



技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

Vol. **3**

水素分野の 技術戦略策定に向けて

2015年10月

1 章	水素に関する技術の概要	2
1-1	水素の製造技術	3
1-2	水素の輸送・貯蔵技術	3
1-3	水素の利用技術	4
2 章	水素に関する技術の置かれた状況	5
2-1	技術開発の動向	5
2-2	市場規模(国内、海外)	7
2-3	産業競争力(諸外国との比較)	8
2-4	水素エネルギー利用の意義	12
2-5	水素エネルギーの政策的位置づけ	12
3 章	水素分野の技術課題	13
3-1	水素の製造技術	13
3-2	水素の輸送・貯蔵技術(国内輸送、海外からの水素輸入含む)	14
3-3	水素の利用技術	15
3-4	水素発電における各輸送・貯蔵方法のコスト比較	16
4 章	おわりに	18

TSCとはTechnology Strategy Center(技術戦略研究センター)の略称です。

水素分野の技術戦略策定に向けて

1章 水素に関する技術の概要

水素は様々なエネルギー源から製造可能な二次エネルギー媒体であり、図1に示すような特徴がある。利用方法は水素のままの燃料電池への使用の他、電気や他のエネルギー媒体と同様、発電・熱利用など多様であるとともに、再生可能エネルギーを利用して製造する、又は二酸化炭素回収・貯留(CCS:Carbon Dioxide Capture and Storage)と組み合わせて化石燃料から製造する場合に、CO₂を排出しない製造、利用が可能である。また、貯蔵・長

距離輸送も技術的に可能であり、さらに、余剰電力を水素に変換して長期間・多量に貯蔵することもできる。

現在まで、水素の用途には、家庭用・業務用の燃料電池や燃料電池自動車を実現しているが、これらに必要な水素の需要総量は、図2に示すように、石油精製、製鉄等の製造プロセスから生じる副生水素（及び化石燃料改質によって得られる水素等）で賄える程度^{*1}と見込まれる。

*1 2030年の水素の自家消費を除く国内需要ポテンシャルは年間30億Nm³、国内供給ポテンシャル120～180億Nm³ (NEDO委託調査(委託先：みずほ情報総研)「水素需給の現状と将来見通しに関する検討」(2012年))

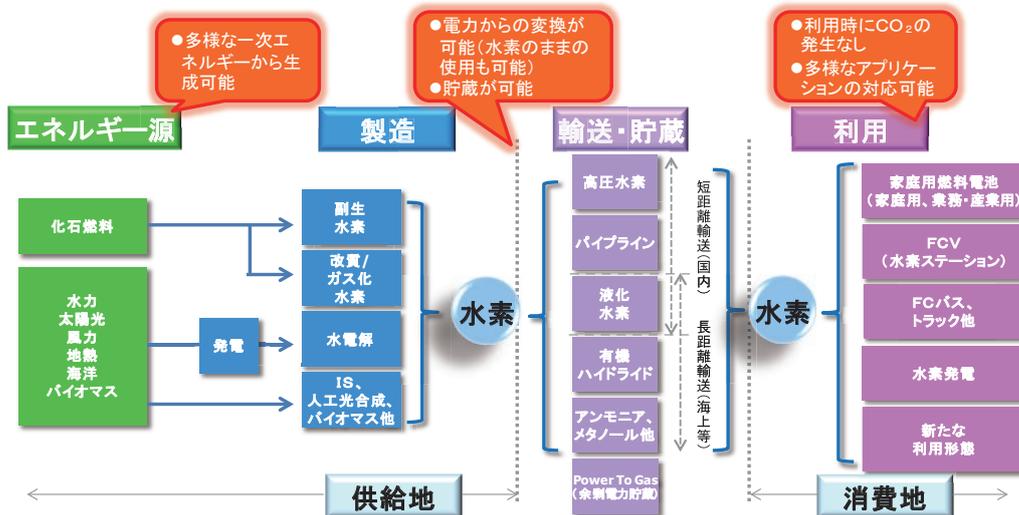


図1 水素エネルギーシステムの概要と水素の特徴
出所：NEDO 技術戦略研究センター作成(2015)

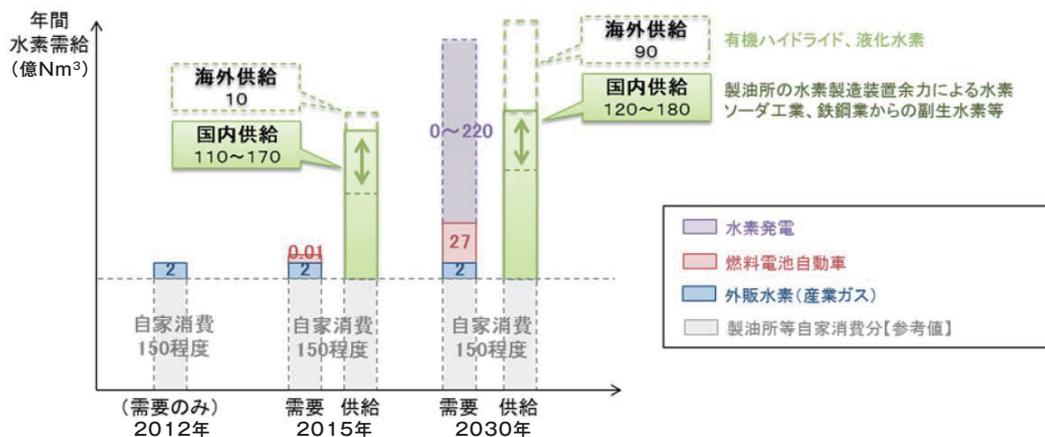


図2 水素供給の将来見通し
出所：水素需給の現状と将来見通しに関する検討 (NEDO, 2012)

水素分野の技術戦略策定に向けて

将来の水素需要の拡大には、燃料電池自動車の普及拡大（乗用車の普及、バスやタクシー等の商用車の実用化）、業務・産業用等への定置用燃料電池の用途の拡大とともに、水素発電の実用化が不可欠である。発電用に水素需要が拡大すると、国内の水素需要量も飛躍的に増大する。その場合、より安価な水素を大量に安定して製造することが課題となる。水素エネルギー源を太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー由来の電力に求める場合、水素製造プラントの高い建設コストや水素製造時のエネルギー損失は、経済性の低下に繋がることに留意する必要がある。また、受け入れ・貯蔵地点からのインフラ整備を含む輸送コストや、水素発電においては発電効率の低さも経済性を低下させる要因となる。

このように将来の水素社会の構成要素には、技術面、コスト面、インフラ面等において、いまだ多くの課題が存在しており、社会に広く受容されるか否かは、まさにこれからの取組にかかっている。LNG導入時もそうであったように、これらを一体的に解決するためには、社会構造の変化を伴うような大規模な体制整備と長期の継続的な取組が求められる。以下の章では、水素社会を構成する各要素（水素製造、輸送・貯蔵及び利用）に関する技術について、現状と特徴、及び技術開発の動向を説明する。

1-1 水素の製造技術

当面のコスト制約や生産能力を考えると、①化石燃料からの製造（水蒸気改質法、部分酸化改質法など）が実際の導入技術として優位と考えられる。ただし、化石燃料からの水素製造ではCO₂を排出することから、水素をCO₂フリーのエネルギー媒体として利用するためにはCCSとの組み合わせが必要である。

