価)換算 1L あたり 231 円、天然ガスの水蒸気改質の場合で 309 円、風力を電源とした電気分解で 341 円と、いずれも割高となる。但し、走行燃費を勘案して、1km あたりの燃料供給コストで整理すると、経済性の最も高いのがガソリンハイブリッド自動車で 1km あたり 4.8 円、既存ガソリン車で 8.1 円となる。FCV の場合は、いずれも 8.9 円~12.8 円と割高である。このうち、最も競争力があるのは、副生水素を回収した場合(コークス炉ガス) 8.9 円となる。

(3) CO₂ 排出量

表 2-5-9 に示すように、ガソリン製造時の CO₂ 排出量 (WtT) は 1MJ あたり 11.3g であるが、水素の場合は製造・輸送過程で大量のエネルギー投入がされることもあり、CO₂ 排出量は逆に 26.7~139.8g と多くなる。風力など再生可能エネルギーを利用した場合には

26.7g と低くなる。走行時の CO₂ 排出量 (TtW) は、ガソリンの場合、燃焼時に 1MJ あたり 73.5g の CO₂ の排出があり、合計(WtW)で 1MJ あたり 84.8g となる。一方、水素の場合は燃焼時には CO₂ は排出されないため WtT の数値と同じとなる。原子力や風力を利用した場合は、ガソリンよりも CO₂ 排出量は少なくなるが、天然ガス起源の場合は逆に多くなる。自動車の走行燃費を勘案して、1km 走行あたりの CO₂ 排出量に換算すると、ハイブリッド自動車の場合で約 101g、既存車の場合で 170g となるのに対し、風力による電気分解は 32g、副生水素の回収で 52g と、FCV の方が有利となる場合がある。一方、天然ガスの場合は 168g となり、ガソリン車と同等程度となり LCA 評価における CO₂ 削減効果はないことが分かる。

表 2-5-9 燃料電池自動車 (FCV)、ガソリン車 (既存・HEV) の供給コストと CO₂ 排出量

	燃料(水素)製造	輸送+SS	投資コスト(億円)		供給コスト		
					(¥/H2kg)	ガソリン換算(¥/L)	(¥/km)
FCV(水素)	副生ガス(コークス炉)	オフサイト(圧縮)	100SS	711	660	231	8.9
	天然ガス水蒸気改質	オンサイト		761	948	309	11.9
	風力(電気分解)	オンサイト		761	1,043	334	12.8
ガソリン車	ハイブリッド	石油精製	既存	-	-	126	4.8
	既存						8.1

	燃料(水素)製造	輸送+SS	CO ₂ 排出量					
			(WtT)		(TtW)		(WtW)	
			(g/MJ)	(g/H2-g)	(g/MJ)	(g/H2-g)	(g/MJ)	(g/km)
FCV(水素)	副生ガス(コークス炉)	オフサイト(圧縮)	43.7	5.2	0	0	43.7	52
	天然ガス水蒸気改質	オンサイト	139.8	16.8	0	0	139.8	168
	風力(電気分解)	オンサイト	26.7	3.2	0	0	26.7	32
ガソリン車	ハイブリッド	石油精製	既存	11.3	-	73.5	-	101
	既存							170

(注) 走行距離 1km あたりの CO₂ 排出量は、ガソリン車(既存) : 15.5km/L(H17 年度乗用車平均燃費)、ハイブリッド自動車(HEV) : 26.0km/L、燃料電池自動車(FCV) : 100km/H₂-kg で計算した。

第3章 水素社会への移行可能性と今後の課題

3-1 水素社会への移行可能性

前章では、水素社会への移行期における供給コストについて試算を行った。本節ではこれを踏まえ、移行可能性に関する問題点（下記に示す）について検討を行った。

- ① 日本での移行期における供給コスト（水素の原料製造から自動車への充填まで）は、欧米の試算結果と比較してどの程度の水準にあるのか？
- ② 中長期的に見て、水素供給インフラの拡大にともなうスケールアップにより、どの程度コストは低減するのか、またガソリン価格との競争力はどの程度あるのか？
- ③ 現行の石油インフラから水素インフラへの移行にともない、最低限、社会的に負担しなければならない「追加コスト」はどの程度なのか？
- ④ 長期的に見て、水素の優位性はどこにあるのか？

3-1-1 欧米における水素供給コストの比較

(1) 欧米における水素供給コストの比較

前章第 5 節では、日本における水素の供給コスト試算を行ったが、本節では、これを米国については NAS（全米科学アカデミー）、欧州については IEA による試算結果と比較したのが表 3-1-1 である。前提条件は各国で異なっており、必ずしも詳細は明確でなく、正確な比較は期待できないものの、およそのコスト水準の比較は可能と判断した。

表 3-1-1 水素の供給コストにおける欧米との比較

米試算	(円/m ³)					IEA試算	(円/m ³)					IEEJ試算	(円/m ³)		
	パイプライン輸送		液体水素輸送	オンサイト製造			パイプライン(将来)	パイプライン(現状)					圧縮水素輸送	オンサイト	オンサイト
	天然ガス	石炭	天然ガス	天然ガス	電気分解	天然ガス	天然ガス	石炭(CCS付)	原子力(Srサイクル)	電気分解	コークス炉ガス	天然ガス	電気分解(風力)		
水素製造	9.3	8.6	12.4			5.4	7.5	10.8	21.6	32.3	7.7	51.9	65.2		
輸送	3.8	3.8	16.2			6.9	17.2	17.2	17.2	17.2	19.8	-	-		
充填	4.9	4.9	5.6			6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	31.9	33.4	28.6		
計	17.9	17.3	34.2	31.6	59.1	18.3	30.8	34.1	44.8	55.6	59.4	85.3	93.7		
ガリン換算 円/L	52.5	50.7	100.3	92.6	173.6	53.8	90.5	100.0	131.6	163.3	177.3	254.7	280.0		
(税込み)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	231.1	308.5	333.8		
CO ₂ 排出量 (g-CO ₂ /MJ-H ₂)	76.9	156.4	82.0	101.1	146.3	-	-	-	-	-	43.7	139.8	26.7		

(出所)1 米試算: The Hydrogen Economy – Opportunities, Costs barriers and R&D Needs, National Academy of Sciences, b2. IEA 試算: Prospects for Hydrogen and Fuel cells, 2005, IEA

イ. 米国におけるコスト試算

- ① 水素 SS の規模や供給ネットワークのスケールは日本よりも 10 倍程度大きい(後述)。

- ② 現状の技術ベースで評価した場合、オフサイト方式(天然ガス)380 円/kg、オンサイト方式 (天然ガス) 351 円/kg、オンサイト方式 (電気分解) 658 円/kg となる。
- ③ 日本におけるオンサイト方式 (天然ガス) 948 円/kg やオンサイト方式 (電気分解) 1,043 円/kg と比較して半分以下の供給コストであるが、ガソリン換算価格 (熱量等価) で見れば 93 円/L~174 円となり、米国においてはかなり割高である(後述)。
- ④ 天然ガスを水蒸気改質して水素を製造し、パイプラインで輸送する場合は 199 円/kg となり、供給コストはさらに低下する。

ロ. 欧州におけるコスト試算

- ① 発達した域内の天然ガスパイプラインの利用を想定しており、その供給コストは 343 円/kg~619 円/kg となる。
- ② パイプラインを除いた米国のコスト評価とほぼ同じ水準となっている。
- ③ 将来的には、パイプラインを利用する場合のコスト(天然ガスの改質)は、更に 40% 程度低下して 204 円/kg まで低下し米国並となる。

(2)日米における規模の格差とコスト目標について

表 3-1-1 の前提条件である水素の供給ネットワークの規模について、比較したのが表 3-1-2 である。日本の場合、1つの水素供給システム (1ユニット) を 100SS としたが、米国の場合は、約 4.4 倍の 1ユニット=438SS を前提としている。FCV の走行燃費、燃料タンク等はほぼ同一なのに対し、年間の走行距離は日本の約 2 倍となっている。

その結果、1SS の供給量は約 2.7 倍となり、1ユニットの年間水素供給量は約 12 倍の 39 万トンとなる。米国のガソリン需要は日本の約 10 倍程度であることから妥当なスケールと言え、(1)で述べた日米のコスト差の大部分は、規模の経済性で説明できると考えられる。

表 3-1-2 日米における水素の供給ネットワークの条件比較

		単位	日本の場合	米国の場合
1SS	来店台数	台/(SS・日)	229	595
	給油量	kg/台	4.0	4.2
	販売量	kg/月	27,528	74,970
		Nm ³ /h	425	1,158
	給油回数	回/(台・月)	2.1	5.0
	保有台数	台/SS	3,256	3,570
1ユニット	年間販売量	トン/年	33,034	394,042
	1ユニットのSS数	件	100	438
FC車	燃費(FC)	km/H2kg	100	106
	(ガソリン換算)	km/l	26.0	27.6
	走行距離	km/(年・台)	10,144	19,308
	燃料消費量	kg/(台・月)	8.5	15

米国の NAS によれば、現状コスト（パイプラインを除く）を更に低減して、220 円/kg（20 円/Nm³）、ガソリン換算価格（熱量等価）で約 60 円/L 前後を目標¹としている。ガソリン価格²が 50～60 円/L とすれば、ガソリンハイブリッド自動車と競合できる水準ということであるが、現状のコスト（例えば、天然ガス利用の場合）を約 40% 削減することを意味しており、その実現は容易ではないと思われる。

