

CO₂フリー水素チェーン実現への取り組み



特 集

川崎重工業株式会社 技術開発本部 技術企画推進センター 水素プロジェクト部
部長 西村 元彦氏

●はじめに

我々企業として今の技術から何ができるかの観点から、CO₂フリーチェーン実現への取り組みについて話したいと思います。中身は背景、どんなコンセプトであるのか、また経済的視点から水素の価格等も見積もりました。2015年から燃料電池車がリーズナブルな価格で販売される予定なので、燃料電池車関連の話もしたいと思います。

●グループミッション

これは当社のグループミッションで、「地球環境の未来に貢献する」という表現が入っています。同時に人々の生活が豊かなままで地球環境も充実したいという思いでやっております。2010年公表の中期経営計画では、将来の低炭素社会に向けて電力は海外から運べないので、そのかわりに水素を運んでみてはどうか、しかも水素は海外でCO₂フリーにしてそれを持ってくる。そのような提案をしております。

●CO₂フリー水素エネルギーチェーン構想

これがCO₂フリー水素エネルギーチェーンのコンセプトです。資源国の豪州では未利用資源の褐炭がたくさんあり、また、2020年までに再生可能エネルギーを電力の20%にする計画もあって、広大な土地での風力の電力なども安くなってくるだろう。そうしたことを踏まえて水素をつくろうとしていま

す。ただ化石燃料から水素をつくると副産物としてCO₂が出る。これについては現地でのCCS対応、大気中へのCO₂排出なしということで水素をつくりまします。水素の輸送については当社の今までの技術を生かし、液化してLNGと同じように液化水素船で日本に運んでくる。日本での利用は、すでに石油精製・脱硫、半導体や太陽電池パネル製造などに使われていますが、今後は水素を燃料とする燃料電池自動車の実現が目前に迫っているし、将来的には分散発電、あるいは事業用発電へと用途が広がってくるとみています。

●安価な再生可能エネルギーからの水素製造

当社は水素を褐炭からつくることに一点集中しているだけではありません。将来は世界的に再生可能エネルギーや天然ガスからも水素をつくることにもなるとみており、そういう時にも長距離輸送が重要になります。大量輸送の手始めとして、褐炭由来水素の輸送に着目しているのです。重要なのは再生可能エネルギーが量的に増えていくには、数十年オーダーくらいの時間がかかり、値段が下がるのもそのタイムスパンだということです。それに対して化石

CO₂フリー水素エネルギーチェーン構想



講師 西村 元彦氏

燃料由来の水素は大量、安定に供給できるので、これを端緒にインフラを整備していき、しかる後に再生可能エネルギーからできた水素をインフラに流していくことが考えられると思っています。

●水素の需要とその将来

まず日本国内で水素の需要が将来どれくらいあるのかを検討してみました。これはエネルギー経済需給モデルを使って、日本の人口の推移、GDPの推移、1次エネルギー消費の推移、それに伴う電力消費、原油や天然ガス、石炭などの価格の予測推移も入れて、将来をシミュレーションしています。前提条件としてCO₂フリーの水素が25円～45円のCIF (Cost Insurance Freight、船上引き渡しコスト) で入ってくるとしています。2010年の算定で、CO₂制約は2020年でマイナス15%、2050年でマイナス80%という形にしています。ちなみに、当時の政府が掲げた目標の2020年25%減は解が得られず、15%減に変更しています。原子力は2010年6月閣議決定のエネルギー基本計画にあった総発電量の50%を上限として計算しています。再生可能エネルギー上限15%、さらに国内でのCCSは難しいだろうという条件にしています。そうした中で1次エネルギーの組み合わせをどのようにしたら国民の経済的負担が最小になるかということで計算しています。

その結果がこの図になります。横軸が年代、縦軸が1次エネルギー供給量で、全体的には人口減少や効率向上で減っていくのですが、2020年頃から水素の需要が増えていく形になります。原子力は、震災後は算定したように増えるのは難しいといわれています。2050年を見ると、水素が40%くらいになるとされています。この結果、水素価格はCIF25円/Nm³で試算していますが、ちなみに先ほどの前提条件の上限である45円で試算すると半分の20%となります。20%であればインフラ整備も可能と考えます。

水素は、現在は半導体製造などに使われていますが、将来は製鉄用にも使われるでしょうし、石油精製・脱硫用途も海外からのものに置き換えられる可能性もあります。事業用電力に使われるのは、震災前にはもっと先だと見られていましたが、もっと早くできないかという話も聞こえています。そういう

