

水素社会について

国の計画と実現性

大築康生

目次

1. 水素社会プロジェクト
2. 水素の基本性質
3. 水素の製造法
4. 水素の保管・輸送法
5. 水素の利用法
6. 経済性・実現性
7. 結言

1. 水素社会プロジェクト

政府のプロジェクトの経緯

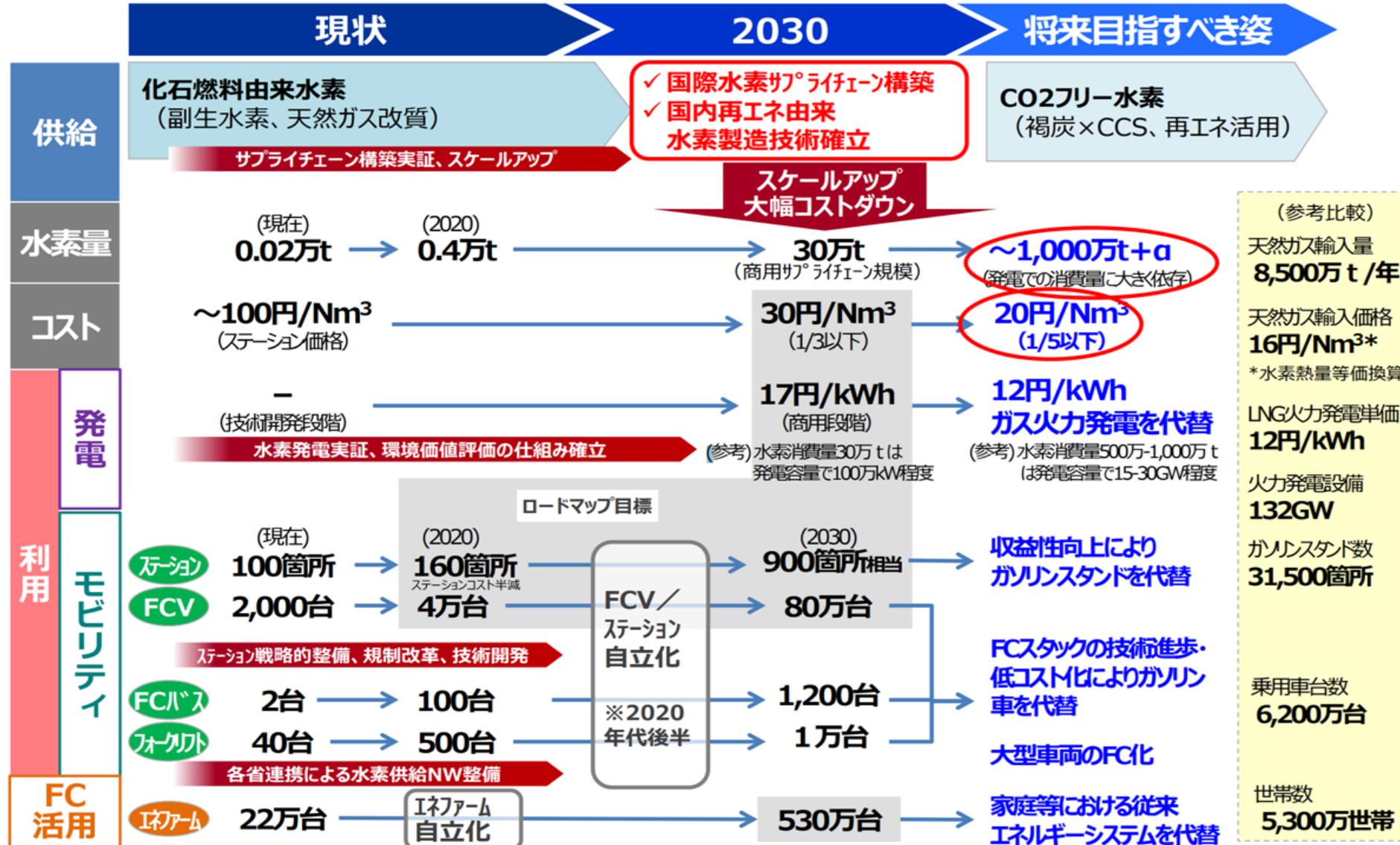
- ・ 2014年4月：第4次エネルギー基本計画で「水素社会実現に向けたロードマップの策定と産学官協議会の推進」を記載。
- ・ 2014年6月：水素・燃料電池戦略協議会で「**水素・燃料電池戦略ロードマップ**」取りまとめ。
- ・ 2017年12月：「再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議」で「**水素基本戦略**」を策定。**水素をカーボンフリーなエネルギー**の新たな選択として提示。
- ・ 2018年7月：第5次エネルギー基本計画で「**水素を再生可能エネルギーと並ぶ新たなエネルギーの選択肢**」と規定。**水素の調達・供給コストを従来エネルギー水準まで低減**を目標。

目標：**現在100円/Nm³を‘30に30円/Nm³、将来20円/Nm³！**

* 参考：2017年天然ガス輸入価格 16円/Nm³（水素熱量等価換算）

水素基本戦略のシナリオ

出典：経済産業省 資源エネルギー庁



プロジェクトの現状

出典：②水素社会実現に向けた経済産業省の取り組み（2020年2月）

国際水素サプライチェーン構築



日ブルネイ水素プロジェクトの進捗

- 2019年11月にブルネイの水素化プラントの開所式典を開催。現在、当該プラントにおけるMCH(メチルシクロヘキサン、トルエンに水素が結合。)の合成や、船舶への積込、海上輸送等の実証をブルネイ国内で開始している。
- 今後、川崎の脱水素プラントの竣工・稼働を経て、ブルネイからの水素輸送(MCH輸送)及びMCHからの水素分離の実証を開始する予定。

完成した水素化プラント (ブルネイ)



・19年11月に開所。水素化プラントで変換されたMCHは、海上輸送により日本に送られ、川崎に建造中の脱水素プラントにおいて、再び水素とトルエンに変換される。

水素サプライチェーン

①水素化 (MCH合成)



未利用ガス→水素

・19年11月 ブルネイ水素化プラント 竣工

②水素輸送 (MCH輸送)



※ 既存のケミカルタンカーを利用

③脱水素 (水素分離)



・川崎脱水素プラント 外観 9

出典②

日豪水素プロジェクトの進捗

- 2019年12月11日に液化水素運搬船「すいそ ふろんていあ」の命名・進水式を開催。
- 今後、褐炭ガス化炉(豪州)、神戸水素基地が竣工し、秋頃には「すいそ ふろんていあ」が完成する予定。
- 「すいそ ふろんていあ」は、21年冬～春頃に世界初の液化水素の大規模海上輸送による褐炭水素を日本に輸送する予定。

進水式の様子

2019年12月11日 川崎重工 神戸工場

- ・経産省 中野政務官、在日豪州大使、豪連邦政府 フィンケル主席科学官 他が出席
- ・一般参加者を含め約4000人規模の式典



水素サプライチェーン

①水素製造
(褐炭ガス化)
+ CCS



②水素輸送
(液化水素船)



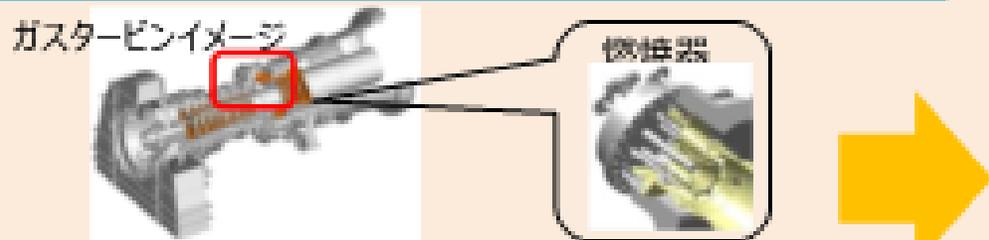
③水素荷揚
(荷役基地)