日本の NEDO（ロードマップ）によれば、目標コストは 40 円/Nm³（約 445 円/kg）、ガソリン換算価格では約 171 円/L（揮発油税込み）と設定されている。前章の前提条件である小売価格 126 円/L（揮発油税込み）との競争力を考えた場合には、原油価格の水準にも依存するが、必ずしも競争力ある水準³ではない可能性もある。

3-1-2 供給インフラの転換にともなう追加コストについて

(1) 中長期的なコスト低減の見通し

日本における水素社会への移行については、その数量と規模が拡大するにつれ（1 ユニットから 100 ユニットへと拡大）、当然、設備コストも低減していくと予想される。水素 SS の建設コストも、図 2-5-3 で示したように、現在の約 4 億 7 千万円（ガソリン SS の建設コスト 1 億 5 千万円の約 3 倍）から 40% 減の 2 億 8 千万円程度（ガソリン SS の約 2 倍）まで低減される可能性は十分あると判断できる。

欧米でのコスト削減についてもプロセス別に異なるものの、概ね 40%～50% 程度の削減を見込んでいることから、日本においても、設備コストは 40% 程度削減される可能性は高い。こうした前提に基づいて（石油・天然ガス・石炭などのエネルギー価格は一定）、供給コストを試算し直したのが表 3-1-3 である。要点を整理すると以下のとおりである。

① オフサイト型（コークス炉ガス：圧縮水素輸送）

660 円/kg → 489 円/kg（ガソリン換算 185 円/L）

副生水素回収の場合は概ね目標の 445 円/kg（40 円/Nm³）を達成するが、供給上のアベラビリティに制約があるなど、水素社会での一般的な供給源としては難しい。

② オンサイト型

天然ガスによる水蒸気改質：948 円/kg → 766 円/kg（ガソリン換算 260 円/L）

風力による電気分解：1,043 円/kg → 861 円/kg（ガソリン換算 285 円/L）

¹ 再生可能エネルギーによる電気分解（オンサイト型）が最も理想的なシステムと評価しているが、風力や太陽光を直接利用する分散型の電源はコストが現状では高く、コスト削減の課題は多い。従って、移行期では、天然ガスの水蒸気改質により水素を製造し、パイプライン（液体水素）で供給するのが、最も経済性が高い（199 円/kg）としている。但し、米国においてさえ「将来の確かな見込みがない限り、新規パイプラインの投資を行う者はない」（T.Koppel、第 1 章 1 節脚注 3 を参照）と言われ、水素のパイプライン設置は極めて限られている。

² 米国の小売価格は DOE 発表（09 年 2 月 16 日）で全グレード平均価格 2.02 \$/ガロン（約 53 円/L）、日本の小売価格は石油情報センター発表（09 年 2 月 16 日）でレギュラーガソリン 109.4 円/L。

³ ガソリンハイブリッド自動車ではなく既存車との比較であれば、126 円/L の約 1.67 倍（FCV と既存車の走行燃費差）の 210 円/L がイーブンな値となるため、40 円/Nm³（171 円/kg）で十分な競争力を持つ。

目標値の 445 円/kg とは 2 倍近い差が依然としてある。

表 3-1-3 日米における水素の供給ネットワークの条件比較

その 1 (表 2-5-5 の再掲 : 稼働率 85%)

エネルギー源 製造方式 輸送方法	天然ガス			回収						電気分解									
	オン サイト	オフサイト		オフサイト						オンサイト			オフサイト						
		液本 水素	圧縮 水素	コークス炉ガス (COG)		苛性 ソーダ		石油精製		石炭 火力	風力	原子力	石炭 火力		風力		原子力		
				液本 水素	圧縮 水素	液本 水素	圧縮 水素	液本 水素	圧縮 水素				液本 水素	圧縮 水素	液本 水素	圧縮 水素	液本 水素	圧縮 水素	
コスト (円/kg)	製造	577	354	354	85	85	605	605	255	255	589	725	493	589	589	725	725	493	493
	輸送	-	386	220	386	220	386	220	386	220	-	-	-	386	220	386	220	386	220
	充填	371	253	355	253	355	253	355	253	355	318	318	318	355	355	355	355	253	355
	合計	948	992	928	724	660	1,243	1,179	893	830	906	1,043	811	1,228	1,164	1,364	1,300	1,132	1,068
コスト (円/L-ガリン)	製造	155	95	95	23	23	162	162	68	68	158	195	133	158	158	195	195	133	133
	輸送	-	104	59	104	59	104	59	104	59	-	-	-	104	59	104	59	104	59
	充填	100	68	95	68	95	68	95	68	95	85	85	85	68	95	68	95	68	95
	揮発油税	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
	合計	308	320	303	248	231	388	371	294	277	297	334	272	383	366	420	403	358	341

その 2 (設備コストが約 40%低減された場合 : 稼働率 85%)

エネルギー源 製造方式 輸送方法	天然ガス			回収						電気分解									
	オン サイト	オフサイト		オフサイト						オンサイト			オフサイト						
		液本 水素	圧縮 水素	コークス炉ガス (COG)		苛性 ソーダ		石油精製		石炭 火力	風力	原子力	石炭 火力		風力		原子力		
				液本 水素	圧縮 水素	液本 水素	圧縮 水素	液本 水素	圧縮 水素				液本 水素	圧縮 水素	液本 水素	圧縮 水素	液本 水素	圧縮 水素	
コスト (円/kg)	製造	505	307	307	71	71	605	605	255	255	463	599	368	496	496	632	632	400	400
	輸送	-	294	177	294	177	294	177	294	177	-	-	-	294	177	294	177	294	177
	充填	261	175	241	175	241	175	241	175	241	261	261	261	175	241	175	241	175	241
	合計	766	776	725	540	489	1,074	1,023	724	673	725	861	629	965	914	1,101	1,050	869	819
コスト (円/L-ガリン)	製造	136	82	82	19	19	162	162	68	68	124	161	99	133	133	170	170	107	107
	輸送	-	79	48	79	48	79	48	79	48	-	-	-	79	48	79	48	79	48
	充填	70	47	65	47	65	47	65	47	65	70	70	70	47	65	47	65	47	65
	揮発油税	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
	合計	260	262	249	199	185	342	329	248	235	248	285	223	313	299	349	336	287	274

(2)社会インフラの転換にともなう追加コスト

(1)で計算した水素の供給コストを、ガソリン換算価格で表示して、ガソリン小売価格 126 円/L との差分を示すと次の通りである。

- ① オフサイト型 (コークス炉ガス) : +59 円/L
- ② オンサイト型(天然ガス) : 134 円/L
- ③ オンイト型(風力) : 159 円/L

ガソリンとの競争力を十分に有するには、水素供給のコストが少なくともガソリン価格と同一か、これを下回る必要がある。中長期的なコスト低減を織り込んだ場合でも、59 円

～159 円程度の差額が生じているが、これは、新たな水素供給インフラを構築する際に生じる未回収コストと定義でき、社会全体で、この差額を何らかの形で負担する必要がある。想定される 2 つのシナリオには次のようなものが考えられるが、いずれにしても、新エネルギーインフラへの移行に向けた社会的な「追加コスト」と言える。

- ① 資源制約（オイルピーク）などにより原油価格が長期的に上昇し、他のエネルギー価格との相対格差が拡大していく場合。
- ② CO₂問題により化石燃料の使用規制により炭素価格が上昇する場合。

3-1-3 水素エネルギーの優位性

自動車用燃料として、化石燃料（ガソリン・軽油）に代替できるのは、電気または水素となる。第 1 章第 1 節でも述べたように、電気自動車はインフラの負担が軽く早期の実現性が期待されることから、FCV に先行して導入が進むものと予想される。

但し、最大の課題は安価で高性能なバッテリーの開発にある。現状では、1 回の充電で 100km 程度の走行距離にすぎないことから、バッテリーの大幅な性能向上なくしては、市内を中心とした短距離走行用のコミューターとしての地位にとどまる可能性が高い。

バッテリー性能の向上は、特に重量あたりのエネルギー密度を高めることにあるが、現状は、鉛電池で 30～40Wh/kg、ニッケル水素で 50～70Wh/kg、自動車用として期待される Li イオン電池でさえも 80～120Wh/kg⁴に過ぎない。

水素の場合は次ぎに示す通り、電池の約 10 倍のエネルギー密度を持っている。

- ① 高圧縮水素⁵の燃焼エネルギー：1,165Wh/kg
- ② 高圧縮水素を効率 50%の燃料電池で電力を取り出した場合：582Wh/kg

化石燃料であるガソリンのエネルギー密度は、水素エネルギーの約 10 数倍もあり、エネルギー密度の観点からは最も効率が高いものの、長期的に見れば、化石燃料の枯渇（価格高騰）や CO₂問題による使用規制が実施される場合には、次善の策として、水素利用の価値は大変に重要なものになると考えられる。

- ③ ガソリンの燃焼エネルギー：11,857Wh/kg
- ④ 効率 20%の内燃機関で出力(動力)を取り出した場合：2,371Wh/kg

今後の電池の技術開発におけるロードマップを図式化したのが図 3-1-1 であるが、これによれば、現行のエネルギー密度 70Wh/kg から、「要素技術開発」により 100Wh/kg へ、さらに電池構成材料開発により 200Wh/kg へと性能向上が図られて行き、最終的には、「次