その他の水素製造技術としては、水電解によるものがあり、②アルカリ水電解、③固体高分子形水電解がすでに実用化されており、技術開発段階のものとして、④高温水蒸気電解も存在する。これらは、再生可能エネルギーの余剰電力等を利用したCO₂フリー水素の製造に適用可能な技術としての期待が大きい。②、③は、古典的技術で産業用までの規模では実用化されているが、汎用エネルギーインフラ設備として利用するためには、耐久性向上や白金電極等のコスト低減や高効率化等が課題である。近年の燃料電池や蓄電池の技術進歩も考慮すればコストは下がる可能性があるため、技術開発の意義は大きいといえる。④は、要素技術開発段階であり、セル材料の耐久性向上や低コスト化、高効率化、大型化が課題である。

また、将来技術として、⑤ISプロセス（ヨウ素と酸化硫黄を介在させる多段階プロセスで水を水素と酸素に分離）等の熱分解、⑥バイオマス利用（乾留、熱分解、微生物利用）等が考えられており、現在は基礎的な研究開発段階にある。⑤は高い反応温度（900℃）が必要であるが、機能性材料などの技術進歩により、反応温度は近い将来に600℃台まで低下する可能性も示されており、米国ではヨウ素（I）、硫黄（S）以外の物質についてスクリーニングを始めている。⑥は国内での実用化においてはバイオマスの安定供給の確立などの課題を抱えている。

1-2 水素の輸送・貯蔵技術

水素輸送技術は、国内輸送等の短距離輸送としては、①高压水素、②パイプライン、③液化水素による輸送が既に実用化されている。一方、海外からの輸入等のための海上長距離輸送としては、③液化水素、④メチルシクロヘキサン（MCH）などの有機ハイドライド、⑤アンモニア等による輸送が検討されている。③、④については現在のところ技術的に実証される段階まで到達しており、今後は、断熱材・断熱機構、大規模貯蔵システム等の開発によってコストが徐々に下がる可能性が見いだされている。⑤については体積水素密度が大きいという特長がある一方、伝統的なアンモニア製造法であるハーバー・ボッシュ法は高温高压を利用するためにコストが下がりにくいという欠点を有する。このため、高効率貯蔵システムの開発やハーバー・ボッシュ法に代わる省エネルギープロセス等に関する研究が実施されている。加えて、燃焼制御技術と排ガス処理技術の進歩により、アンモニアを水素に戻さず直接燃焼させることも可能と考えられている。なお、運搬には不向きであるが、定置用の貯蔵技術として⑥水素吸蔵合金がある。研究の歴史は長いものの、近年の急激な技術進歩は見られない。

また、近年ドイツを中心として、再生可能エネルギー由来の余剰電力を水素に変換して貯蔵する“Power to Gas”の取組が積極的に行われている^{※2}。これは、短長期的な出力変動を伴い、かつ供給地が分散している再生可能エネルギーの時間的、地理的な偏在性を吸収する手段として、電力の水素エネルギーへの変換貯蔵を目指すものであり、今後の有効な手段となり得ると期待されて

※2 ドイツ国内においては、14カ所（稼働中10カ所、検討中4カ所）、11.5 MW規模のPower to Gas（風力、太陽光等）プロジェクトが実施されている。（出所：Strategieplattform Power to Gas）

水素分野の技術戦略策定に向けて

いる。ただし、本手法を商業的に利用するためには、再生可能エネルギーからの水素製造、輸送・貯蔵、利用までを含めた技術開発・実証が必要となる。

1-3 水素の利用技術

水素の利用技術として実用化されているものとして、家庭用燃料電池や燃料電池自動車がある。家庭用燃料電池は2009年にすでに実用化され、2014年12月現在で11万台超が販売されている^{※3}。また、燃料電池自動車についても2014年12月に販売が開始された。

その他の利用技術としては、発電用燃料として水素を使う方法が検討されている。水素をガスタービンやエンジン等を用いた発電用途に利用することは、利用地におけるCO₂排出量削減やエネルギーセキュリティの観点から意義がある。水素発電が本格化すると、水素需要の中でも最大規模の需要を生み出す利用形態となる。水素を燃料とすることにより、燃焼温度が高温となるため、理論的には天然ガスによる発電よりも高効率で発電することが可能である。また、水素専焼の場合、排気にCO₂が含まれず、水蒸気が主要成分になるため、背圧を下げることができることから更なる効率向上も期待できる。現在、既に90vol%の水素リッチガス焼きガスタービン（水蒸気噴射型）の20年以上の運転実績がある^{※4}。ただし、NO_x発生等の問題により、現状では高温域での燃焼が十分に活用できないため、水素ガスタービン発電で天然ガスタービン発電並みの発電効率の実現を目指した技術開発が進められている状況にある。

※3 出所：コジエネ財団 エネファームメーカー販売台数
(http://www.ace.or.jp/web/works/works_0090.html)

※4 出所：三菱重工技報 VOL.44 NO.1: 2007「ガスタービンの燃料多様化によるCO₂削減対策」図2水素リッチガス（20vol%以上）焼きガスタービンの運転実績

水素分野の技術戦略策定に向けて

2章 水素に関する技術の置かれた状況

2-1 技術開発の動向

(1) 技術開発の動向 (国内、海外)

①国内動向

i) 国の取組

国内においては、1993年にニューサンシャイン計画の一環として水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) 計画が開始され、社会における大規模な水素利用について、再生可能エネルギーを利用した水素製造や液化水素輸送タンカーの開発、その利用技術の検討が進められた。WE-NETでは、水素を大規模かつ経済的に製造する方法として、再生可能エネルギー由来の電力を利用した固体高分子形水電解法を選択し、香川県高松市に日本発の水素ステーションを稼働させた。製造された多量の水素を高効率に輸送・貯蔵する手段としては液化水素を選択した。また、メタノールやアンモニア等の化学媒体を用いた輸送ケースについても、全体システムのご概念設計を行い、液化水素との比較・評価を実施した。

2003年以降には、水素の安全利用に関するデータの取得や安全基準の確立、水素関連機器の開発、基準化・標準化等に取り組ん

できた。現在は水素の利用拡大に向けて、家庭用の定置用燃料電池や燃料電池自動車の他に、業務・産業用の定置用燃料電池、燃料電池バス・タクシー、水素発電等の実用化を目指して技術開発を進めているところである。また、CO₂フリー水素を海外から輸入する将来を想定した、水素の製造、輸送・貯蔵に関する技術開発等を進めている。

燃料電池自動車に関する取組としては、経済産業省とNEDOは水素インフラと燃料電池自動車等の実証研究として、2002年度から水素・燃料電池実証プロジェクト (Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project、略称「JHFC プロジェクト」) を実施し、実測データの取得と実用化のための課題 (技術、コスト、安全性など) を抽出するとともに、他の関連プロジェクトに反映させた。2011年度からは「JHFC プロジェクト」の第3期として「地域水素供給・インフラ技術社会実証事業」を開始し、燃料電池自動車の一般ユーザへの普及開始に向けて、実使用に近い条件での燃料電池自動車及び水素供給インフラに関する技術実証及び商用ステーションの総合実証の位置付けとして、ユーザに対する利便性、耐久性及び実用性を含めた燃料電池自動車及び水素供給インフラの事業成り立ち、社会一般の水素エネルギーに関する受容性向上に向けた検討を行った。その成果として、市街地に70MPa商用モデルステーションを3ヶ所建設し、用地選定、設計、建設から運用までの一連の総合実証を実施したほか、3分間で満充填 (5kg) という実用化時に求められる性能を確立した。