水素発電に関する技術開発・実証

- 将来の発電分野での水素利用を見据え、①大規模火力発電級（500MW級）②地域における熱電供給のコジェネ発電（1MW級）のそれぞれの分野で水素の燃焼特性に応じた燃焼器の技術開発に取り組んでいる。

①大規模火力発電級（500MW級）のR&Dの流れ

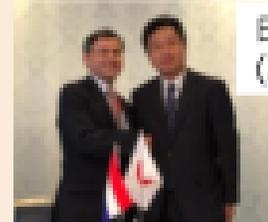


既存大規模火力発電所における水素混焼を可能とするための技術開発を実施し、**2018年に水素混焼率20%を達成した。**

出典：HPS資料、S&C資料より作成

2020年より、水素専焼発電の技術開発を実施予定。将来的には、オランダがマグナム発電所にて計画している**世界初となる大型水素専焼発電の商用運転への展開**を目指す。

→日蘭で水素発電の実現に向けた協力覚書を締結



日蘭MOC締結 (2019.9)

②地域における熱電供給のコジェネ発電（1MW級）のR&Dの流れ



神戸市のポートアイランドに整備された水素発電施設（水素CGS）

水素を天然ガスに0～100%まで自在に混焼可能な技術を開発し、**2018年4月には水素専焼(水素100%)による市街地への熱電供給を世界で初めて達成した。**

出典：HETS/EDCO主催「水素・燃料電池の力」海外研修 受講資料より（2019.8） 出典資料をS&C資料より作成

エネルギー供給能力
電力：約1,100kw
熱：約2,800kw



街区への供給イメージ

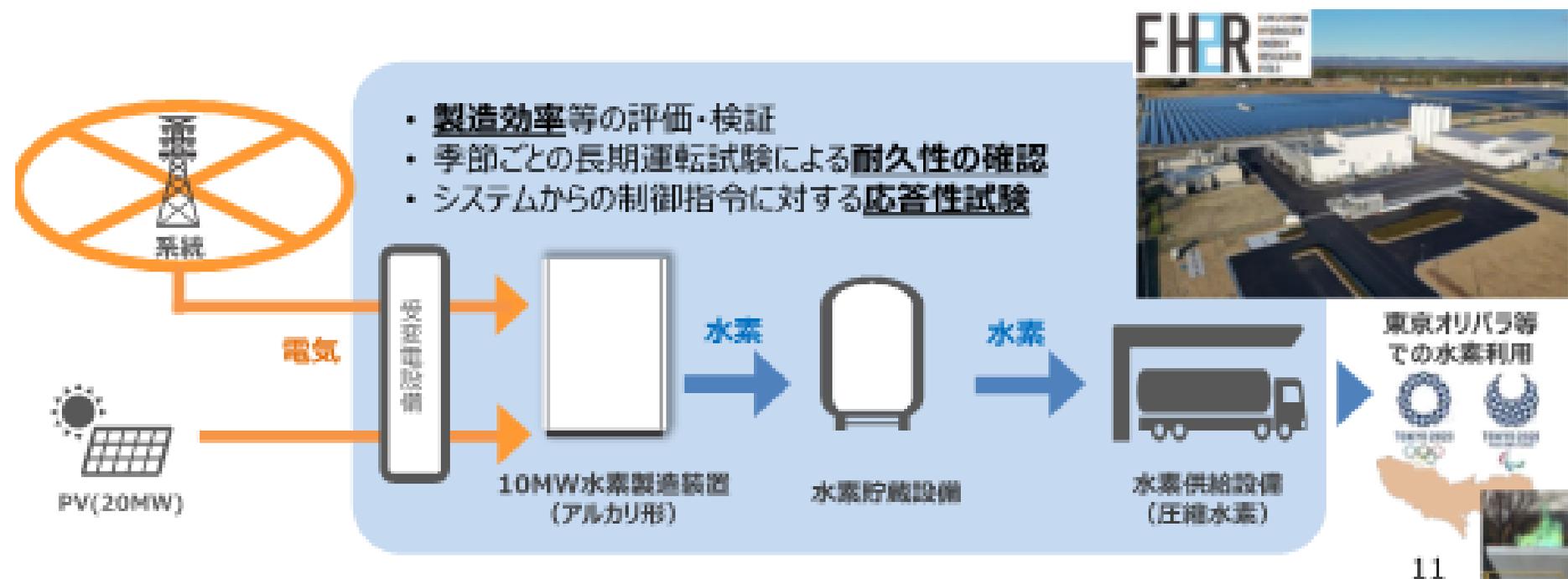
水素CGSにて、高効率な水素**専焼**発電の技術開発を実施中。

出典②

地域の再エネを最大限活用する取組（Power to Gas）

- 再エネの大量導入は調整力確保とともに余剰の活用策が必要。水素利用のポテンシャルは大。
- 特に蓄電池では対応の難しい「季節を超えるような長周期の変動」に対しては、有効。
- 福島県浪江町の「福島水素エネルギー研究フィールド」では、太陽光発電(20MW)で水を電気分解して水素を製造(年間約200トン)。
- 将来的な水電解技術の商用化の実現に向けて、製造効率の評価、耐久性の確認等の技術実証を行う。
- 3月より水素の製造・出荷に着手し、3月7日には開所式を開催。

福島県浪江町での大規模水素製造実証プロジェクト



出典②

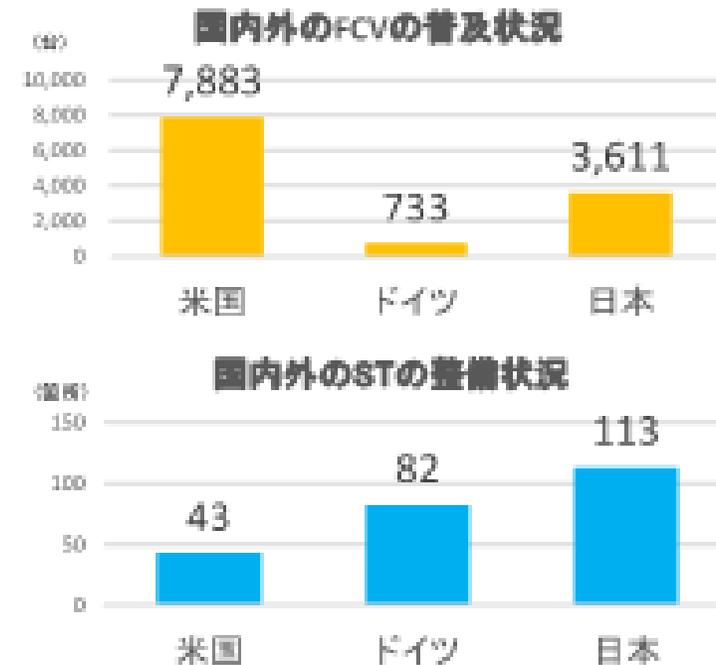
水素ST及びFCVの普及目標、現在の実績

- モビリティにおける水素利用の中核はFCV・水素ステーションの普及。FCVは2020年までに4万台の普及を、水素ステーションは2020年度までに160箇所の整備を目指す。
- FCV・水素ステーションの2020年代後半の自立化に向けては、FCVの量産化 及び 安定収益の裏付けのあるステーション整備（自立的なビジネス展開）が必須。そのため、規制改革、技術開発、ステーションの戦略的整備を三位一体で推進。
- 燃料電池技術の横展開、及び水素ステーションインフラの有効活用（稼働率向上）の観点からは、他のアプリケーションへの展開を合わせて進めていくことが重要。