⁴ 村田、大型リチウムイオン電池の技術開発の動向（エネルギー・資源、08 年 3 月）

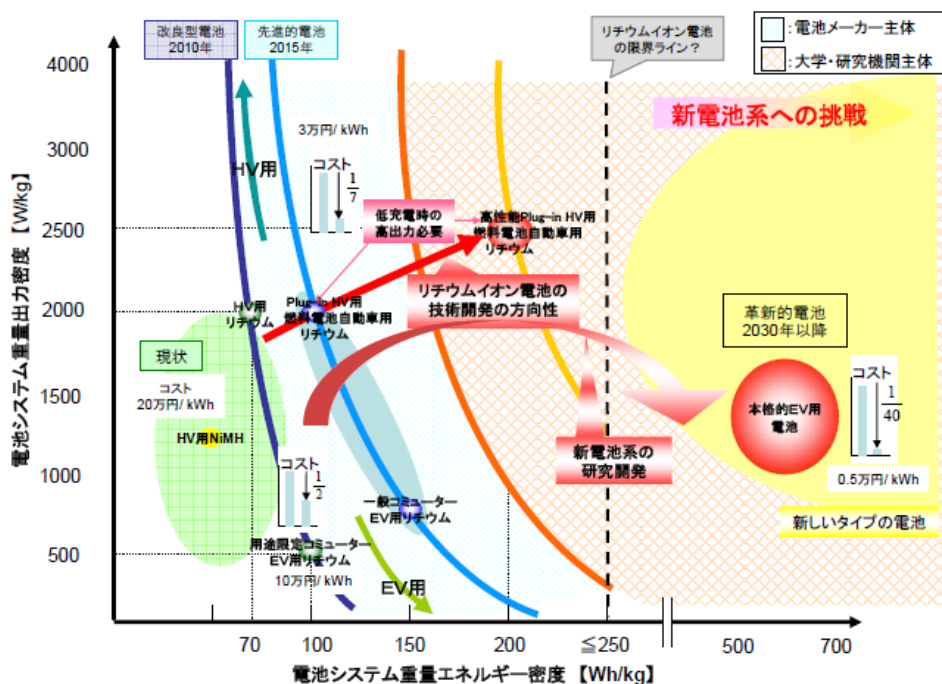
⁵ 35Mpa の高圧ボンベに水素 5 kg を充填する場合、(充填水素) / (充填水素 + ボンベ空重量) = 3.5% すると、水素が充填された高圧ボンベの総重量は 143 kg となる。水素の発熱量（LHV）は 1 kg あたり 120MJ なので、水素が充填された高圧ボンベの総重量あたりの発熱量は 4.19MJ/kg、Wh^②換算すると 1,164Wh/kg となる。

世代技術開発」によって、現状の技術レベルの延長線上にない、革新的な性能を目指す開発によって 500Wh/kg の性能に到達することを目標としている。更に、2030 年頃には 700Wh/kg という革新的電池を目指すとしている⁶。エネルギー密度 500Wh/kg⁷が実現すれば、電気自動車は FCV と競合する可能性が出てくるが、この数値を達成するには、従来の技術とは全く異なったものを開発する必要があることから、現時点での「実現可能性」については不明と言わざるを得ない。

短・中期的には、バッテリーの短所である走行距離の拡大を図るために、ガソリンハイブリッド自動車やプラグインハイブリッド自動車の普及拡大が予想される。しかしながら、長期的な視点から、低炭素社会 (CO₂ 排出量の抑制) を目指す場合には、低 CO₂ 排出量と長距離走行の両立が図れる FCV は重要である。

以上のことから、再生可能エネルギーを高効率で蓄積する手段としての水素の役割とその優位性は、再生可能エネルギーの開発・進展にともない、益々重要なものになってくると考えられる。

図 3-1-1 電池の体積エネルギー密度の推移



(出所) 新世代自動車の基礎となる次世代電池技術に関する研究会

⁶ 小林、次世代自動車用リチウムイオン二次電池の開発動向 (エネルギー・資源、2008 年 7 月) エネルギー密度が向上すると相対的に出力密度は低下してくるが、1kg あたり 1kW であれば、自動車用としては十分に利用可能と思われる。

⁷ 500kWh を達成した場合には、FCV と同水準になり、水素利用に対する反論する論者の 1 つの根拠となっている。

3-2 まとめと今後の課題

3-2-1 まとめ

(1)インフラ投資

- ① 水素供給のインフラを新しく構築するには、石油を前提とする既存のインフラを代替する必要があることから、ある程度の範囲と規模を持って、投資を進める必要がある。

(第1章第1節)

- ② 100店の水素SSとそれらに水素を製造供給する関連設備を1ユニットとして投資を行う場合、初期段階で、天然ガスの水蒸気改質によるオンサイト型、または風力を電源とした電気分解によるオンサイト型で約760億円、中長期的なコスト低減を見込んだ場合で、約460億円の投資額が必要と試算される。

(第2章第5節、第3章第1節)

- ③ 日本における水素社会では、100ユニット(1万件の水素SS)、約3,300万台のFCVが走行することになるが、自動車側を除く供給側のみで、投資総額の規模は約7.6兆円～4.6兆円にものぼり、10年から20年かけて実行されることになる。この投資をエネルギー業界単独で実行するには、かなりの困難を伴う可能性が高い。

(第1章第1節、第2章第5節)

(2)コスト競争力

- ① 日本における水素の供給コストは、初期段階では、コークス炉ガスからの副生水素の回収(圧縮水素によるオフサイト供給)の場合で660円/kg、天然ガスの水蒸気改質によるオンサイト型で948円/kg、風力を電源とする電気分解によるオンサイト型で1,043円/kgとなり、NEDOの目標コスト445円/kg(40円/Nm³)と比較して割高である。

(第2章第5節、第3章第1節)

- ② 上記①のコストをガソリン価格(熱量等価)に換算すれば、ガソリンの小売価格126円と比較して、副生水素の場合で、231円/L(揮発油税込み)、天然ガスの場合で309円/L、風力の場合で334円/Lとなり競争力は弱い。

(第2章第5節、第3章第1節)

- ③ FCVとの競合相手は、既存のガソリン車や短距離走行を目的とした電気自動車ではなく、FCVと同等もしくはそれ以上の走行燃費を有するガソリンハイブリッド自動車(あるいはプラグインハイブリッド自動車)の可能性が高い。従って、原油価格の水準にもよるが、走行燃費を競合車と同一と仮定した場合、445円/kg(40円/Nm³)では、必ずしも、十分なコスト水準ではない可能性もある。

(第2章第5節、第3章第1節)

- ④ 走行燃費を勘案して、1kmあたりの燃料供給コストで整理すると、経済性の最も高いのがガソリンハイブリッド自動車で1kmあたり4.8円、既存ガソリン車で8.1円となる。FCVの場合は、いずれも8.9円～12.8円と割高である。このうち、最も競争力があるの

は、副生水素を回収した場合（コークス炉ガス）8.9 円となる。

（第 2 章第 5 節）

- ⑤ 中長期的な設備コストの低減(40%削減)を見込んだ場合でも、上記①に対応するガソリン換算での水素供給コストは 185 円/L、260 円/L、285 円/L となり、ガソリン小売価格 126 円/L と比較して割高になる。この格差は新しい水素供給のインフラを構築するための社会全体が負担するべき「追加コスト」となる。

（第 3 章第 1 節）

(3) CO₂ 排出量の削減効果

- ① プロセス別の水素供給における CO₂ 排出量 (WtW) で評価すると、1km あたりの CO₂ 排出量はガソリンハイブリッド自動車約 101g となるのに対して、天然ガスの水蒸気改質による場合では、約 140g となり逆に多くなる。一方、風力を電源とした電気分解の場合では約 44g となり、CO₂ の排出量削減に効果がある。FCV の利用については、再生可能エネルギーや原子力を利用することが前提となる。

（第 2 章第 5 節）

- ② (2) の⑤で述べた社会的な「追加コスト」は、資源制約（オイルピーク）などにより原油価格が長期的に上昇し、他のエネルギー価格との相対格差が拡大していくか、あるいは、CO₂ 問題により化石燃料の使用規制が生じ炭素価格が上昇することによって、補填されることとなる。

（第 1 章第 1 節、第 3 章第 1 節）

(4) その他

- ① 自動車用燃料として、CO₂ の排出量 (WtW) の低減を図るためには、再生可能エネルギーの利用がポイントとなる。最大のネックはコストが高いということであり、水素社会への移行のためには、低コストで供給が可能になることが先決である。

（第 1 章第 3 節、第 2 章第 5 節）

- ② 再生可能エネルギーを蓄積するためには、バッテリーか水素（液体か圧縮ガス）が考えられる。現時点では、EV 用バッテリーの重量エネルギー密度は 100Wh/kg 程度であり、水素・FCV(高圧タンクからの水素で効率 50%の燃料電池で発電した電力)の 582Wh と比較して、相当程度差があり、エネルギーの蓄積手段として水素の優位性が指摘できる。

