

## 水素社会について－PPT の解説

記 大築

### 0. 序

本文は 2021 年 4 月 7 日に行った、縮小社会第 52 回研究会の講演「縮小社会について」のパワーポイント（PPT）資料の解説です。講演の目的は以下の通りです。

現在、国を挙げて水素社会実現に向けてプロジェクトが進められていますので、プロジェクトの概要、水素社会を構成する要素技術等を一通り示したいと思います。

まず、そのプロジェクトの目指すところは何かを簡単に紹介します。

次に、水素の基本的性質とどのように製造され、運搬・保管され、利用されるかを紹介します。最後に経済性や実現性などについての課題を示して、水素社会を考える上での基礎的な情報提供としたいと思います。

以下、説明中での図表やデータはPPT資料のページと対応してご理解ください。

### 1. 水素社会プロジェクト

#### (1) プロジェクトの経緯

水素社会プロジェクトは経済産業省（以下経産省）のエネルギー基本計画に位置付けられています。2014 年の第 4 次基本計画では「水素社会実現に向けたロードマップの策定と産学官協議会の推進」が記載され、2017 年には「水素をカーボンフリーなエネルギーの新たな選択」が提示されました。

その後 2018 年には「水素を再生可能エネルギーと並ぶ新たなエネルギーの選択肢」と規定され、「水素の調達・供給コストを従来エネルギー水準まで低減」が目標とされました。

これは、水素を単なる「ひとつのエネルギー源」から、石化エネルギーの枯渇を見据えて、その代替エネルギーとしての水素を国家として重要視するようにシフトしてきたものと見られます。

このプロジェクト推進の中核となり、戦略ロードマップを作製したのが経産省の「水素・燃料電池戦略協議会」であり、産官学から多くのメンバーが参画しています。2019 年時点でのメンバーは座長に東工大の柏木教授、官側は経産省、国交省、文科省、NEDO、福岡県など、学は九大、山梨大など、産は岩谷産業、トヨタ、パナソニック、川崎重工、三菱重工、東京ガス、日本政策投資銀行、電気事業連合会、水素エネルギー協会など多くの企業・業界団体からなっています。（PPT.3）

#### (2) 基本戦略

では、どのような戦略が立てられているのかが PPT.4 です。項目は「供給」、「水素

量]、「発電」、「モビリティ」、「FC活用」に分けて現状、2030年、将来の目指すべき姿の各時点での目標を示しています。

供給は、現状は副生水素や天然ガス改質などの従来技術ですが、2030年には国際サプライチェーンを構築し、再生エネルギー由来の製造法を確立する。そして将来はCO<sub>2</sub>の製造体制を確立する目標です。

水素量は、現状の200～4000tonを2030年には30万ton、将来は1,000万tonまで拡大する目標です。

発電は、研究開発段階の現状に対して、2030年には17円/kWh、将来は12円/kWhまでコストを下げる目標です。

モビリティは、現状は微小数の水素ステーション(ST)や水素燃料電池自動車(FCV)を、2030年にはSTを900箇所、FCVを80万台レベルに実現し。将来はそれぞれガソリンから代替するのが目標です。

### (3) プロジェクトの具体策と現状

#### ① 国際水素サプライチェーンの構築

これは外国から水素を輸入するシステムの構築です。ブルネイからは天然ガス由来の水素を化学物質として輸入する方式と、オーストラリアからは褐炭由来の水素を抽出・液化して輸入する2方式が進められています。(PPT.5)

ブルネイからのものは、現地で天然ガスから水素を抽出するとともにメチルシクロヘキサン(MCH)に合成してケミカルタンカーで輸送するものです。日本ではMCHから水素を分離する作業を行うこととなります。(PPT.6)

オーストラリアからのものは、現地で褐炭から水素を分離した後に液化して体積を下げ、液体水素専用の運搬船で輸送します。日本では水素を液体から気化する作業を行います。(PPT.7)

#### ② 水素発電に関する技術開発・実証(PPT.8)

500MW級の水素燃焼ガスタービン発電システムを開発します。従来のガスタービンベースに水素を混ぜて燃焼させる混焼タイプと、水素だけを燃焼させる専焼タイプとがあり、現状は1MW級の専焼タイプが実現しているようです。