FCV・STの普及イメージ

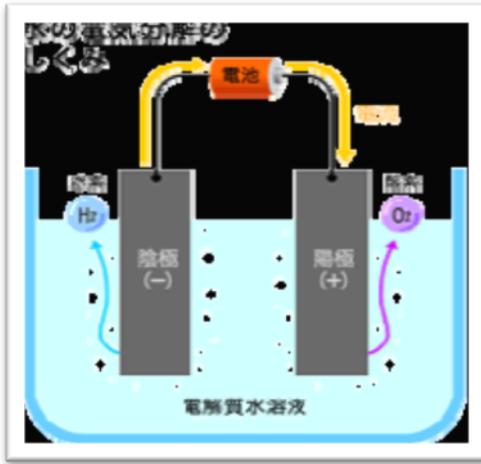


FCV・STの普及実績



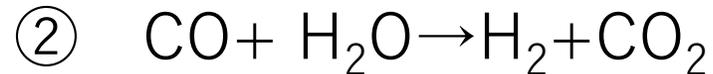
3. 水素の製造法

(1) 電気分解法：電気エネルギーで水を水素と酸素に分解する。



- ・再生エネルギーによる製造ならCO₂フリー。
- ・1Nm³製造に理論値で3.6 kWh必要（現実には5～6 kWh）。
- ・水素製造の効率向上、大規模化への対応、再エネの負荷変動への対応などが今後の課題。アルカリ水分解法などが研究中

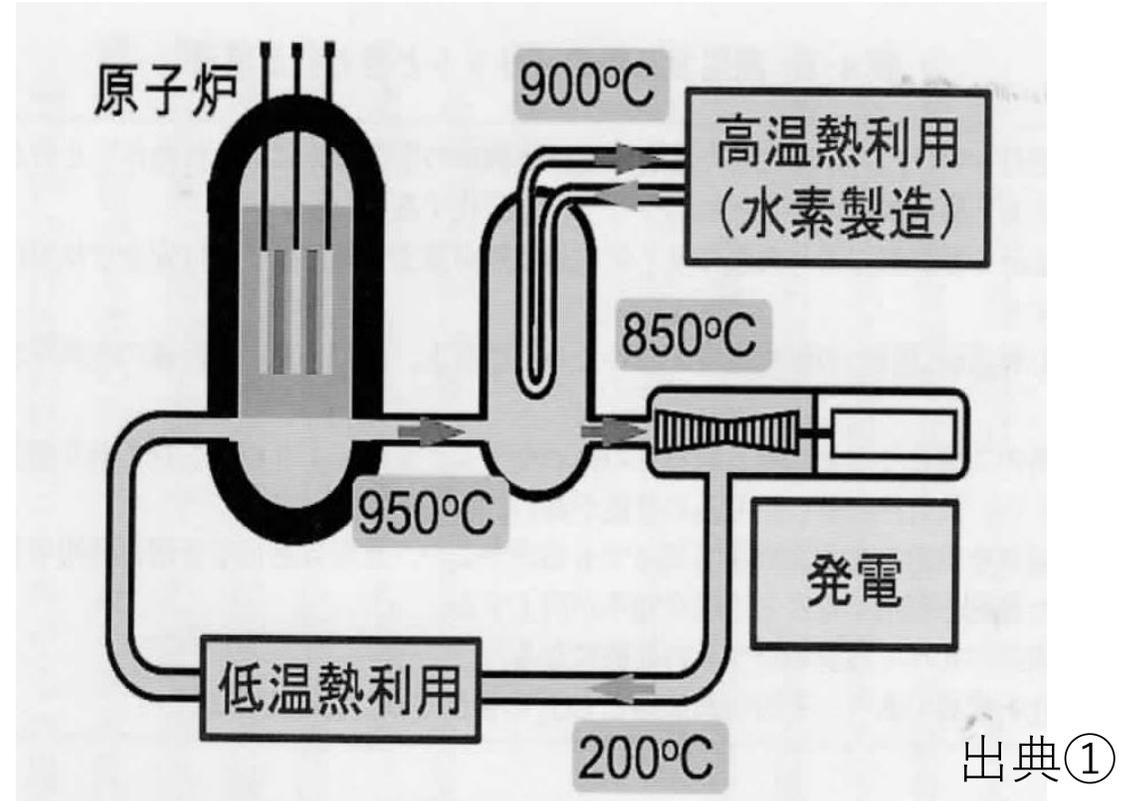
(2) 水蒸気改質法：LNG等の化石燃料（主成分メタン）と水蒸気を高温環境下（900～1000℃）で触媒のもとで反応させる。既存技術で比較的経済性あり。



生成される二酸化炭素（約1kg/Nm³）の処理（CCS：通常地中貯留）が必要となる。

(3) 熱分解法：直接熱分解、熱化学分解法

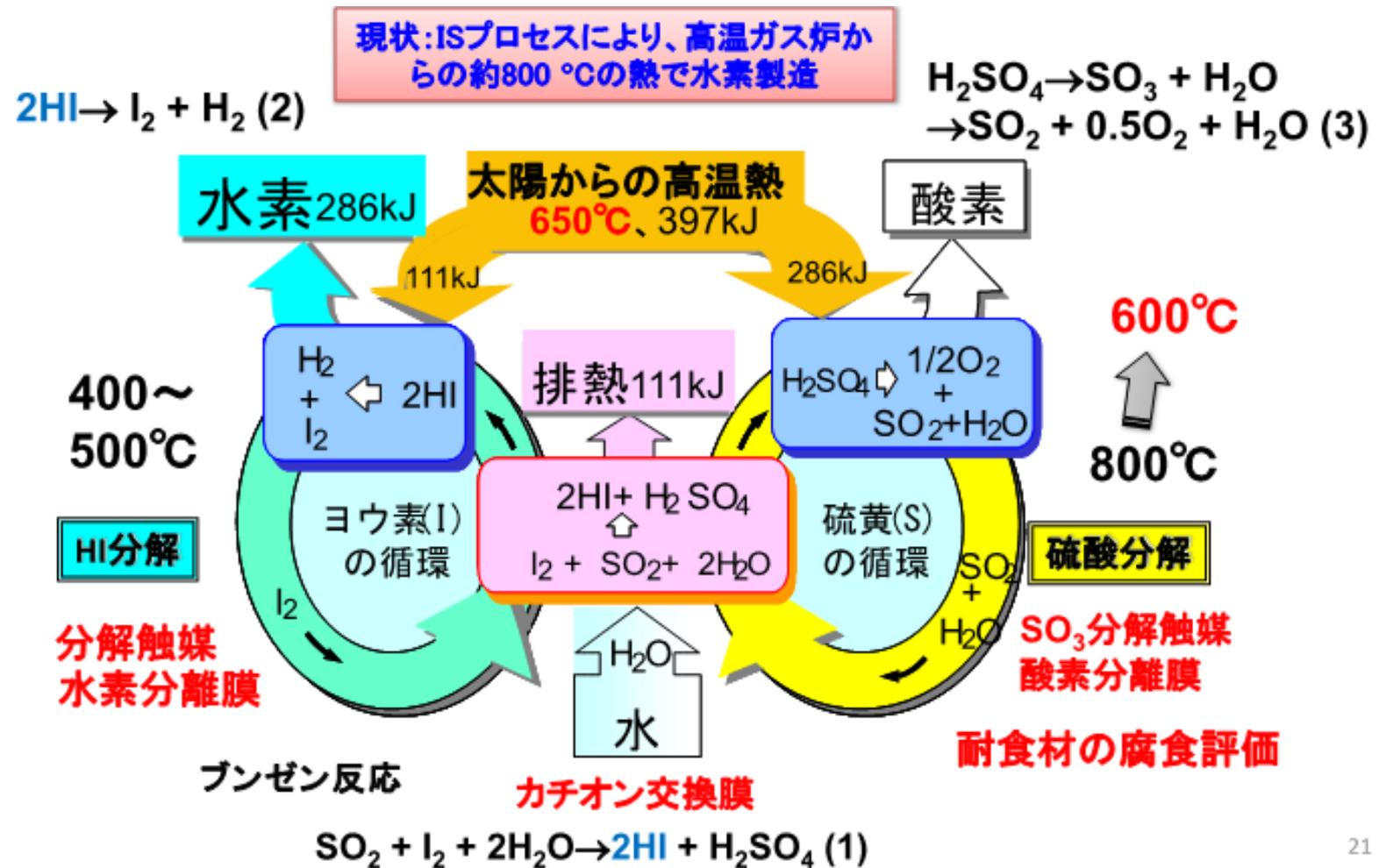
①高温ガス炉型原子炉の冷却液（ヘリウム）を使用して水を直接分解し、水素を得る。高温ガス炉は冷却材がヘリウムで不活性、かつ減速材はグラファイト（黒鉛）で安全性が高いと言われる。一方、大型化が困難（現状の発電規模は30万kW程度）での経済性、および（原発共通としての）使用済み燃料処理の課題あり。