（第 3 章第 1 節）

3-2-2 今後の課題

(1) 政府のリーダーシップと国民的コンセンサスの必要性

水素社会への移行を実現するには、第一に、長期的な観点から「低炭素社会」の実現を目指すことを目的とし、追加費用（ガソリンや軽油価格と比較して）は、社会全体として負担する必要がある。そして、これに関する国民的コンセンサス形成が求められる。そ

のためには、燃料電池や水素貯蔵技術ばかりでなく、有効利用が期待される再生可能エネルギーも含めた技術開発の進展を促し、可能な限りコスト低減を図って、費用対効果を明確にする必要があり、政府による研究開発等への支援が重要な鍵となる。

第二に、石油に依存した供給体系から、水素を軸とした供給インフラへと転換していくには、インフラ設備全体を代替することになるので、長期的な社会プランとして取り進めることになり、政府の強力なリーダーシップが必要である。さらに水素に対する安全性の確保及び法的規制の整備など、ルールと運用の確立も政府が果たすべき重要な役割である。

(2)長期的な視点と技術開発力の蓄積の重要性

既存の供給インフラを利用できるか、または比較的軽微な投資（充電設備など）で対応できる、ガソリンハイブリッド自動車やプラグインハイブリッド自動車などの普及拡大は、今後 10 数年の間（2010～2020 年）に急速に進むと想定される。一方、FCV の展開時期は、当初の想定よりも遅れるものと思われる。

しかしながら、二酸化炭素排出量（LCA ベース）が少ないことや、ガソリン車同様に、長距離走行に適していることから、内燃機関を駆動源とする自動車の究極的な代替可能性を秘めている。そういう意味では、100 年を越える長い歴史を持つ内燃機関と比較して、FCV（燃料電池）はわずか 20 年の歴史であり、現状では克服しなければならない課題は多いが、長期的な楽観主義の観点からは、内燃機関同様に、様々な改良改善が加えられ技術的な蓄積が進み、成長・成熟していくと考えるべきである。

逆に言えば、過度の楽観主義に走り（短期的な意味で）、解決しなければならない課題を不十分なまま、短期的な実現性を強調することは、技術的ブレークスルーやインフラ整備の面で、かえって水素社会への移行・実現への懐疑を生み出し、遅延させる危険性があると言える。

(3)地域活性化と水素タウン構想の推進（移行期における課題）

水素社会への移行については、一定の規模と範囲でインフラ投資を進めることになるが、実際の投資における実効性と経済性を考慮すれば、都市ガス(天然ガス)を原料とした水蒸気改質によるオンサイト型水素 SS ステーション（実際には、ガソリンスタンドとの併設タイプ）が、最も現実的な選択と言える。

長期的には、再生可能エネルギーの技術開発の進展にともなうコスト低減が進めば、再生可能エネルギーベースの電気分解方式に代替されていく可能性が高くなるが、移行期での投資が、本格的展開期における投資と二重にならないような配慮が必要となろう。その意味でも政府のリーダーシップの重要性は高いと言える。

自動車用の燃料電池に先行して、電気と熱(暖房・給湯)の複合利用による高効率な家庭用燃料電池（都市ガス供給）が、普及拡大していくと予想される。そうした場合、個別の家庭にとどまらず、1つの町や大規模なニュータウンにおいて、水素 SS を組み込んだ包

括的な水素（エネルギー）供給システムとして制度設計をすることは重要な機会と考えられる。

なぜならば、「水素社会」の具体的なあり方（いわゆる「水素タウン」構想）として、地域住民の生活に密着した形で具体的に明示できる利点があり、それによって、地方や地域でのコミュニティーづくりや地域の活性化に貢献できるからである。いずれにしても、政府・地方自治体におけるビジョンづくりとリーダーシップが求められる課題と言えよう。

以上

お問合せ先 : report@tky.ieej.or.jp

参考文献

- 1) 水素エネルギー読本、水素エネルギー協会、オーム社、2007
- 2) J.Romm、本間・西村訳、水素は石油に代われるか、オーム社、2005
- 3) レフキン、柴田訳、水素エコノミー、NHK 出版、2003
- 4) 堤、燃料電池・実用化への挑戦、工業調査会、2007
- 5) 槌屋、「燃料電池」、ちくま新書、筑摩書房、2003
- 6) J.ラミニー著、槌屋訳、「解説 燃料電池システム」オーム社、2004
- 7) ホーケン、ロビンズ、佐和監訳、自然資本の経済、日本経済新聞社、2001
- 8) T.Koppel、酒井泰介訳、「燃料電池で世界を変える」 翔泳社、2001
- 9) 水素エネルギー社会、エネルギー・資源学会、2008
- 10) 「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) 第Ⅱ期研究開発 タスク 1 システム評価に関する調査・研究」 平成 14 年 3 月 新エネルギー・産業技術総合開発機構
- 11) 燃料電池自動車・水素供給インフラ整備普及プロジェクト、産業競争力懇談会、2008
- 12) 「水素安全利用等基盤技術開発 水素に関する共通基盤技術開発 水素供給価格シナリオ等に関する研究」 平成 19 年 3 月 新エネルギー・産業技術総合開発機構
- 13) 「水素安全利用等基盤技術開発 水素に関する共通基盤技術開発 水素供給経済社会移行シナリオ等研究」 平成 19 年 3 月 新エネルギー・産業技術総合開発機構
- 14) 「JHFC 総合効率検討結果」 JHFC 総合効率検討特別委員会、日本自動車研究所、平成 18 年 3 月
- 15) 「低炭素社会づくり行動計画」、閣議決定、平成 20 年 7 月
- 16) 「Cool Earth・エネルギー革新技术計画」、経済産業省、平成 20 年 3 月
- 17) 「環境エネルギー技術革新計画」、総合科学技術会議、平成 20 年 5 月
- 18) 「次世代自動車・燃料イニシアティブとりまとめ」、次世代自動車・燃料に関する懇談会、平成 19 年 5 月
- 19) 「低炭素社会に向けた 12 の方策」、「2050 日本低炭素社会」シナリオチーム、2008
- 20) 「新・国家エネルギー戦略」、経済産業省、平成 18 年 5 月
- 21) 「長期エネルギー需給見通し」、総合資源エネルギー調査会・需給部会、平成 20 年 5 月
- 22) 「NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2008」、新エネルギー・産業技術総合開発機構、平成 20 年 6 月
- 23) “Hydrogen & Fuel Cells”, International Energy Agency, 2004

- 24) “Prospects for Hydrogen and Fuel Cells”, International Energy Agency, 2005
- 25) “Hydrogen and Fuel Cells as Strong Partners of Renewable Energy Systems”, European Hydrogen Association, 2008
- 26) “The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs”, National Research Council and National Academy of Engineering (USA), 2004
- 27) “Advanced Energy Initiative”, National Economic Council (USA), 2006
- 28) “An Energy Policy for Europe”, Commission of the European Communities, 2007

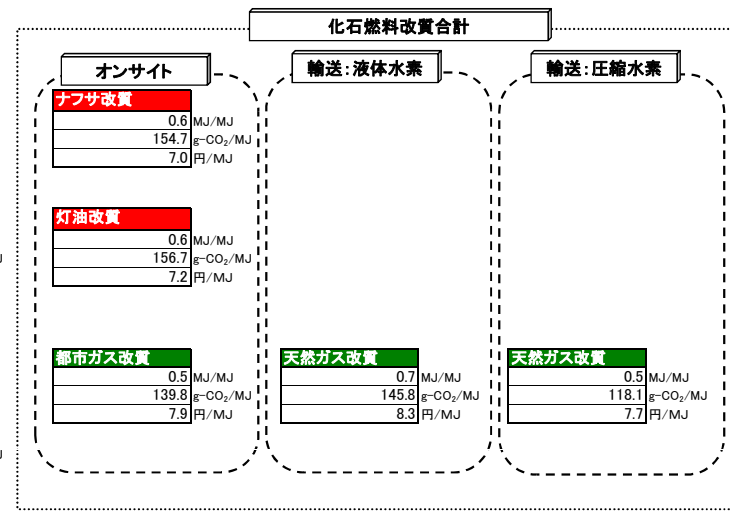
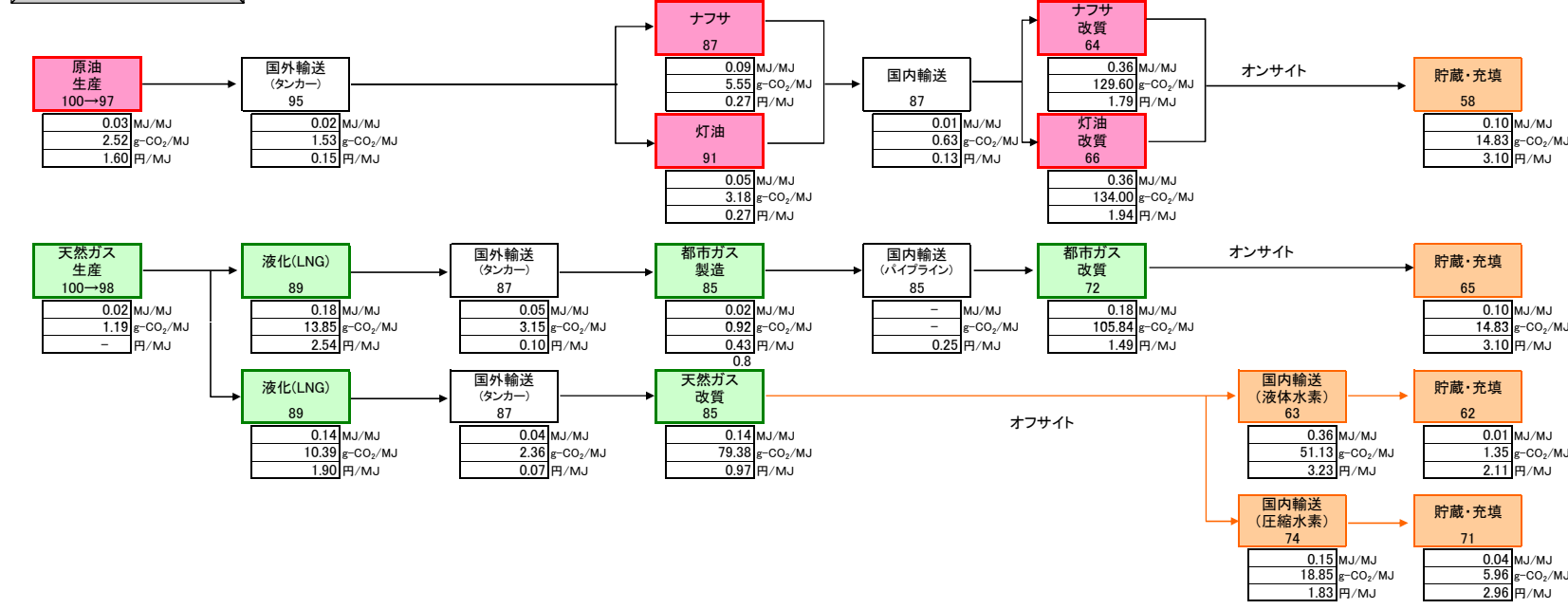
付属資料