もう一つは、1MW級の地域における熱電供給コジェネシステムの開発です。神戸市のポートアイランドで実証に入っています。

#### ③ 地域の再生エネルギーの最大活用(PPT.9)

風力や太陽光による再生可能エネルギー発電は一定の出力維持が困難です。このため、余裕電力で水素を製造・貯蔵し、電力定価の時に貯蔵の水素で発電し補完をするシステムの開発・実証を行います。福島県で実証システムを構築中です。

#### ④ 水素 ST および FCV の普及 (PPT.10)

ST と FCV の普及は 2020 年度までに FCV は 4 万台、ST は 160 か所の普及を目指します。実態は FCV の普及は 1000 台レベルと言われています。

水素を十分に活用するには、技術開発だけでは不足で、規制改革も重要になります。また、モビリティ以外のアプリへの展開も進めます。

### 2. 水素の基本特性 (PPT.11)

- ・水素は原子番号 1 の非常に軽い元素で、通常 2 個で構成する分子の形で存在します。
- ・質量は、標準状態 (0°C、0.1MP) で 89g/Nm<sup>3</sup> です。
- ・融点は -259.2°C と大変低く、液体では体積は気体の 1/800 になります。
- ・特徴としては引火しやすいこと、分子が小さいため漏れやすいこと、金属をもろくする(脆性)働きがあるなどです。

### 3. 水素の製造法

#### (1) 電気分解法 (PPT.12)

- ・電気エネルギーで水を酸素と水素に分解する方式です。小学校か中学校の理科実験を思い出してください。
- ・この電気の元が再生エネルギーであれば、CO<sub>2</sub>フリーと言うことになります。
- ・1Nm<sup>3</sup>の製造に 3.6kWh のエネルギーが理論上必要ですが、実際には 5~6kWh 程度は必要と言われています。
- ・本方式の課題は、効率の向上、大規模化、再生エネルギーで製造する場合の負荷変動対策等が挙げられます。効率化の面では「アルカリ水分解法」などの研究が進められています。

#### (2) 水蒸気改質法 (PPT.12)

- ・化石燃料等の主成分であるメタンと水蒸気を 900~1000°C の高温環境下で触媒を使用し得反応させます。
- ・メタンと水から水素と一酸化炭素 (CO) が発生し、その一酸化炭素と水から水素と二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) が生成されます。
- ・この方式は水素と共に CO<sub>2</sub> が発生するので、その処理が必要となります。処理としては、CCS (Carbon Capture and Storage) と呼ばれる二酸化炭素回収・貯留技術で通常は地中に CO<sub>2</sub> を埋め込むことが想定されています。

#### (3) 熱分解法

これは 1000°C 近くの高温で、水を水素と酸素に分解する方式です。

##### ① 高温ガス炉方式 (PPT.13)

- ・ヘリウムを冷却材として高温で運用する原子炉の熱を利用する方式です。
- ・ヘリウムが不活性であること、減速材がグラファイト（黒鉛）であることなどから、高温ガス原子炉は安全性が高いと言われています。
- ・一方、大型化が困難で現在実現しているのは 30 万 kW 級までであることや、原子炉として共通の使用済み燃料の処分問題があり、この方式の実現性には課題が残されています。

## ② IS システム (PPT.14)

- ・この方式は水を高温で直接分解するのではなく、ヨウ素 (I) サイクルと硫黄 (S) サイクルとに分けて、各々水素と酸素に分離しようというものです。
- ・前方式よりもやや低い (650°C) 環境で行うので、高温ガス炉を使用せず、太陽熱利用などが考えられます。
- ・ヨウ素と二酸化硫黄と水からサイクルが始まります。ヨウ素サイクルはいったんヨウ化水素を生成した後に水素を分離して、ヨウ素は回収されます。
- ・硫黄サイクルでは、二酸化硫黄と水から硫酸が生成され、その後に酸素と二酸化硫黄と水に分解され、酸素を分離して残った二酸化硫黄と水が回収されます。
- ・理論上は無駄な生成物がなく良さそうですが、技術的には研究段階です。