結局は地球に食わず核のゴミ（毎日新聞川柳欄）

②ISシステム：高温環境下で水をヨウ素サイクルと硫黄サイクルで回し、水素と酸素を生成する。

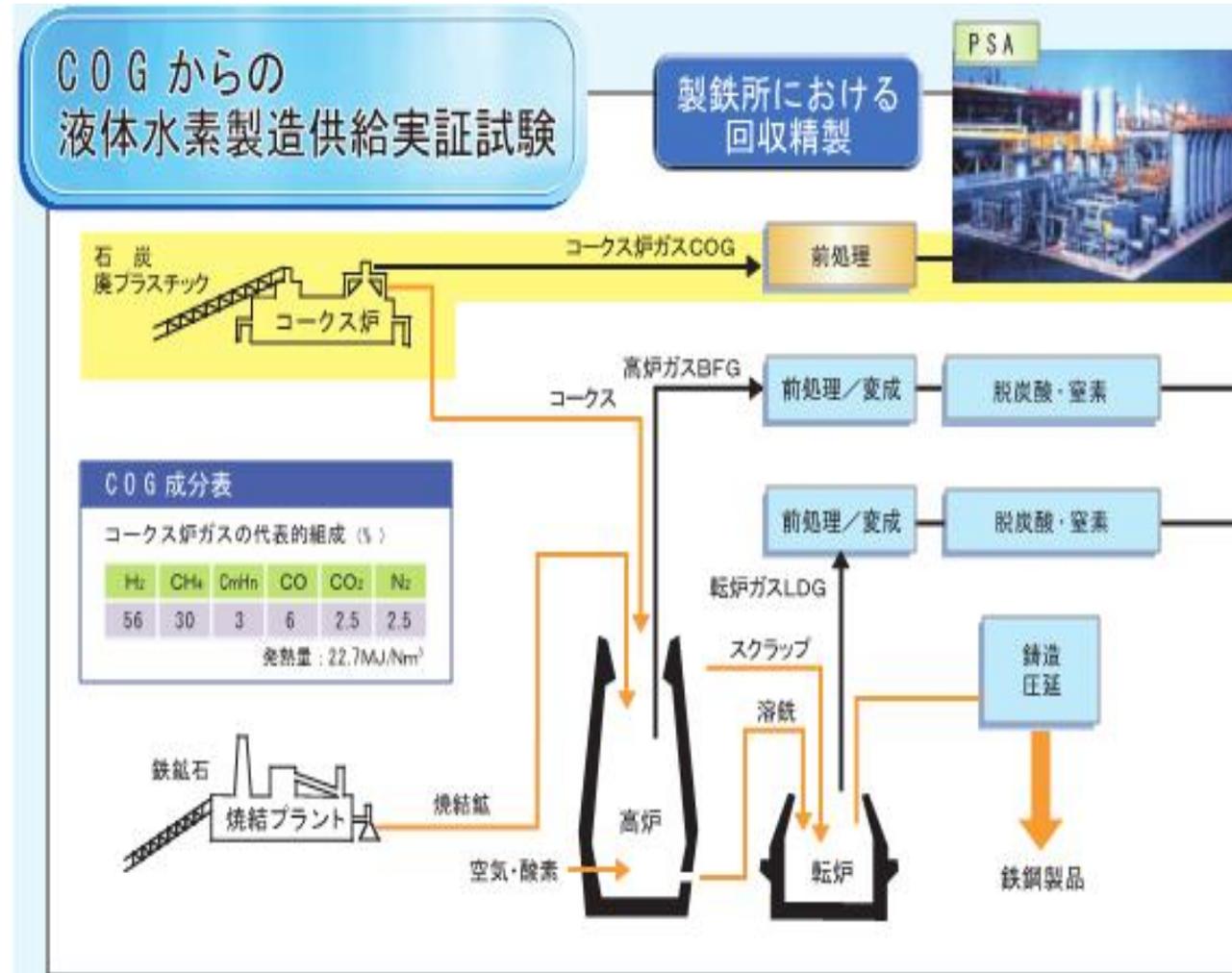
高温ガス炉での生成が現状の計画だが、太陽熱を利用する研究が進行中。



出典：水素社会の実現に向けた方向性／様々な水素製造方法の比較検討（東京農工大2014）

(4) 副生水素：苛性ソーダ (NaOH)やコークス製造の過程で副産物としての水素生成

右は製鉄所のコークス炉から発生する水素を抽出する例。広く実用されており、その大部分を所内で消化している。本格的な水素需要には対応できない。生成される二酸化炭素は約1kg/Nm³



H₂

4. 水素の保管・輸送法

(1) 保管法

- 気体方式：体積効率を上げるため、20～70MPaに圧縮して保管
圧力容器の軽量化、ガス漏れ対策、脆性対策等の課題
- 液化方式：融点以下に冷却して800分の1に体積圧縮
容器の小型化・軽量化、低温脆性、断熱技術、気化ガスの処理等の課題
- 水素吸着方式：水素吸着性物質に吸着して保管
常温・常圧的保存性。吸着効率、吸着材の重量等の課題
- 化合物方式：水素を含む化合物に生成して使用時に水素を分離
常温・常圧的保存性。水素化号と分離の処理が必要