主要物性値・FCV 関連諸元・単位

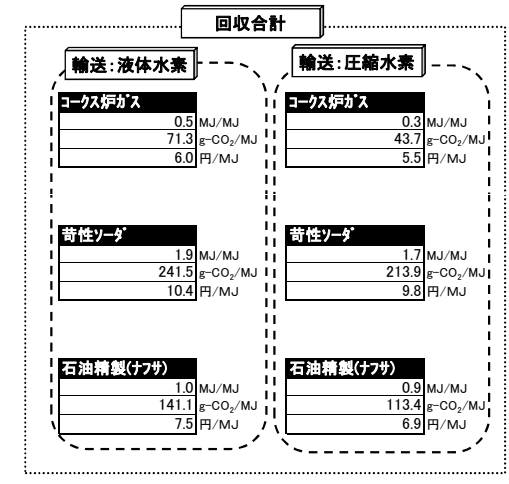
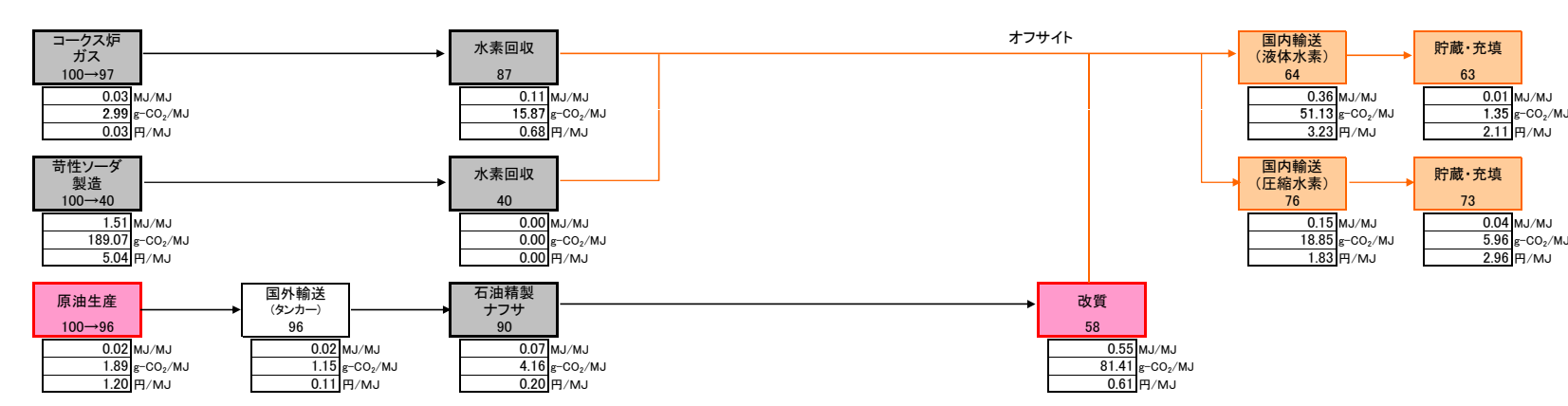
物質名	項目	単位	数値		項目	単位	数値
水素	密度(1atm,0°C: 気体)	kg/m ³	0.090	燃料電池自動車	燃費	km/H ₂ -kg	100
	密度(1atm,20K: 液体)	kg/m ³	70.8		タンク容量	H ₂ -kg/台	5
	発熱量(LHV)	MJ/kg	119.9	水素輸送車両 (圧縮)	水素ポンペ	atm	400
MJ/Nm ³		10.78	L/本			520	
原油	密度(1atm,0°C: 液体)	kg/L	0.8596	(容量)	H ₂ -kg/台	224	
	発熱量(LHV)	MJ/kg	41.3		水素タンク	KL/台	23
		MJ/L	35.5	H ₂ -kg/台		1,466	
ガソリン	密度(1atm,0°C: 液体)	kg/L	0.7352	水素輸送車両 (液体)	(充填率90%)		
	発熱量(LHV)	MJ/kg	42.7			変換前	数値
		MJ/L	32.2				
ナフサ	密度(1atm,0°C: 液体)	kg/L	0.7247	単位換算	1x10 ⁶ Btu	1,055	MJ
	発熱量(LHV)	MJ/kg	43.6		1xFt ³	0.283	m ³
		MJ/L	31.7		1xgal	3.785	L
LPG	密度(1atm,0°C: 液体)	kg/L	0.55		1xlb	0.453	kg
	発熱量(LHV)	MJ/kg	46.2		1xMJ	238.8	kcal
		—			1xKwh	3.6	MJ
LNG	密度(1atm,0°C: 気体)	kg/m ³	0.7173	1xmile	1.609	km	
	発熱量(LHV)	MJ/kg	49.6				
		MJ/Nm ³	35.6				
都市ガス	密度(1atm,0°C: 気体)	kg/m ³	0.847				
	発熱量(LHV)	MJ/kg	49.0				
		MJ/Nm ³	41.5				