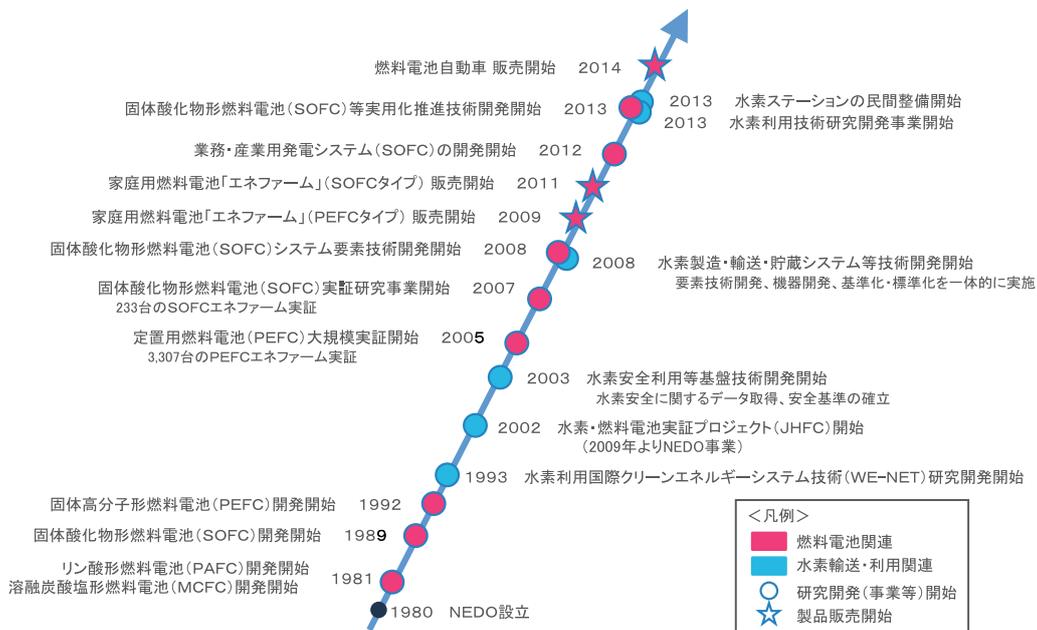


図3 NEDOの水素・燃料電池に関する技術開発の取組

出所：NEDO作成(2015)

水素分野の技術戦略策定に向けて

ii) 民間企業の取組

民間企業では、川崎重工業や千代田化工建設が水素サプライチェーンを検討している。川崎重工業では、豪州の褐炭を原料として水素を製造し、豪州連邦政府及びビクトリア州政府が推進しているCO₂分離・回収・貯留ハブプロジェクト（カーボンネット）を利用して、CO₂フリーの水素を国内に輸入することが検討されている。今後、設備機器の大型化や液化効率の向上、効率の良い水素輸送船による

大量輸送等によってコストの低減が期待される。千代田化工建設では、有機ハイドライドによる水素の大量貯蔵・輸送システムが検討されている。海外の副生水素（CO₂はCO₂-EORによって処理）をトルエンと反応させたメチルシクロヘキサンとして海上輸送し、日本国内で脱水素することによって水素に戻すというシステムである。どちらの検討も実用化に近づきつつあり、必要な技術開発が進められている。

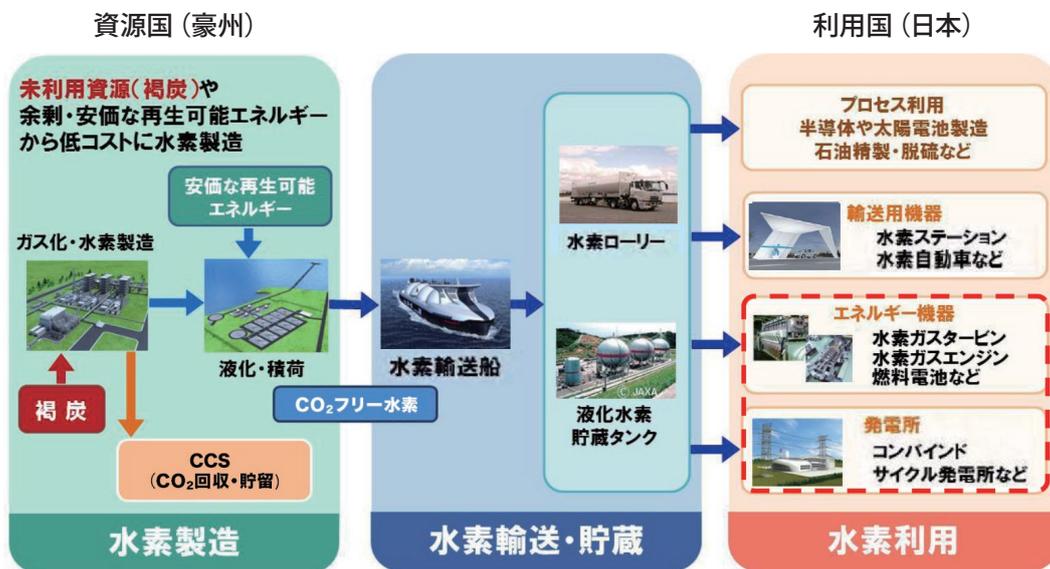


図4 川崎重工業 水素サプライチェーン構想
出所：NEDOフォーラム講演資料（川崎重工業，2015）

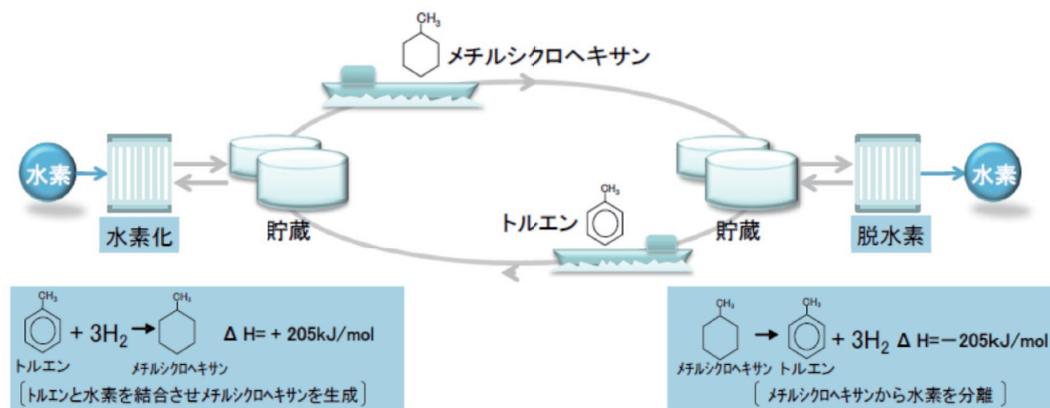


図5 千代田化工建設 水素サプライチェーン構想
出所：水素社会の実現に向けた東京戦略会議講演資料（千代田化工建設，2014）

水素分野の技術戦略策定に向けて

②海外動向

海外では、1986年に発足したThe Euro-Quebec hydro-hydrogen pilot project (EQHHPP) にて、カナダにおいて水力発電(100MW)による水素を年間で16000t(約1.8億Nm³)製造し、欧州へ液化水素、メチルシクロヘキサン、アンモニアによって輸送することを目的とした計画が存在した。結果的には大量輸送は資金問題などにより実現しなかったが、1994年～1998年まで水素自動車のデモンストレーションとして、ドイツのErlangenにおいて水素バスが稼働されるなどの成果を上げている。EQHHPPでは、メチルシクロヘキサンからの脱水素反応も効率の高い水素キャリアとして輸送手段の有力な選択肢の一つであったが、有効な脱水素触媒が開発されなかったことなどから液化水素が輸送形態として選択された^{※5}。また、ドイツとサウジアラビア政府は1986年にHydrogen from SOLAR energy (HYSOLAR) プロジェクトを発足させて、太陽光による水素製造、水素エネルギー輸送システムの研究開発を行い、1995年にプロジェクトを終了した。