## (4) 副生水素 (PPT.15)

- ・苛性ソーダ (NaOH) やコークス製造の過程で副産物としてできる水素製造法です。
- ・広く実用されており、製造された水素はその大部分を所内で消化されます。このため、本格的な水素需要には対応できません。
- ・この方式で副産物として生成される CO<sub>2</sub> は約 1kg/Nm<sup>3</sup> になります。

## 4. 水素の保管・輸送法

### (1) 保管法 (PPT.16)

#### ① 気体方式：

- ・体積効率を上げるため、20~70MPa に圧縮して保管する方式です。
- ・圧縮自体は既存の技術ですが、課題としては圧力容器の軽量化、ガス漏れ対策、脆性対策等が挙げられます。

#### ② 液化方式

- ・融点以下に冷却して 800 分の 1 に体積圧縮する方式です。
- ・小容積化という点で大きな利点を持ちますが、課題としては -250°C クラスまでの冷却技術、耐圧容器の小型化・軽量化、低温脆性、断熱技術、気化ガスの処理等が挙げられます。

### ③ 水素吸着方式

- ・水素吸着性物質に吸着して保管する方式で、多くの合金が開発されています。
- ・常温・常圧的な保存のできる点が大きな利点です。
- ・一方、課題としては吸着効率、吸着材のコストや重量等が挙げられます。

### ④ 化合物方式

- ・水素を含む化合物に生成して保管し、使用時に水素を分離する方式です。
- ・本方式も常温・常圧的保存のできる点が大きな特長です。
- ・課題としては、水素を他の物質と化合させる時と、使用時に分離する処理設備が必要になるのが主な点です。

## (2) 搬送法

製造された水素を利用する場所へ輸送する方式は、高圧ガス、液体水素、有機ハイドライド、パイプラインの4方式が構想されています。パイプライン方式は従来のガスの配送方式と同様なので、他の3方式について以下述べます。(PPT.17)

### ① 高圧ガス方式 (PPT.18)

- ・水素を20MPa程度に圧縮して搬送する方式で、既に実用レベルのものです。現在、45MPaまでの高圧化が実証されており、体積を1/450まで圧縮しています。
- ・圧縮することによるエネルギーを必要としますが、科学プロセスの装置等は必要としない比較的シンプルなシステムです。
- ・課題としては、システムの低コスト化の他に、高圧ガス関連の法規への対応が挙げられます。

### ② 液化水素方式 (PPT.19)

- ・水素を超低温で液化した状態で輸送する方式で、ロケット燃料の搬送で実用化されています。
- ・常圧の状態に比べて体積が1/800になるのが最大の利点です。
- ・液化にエネルギーを必要とすること、搬送先で気化させるシステムの費用が必要になる、また法令上は「高圧ガス」の扱いとなるのでその対応などが課題になります。

### ③ 有機ハイドライド方式 (PPT.20)

- ・水素をトルエンと化合してメチシクロルヘキサン(MCH)の形で搬送するシステムで、常圧の気体に比べて体積が1/500になります。
- ・体積の縮小の上に、常温・常圧で輸送できることから既存のケミカルロータリー

を使用できるという利点があります。

- ・水素の化合と搬送先での水素分離のシステムが必要になるのが経済的課題であり、また水素キャリアとして規制が未定のため、今後の規制に対する対応が必要になります。

#### \*水素貯蔵合金について (PPT.21)

- ・搬送には通常使用されないが、貯蔵の形態として水素を貯蔵する機能を持つ合金を使用する場合があります。

- ・材料はチタン、ニッケルなどの遷移元素、希土類、マグネシウムなど多くの合金があります。

- ・本方式の利点は高い充填率（有効吸蔵量が1～3重量%）や作動温度が低い（一般に0～100℃）、水素の放出時の反応が温和で事故の可能性が低いなどです。

- ・課題としては大重量（ガソリン19L相当の水素5kgを吸着する合金の重量は200～600kg）、吸蔵と放出時の熱反応、合金材料の高価格などが挙げられます。

#### (3) 水素ステーション (PPT.22)

気体または液体水素を貯蔵・調圧してディスペンサーを通してFCVやFCバスに供給するシステムです。

水素社会では将来ガソリンスタンドに代わることを目標にしていますが、水素の取扱いは温度、圧力とも安全性の確保の点でコスト高になります。

### 5. 水素の最終利用形態

#### (1) 燃料電池 (PPT.23)

- ・使用する電解質によりアルカリ型(AFC)、固体高分子型(PEFC)、リン酸型(PAFC)、溶融炭酸塩型(MCFC)、個体酸化物型(SOFC)などに分類されます。