付属資料 プロセス別水素供給フローチャート（稼働率85%）

① 化石燃料改質



② 回収



凡例

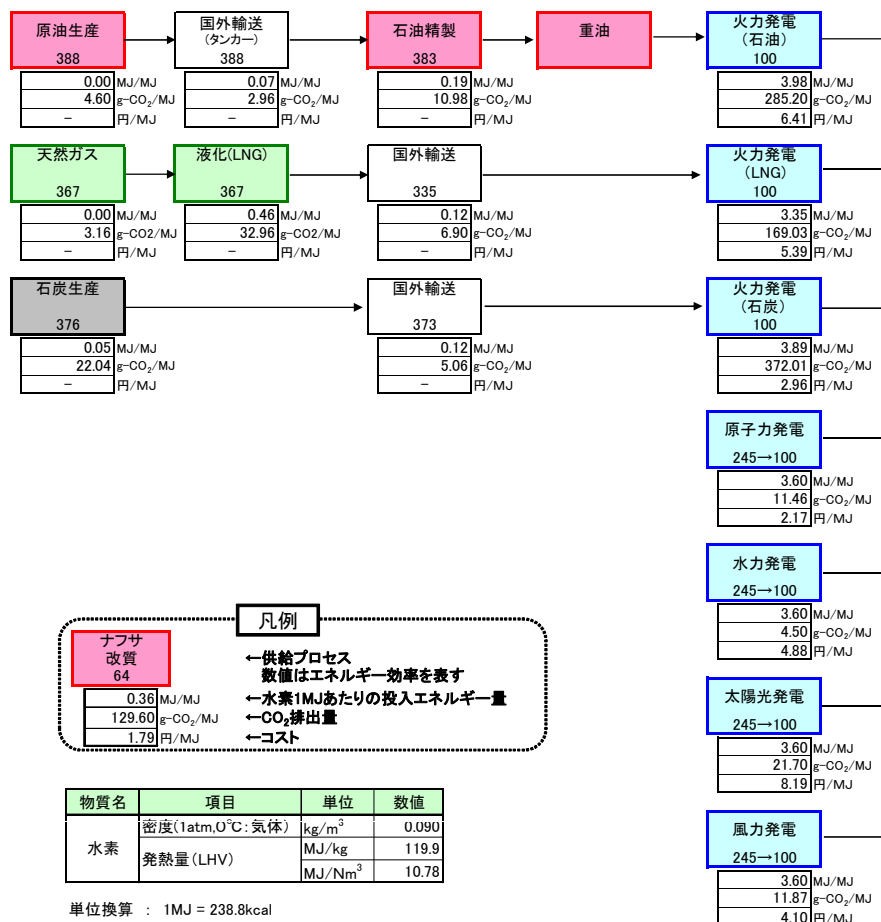
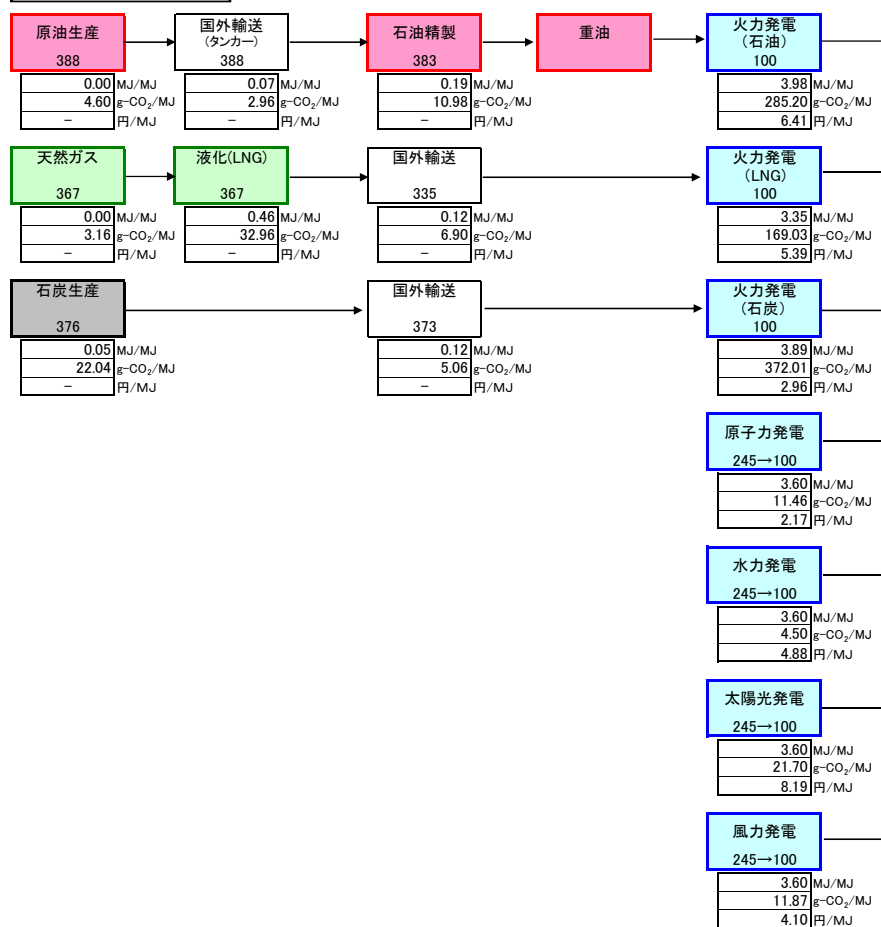
- ←供給プロセス 数値はエネルギー効率を表す
- ←水素1MJあたりの投入エネルギー量
- ←CO2排出量
- ←コスト

物質名	項目	単位	数値
水素	密度(1atm, 0°C: 気体)	kg/m ³	0.090
		MJ/kg	119.9
	発熱量(LHV)	MJ/Nm ³	10.78

単位換算 : 1MJ = 238.8kcal

付属資料 プロセス別水素供給フローチャート（稼働率85%）

③ 電気分解



凡例

ナフサ改質	64	←供給プロセス
0.36 MJ/MJ	←水素1MJあたりの投入エネルギー量	
129.60 g-CO ₂ /MJ	←CO ₂ 排出量	
1.79 円/MJ	←コスト	

物質名	項目	単位	数値
水素	密度(1atm,0°C: 気体)	kg/m ³	0.090
	発熱量(LHV)	MJ/kg	119.9
		MJ/Nm ³	10.78

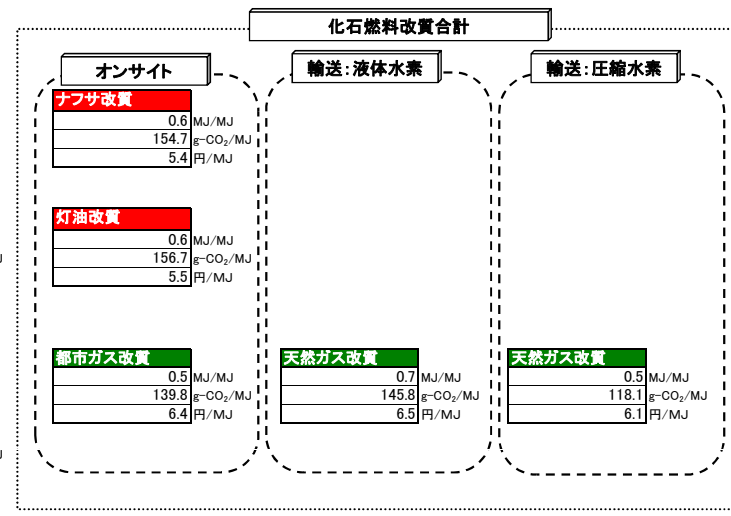
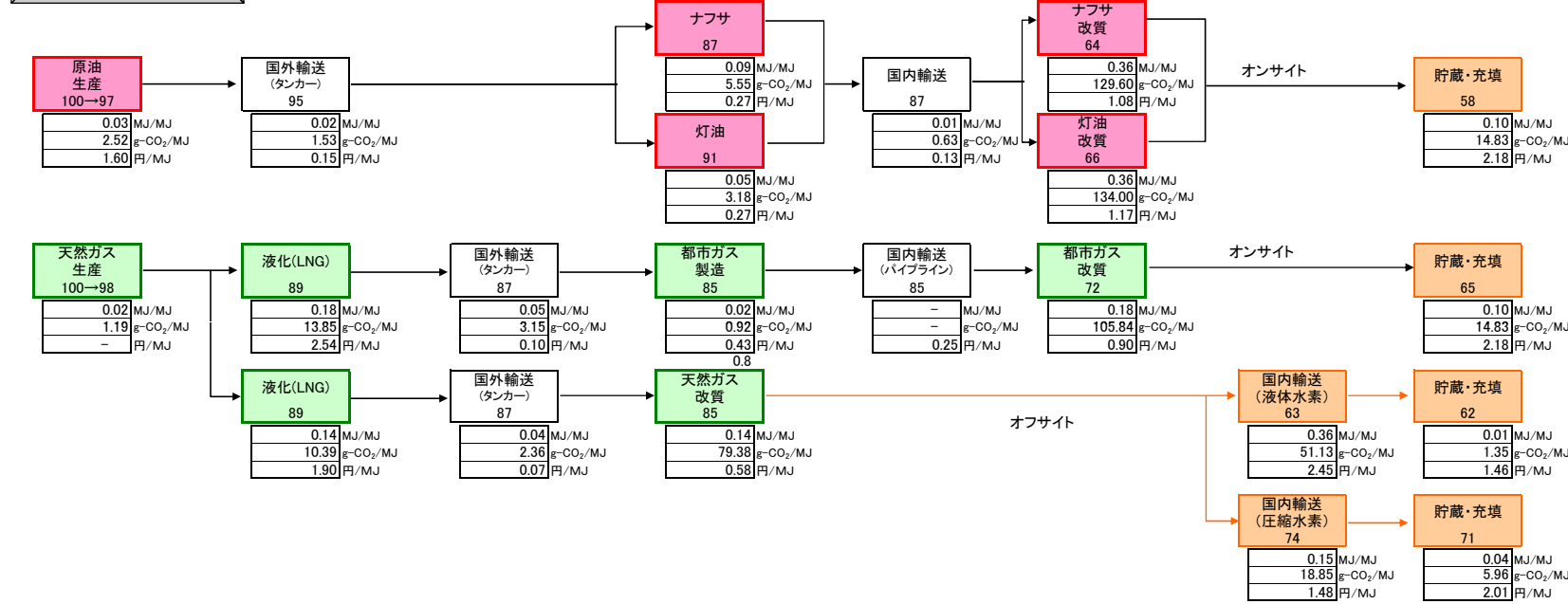
単位換算 : 1MJ = 238.8kcal