(2) 輸送法 出典：水素の製造、輸送・貯蔵について（資源・エネ庁 2014年）



高压ガスによる水素の輸送・貯蔵

- ◆ 水素を高压に圧縮し、ポンプ等で輸送・貯蔵。



国内における高压ガス輸送に関する規制見直し

圧縮水素運送自動車用容器の最高充填圧力を35MPaから45MPaに引き上げるための技術基準の整備を実施済み



NEDOプロジェクトで実証された45MPaトレーラー

実用化状況

既に外販用の水素輸送方法として普及

輸送効率

例えば20MPaであれば常圧の状態に比べて約200分の1に圧縮が可能

エネルギー投入

圧縮に一定のエネルギーを要する

経済性

圧縮機や高压で貯蔵するタンクなどについては、低コスト化に向けて更なる技術開発が必要

留意点

高压にすることにより、取扱いには注意が必要であり、高压ガス保安法等の法規への対応が必要

液化水素による水素の輸送・貯蔵

- ◆ 水素を -253°C まで冷却することで液化させ、輸送・貯蔵を行う。



実用化状況

従来はロケット用燃料として用いられ、近年では工業用の水素輸送方法として普及

輸送効率

常圧のガス状態に比べて約800分の1の体積に圧縮することが可能

エネルギー投入

液化に一定のエネルギーを要する

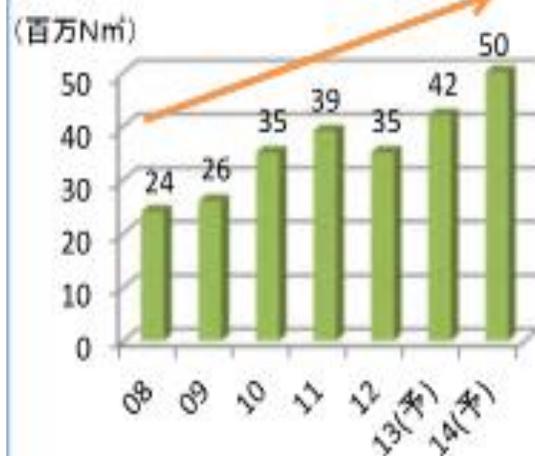
経済性

液化には大規模な設備が必要となるため、設備コストが高まる

留意点

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必要
また、法令上は「高圧ガス」となるため、高圧ガス保安法等の法規への対応も必要

国内における液化水素の活用



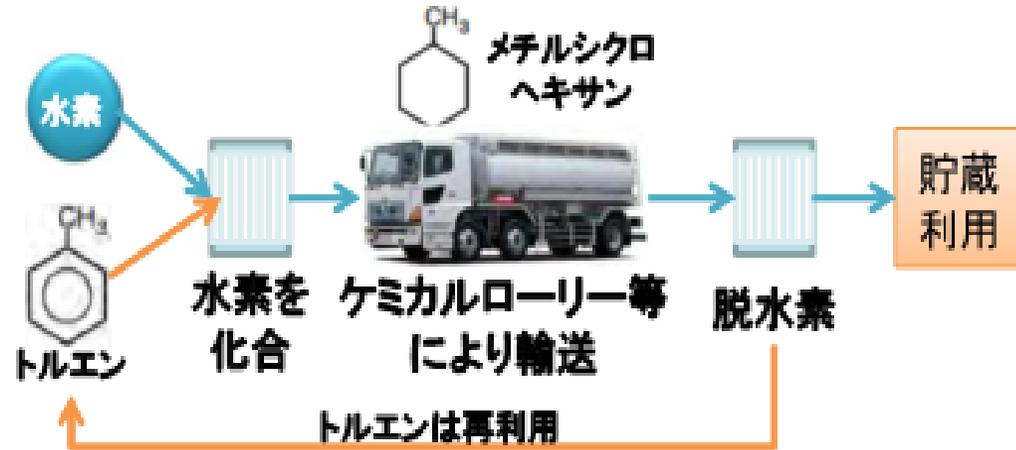
[出典]岩谷産業

✓ 産業ガス向けの液化水素販売は増加傾向。 [出典]ガスレビュー

✓ LNGの冷熱等を活用して、効率よく水素を液化する取組も国内で行われている。

有機ハイドライドによる水素の輸送・貯蔵

- ◆ 水素をトルエンに化合させてメチルシクロヘキサンの形にして輸送・貯蔵。需要地で脱水素して水素を活用。



有機ハイドライドによる水素ステーションへの水素輸送



- ✓ 将来的には、メチルシクロヘキサンを水素ステーションに運び、オンサイトで脱水素して燃料電池自動車に供給することも検討されている。
- ✓ このためには、脱水素装置の小型化に向けた技術開発が必要。

実用化状況

脱水素のための触媒について研究が進められており、実用化段階に達しつつある

輸送効率

常圧のガス状態に比べて約500分の1の体積に

エネルギー投入

脱水素に一定のエネルギーを要する

経済性

水素化合、脱水素には一定の投資が必要であるが、常温・常圧での輸送・貯蔵が可能であり、既存の輸送・貯蔵手段でも対応可能

留意点

水素キャリアとしての利用が想定されていないため、各種規制について対応が必要

* 水素貯蔵合金：金属組織の空間に水素を貯蔵するタイプと、水素との化合物として貯蔵するタイプがある。

・ 利用例：Ti、Mn、Ni等の遷移元素。希土類、Al,ジルコニウム等。

バナジウム、Mg、Ca等の合金。

・ 利点：高い充填率。放出が温和で事故の可能性低い。

・ 欠点：バナジウム、Mg系以外は大重量。吸蔵と放出の過程での熱反応、水素脆化、合金材料の高価格など。

・ 作動温度：Mg系の250～350°Cを除き、0～100°C

・ 有効水素吸蔵量（合金に対する重量パーセント）：Mg系約3、V系1.8～3.0、その他1.0～1.7

試算：ガソリン19L相当の水素5kgを吸着する合金の容器重量は200～600kg

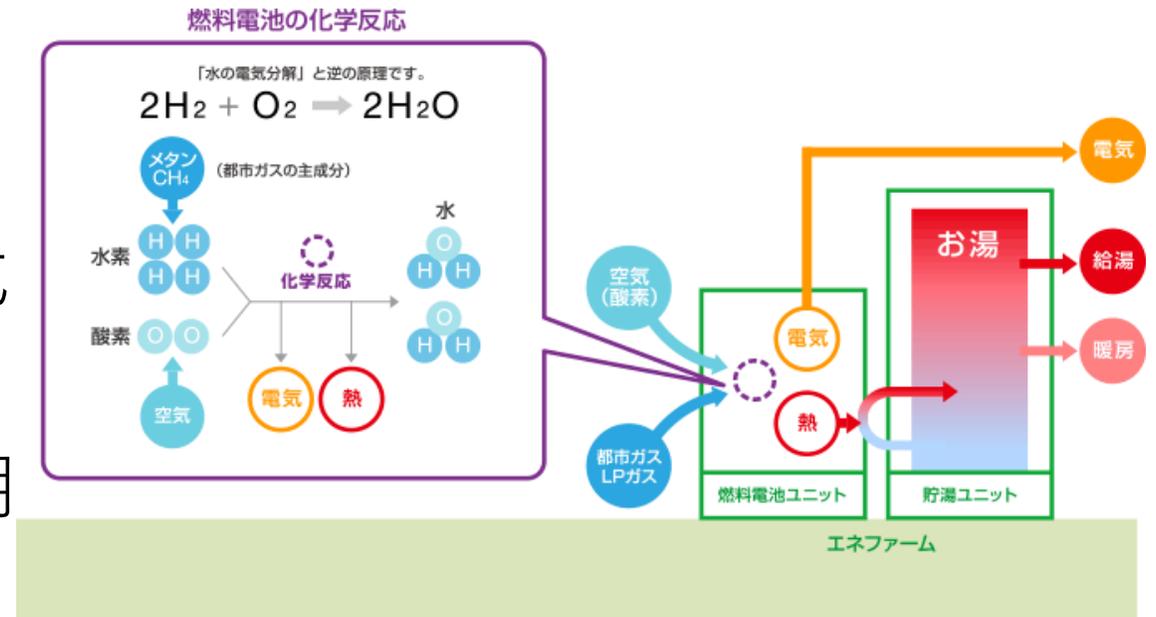
5. 水素の最終利用形態

(1) 燃料電池：各種電池の比較 出典：日本電機工業会

| 種類 | アルカリ型 (AFC) | 固体高分子型 (PEFC) | リン酸型 (PAFC) | 熔融炭酸塩型 (MCFC) | 個体酸化物型 (SOFC) |
|--------|----------------|------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 電解質 | 水酸化カリウム水溶液 | 陽イオン交換膜 | リン酸 | リチウム・カリウム炭酸塩 | セラミック |
| 作動温度 | 50～150℃ | 80～120℃ | 190～200℃ | 600～700℃ | 600～1000℃ |
| 使用可能燃料 | 純水素 | 都市ガス、LPガス、石油、メタノール、石炭ガス、純水素等 | | | |
| 主な用途 | 宇宙開発等特殊用途 | 小型家庭用、携帯・可搬用、車載用 | 産業・業務用、大規模事業用、非常電源用 | 産業・業務用、大規模事業用、非常電源用 | 小型家庭用、産業・業務用、可搬用、大規模事業用 |
| 発電効率 | 70% | 33～44% | 39～46% | 44～66% | 44～72% |