- ・AFCは純水素を燃料として発電効率が70%と高く、宇宙開発など特殊用途に使われます。

- ・PEFCは作動温度が120℃以下と低く、小型で家庭用や車載用に使用されます。

- ・他のものもそれぞれ特徴はありますが、大規模事業用、非常用などに広く応用されています。

#### (2) 民生分野 (PPT.24)

- ・民生分野で「エネファーム」の呼び名で実用化されているシステムがあります。都市ガスなどを改質して水素を製造し、燃料電池として作用させ、発生した電気と熱を使用するシステムです。

- ・電気は自家消化と売電、熱は温水製造と、両方利用するメリットがあり、太陽光発

電などより高能率とされています。価格は 200 万円以上だが補助金（燃料電池の形式によって異なる）があり、家庭用に普及が始まっています。

- ・課題としては、短寿命（約 10 年）や保守費用の必要などが挙げられます。

### (3) 発電分野：ガスタービン (PPT.25)

- ・水素のみでの燃焼（専焼）型と従来燃料に混ぜる混焼型があり、現在、神戸で混焼および 1MW 級の専焼タービンの実績があります。

- ・水素燃焼でタービンの特長は、燃焼の高温・高圧化による熱効率の向上です。

- ・課題としては、燃焼器やタービンの耐熱性や NO<sub>2</sub> 対策、水素燃焼時の逆火対策等が挙げられます。

- ・また、石炭をガス化して燃焼させタービンを回して発電するとともに、単に燃焼で終了するのではなく、排熱でボイラーを回して発電する高効率のコンバインドサイクルも開発されています（IGCC：石炭ガス化複合発電）。

#### ① 水素専焼型 (PPT.26)

- ・水素と酸素の燃焼により、発生するのは水蒸気だけのシステムです。

- ・高い発電効率で、日本の CO<sub>2</sub> の発生量の 4 割を占める電力部門の脱炭素化に大きな貢献が可能になります。

#### ② IGCC (Integrated Coal Gasification Combined Cycle) (PPT.27)

- ・石炭ガス化混合発電の意で、石炭を燃やして直接ボイラーを動かすのではなく、ガス化炉で可燃ガス化して、ガスタービンを使って発電します。

- ・同時に、ガスタービンの排熱を利用してボイラーを動かし、蒸気タービンでも発電するコンバインドサイクルを活用することで、さらに効率を上げます。また、CO<sub>2</sub> を燃焼前に分離回収することにより、さらに CO<sub>2</sub> 排出量は削減できます。

- ・実証実験機が、福島県いわき市の勿来（なこそ）発電所で稼働中です。商用化段階でのエネルギー効率は 48～50%程度が見込まれています。

### 6. 経済性・実用性 (PPT.28)

- ・石油や石炭はそのまま燃焼してエネルギーが取り出せる「1次エネルギー」ですが、水素は何らかの加工をして得られる「2次エネルギー」（製造方法によっては3次エネルギー）という本質的な弱点があります。

- ・さらに、利用法による変換効率のロスが発生します。例えば、交流電源から充電して走行する電気自動車の効率は約 70%になりますが、いったん水素に変換して燃料電池車が走行する場合は、中の変換効率が影響して約 20%になります。