ことで、社会的には日本で十分に水素需要がありそうだと見えてきました。

●全体計画

全体計画として私共では2025年の実証、2030年の商用という目標を設定して、それに向けての計画を決めております。日本で経済的な面から水素が使われるのかといえば、前提で25円～45円のNm³の水素が手に入れば需要があるとなっていますので、本当にそんな値段で水素ができるのかがポイントになってきます。2030年商用化時点でどれくらいの値段で水素ができるのかのFS (Feasibility Stud、概念設計) を2010年にNEDOの委託事業でやらせていただきました。

●褐炭とは

ここで褐炭について少し触れてみたいと思います。褐炭は若い石炭で、通常の石炭は硬いのですが、褐炭はバイオマスと石炭との合いの子の土状のもので、特に豪州では石炭と同じくらい埋蔵量が多い。ただ水分量が半分以上あって、水を運んでいるかと思わせるくらい輸送効率が悪い。乾燥すると自然発火しやすく輸送が困難だとして、現地での発電にしか利用されていません。発電に使うと、水分量が多いので発電効率が悪い。そのために、国際取引の無い未利用資源であり、最も経済的な水素製造方法の1つになると考えております。

●豪州の褐炭埋蔵地とCO₂貯留場所

ここに示したのが豪州の褐炭炭田で、メルボルンから200kmのラトロブバレーにあります。露天掘りで深さ100mくらい30年間で掘り下げています。



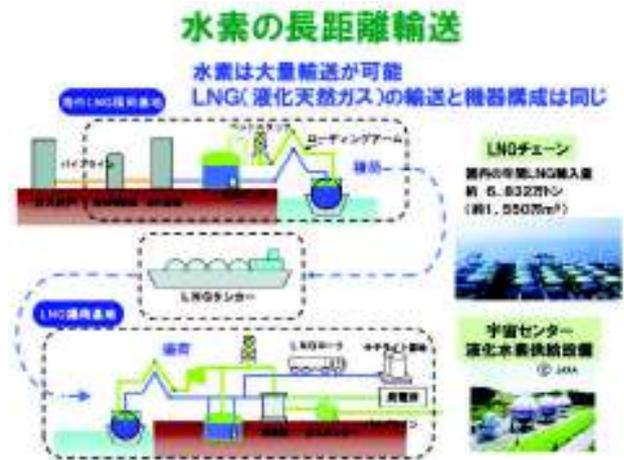
周囲が約14km、グーグルの航空写真でもはっきり見ることができます。全部で320万kWの発電容量で、メルボルンの8割程度の電力を供給。ほとんどただ同然の燃料を掘って、すぐに発電用ボイラーに投入しています。地平線の彼方まで褐炭が地中にあり、ここの褐炭で水素をつくり日本の電力の全てに使ったとして、240年分に相当する埋蔵量があります。豪州連邦およびビクトリア州政府はカーボンネットという国家プロジェクトを進めており、ここから海岸方面へ行くと枯れたガス田があって、そこにCO₂を埋め戻そうという計画があります。そこでCO₂を引き取ってもらうという前提で、計画を進めています。

●水素の長距離輸送

ガスができて、CO₂はCCSで抑えて水素をどう運ぶのか。これはLNGの例ですが、液化機でガスから液体にして貯めておいて、船で日本に運びます。日本で荷揚げして、液の状態では貯蔵しておいて、蒸発させてから運ぶ、あるいはローリーで液体のまま需要地まで運んでサテライト式で蒸発させるという方法があります。水素も同じような方法でやることになります。種子島には、すでにロケット燃料用の液化水素タンクがあり、実用化実績のある技術であり、これは当社が納めさせていただいたものです。

水素と天然ガスとは何が違って何が難しいかといえば、水素の沸点はLNGよりさらにマイナス91℃低い。また蒸発潜熱が低いということで、例えば蒸発潜熱を常温と沸点までのデルタTで割ってやった指標で比較した場合、水素はLNGより10倍も蒸発しやすい物質だということになります。すなわち、仮にLNGのタンクに液化水素を入れるとLNGの10倍蒸発するので、10倍の断熱性能を確保して蒸発量を抑えてやる必要があるわけです。こうした条件でタンクを開発する必要があり、蒸発率0.1%/日というスペックでタンクが設計されています。

このような技術はないのかといえば、そうではありません。先ほど申し上げた、種子島のロケット射点設備用の540m³のタンクは蒸発率が0.1%/日以下を達成しています。これをいかに揺れによる加重がかかる船にうまくマウントして積んでやるか。あとは直径が種子島の5倍程度の大型になります。要素技術は確立されているので、大型化や生産技術と