現在の水素に関するプロジェクトとしては、ドイツにおいてPower to Gasプロジェクトが実施されている他、石炭ガス化複合発電(IGCC: Integrated Coal Gasification Combined Cycle)とCCSの組み合わせによる高効率で低炭素な石炭火力発電に関する取組が進められており、その一環として水素燃焼のガスタービンの開発が進められている。具体的には、Enel(イタリア)にて将来的にIGCCとCCSを組み合わせた発電を行うことを念頭に2009年に水素発電のデモプラント実証事業を開始した。これは、周辺の石油化学工場で発生する副生水素を燃料とする水素発電によって約12MWを発電し、その際に発生した蒸気を石炭火力プラントに送って4MWを発電する合計16MWのガスタービンコンバインドサイクル発電(GTCC)の実証事業であったが、現在は政府支援の終了に伴い運転が停止されている。また、米国では、石炭火力発電所を新設する場合には、CCSを行わなければ達成困難な水準の二酸化炭素排出基準が義務づけられる等、厳しい環境規制が検討されている。そのため、IGCCとCCSを組み合わせた発電システムが将来的に有望視されている。その一環として、GE社は、DOEのAdvanced Energy Systems/Hydrogen Turbineプログラムに参画し、水素ガスタービンの研究開発を行っている。当該プロジェクトでは、2020年頃までに1450℃級、2035年頃までに1700℃級の水素タービンの開発・実証を予定している。

燃料電池自動車に関する取組は、米国や欧州等で進められてい

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

※5:「有機ハイドライドを用いた水素の大量輸送の可能性シナリオに関する調査報告書」(財団法人 石油産業活性化センター, 2010)

2-2 市場規模(国内、海外)

図6に示すように、燃料電池関連を含めた機器・インフラ市場は、国内で2030年に1兆円程度、2050年に8兆円程度に拡大すると試算されている。また、世界市場では、2030年に約40兆円、2050年に約160兆円との予測もある。

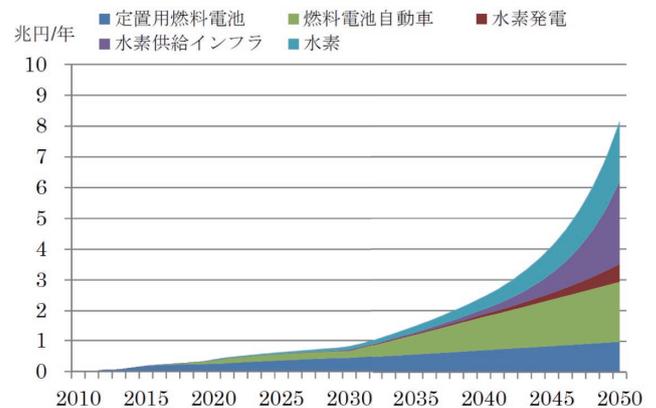


図6 我が国における水素・燃料電池関連の市場規模予測
出所: 水素・燃料電池戦略ロードマップ(経済産業省, 2014)

水素分野の技術戦略策定に向けて

2-3 産業競争力（諸外国との比較）

(1) 主な推進企業・機関等（国内、海外）

① 製造技術

水素製造技術の区分、及びそれらの主な推進企業・機関等を表1に示す。アルカリ水電解については、日本企業では、旭化成、日立造船等が技術開発に取り組んでいる。固体高分子形水電解は日本企業にとって実績のある技術であり、固体高分子形燃料電池の技術を取り入れることで、更なる高性能化と低コスト化を実現できると期待されている。研究開発中の技術である高温水蒸気電解については、

既に商品化された家庭用燃料電池の技術や、熱のカスケード利用のために開発が行われている燃料電池コンバインドサイクルの技術を転用することができれば、日本企業が世界に先駆けて実用化できる可能性がある。

電解式水素製造技術について、特許庁が2013（平成25）年度に実施した特許出願技術動向調査によると、水電解技術については、固体高分子形水電解の分野では日本国籍出願人の出願が最も多く、アルカリ水電解、及び水蒸気電解では欧州国籍出願人の出願が最も多くなっている（図7～9）。

表1 水素製造技術の主な推進企業・機関等

【水素製造技術】	国内	海外
化石燃料改質	<ul style="list-style-type: none"> ・電源開発 ・IHI 	
アルカリ水電解	<ul style="list-style-type: none"> ・旭化成 ・日立造船 	<ul style="list-style-type: none"> ・McPhy Energy (フランス) ・NEL Hydrogen (ノルウェー) ・Hydrogenics (カナダ)
固体高分子形水電解	<ul style="list-style-type: none"> ・神鋼環境ソリューション ・ジーエス・ユアサ パワーサプライ ・日立造船 	<ul style="list-style-type: none"> ・Proton Energy Systems (米国)
高温水蒸気電解	<ul style="list-style-type: none"> ・東芝 	—

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成(2015)

水素分野の技術戦略策定に向けて

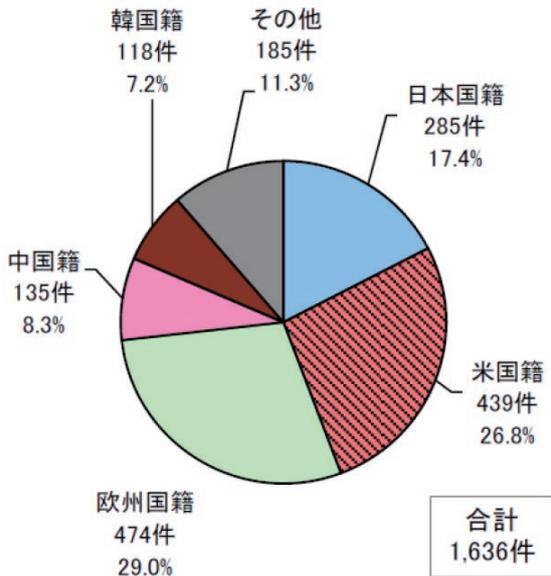


図7
日米欧中韓への出願における
アルカリ水電解に関する出願人国籍別の出願件数・比率
(出願年(優先権主張年): 2001~2011年)

出所: 平成25年度特許出願技術動向調査報告書
電解式水素製造及びその周辺技術(特許庁, 2014)

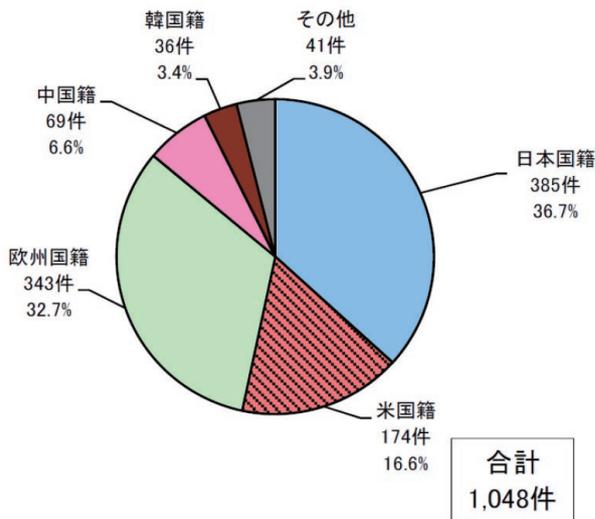


図8
日米欧中韓への出願における
固体高分子形水電解に関する出願人国籍別の出願件数・比率
(出願年(優先権主張年): 2001~2011年)

出所: 平成25年度特許出願技術動向調査報告書
電解式水素製造及びその周辺技術(特許庁, 2014)