(2) 民生分野：エネファーム

- 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。
- 現在は家庭用として実用化。
- 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。
- 太陽光発電などより高能率。
- 価格は200万円以上だが補助金（数万円、燃料電池の形式によって異なる）がある。
- 短寿命（約10年）や保守費用のデメリットあり。

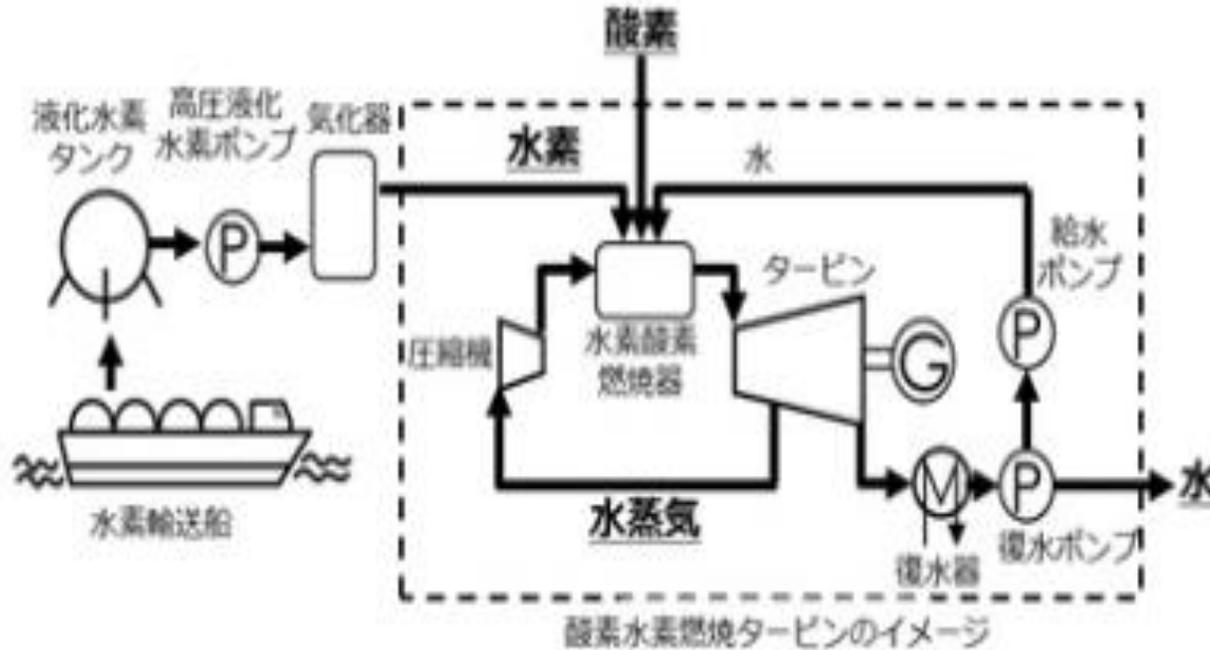


※暖房使用時など、付属のガス給湯器でお湯をつくることもあります。

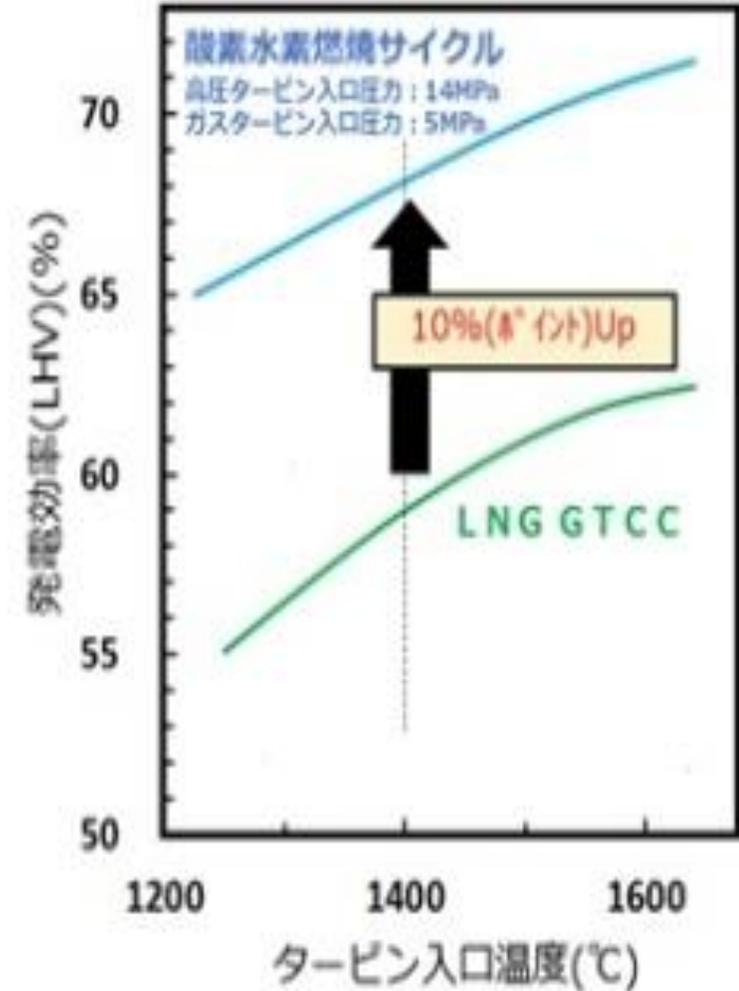
(3) 発電分野：ガスタービン

- 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る。
- 神戸で混焼および1MW級の専焼タービンの実績あり。
- 利点：水素燃焼でタービンの高温・高圧化⇒熱効率の向上
- 課題：燃焼器やタービンの耐熱性。NO₂対策。水素燃焼時の逆火対策等。
- 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る（IGCC：石炭ガス化複合発電）。