いった実用化のための技術開発に私共は取り組んでいるところです。

●液化水素の特徴

なぜ液化水素で輸送・貯蔵するのかを簡単にいえば、当社の検討結果では最も合理的であると判断したからです。液化水素は実用化済みの技術で、実際に岩谷産業殿は堺市から鹿児島県・種子島ロケット射点場まで、液化水素をローリーに積んで運んでいます。体積は気体の800分の1とぐっと小さくなります。また付帯的な媒体を用いないので重量は増えない。また、海外すなわち資源国で液化する場合には液化に要する電気代が安い。さらに、液化水素は常温で蒸発させるだけで使えるので、需要(消費)地でエネルギーはほとんど消費しません。さらに冷熱利用ができます。液化の時点でヘリウム以外の物質は固体になって取り除かれるため純度が高く、液化水素を持ってきたら蒸発させるだけで燃料電池に入られます。

ただし課題もあります。液化機ですが、世界で市販されているのは5t/日の大きさの製品しか無く、将来の大量需要時代に向けては10倍くらいの大型化が必要とされます。同時に高効率化も課題とされます。これもLNGがたどった経緯を追っていきような形であり、ちなみにLNGの場合、実用化された1960年代後半と比べ、いまの液化機は高効率な仕様になっています。

●CO₂フリーチェーンの特徴

以上のことを踏まえて、CO₂フリー水素チェーンの特徴をまとめてみました。まず未利用の化石燃料

から水素を製造するということから、大量に安定確保が可能ということ。一方で再生可能エネルギーは量が少なく、供給安定性に課題があります。水素製造時のCO₂は現地で分離・貯蔵ができるので、使用時の環境性は良好ということ。天然ガスや石油は輸入コストの半分以上が輸入元の権益・利益に取られて、国富がどんどん流出してしまいます。一方褐炭由来水素は、ほとんどのプラントや機器を日本の技術・産業が担うことから、産業競争力が向上し、かつ原料が安いことから、国富の流出が抑制できます。このようなことから、将来に求められるエネルギーの条件を満たすだろうと思います。

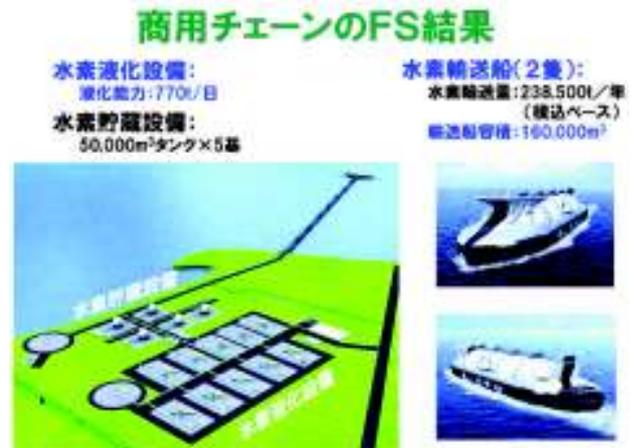
●商用チェーンFS

水素供給コストの算定について話したいと思います。水素製造・供給設備の導入・建設コストや、運転経費の見積もりには、現地豪州の情報が不可欠ですので、経産省およびNEDOと豪州連邦政府ならびにビクトリア州政府の協力をいただき、現地サイトの状況や電力、人件費などの情報を収集しました。見積もりにはサイトの候補地も決めなければなりません。水素製造はラトロブバレーの褐炭採掘所の近傍とし、海沿いの積荷基地はラトロブバレーから南方80kmの所に設定しました。この地図の茶色の線はCO₂のパイプラインで、こちらにカーボンネット・プロジェクトにCO₂を引き取って貰う構想としています。

一方、水素製造・供給能力は、LNGの例に習いました。LNGを日本で最初に輸入した時は、安定供給を目指すということで、連続的に運ぶために船2隻を導入、それを現地と日本とを往復させた。よって水素の供給についても、大型LNG船サイズと同じ16万m³の運搬船2隻を連続運行させて供給するというので、積荷ベース770t/日の製造・供給量を設定しました。

●商用チェーンのFS結果

当社で概念設計できる機器類の見積もりを進めるとともに、購入品は、供給メーカーから見積もりをとって積み上げています。こちらは、褐炭炭田側の水素製造サイトのCGです。ガス化炉と精製設備がそれぞれ3系列、コンプレッサーでパイプラインに送り込む形です。褐炭消費量が1万5,300t/日、水