電気分解合計

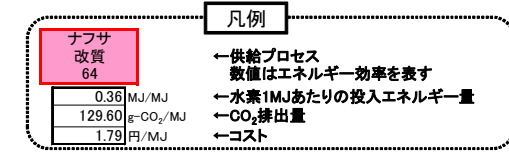
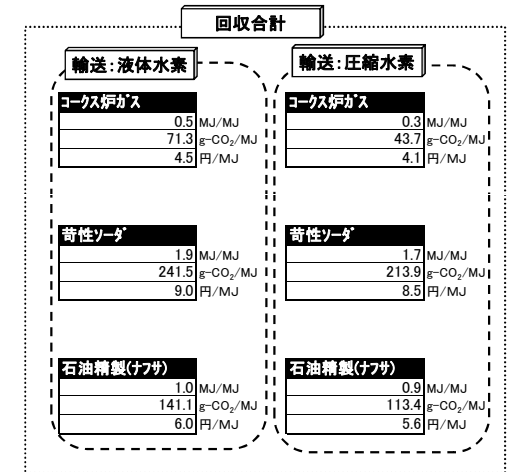
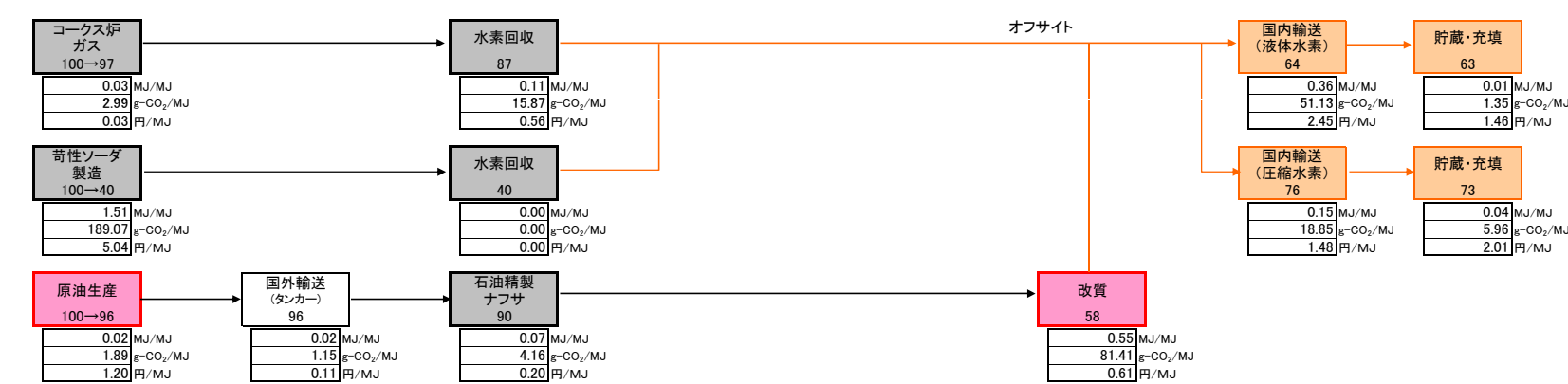
アルカリ水電解			固体高分子型		
オンサイト	輸送: 液体水素	輸送: 圧縮水素	オンサイト	輸送: 液体水素	輸送: 圧縮水素
石油火力	石油火力	石油火力	石油火力	石油火力	石油火力
4.3 MJ/MJ	4.6 MJ/MJ	4.4 MJ/MJ	4.3 MJ/MJ	4.6 MJ/MJ	4.4 MJ/MJ
318.6 g-CO ₂ /MJ	356.2 g-CO ₂ /MJ	328.5 g-CO ₂ /MJ	318.6 g-CO ₂ /MJ	356.2 g-CO ₂ /MJ	328.5 g-CO ₂ /MJ
11.0 円/MJ	13.7 円/MJ	13.2 円/MJ	11.3 円/MJ	15.0 円/MJ	14.5 円/MJ
LNG火力	LNG火力	LNG火力	LNG火力	LNG火力	LNG火力
4.0 MJ/MJ	4.3 MJ/MJ	4.1 MJ/MJ	4.0 MJ/MJ	4.3 MJ/MJ	4.1 MJ/MJ
226.9 g-CO ₂ /MJ	264.5 g-CO ₂ /MJ	236.9 g-CO ₂ /MJ	226.9 g-CO ₂ /MJ	264.5 g-CO ₂ /MJ	236.9 g-CO ₂ /MJ
10.0 円/MJ	12.7 円/MJ	12.1 円/MJ	10.3 円/MJ	14.0 円/MJ	13.4 円/MJ
石炭火力	石炭火力	石炭火力	石炭火力	石炭火力	石炭火力
4.2 MJ/MJ	4.4 MJ/MJ	4.3 MJ/MJ	4.2 MJ/MJ	4.4 MJ/MJ	4.3 MJ/MJ
413.9 g-CO ₂ /MJ	451.6 g-CO ₂ /MJ	423.9 g-CO ₂ /MJ	413.9 g-CO ₂ /MJ	451.6 g-CO ₂ /MJ	423.9 g-CO ₂ /MJ
7.6 円/MJ	10.2 円/MJ	9.7 円/MJ	7.9 円/MJ	11.5 円/MJ	11.0 円/MJ
原子力	原子力	原子力	原子力	原子力	原子力
3.7 MJ/MJ	4.0 MJ/MJ	3.8 MJ/MJ	3.7 MJ/MJ	4.0 MJ/MJ	3.8 MJ/MJ
26.3 g-CO ₂ /MJ	63.9 g-CO ₂ /MJ	36.3 g-CO ₂ /MJ	26.3 g-CO ₂ /MJ	63.9 g-CO ₂ /MJ	36.3 g-CO ₂ /MJ
6.8 円/MJ	9.5 円/MJ	8.9 円/MJ	7.1 円/MJ	10.7 円/MJ	10.2 円/MJ
水力	水力	水力	水力	水力	水力
3.7 MJ/MJ	4.0 MJ/MJ	3.8 MJ/MJ	3.7 MJ/MJ	4.0 MJ/MJ	3.8 MJ/MJ
19.3 g-CO ₂ /MJ	57.0 g-CO ₂ /MJ	29.3 g-CO ₂ /MJ	19.3 g-CO ₂ /MJ	57.0 g-CO ₂ /MJ	29.3 g-CO ₂ /MJ
9.5 円/MJ	12.2 円/MJ	11.6 円/MJ	9.8 円/MJ	13.5 円/MJ	12.9 円/MJ
太陽光	太陽光	太陽光	太陽光	太陽光	太陽光
3.7 MJ/MJ	4.0 MJ/MJ	3.8 MJ/MJ	3.7 MJ/MJ	4.0 MJ/MJ	3.8 MJ/MJ
36.5 g-CO ₂ /MJ	74.2 g-CO ₂ /MJ	46.5 g-CO ₂ /MJ	36.5 g-CO ₂ /MJ	74.2 g-CO ₂ /MJ	46.5 g-CO ₂ /MJ
12.8 円/MJ	15.5 円/MJ	14.9 円/MJ	13.1 円/MJ	16.8 円/MJ	16.2 円/MJ
風力	風力	風力	風力	風力	風力
3.7 MJ/MJ	4.0 MJ/MJ	3.8 MJ/MJ	3.7 MJ/MJ	4.0 MJ/MJ	3.8 MJ/MJ
26.7 g-CO ₂ /MJ	64.3 g-CO ₂ /MJ	36.7 g-CO ₂ /MJ	26.7 g-CO ₂ /MJ	64.3 g-CO ₂ /MJ	36.7 g-CO ₂ /MJ
8.7 円/MJ	11.4 円/MJ	10.8 円/MJ	9.0 円/MJ	12.7 円/MJ	12.1 円/MJ