①水素専焼型（混焼型は他の燃料と混ぜて投入か別個に投入）

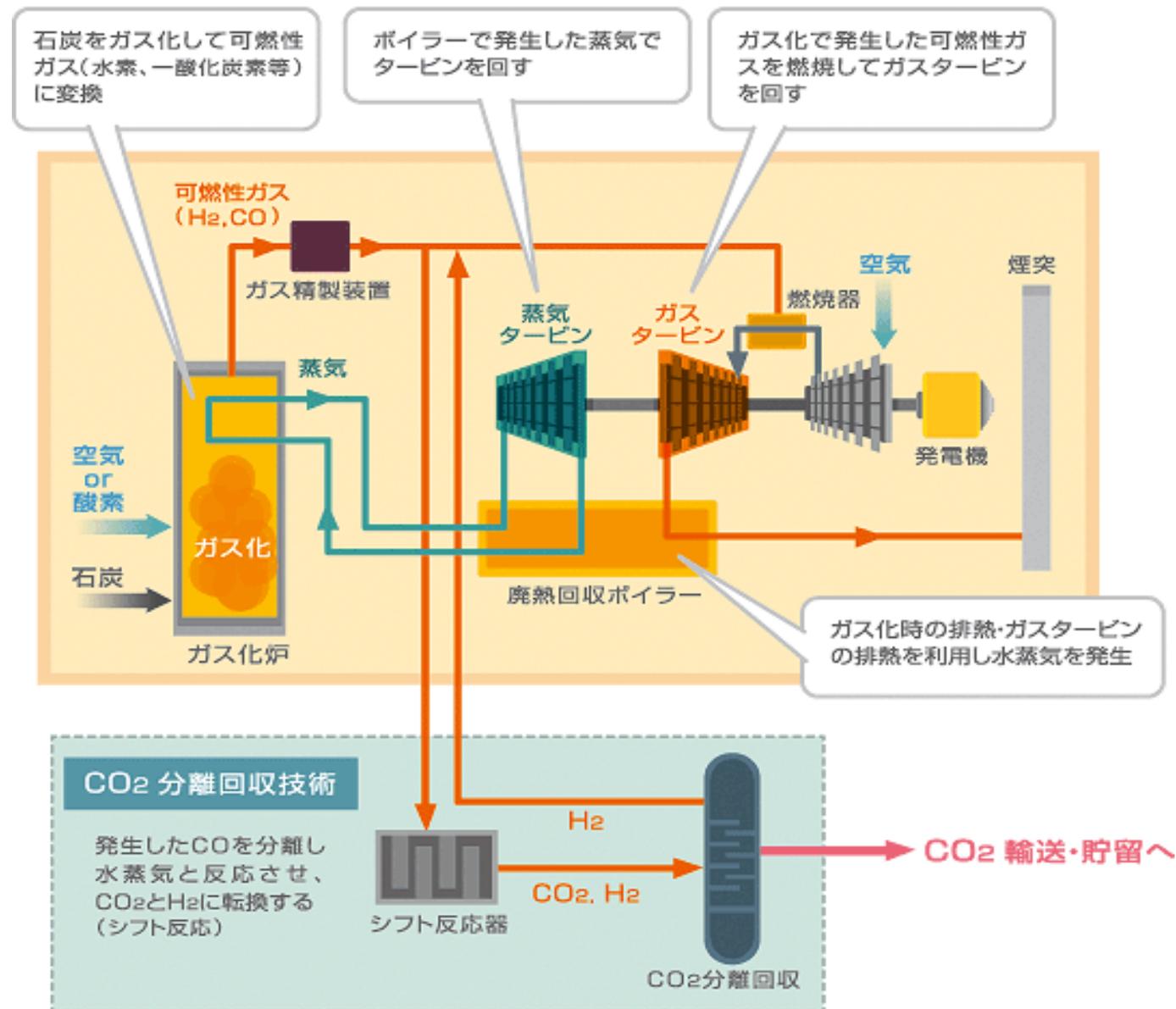


- 水素と酸素の燃焼により発生するのは水蒸気のみ
- 水蒸気のエネルギーを最大限活用することで高い発電効率を実現
→ 我が国の CO2 排出量の 4 割を占める電力部門の低炭素化に貢献
- 水素を燃料として安定的かつ大量に消費
→ 大規模な水素利用技術として水素社会の実現に貢献



②IGCC (Integrated coal Gasification combined Cycle 石炭ガス化混合発電)

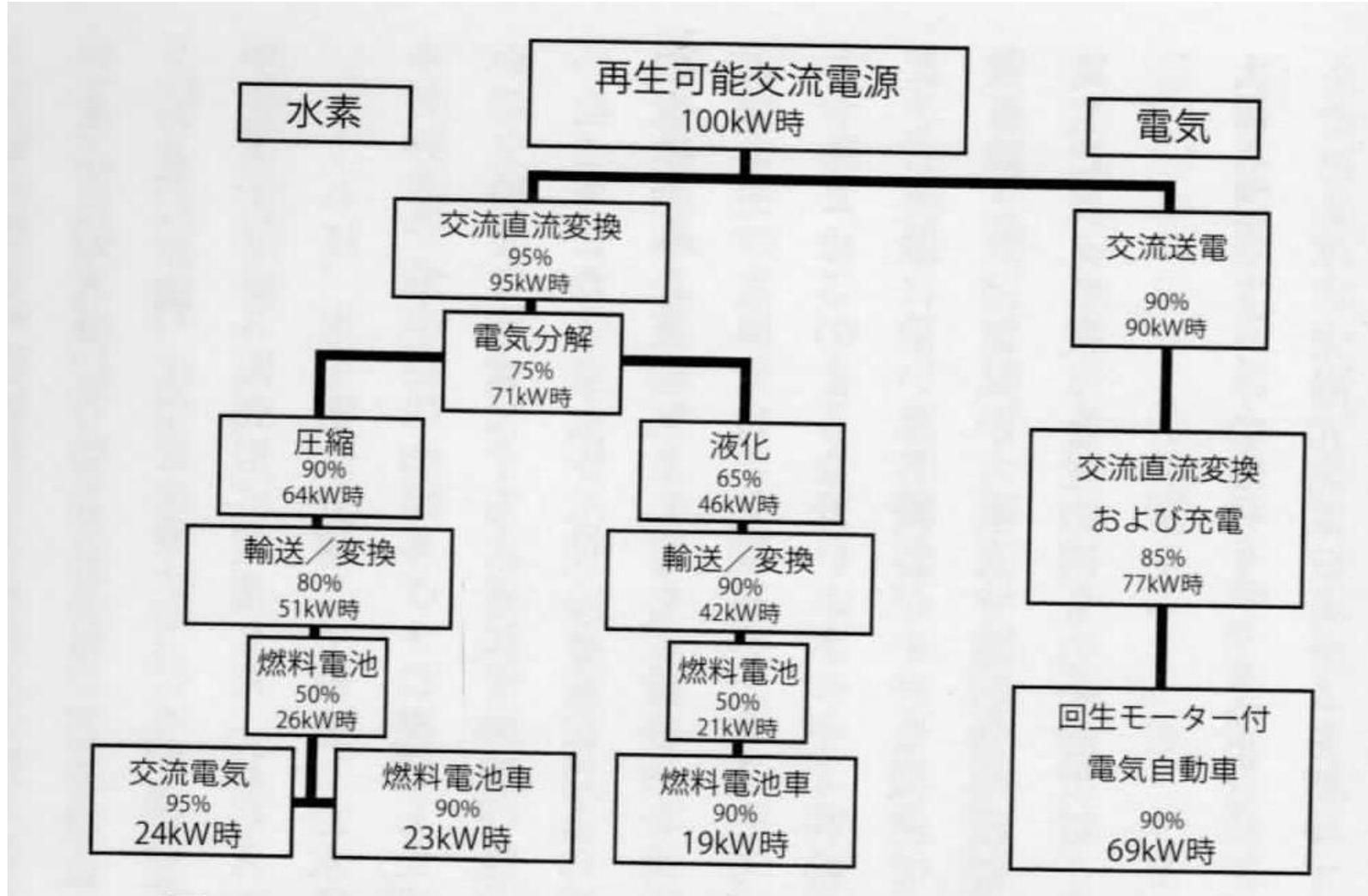
IGCCの全体図



6. 経済性・実用性

• 水素は2次（3次）エネルギーという本質的な弱点がある。

• その上、利用法による変換効率のロスが発生。
右図は交流電源から水素を発生させて燃料電池に変換し燃料電池車を駆動した場合と、交流電源で電気自動車を駆動した場合の効率の比較。