素生産量が770t/日、CO₂発生量が1万3,300t/日。褐炭消費量は水分(～60%)を含んだ重量です。

この絵は積荷基地ですが、こちら側が10系列の液化機。貯蔵タンクは5万m³×5基。液化水素を年間23万8,500t積み出す形になります。これらを積み上げて水素のコスト(CIF)を試算。設備導入費用を15年償却とし、運営・維持経費も積み上げた結果、29.8円/Nm³という試算です。先ほど話した経済需給モデルで計算した条件25～45円/Nm³の範囲に入っていることになります。ちなみに水素の輸入量は燃料電池車にして約300万台の消費量に相当します。発電に利用すると、ガスタービンコンバインドサイクル発電650MW一基、すなわち原発の2分の1くらいの電力供給量に相当します。こうして見ていただくと、いかに発電の需要が大量であるかが分かります。

●FCV利用

30円の水素でどんなユーザー・メリットが考えられるのかということで、まずは自動車の運行に使った場合の試算です。ここでは30円という船上コストに国内の揚荷基地、水素ステーション、配送のコストなどを上乗せして、60円の原価で水素ステーションに卸すと試算しました。これに利益分と税金が加わることになります。この図の見方は、青色のライン上にある場合は、ガソリン・ハイブリット車と燃料電池自動車の燃料費が同じであることを示しています。この線より下になれば燃料電池車を走らせた方が燃料費は安く済むことになります。現状のガソリン150円程度と比較すると、水素を使う燃料電池車の燃料費が安価になります。

●発電利用

次に発電利用について見ると、原子力、化石燃料のLNG、石炭、石油などと比較してみると、水素の発電コストは16円/kWhと少し高い。ただしCO₂を出しません。ちなみに今年8月の資源エネルギー庁が公表した資料によると、石炭発電でCCSをやったとすると約20円/kWhという試算が出ています。このことから、将来的には水素発電の競争力が出てくると考えられます。

●パイロットチェーンの概念設計

商用チェーンは大規模で投資も大きくなるため、その前に小規模な形で水素を液化して船で運べるのかといった、技術・運用および安全面の実証について検討されています。この小規模チェーンの概念設計を実施しました。その結果、炭田の横でガス化と液化をしてローリートラックで港のタンクまで運び、貯蔵し、船で運ぶという構想を描きました。船は液化水素運搬量2,500m³です。先ほど話した16万m³の船は長さ300m、幅50mの大きさですが、この船の場合は長さ100m、幅15mと小型になります。液化水素の海上輸送については、国交省も基準の整備に動こうとしています。(その後、12月25日に世界初の液化輸送に関する基本認証を取得)

水素製造のガス化炉は、酸素吹きを計画しています。酸素の製造には、水電解設備を適用して、水電解水素製造の実証も同時に行いたいと考えております。水電解に使用する電力は、豪州では風力発電が2020年までに大幅に増えるので、この適用も念頭においております。

●高圧水素トレーラーの開発背景

これはFCCJ出展のロードマップですが、トヨタ殿とホンダ殿が2015年に燃料電池車を市販する予定です。それに合わせて水素ステーションの整備が検討されており、2025年頃には1,000カ所を整備、その後も増設される予想です。こうした動きに先行する形で、メーカーとして水素トレーラーなどの開発を進めています。

●開発した高圧水素トレーラー

需要の導入期については、高圧水素ガスの配送で需要を賄えると考えています。この写真は、JX殿

のご要望により開発した炭素繊維複合容器を搭載した高圧水素トレーラーです。従来はスチール容器で運んでいたのですが、15tトラックで軽自動車程度で運ぶ程度の200kgの水素しか運べないことが輸送コスト増の要因でした。そこで、軽量化が可能となる、AI合金、カーボンファイバーを使った複合容器搭載のトレーラーを開発しました。

まず、日本最初の複合容器トレーラーで、35MPaを一昨年に開発しました。その後、圧力を上げた45MPaのトレーラーを開発しております。左のトレーラー(35MPa)は東京都杉並区の水素ステーションに納入、右(45MPa)は海老名にある日本初のガソリンスタンド併設の水素ステーションに納入されています。この開発で難しかった点は、高圧ガス保安法、消防法、道路交通法他複数の法令をクリアして車検を通すということで、そのために委員会を設置し検討協議を重ねて実現することができました。