### (1) FCV（燃料電池自動車）の効率と経済性（PPT.29、30）

- ・FCV の価格は現在約 700 万円で国産の高級車並み（補助は最大 225 万円）です。
- ・HS（水素ステーション）の設置費は約 5 億円で現在のガソリンスタンドの約 6～8 倍ですが、EV 向けの給電ステーションは急速充電でも約 1 千万円で設置可能です。
- ・EV の短所である充電時間と航続距離以外は FCV のメリットは少ないでしょう。路線バスやフォークリフトのような移動経路や領域が確定しているものは、電池交換方式で充電時間の短所を解決することにより、EV の方がコスト的に優れていると評価されます。
- ・また、エンジン車と同等の航続距離を持つ FCV のタンク容量を計算すると、単位重量当たりの発熱量から、水素はガソリンの 1/3 の重量で済むことになります。これを比重から容積に直すと、水素は液化した場合でも 4.7 倍の容量が必要となります。実際には断熱材などを考えると、より大きなタンクを必要とするでしょう。

### (2) 水素製造コスト（PPT.31）

- ・本プロジェクトの目標は 30 円/Nm<sup>3</sup> です。大量の自家製造・消費の場合は約 10 円/Nm<sup>3</sup>、容器で外販の場合は 100～200 円/Nm<sup>3</sup> が可能との指摘もあり、一般に、副生水素は安いと言われていますが、自己消費が大半であり、大量消費の時代に対応できる製造方式ではありません。
- ・複数のコスト計算例がありますが、相当のばらつきがあります。各々、計算の前提条件など明確でないものが多く、開発中の技術による希望的な数値の表記もあるようで、参考程度に考えた方がよさそうです。
- ・因みに国の目標値 30 円/Nm<sup>3</sup> は、同じ走行距離を得るガソリン 1L 分の容積相当では、 $0.75/3 = 0.25\text{kg} \Rightarrow 250\text{g} / (89\text{g/Nm}^3) = 2.81\text{Nm}^3 \Rightarrow 84\text{円}$  となり、ガソリン 1L の値段と競争できると言えます。
- ・以下（PPT.32、33）に 2 例のコスト計算を示します。数字だけを見ると目標コストが実現するかにも見えますが、ランニングコスト以外の諸経費が含まれていないものもあり、副製品の処理費用なども含めると表以上の価格になるものと思われます。

## 7. 結言（PPT.34）

- 1) 水素への期待：化石燃料の枯渇・地球温暖化防止に対するエネルギー源としての水素は、資源として豊富なことやクリーン性からその候補になりうると思われれます。
- 2) 水素利用への課題：水素本体はクリーンでも、以下のような課題があります。
  - ・製造時に CO<sub>2</sub> をはじめとする副生産物が発生する場合はその処理が必要になります。
  - ・貯蔵・運搬では超低温、高圧、漏れやすさなどに対する技術開発および安全対策が必要で、研究レベルの段階にあるものが多いです。

・水素は本質的に2次エネルギーであるほかに、製造・貯蔵・搬送・利用の各段階において化石燃料系よりコスト高になることが見込まれています。

### 3) 水素利用の方針

・今後はクリーンなエネルギー源が強く求められることとなります。しかし、水素はクリーンだからといって、高コストゆえになんにでも使おうという訳にはいきません。水素に適した使い方を探っていくべきです。

・クリーン性を強調した水素製造： 製造は副生成物を出さない方式にする方式（ソーラー発電など再生エネルギーを使用した電気分解法、高温水蒸気分解法など）で生成する。ただし、高温状態を作るのに原子炉を利用するのは放射性廃棄物や廃炉などトータルリスクのコストを考慮してやめるべきと考えます。

・クリーン性の高い利用法： 風力発電等の再生エネルギー発電の短所は一定の出力の維持です。出力の余裕時の電力で水素を製造・貯蔵し、出力低下時に水素発電をして平準化する方式は開発の価値があるでしょう。

・従来方式の効率化の利用法： エネファームや水素混焼タービン、IGCCなどは水素のみの方式ではないが、システムの効率を上げると共に、生成CO<sub>2</sub>の削減にも有効です。このような利用法はベストではなくともベターであり、いろいろ工夫されてよいと思います。

・適用を検討すべき利用法： 水素利用の主目的の一つとしてFCVが挙げられているが、最大の特長であるEVに対して航続距離の優位が挙げられます。しかし前述したとおり、コストや安全性から一般の乗用車に使う必然性は低いと思います。クリーンエネルギーといえども安全性、経済性とのバランスをとった利用法を検討すべきでしょう。

以上