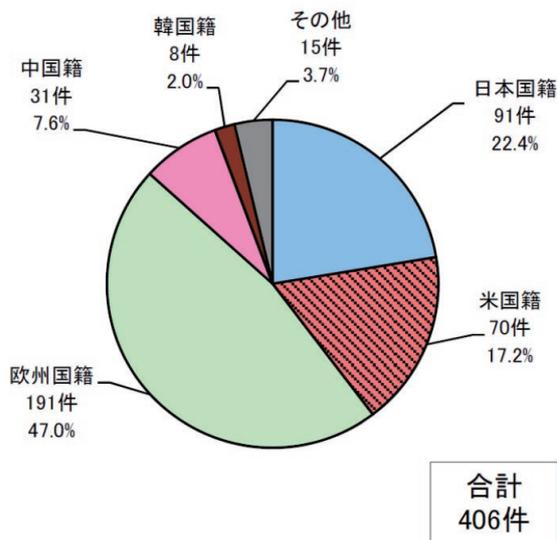


図9
日米欧中韓への出願における
水蒸気電解に関する出願人国籍別の出願件数・比率
(出願年(優先権主張年): 2001~2011年)

出所: 平成25年度特許出願技術動向調査報告書
電解式水素製造及びその周辺技術(特許庁, 2014)

水素分野の技術戦略策定に向けて

②海上長距離輸送・貯蔵技術

ここでは将来の水素発電需要への供給を想定し、海外から我が国への水素輸入の手段となり得る海上長距離輸送・貯蔵技術について記す。表2は、各技術の区分、及びそれらの主な推進企業・機関等を示したものである。液化水素、有機ハイドライドによる海外からの水素の長距離輸送・貯蔵技術については、海外でも商用化の例が無い中で、川崎重工業、千代田化工建設といった日本企業が世界に先行して技術開発を進めており、我が国が技術的優位性をもつ

ているといえる。

特許庁が2013（平成25）年度に実施した特許出願技術動向調査によると、水素貯蔵システムのうち、吸蔵水素、圧縮水素、有機ハイドライドに関する特許では、日本国籍出願人の出願件数が最も多い。中でも、常温・常圧で水素を輸送できることから注目を集めている有機ハイドライドの特許においては、日本国籍出願人の比率は特に高い（図10）。

表2 長距離水素輸送・貯蔵技術の主な推進企業・機関等

【水素輸送・貯蔵技術】	国内	海外
液化水素	・川崎重工業 ・岩谷産業	—
有機ハイドライド	・千代田化工建設 ・JX日鉱日石エネルギー ・横浜国立大学	—
アンモニア	・産業技術総合研究所 ・東北大学 ・広島大学	—

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成(2015)

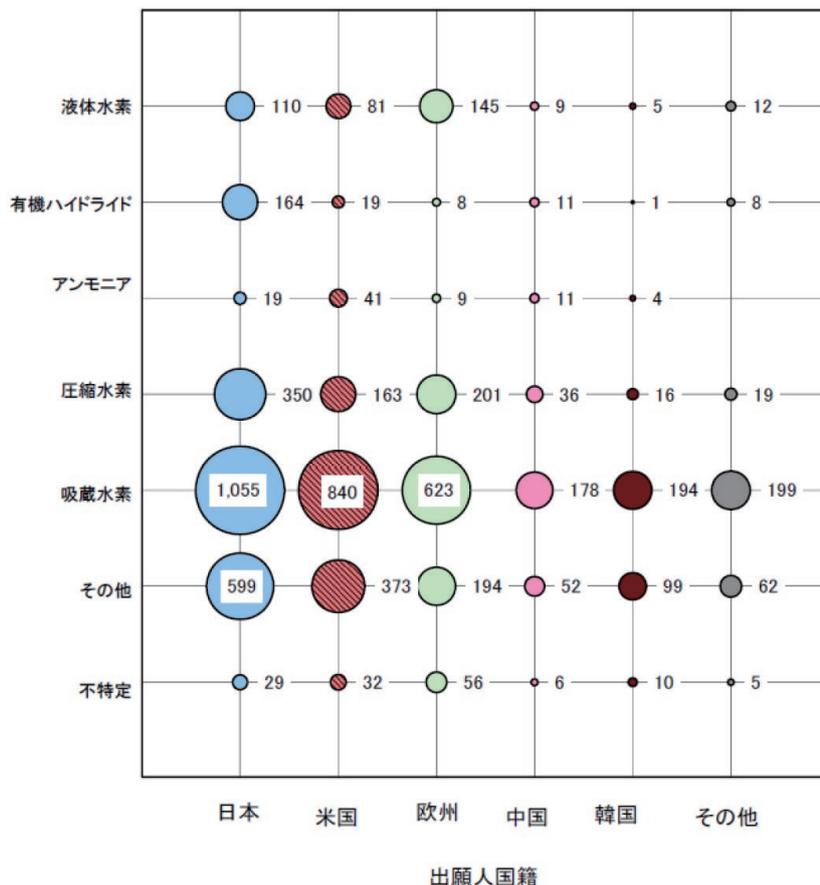


図10 日米欧中韓への出願における水素貯蔵システムに関する構成別出願人国籍別の技術区分付与件数 (出願年(優先権主張年): 2001~2011年)
出所：平成25年度特許出願技術動向調査報告書 電解式水素製造及びその周辺技術(特許庁, 2014)

水素分野の技術戦略策定に向けて

③利用技術

表3は水素利用技術の区分、及びそれらの主な推進企業・機関等を示したものである。将来の実用化が期待される水素発電については、Enel（イタリア）がGE製ガスタービン（水・蒸気噴射あり）を用いた水素専焼発電の実証実験を行った実績はあるが、国内、海外ともに商用発電を実施している国はない。日本企業においては、川崎重工業、三菱日立パワーシステムズ等が水素リッチガスに対応したガスタービンの技術開発を進めている。

表3 水素利用技術の主な推進企業・機関等

【水素利用】	国内	海外
定置用燃料電池 （家庭用）	<ul style="list-style-type: none"> 東京ガス、大阪ガス パナソニック、東芝燃料電池システム(PEFC) アイシン精機、京セラ、長府製作所(SOFC) 	<ul style="list-style-type: none"> Baxi Innotech(ドイツ、PEFC) CFCL(オーストラリア、SOFC) Hexis(ドイツ、SOFC) Vaillant(ドイツ、SOFC)
定置用燃料電池 （業務・産業用）	<ul style="list-style-type: none"> 三浦工業(SOFC) 三菱日立パワーシステムズ(SOFC) 富士電機(PAFC) 	<ul style="list-style-type: none"> Bloom Energy(米国、SOFC) Ballard Power Systems(カナダ、SOFC)
燃料電池自動車	<ul style="list-style-type: none"> トヨタ自動車 本田技研工業 日産自動車 	<ul style="list-style-type: none"> BMW(ドイツ、トヨタ自動車と協力) GM(ドイツ、本田技研工業と協力) ダイムラー(ドイツ、日産自動車と協力) Hyundai(韓国)
水素ステーション	<ul style="list-style-type: none"> 神戸製鋼所(水素圧縮機) 大陽日酸(プレクーラー) 日本製鋼所(蓄圧機) 三菱化工機(水素製造装置) 	<ul style="list-style-type: none"> Linde(ドイツ、コンプレッサー)
水素発電	<ul style="list-style-type: none"> 川崎重工業(自家発電用) 三菱日立パワーシステムズ(発電事業用) 東芝(発電事業用) 	<ul style="list-style-type: none"> Enel(イタリア、発電事業用) GE(米国、発電事業用) Siemens(ドイツ、発電事業用)

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成(2015)