出典：Ulf Bossel 2005

FCV（燃料電池自動車）の効率と経済性

- 電力からEV（電気自動車）への変換はEVステーションでの交流－直流変換のみで、その効率は約70%
- 電力からFCVへの変換は電気-水素変換から輸送、燃料電池の発電と多段に渡り、その効率は20%程度となる。
- 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）。
- 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。EV向けの給電ステーションは急速充電で約1千万円。
- 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。
- 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可能

*FCV：例えばタンク容量

- エンジン車と同等の航続距離を持つ条件
 - 同じ熱量を発生するタンク容量（熱発生から動力伝達までの効率を等しいと仮定）
- ①発熱量からの比較：ガソリン47.3MJ/kg、水素141.8MJ/kg
⇒ $47.3/141.8 \div 1/3$ の重量が良い。
 - ②容量換算：ガソリン比重0.75から1.33L/kg。水素比重0.089kg/Nm³⇒11236L/kg（気体）⇒14L/kg（液体）
 - ③必要容量： $14/3 \div 4.7$ 倍の容量が必要

実際には断熱材等の材料が追加要素としてある。

水素製造コスト

- 大量の自家製造・消費の場合は約10円/Nm³、容器で外販の場合は100～200円/Nm³とされている。
- 一般に、副生水素は安いと言われるが、自己消費が大半であり、大量消費の時代には対応できない。
- 種々のコスト計算例があるが、相当のばらつきがある。
- 計算の前提条件など明確でなく、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。
- 因みに国の目標値30円/Nm³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。

コストの比較表その1

| | | 製造コスト (円/Nm ³) | 備考 |
|----------------|---------|--|---|
| 副生水素 | 苛性ソーダ | 20 | ・各種資料からの引用であり、詳細は不明 |
| | 鉄鋼 | 24~32 | ・各種資料から12~20円/Nm ³ ・「水素社会における水素供給者のビジネスモデルと石油産業の位置付けに関する調査報告書」、石油産業活性化センター、平成15年)では16.3円/Nm ³ であるが、最新のエネルギー価格に基づく28.1円/Nm ³ となり、上記の価格に比べ12円の上昇 |
| | 石油化学 | 20 | ・各種資料からの引用であり、詳細は不明。 |
| 目的生産 (既存設備) | 石油精製 | 23~37 | ・各種資料から10~24円/Nm ³ ・「水素社会における水素供給者のビジネスモデルと精油産業の位置付けに関する調査報告書」、石油産業活性化センター、平成15年)では11.1円/Nm ³ であるが、最新のエネルギー価格に基づく23.7円/Nm ³ となり、上記の価格に比べ13円の上昇。 |
| | アンモニア | N.A. | |
| 目的生産 (新規設備) | 化石燃料等改質 | 31~58 (※)ランニングのみ | ・改質器の設備費等は含まない。 ・改質効率を70%と想定。 ・都市ガス(工業・商業用)1.7円/MJ、A重油1.4円/MJ、LPG2.9円/MJ、ナフサ1.8円/MJ ・PSA用電力は0.33kWh/Nm ³ -H ₂ 。2012年の電力平均単価16.5円/kWh |
| | 水電解 | 84(系統電力) 76~136 (風力~太陽光) (※)ランニングのみ | ・電解装置の設備費等は含まない。 ・電解効率を70%と想定。 ・系統電力は2012年の伝よく平均単価16.5円/kWh ・調達価格算定委員会資料に基づき、風力発電は30万円/kWh、太陽光は10kW以上を29万円/kWh、10kW未満を38.5万円/kWhとし、コスト等検証委員会の手法により発電単価を推計すると、各々14.9円/kWh、23.6円/kWh、26.8円/kWh ・水素製造は発電サイトでの電解を想定していることから、送電コストは含まない。 |

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

また、電力料金、化石燃料価格等の上昇等に伴い、現在、コストが高くなっているものもあると想定される

コストの比較表その2

| 水素源 | 水素コスト (円/Nm ³) | コスト前提 *1 |
|--|-------------------------------|---|
| 苛性ソーダ電解 副生水素 | 20 | 電解工場の未処理卸売り価格 |
| コークス炉ガス (水素含有率57%) | 16~21 | 今回試算ベース PSAにより精製し、99.99%水素とする。 |
| 液体水素コシ輸入 (Montreal ~Vancouver経由) | 93 | 40ftコンテナ3本/月輸入 液体水素2.7ton/本 現地液水価格30円/Nm ³ |
| 天然ガス 水蒸気改質 | 28.8 | 稼働率：90% 天然ガス価格：26円/Nm ³ |
| ナフサ水蒸気改質 | 19.9 | 稼働率：91.3% ナフサ価格：30円/Nm ³ |
| メタノール 水蒸気改質 | 30.2 | 稼働率：91.3% メタノール価格：30円/Nm ³ |
| プロパン 水蒸気改質 | 29.8 | 稼働率：91.3% プロパン価格：30円/Nm ³ |
| 石炭部分酸化 | 36.3 | 稼働率：90% テキサコ法 石炭価格：7000円/ton |

- 出典：NEDO WE-NET第Ⅱ期研究開発タスク1「システム評価に対する調査・研究」平成12年度成果報告書

*1：規模は液水25ton/日（≒11,600Nm³/h）規模と設定。

結言

- 全体的に、盛んに研究開発が行われているが、水素社会が低コストで大規模に稼働するレベルには到達していない。
- 水素自体はクリーンでも、製造時や各反応時に炭素を排出する方式ではトータルシステムとして問題。その処理コストが足される。
- 高圧気体や超低温液体での保管や運搬および漏れによる爆発対策等でもコストがかかる。
- 水素の利用は高コストを覚悟し、必要性の高い分野に限るべき。
- 純水素でなくともCO₂の発生を軽減できるシステムは採用可能。
- 再生エネルギーによる水素製造が望ましいが、生産性・経済性に課題。
- 再生エネルギー発電の平準化に利用するのは選択肢として可能。
- 高温ガス炉の水分解方式は、原発事故のリスクから採用を避けるべき。
- 移動手段としてはFCVよりEVを優先すべし。

参考資料

- ①「水素社会」はなぜ問題か 小澤祥司 岩波ブックレット931
- ②水素社会実現に向けた経済産業省の取組 2020年2月
- ③水素・燃料電池戦略ロードマップ 水素・燃料電池戦略協議会 平成31年3月12日
- ④水素の製造、輸送・貯蔵について 資源エネルギー庁燃料電池推進室 平成26年4月14日
- ⑤平成30年度 水素輸送・貯蔵研究会 報告書 (財)エンジニアリング協会 2019年8月
- ⑥ 水素社会の実現に向けた方向性/ 様々な水素製造方法の比較検討 東京農工大学 亀山秀雄 2014年
- ⑦NIPPON STEEL MONTHLY 2004。1-2
- ⑧NEDO WE-NET第Ⅱ期「システム評価に関する調査研究平成12年度成果報告書」 2001.3
- ⑨TECH MAP [第183回 進化する石炭火力発電 ～環境にやさしいIGCC、IGFC～ | テクの雑学 | TDK Techno Magazine](#)
- (10) (社) 日本ガス協会HP
- ⑪ [充電スポット／水素ステーション | クリーンエネルギー自動車AtoZ \(cev-pc.or.jp\)](#)
- ⑫ <https://www.bing.com/images/search?q=%e6%b0%b4%e7%b4%a0+%e7%87%83%e7%84%bc+%e3%82%bf%e3%83%bc%e3%83%93%e3%83%b3+bing+images&qpvt=%e6%b0%b4%e7%b4%a0%e7%87%83%e7%84%bc%e3%82%bf%e3%83%bc%e3%83%93%e3%83%b3%e3%80%80bing.com%2fimages&form=IGRE&first=1&tsc=ImageBasicHover>