●液化水素ローリー

この写真は岩谷産業殿に納入させていただいたローリーで、ロケット燃料用液化水素の堺市から種子島までの輸送に使われています。水素2,800kgの輸送が可能で、液化すれば大量に運べるということになります。これは、高圧水素トレーラーと競合する技術だとは考えていません。導入期は燃料電池車がひっきりなしにスタンドに来ることはないので、高圧ガスの状態で置いておいて供給すれば間に合います。需要が増えれば、液化水素に移行すると見えています。また将来、都心部で液化水素輸送が進展した状況においても、燃料電池車の普及が遅れて立ち上



がるであろう地方部では、ガスで配送することが考えられます。

●再生可能エネルギー・水素の国内での動き

国内の再生可能エネルギー関係で水素活用のさらなる可能性を研究するため「HyGrid 研究会」が発足し、当社は幹事を担当させていただいています。自動車メーカー、ガス会社、商社、調査会社、大学などが参加して話し合っています。「HyGrid」は、水素の「ハイ」と「スマートグリッド」を掛け合わせた造語です。スマートエネルギー、スマートグリッドは、電力の融通を主眼としていますが、「Hygrid」ではそれに水素の融通をリンクさせようというものです。再生可能エネルギーがメインとしながらも、化石燃料由来およびバイオマス由来の水素も視野に入れて、研究活動をしております。

主な狙いは、再生可能エネルギーの変動が非常に大きいという問題への対応です。この図は横軸が時間スケール、縦軸がエネルギースケールで、太陽光エネルギーの変動はバッテリーに吸収できます。一方、風力エネルギーは季節変動などがあって変動幅が大きくバッテリーでは対応できないため、余剰電力を水素に変換して貯蔵する概念です。海外ではすでに、再生可能エネルギーによる電力が余剰となる状況が出ています。ドイツや南オーストラリア州では風況と電力需要のミスマッチが生じた際に、風力エネルギーが余剰となりグリッドに入らないために、お金を渡して電力を引き取ってもらう状況がすでに発生しています。さらに、シベリアのバックアップ電源のための水力発電所建設計画では、将来電力が大幅に余る見通しであり、この余剰電力から水素を製造して東南アジアに輸出した場合のコスト試算を現在進めております。

●当社事業・技術の関連実績

スケールの大きな話をしてきましたが、水素の製造、輸送・貯蔵から利用に至るインフラ整備において、当社は多くの関連技術を保有しています。例えば褐炭ガス化水素製造の技術では、当社は前処理やガス生成の技術を持っています。また、化学肥料プ

ラントにおいても天然ガスを原料とした水素製造とCO₂回収の技術が適用されています。LNG 基地は各社に納入させていただいておりますし、ロケット射点場の液体水素タンクも 20 年前からやっけていて、事故やトラブルもなく推移しています。

さらに当社は日本で最初に LNG 船を建造したメーカーです。実際、大型 LNG 船と大型液化水素タンクの技術を同時に保有する会社は世界で唯一です。こうしたところでも水素船に当社の技術が生かせるのではないかと考えております。陸上輸送では、水素ローリーや水素コンテナは長距離輸送にも使われますが、さらに先ほど触れた高圧圧縮水素のトレーラーも手掛けようとしています。

水素の利用系では、当社の 7MW のガスエンジンは世界最高効率です。30MW 出力のガスタービンも同サイズでは、世界最高効率の発電効率 40% です。現状は天然ガスを燃料としていますが、将来、水素の混焼さらには専焼に当社の技術が生かせるのではないかと考えております。発電需要は水素社会到来にとって重要な分野であり、再生可能エネルギー分野では立ち上がりがなかなか読めないことがありますが、発電所をつくってしまえば需要が決まります。1970 年代初頭に日本が LNG の輸入を開始した時にそんな構図がありまして、東京電力殿が天然ガスを入れて発電することを決めたことで、都市ガスの天然ガス化が一気に進んだという経緯があります。化石燃料由来の水素を入口とした大量供給と、発電を出口とした大量需要があると、非常に大きな動脈ができるわけで、それから枝分かれして燃料電池、あるいは半導体他産業プロセスにも安価に水素を使えるといった絵が描かれるのではないかと見ております。

●まとめ

将来のエネルギー環境を見越し、安価で大量に水素を供給できる「CO₂フリー水素チェーン」の概念検討を実施しました。その結果、ニーズに応えられるような水素のコストが見えてきています。今後は事業主候補企業および日豪両政府の理解と協力を得ながら構想の実現を目指します。