水素分野の技術戦略策定に向けて

2-4 水素エネルギー利用の意義

(1) エネルギー供給源の多様化に貢献する

水素は、副生水素、原油随伴ガス、褐炭といった未利用エネルギーや、再生可能エネルギーを含む多様な一次エネルギー源から製造することができるエネルギー媒体である。しかも、こうした原料となる一次エネルギー源を地政学的リスクの低い地域から安価に調達することも検討されていることから、供給安定性（エネルギーセキュリティ）向上のための手段としての期待が大きい。

また、ガソリンの代替として水素を活用することで、運輸部門における燃料多様化も見込める。

(2) 環境負荷の低減に貢献する

燃料電池、水素燃焼といった利用技術の種類によらず、利用段階でCO₂を排出しないことは水素エネルギー利用の大きな利点である。このため、CCSを組み合わせた化石燃料改質、又は再生可能エネルギーを利用した製造を行った水素を利用する場合には、水素はCO₂排出量を大幅に削減できる（更にはCO₂フリーの）エネルギー媒体となる。

(3) エネルギー効率の向上に貢献する

固体高分子形燃料電池（PEFC）の発電効率は35～60%であるが、電気と熱を合わせた総合エネルギー効率は80%を超える。発電と熱回収を組み合わせたシステムによって高効率でのエネルギー利用が可能となる点は、水素エネルギー利用の利点である。

(4) エネルギーの有効利用を促進する

炭化水素系燃料から転換した水素を燃焼させる場合には、原料となった炭化水素を直接燃焼する場合と比較して最終的に利用可能な熱量が大きくなる。これは、炭化水素を直接燃焼させる場合には、燃焼過程においてC-H結合（結合エネルギー：約100kcal/mol）を解離させる反応（吸熱反応）が必要になり、燃焼熱の一部がC-Hの解離エネルギーとして消費されることによるものである。

炭化水素系燃料の一種であるメタノールは、200℃程度の比較的低温の産業排熱を用いた水蒸気改質によって、水素と一酸化炭素、又は水素と二酸化炭素への転換が可能であり、転換後の水素を含む燃料において利用可能な熱量は原料となったメタノールよりも2割程度高くなる。これは、種々の燃料を水素に転換して利用する社会

では、炭化水素系の燃料を水素に転換するプロセスにおいて、産業排熱等のもつ熱エネルギーを水素の燃焼熱（化学エネルギー）に変換して利用できることを意味している。このように、産業排熱等の未利用エネルギーの有効利用を促進できる点は水素エネルギー利用の大きな利点となる。

2-5 水素エネルギーの政策的位置づけ

(1) エネルギー基本計画

2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画には、「“水素社会”の実現に向けた取組の加速」として、水素は、将来の二次エネルギーの中心的役割を担うことが期待されると記載され、「“水素社会”を実現していくためには、水素の製造から貯蔵・輸送、そして利用にいたるサプライチェーン全体を俯瞰した戦略の下、様々な技術的可能性の中から、安全性、利便性、経済性及び環境性能の高い技術が選び抜かれていくような厚みのある多様な技術開発や低コスト化を推進することが重要である。水素の本格的な利活用に向けては、現在の電力供給体制や石油製品供給体制に相当する、社会構造の変化を伴うような大規模な体制整備が必要であり、そのための取組を戦略的に進める。」と明記されている。

(2) 水素・燃料電池戦略ロードマップ

2014年6月には、経済産業省資源エネルギー庁が事務局を務めた水素・燃料電池協議会より「水素・燃料電池戦略ロードマップ」が発表され、水素社会の実現に向けた方向性が示された。その中では、3つのステップが示されており、最初のステップが燃料電池車の普及、次のステップが水素発電の普及、第3のステップが再生可能エネルギーを活用する水素製造の普及である。

(3) 長期エネルギー需給見通し

2015年7月に決定された「長期エネルギー需給見通し」では、エネルギー基本計画に示された基本的な方針に従って各分野の取組を進めることが記載されており、省エネルギー技術の一環として、「家庭用燃料電池（エネファーム）や燃料電池自動車といった水素関連技術の活用も推進する。」と明記されている。また、2030年度以降を見据えて進める取組の一つとして、水素社会の実現に向けた技術開発・利用を推進することが明記されている。

水素分野の技術戦略策定に向けて

3章 水素分野の技術課題

3-1 水素の製造技術

(1) 技術の体系

①化石燃料改質

炭化水素系の燃料を高温(800℃)で水蒸気と反応させることでCO₂と水素を製造する水蒸気改質や、燃料に空気を混合して燃焼させ、水素と一酸化炭素を生成する部分酸化改質等がある。

②アルカリ水電解

水酸化カリウム水溶液を電気分解して水素と酸素を製造する。簡単な装置構成で、古くから実用化されており、大規模な商用プラントの実績がある。加圧システムの開発も進んでいる。

③固体高分子形水電解

固体高分子膜を利用した電解セルで水を電気分解することによって水素を製造する。小型化が可能であり、腐食の問題がない。触媒に白金などの貴金属を用いる必要があることから、コストが高くなる。

④高温水蒸気電解

セラミックスなどを用いた高温電解セルを利用し、約700℃の高温水蒸気を電気分解して水素を製造する。研究開発段階であるが、熱を併せて利用可能な唯一の水電解方式である。

【以下将来技術】

⑤ISプロセス

水を熱により直接水素と酸素に分解しようとする4000℃以上の超高温が必要となるが、ヨウ素(I)と硫黄(S)の化合物を用いたISプロセスでは、複数の化学反応を組み合わせることにより、1000℃以下での熱分解による水素製造が可能である。

⑥バイオマス利用

下水処理場で発生する下水汚泥や生ゴミ、木質ペレット等から水素を製造する。生成方法としては、メタンを介して水素を製造する方法や、発酵により直接水素を得る方法がある。

(2) 技術課題

①化石燃料改質

実用段階(国内で多数導入済み)である。ただし、発生する水素は、95～97%の純度のため、燃料電池や産業用途に用いるために

は、PSA(圧力スイング吸着法)等による精製も必要となる。

②アルカリ水電解

電解液による腐食や隔膜の耐久性向上、従来のアスベスト隔膜の優れた耐久性に代替可能な非アスベスト隔膜(現状の寿命は5年程度)の開発、作動温度に起因するエネルギー変換効率の向上、大型化による隔膜製造技術の確立等が必要である。

③固体高分子形水電解

白金等の貴金属使用量低減や貴金属レス化等が課題である。

④高温水蒸気電解

セル材料の耐久性向上や低コスト化、高効率化、大型化等が課題である。

【以下将来技術】

⑤ISプロセス

900℃程度の熱源での水素製造が可能と期待されているが、機能性材料等の技術進歩により、近い将来に600℃台まで低下する可能性も示されており、米国では、ヨウ素(I)、硫黄(S)以外の物質についてのスクリーニングが始められているが、要素技術開発の段階であり、実用化には多くの技術開発課題がある。

⑥バイオマス利用

原料の収集コストの低コスト化が必要である。また、バイオマスの物量そのものの制約があるため、原料の安定供給の確立も課題である。

(3) 利用形態と技術の将来見通しから見る水素製造方法の選択

上記のように水素製造方法は複数存在し、それぞれに特徴があることから、最終的な水素の用途等によって、異なった製造方法が選択されると想定される。

①化石燃料改質

水電解による水素製造と比較して大型化が可能な既存技術であり、安価な水素を大量に安定的に必要な水素発電には、化石燃料改質によって製造された水素が利用されると思われる。将来的にCO₂制約が大きくなった場合には、CCS等との組み合わせが必要となる。