付属資料 プロセス別水素供給フローチャート（稼働率85%・コスト低減）

① 化石燃料改質

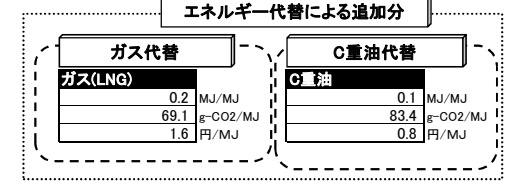


② 回収



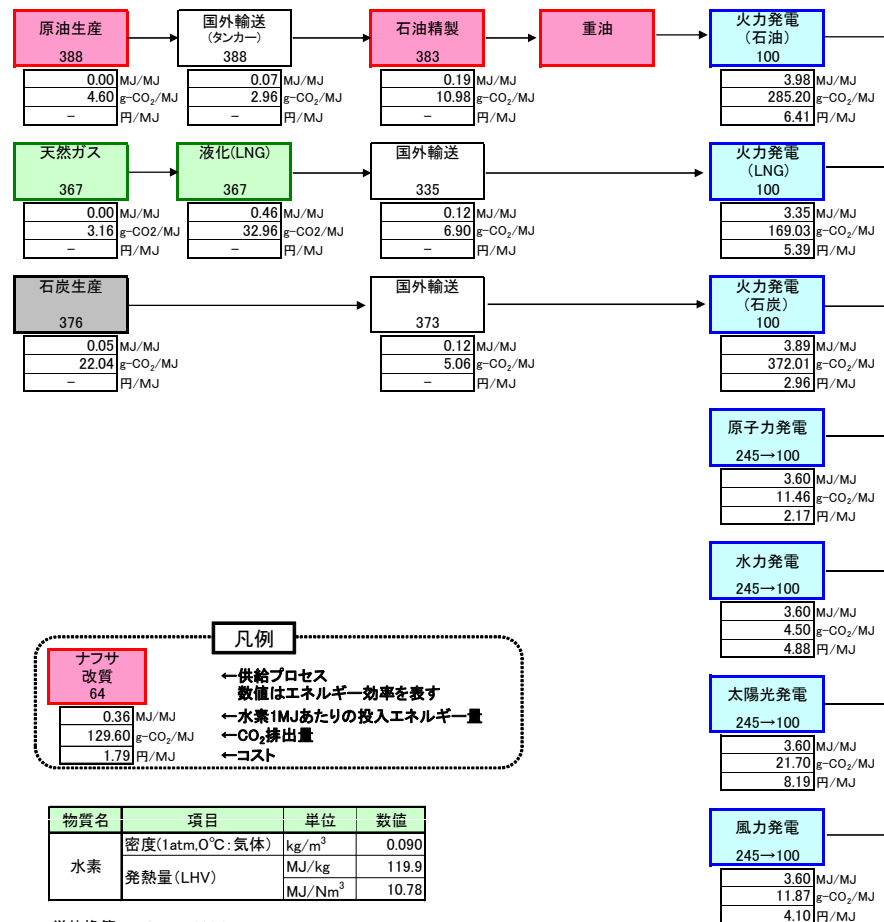
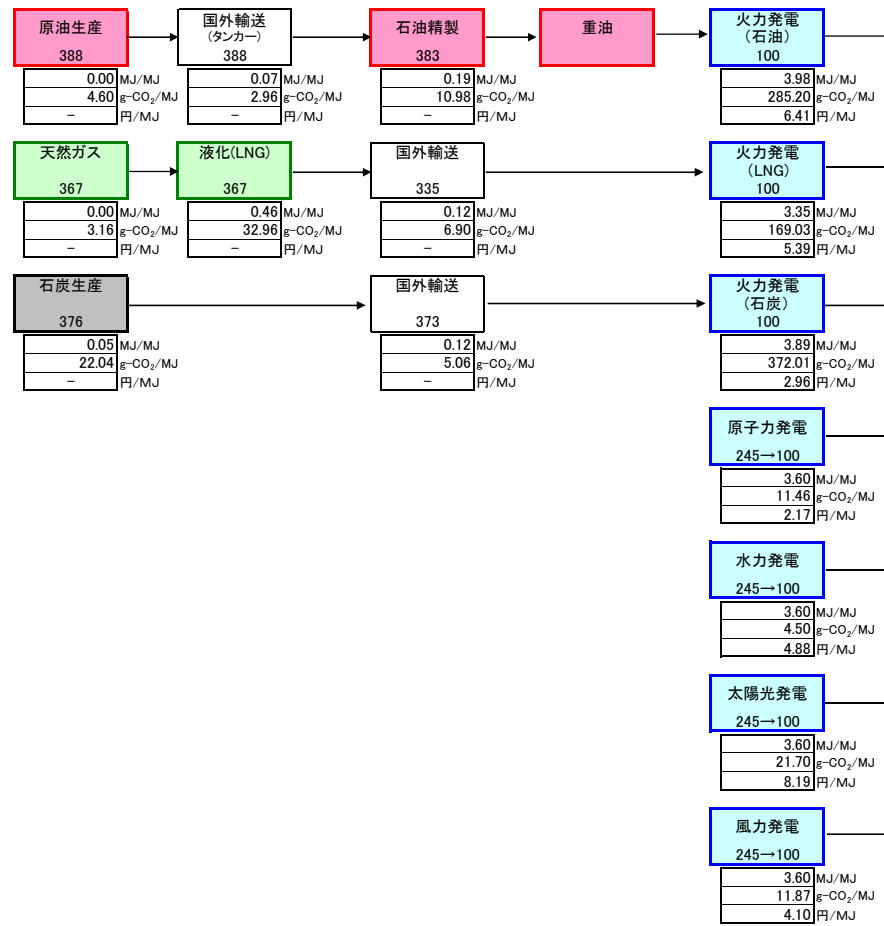
物質名	項目	単位	数値
水素	密度(1atm,0°C:気体)	kg/m ³	0.090
	発熱量(LHV)	MJ/kg	119.9
		MJ/Nm ³	10.78

単位換算 : 1MJ = 238.8kcal



付属資料 プロセス別水素供給フローチャート（稼働率85%・コスト低減）

③ 電気分解

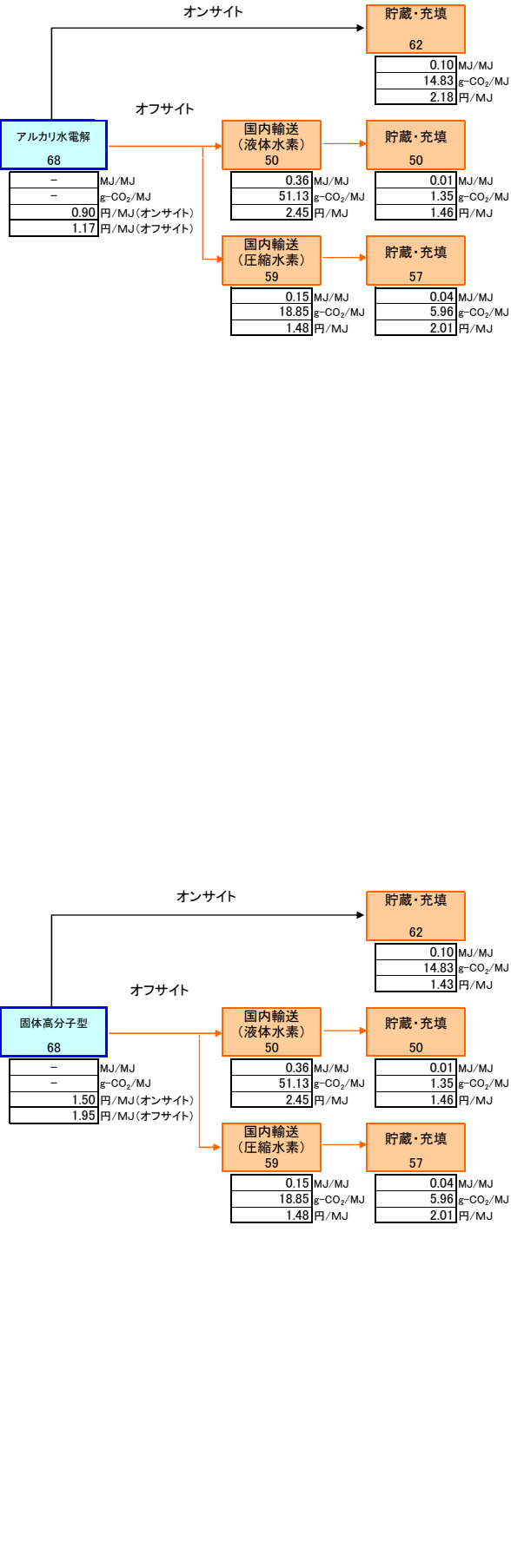


凡例

- ナフサ改質 64
- 供給プロセス 数値はエネルギー効率を表す
- 水素1MJあたりの投入エネルギー量
- CO₂排出量
- コスト

物質名	項目	単位	数値
水素	密度(1atm,0°C:気体)	kg/m ³	0.090
	発熱量(LHV)	MJ/kg	119.9
		MJ/Nm ³	10.78

単位換算 : 1MJ = 238.8kcal



電気分解合計

アルカリ水電解		
電源	オンサイト	オフサイト
石油火力	4.3 MJ/MJ 318.6 g-CO ₂ /MJ 9.5 円/MJ	4.6 MJ/MJ 356.2 g-CO ₂ /MJ 11.5 円/MJ
LNG火力	4.0 MJ/MJ 226.9 g-CO ₂ /MJ 8.5 円/MJ	4.3 MJ/MJ 264.5 g-CO ₂ /MJ 10.5 円/MJ
石炭火力	4.2 MJ/MJ 413.9 g-CO ₂ /MJ 6.0 円/MJ	4.4 MJ/MJ 451.6 g-CO ₂ /MJ 8.0 円/MJ
原子力	3.7 MJ/MJ 26.3 g-CO ₂ /MJ 5.2 円/MJ	4.0 MJ/MJ 63.9 g-CO ₂ /MJ 7.2 円/MJ
水力	3.7 MJ/MJ 19.3 g-CO ₂ /MJ 8.0 円/MJ	4.0 MJ/MJ 57.0 g-CO ₂ /MJ 10.0 円/MJ
太陽光	3.7 MJ/MJ 36.5 g-CO ₂ /MJ 11.3 円/MJ	4.0 MJ/MJ 74.2 g-CO ₂ /MJ 13.3 円/MJ
風力	3.7 MJ/MJ 26.7 g-CO ₂ /MJ 7.2 円/MJ	4.0 MJ/MJ 64.3 g-CO ₂ /MJ 9.2 円/MJ
輸送:液体水素	4.3 MJ/MJ 318.6 g-CO ₂ /MJ 9.3 円/MJ	4.4 MJ/MJ 328.5 g-CO ₂ /MJ 11.1 円/MJ
輸送:圧縮水素	4.3 MJ/MJ 226.9 g-CO ₂ /MJ 8.3 円/MJ	4.1 MJ/MJ 236.9 g-CO ₂ /MJ 10.8 円/MJ
固体高分子型	4.2 MJ/MJ 413.9 g-CO ₂ /MJ 5.9 円/MJ	4.4 MJ/MJ 451.6 g-CO ₂ /MJ 8.4 円/MJ
原子力	3.7 MJ/MJ 26.3 g-CO ₂ /MJ 5.1 円/MJ	4.0 MJ/MJ 63.9 g-CO ₂ /MJ 8.0 円/MJ
水力	3.7 MJ/MJ 19.3 g-CO ₂ /MJ 7.8 円/MJ	4.0 MJ/MJ 57.0 g-CO ₂ /MJ 10.7 円/MJ
太陽光	3.7 MJ/MJ 36.5 g-CO ₂ /MJ 11.1 円/MJ	4.0 MJ/MJ 74.2 g-CO ₂ /MJ 14.1 円/MJ
風力	3.7 MJ/MJ 26.7 g-CO ₂ /MJ 7.0 円/MJ	4.0 MJ/MJ 64.3 g-CO ₂ /MJ 10.0 円/MJ