②アルカリ水電解

実用化の実績もあるとともに、固体高分子形水電解に比べて大型化が望める。

③固体高分子形水電解

アルカリ水電解と比較して発電効率が高いが、大型化に向かないため、オンサイト水素ステーション等に設置し、燃料電池自動車への

水素分野の技術戦略策定に向けて

水素供給に適用することが考えられる。

④高温水蒸気電解

実用化すれば、アルカリ水電解、固体高分子形水電解と比較して水素製造原単位が最も低くなる。高温水蒸気電解では高温（約700℃）の熱を必要とするため、これにSOFCの排熱を利用し、かつ製造した水素をSOFCの燃料として利用する方法等が検討されている。

(4) 各製造方法のコスト比較

水素の製造コストに一番影響を与えるのは、それぞれの原料価格であり、化石燃料改質であれば、原料となる化石燃料価格によって、水素のコストが決まる。さらに、CCS等を組み合わせる場合には、それらのコストも加味する必要がある。

また、水電解方式で比較した場合、水素製造原単位が一番小さくなる可能性のある高温水蒸気電解が実用化すれば、水素製造コストが最も安価となるが、原料となる電力コスト（CO₂フリー電力を原料とする場合には、CCS等のコストを含む）及び高温熱源のコストが全体のコストを左右する。それゆえ、例えば、系統に戻入できない安価な余剰再生可能エネルギー電力等を使用すれば、低コストに水素を製造することが可能となる。

3 -2 水素の輸送・貯蔵技術 (国内輸送、海外からの水素輸入含む)

(1) 技術の体系

①高圧水素

既に実用化されており、国内での水素流通に最も活用されている。

②パイプライン

コンビナート等における産業用水素の輸送手段として用いられており、海外でも大規模かつ長距離の産業用水素輸送が行われている。

③液化水素

水素を-253℃まで冷却することにより液化させ、輸送・貯蔵を行う。気体の状態と比較して体積が約800分の1となるため、液化水素の形で輸送・貯蔵すると、気体水素に比べて輸送効率が高くなる。国内では既に産業用途向けのタンクローリー輸送として実用化されている。

④有機ハイドライド

水素をトルエンと反応させ、メチルシクロヘキサン（MCH）として輸送・貯蔵し、需要地での脱水素反応により水素を取り出して利用する。常圧の水素気体に比べて約500分の1の体積にて輸送が可能とな

ることに加え、常温・常圧での輸送・貯蔵が可能であることから、既存の輸送・貯蔵手段にそのまま応用可能であるという利点を有する。

【以下将来技術】

⑤アンモニア

水素と空気中の窒素を高温・高圧下で反応させるハーバー・ボッシュ法にて合成したアンモニアを輸送・貯蔵し、需要地での脱水素反応により水素を利用する。なお、脱水素反応を介さない、アンモニアの直接燃焼に関する技術開発も行われている。

⑥水素吸蔵合金

体積あたりでは最も多くの水素を貯蔵することが可能な技術の一つである。ただし、合金自体の重量があるため、現段階での輸送用途への適用は限定的である。

(2) 技術課題

①高圧水素

水素圧縮機や高圧で貯蔵するタンク等の低コスト化、圧縮動力削減による所要電力の省エネルギー化が必要である。

②パイプライン

水素パイプラインの設計、施工、維持管理に係る安全確保に向けた諸対応が必要である。

③液化水素

一定の割合で気化（ボイルオフ）するため、輸送・貯蔵用の容器の技術開発などにより、これを減少させることが課題である。また、水素液化機の損失は現状で約30%とされており、液化効率の向上が期待される。

④有機ハイドライド

脱水素時に高温（400℃程度）の熱を要することから、需要地での熱源の確保が必要である。また、反応器の大型化に向けた技術開発や、水素キャリアとしての利用を想定した各種規制についての対応が必要である。

【以下将来技術】

⑤アンモニア

アンモニアは既に肥料として流通しており、取扱方法は既に法令により定められているが、強アルカリ性で刺激臭の強い物質であることから、住民の安全性確保や理解の浸透が課題である。また、アンモニア製造に当たっては、外部からの熱源、圧力が必要となりコストが増加するため、低コストのアンモニア合成方法の開発、水素を取り出すためのアンモニア分解を容易とする手法の開発が必要である。

水素分野の技術戦略策定に向けて

⑥水素吸蔵合金

重量あたりの水素貯蔵量をより多くすることが課題である。

(3) 利用形態と技術の将来見通しから見る水素輸送・貯蔵方法の選択

【国内輸送】

①高圧水素・液化水素

当面、国内の水素製造プラントからオフサイト水素ステーションへの水素供給については、高圧水素又は液化水素によって行われると考えられる。

②パイプライン

近傍の製鉄所等で生じる副生水素をオフサイト水素ステーションや定置用燃料電池に供給するなど、水素源からの距離と需要の関係に応じて、パイプラインで水素を輸送するケースも考えられる。

【長距離輸送】

③液化水素、④有機ハイドライド

現在、水素の輸送に使われている高圧水素よりも高密度に効率よく輸送可能なため、(2)に記した技術課題等が克服されれば、選択される方法と考えられる。特にエネルギー損失の大きい水素液化(液化水素の場合)や脱水素(有機ハイドライドの場合)の部分でどれだけ高効率化、低コスト化できるかが鍵となる。

3 -3 水素の利用技術

(1) 技術の体系

水素の利用方法には、燃料電池のように水素の有する化学エネルギーを直接利用する方法と、タービン、エンジン等の水素の燃焼による方法がある。

①定置用燃料電池(家庭用)

都市ガス、LPガスから取り出した水素と、空気中の酸素を化学反応させて電気と熱を発生させるコジェネレーションシステムである。2009年に実用化されており、固体高分子形(PEFC)と固体酸化物形(SOFC)の2種類が現在発売されている。1機あたりの定格電力出力は、0.7～1kW程度である。

②定置用燃料電池(業務・産業用)

数kW～数百kW規模の燃料電池であり、我が国では1998年にリン酸形燃料電池(PAFC)が業務・産業用として初めて商用化された。より発電効率が高いSOFCについて、技術開発が進められている。

③燃料電池自動車

燃料電池で発電した電力を利用したモータ駆動の自動車であり、走行中は水しか排出しない。既存のガソリン車と同程度の機能を持ち、実用化水準を達成した。2014年12月より販売が開始されている。

④水素ステーション

圧縮機、高圧蓄圧機、プレクーラー、ディスベンサ等の機器から構成され、70MPaシステムにおいては、燃料電池自動車への水素充填(5kg)を約3分間で完了する。

⑤水素発電

水素を燃料として燃焼させ、タービンにより動力を得て発電機により発電する。コンバインドサイクルであれば、水素純度は燃料電池自動車用(一般に、99.99 vol %以上)ほど高い必要は無い。水素に加えて天然ガス等の他燃料を使用する混焼発電と、水素のみを燃焼する水素専焼発電の両方が考えられる。

(2) 技術課題

①定置用燃料電池(家庭用)

燃料電池本体及び周辺機器の低コスト化、耐久性の向上を図る必要がある。

②定置用燃料電池(業務・産業用)

早期実用化に向けた実証が必要である。

③燃料電池自動車

初期段階では電解質膜のコストが、普及段階では触媒やセパレータのコストが、それぞれ大きな割合を占めると想定されており、量産化後を見通しつつ、これらの部材を中心に低コスト化を進めることが必要である。

④水素ステーション

圧縮機、高圧蓄圧機、プレクーラー、ディスベンサ等それぞれの低コスト化に向けた開発や低コスト材料を使用できるようにするためのデータ取得等、コスト低減に資する技術開発が必要である。

⑤水素発電

水素は天然ガス等の既存の燃料に比べると、体積あたりの発熱量が低く燃焼速度が速い、断熱火炎温度が高い等の特性を持つため、燃焼制御、材料の高温耐性等の課題を解決する必要がある。また、断熱火炎温度が高いことから一般にNO_x発生量が多いため、これを低減させるための燃焼技術開発、及びガスタービンの高効率化を図るための技術開発が必要である。

水素分野の技術戦略策定に向けて

3-4 水素発電における各輸送・貯蔵方法のコスト比較

1993年にNEDOで開始された水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(WE-NET)計画のサブタスク3「全体システム概念設計」において、水素燃焼タービンへの燃料輸送手段として液化水素、メタノール、アンモニアを用いる各ケースについてシステム設計を行い、エネルギーバランス及び水素燃焼タービン発電コストを指標とする経済性評価を行った。また、計画においては、海外で水力発電を行い、その電力を固体高分子形水電解によって水素に変換した後に、需要地に輸送・貯蔵し、最終的に水素燃焼タービンにより電力を再生・利用するシステム(図11)が想定された。前提条件は、輸送距離5000km、水素燃焼タービン容量100MW、水力発電電力価格2円/kWhとした。

評価の結果、水素の製造及び輸送・貯蔵過程で液化水素29.6%、メタノール38.4%、アンモニア31.3%のエネルギー損失(表4)が見込まれ、CIFコストは液化水素32.2円/Nm³、メタノール(CO₂回収なし)21.9円/Nm³、アンモニア27.3円/Nm³となった。また、水素燃焼タービンでの発電コストは、液化水素32.6円/kWh、メタノール(CO₂回収あり)30.8円/kWh、メタノール(CO₂回収なし)24.7円/kWh、アンモニア32.9円/kWhとなった(表5)。

現在、NEDOにおいて、液化水素、有機ハイドライド、メタン、アンモニア等を対象として、水素の製造、輸送・貯蔵利活用につながる一連のバリューチェーンを想定した導入シナリオを検討しており、コスト分析等を実施している。WE-NETプロジェクト実施当時よりも技術が進展していることから、WE-NETの検討結果については再度精査する必要があると考えられる。



図11 液化水素、メタノール、アンモニアシステムの構成
出所：WE-NET水素エネルギーシンポジウム講演予稿集(NEDO,1999)

水素分野の技術戦略策定に向けて

表4 エネルギー収支の比較

	項目	液体水素システム	メタノールシステム	アンモニアシステム
条件	タービン出力(MW)	1,000	1,000	1,000
	輸送距離(km)	5,000	5,000	5,000
	水電解効率(%)	90	85	86
入力	水力発電エネルギー	12,477(100)	9,041(52.7)	16,256(98.3)
	石炭エネルギー	—	8,123(47.3)	—
	タンカー燃料(C重油)	—	—	257(1.7)
	入力計	12,477(100)	17,163(100.0)	16,531(100.0)
損失	水素製造損失	986(7.9)	1,258(7.3)	2,100(12.8)
	石炭ガス化損失	—	1,044(8.1)	—
	窒素製造損失	—	—	334(2.0)
	液化損失	2,465(19.8)	—	—
	合成損失	—	4,019(23.4)	2,457(14.9)
	輸送中損失	87(0.7)	271(1.6)	257(1.7)
	その他損失	150(1.2)	—	—
	小計	3,688(29.6)	6,593(38.4)	5,176(31.3)
到着エネルギー		8,789(70.4)	10,570(61.6)	11,355(68.7)
改質(分解)・精製損失		—	1,781(10.4)	2,566(15.5)
水素エネルギー		8,789(70.4)	8,789(51.2)	8,789(53.2)
タービン熱損失		3,515(28.2)	3,516(20.5)	3,515(21.3)
発電エネルギー(発電端)		5,274(42.3)	5,274(30.7)	5,274(31.9)
所内電力損失		570(4.5)	1,012(5.9)	1,487(9.0)
発電エネルギー(送電端)		4,704(37.7)	4,262(24.8)	3,787(22.9)

出所：WE-NET 水素エネルギーシンポジウム講演予稿集 (NEDO, 1999)

表5 WE-NETシステム発電コスト比較

	液体水素	メタノール	アンモニア
前提条件	<ul style="list-style-type: none"> 水素燃焼タービン容量 1000MW 水力発電電力価格 ¥2/kWh 輸送距離 5000km 		
発電コスト	¥32.6/kWh	¥30.8/kWh (CO ₂ 回収) ¥24.7/kWh (CO ₂ 回収なし)	¥32.9/kWh
水素コスト(CIF)	¥32.2/Nm ³	¥21.9/Nm ³ (CO ₂ 回収なし)	¥27.3/Nm ³

出所：WE-NET 水素エネルギーシンポジウム講演予稿集 (NEDO, 1999)

4章 おわりに

水素は様々なエネルギー源から製造可能な二次エネルギー媒体であり、利用方法は水素のままの燃料電池への使用の他、発電・熱利用など多様であるとともに、再生可能エネルギー由来の電力、又はCCSと組み合わせた化石燃料から製造する場合に、CO₂を排出しない製造、利用が可能である。また、長距離輸送・貯蔵も技術的には可能であり、さらに、余剰電力を水素に変換して長期間・多量に貯蔵することもできる。

水素利用技術の面では、現在まで、水素の用途には主に家庭用の燃料電池や燃料電池自動車を実現しているが、これらに必要な水素の需要総量は、化石燃料改質によって得られる水素や、石油精製、製鉄等の製造プロセスから生じる副生水素で賄える程度と見込まれる。将来の水素需要の拡大には、水素発電の実用化が不可欠である。発電用に水素需要が拡大すると、国内の水素需要量も飛躍的に増大する。その場合、国内だけでなく、海外の低質石炭や海外の再生可能エネルギーや副生水素活用による水素供給が重要になる。さらに、CO₂フリー水素を経済性がある状態で多量に安定して製造することも重要となる。また、水素を利用することは、エネルギーセキュリティの向上、環境負荷低減、エネルギーの有効利用に貢献するという点で重要であり、水素社会の構築は大きな目標となる。

ただし、燃料電池自動車や水素発電等の水素利用技術が普及するためには、競合する技術に対して優位性を持つ必要がある。経済産業省の「水素・燃料電池戦略ロードマップ」では、燃料電池自動車用の水素価格について、2020年頃にハイブリッド車の燃料代と同等以下となること、水素発電用の水素コストについて、2020年代後半にCIFコスト30円/Nm³程度^{*6}を下回ることを目指すとしている。これらを達成するためには、社会構造の変化を伴うような大規模な体制整備と長期の継続的な技術開発の取組が求められる。水素分野における我が国の技術開発は、これまで家庭用及び車載用の燃料電池を重点的に進められ、実用化段階に達するとともに世界における競争優位の確立といった一定の成果を挙げており、水素社会の実現に対する期待が増大している。

水素社会の実現においては、現在利用されている家庭用燃料電池や燃料電池自動車の他にバス、トラック、フォークリフト、水素発電等に水素利用範囲を拡げ、水素需要を拡大していくことが重要であ

る。また、拡大した水素需要に対応するため、液化水素や有機ハイドライド等による長距離大量輸送を可能とすることが望まれる。更に、水素の製造に関しては、上述のように、将来的には化石燃料由来ではないCO₂フリー水素を製造する必要がある。CO₂フリー水素の製造方法としては、水電解による製造が中心になると見通され、その大型化に向けた技術開発や、効率向上に向けた技術開発が期待される。また、個々の技術開発だけでなく、サプライチェーンの構築と実証が重要であり、全体システムの効率化、経済性の向上等によって水素社会の実現を目指すことが望まれる。

※6：「コスト等検証委員会報告書」(2011)に記載されているLNG火力の計算方式(発電効率57%など)を用いた場合、発電コストは17円/kWh程度となる。

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。引用を行う際は、必ず出典を明記願います。