	レポート 岩石と水からの水素生成 SCE・Net 鹿子島達志	R-101 発行日 2025年1月13日

1. はじめに

SDGsの推進は世界の重要課題であるが、中でもエネルギーは、気候変動を助長する最大の要素であり、温室効果ガス排出量の約60%を占める。現状は、再生可能エネルギーの利用については前進が見られるものの、解決には程遠く、クリーン燃料とクリーン化技術を推進させる必要がある。そのポイントは、生産時や燃焼時に大量にCO₂を排出する化石原料に替わる水素の積極的な活用とされている。しかし、水素がクリーンかどうかは疑問視されており（3項で取り上げる）、そのため、エネルギーを殆ど使用しない「岩石と水から水素を生成する技術」、および地下資源としての「天然水素（ホワイト水素）」が期待される。以下、その内容と考察の結果を報告する。

2. 日本における水素社会の展望

2023年時点で世界の水素生産量は約1億トンで、2050年には約4.3億トンと予想されている（下左図：出典IEA「Net-Zero Roadmap 2023/9」参照）。国内の生産量は、2023年時点で年間14万トンに過ぎない。一方、需要は約200万トンで差が輸入量に相当する。国内水素ステーションにおける販売価格は100円/Nm³である。2023年6月に改訂された日本の水素基本戦略では、低コスト化を進め、需要と供給を一体的に拡大して水素の社会実装を推進する方針である。具体的には、供給コスト（CIF）を2030年に30円/Nm³、2050年には20円/Nm³へとグリーンイノベーション（GI）基金等も活用し、ガソリンや液化天然ガスと同程度まで引き下げ、水素導入量を2030年に300万トン/年、2040年に1,200万トン/年、2050年には2,000万トン/年と、挑戦的な目標を掲げている。下図は出典：「水素を取り巻く国内外情勢と水素政策の現状について」2024年9月6日資源エネルギー庁より。



3. 水素活用への疑問と反論と考察

水素活用がSDGsのエネルギー課題の抜本対応の様な扱いに対しては、疑問の声も多い。いくつかを以下に紹介する。ベースは、塩沢 文朗氏 国際環境経済研究所主席研究員の説に基づく。

Q1：水素は水を分解して水素を得るため相当量のエネルギーが必要となり、クリーンと言えない。

A1：世界エネルギー消費量の1,500倍を超える太陽、風力等の再エネを利用すれば問題はない。

Q2：再エネから変換された二次エネルギーの電気から生成することは電氣的にムダである。

A2：日本は再エネ資源が不十分。水素輸入がエネルギーと環境問題を克服する唯一の手段だ。

Q3：水素は、生産、圧縮または液化、輸送といった工程で大量のエネルギーを消費する。

A3：海外から安価な再エネ利用の水素を輸入すれば、価格競争力のあるエネルギー源になる。

等がある。この回答への疑問は、日本ベースの狭い視点である点と、再エネ源を海外に依存した理屈であり、根本的な回答になっていない点である。従って、岩石と水から水素を生成する「富士吉田水素ガス発電」の方式（後述する）や、地中資源「天然水素」の活用への期待がある。

4. 水素発電の実証例（環境省資料）

出典：https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/application_hpowergeneration.pdf

下図に実証例を示す。左：三菱重工 高砂水素パーク、右：富士吉田水素発電所

	水素発電実証設備「高砂水素パーク」	富士吉田水素発電所
事業概要	<ul style="list-style-type: none"> 水素製造からガスタービン発電まで一気通貫で検証できる設備を建設 隣接する実証設備複合サイクル発電所では、出力56万6,000kWのガスタービン・コンバインドサイクル（GTCC）発電設備の長期実証運転を実施（2020年7月～） 	<ul style="list-style-type: none"> 国内初の実証型水素専焼発電所を運転 水素製造では黒曜石やがんらん岩等と水を反応させて水素を製造し、出力320kW（水素量270Nm³/h）の発電を実施
主体事業者	三菱重工業	イーレックス株式会社、Hydrogen Technology
実施場所	高砂製作所（兵庫県高砂市）	富士吉田水素発電所（山梨県・富士吉田市）
実施期間	2022年2月～	2022年4月～
		

出所：三菱重工業HP、イーレックスHP、日本経済新聞「イーレックス 国内初の水素発電所、22年5月に稼働へ」（2021/9）

・水素発電実証設備「高砂水素パーク」（三菱重工業）

三菱重工業は、開発・製造拠点を置く高砂製作所（兵庫県高砂市）にて、水素製造から発電までにわたる技術を一貫して検証できる「高砂水素パーク」を整備する。この取組は世界初となる。2025年の商用化に向け、566MWの大型水素ガスタービン発電施設の長期実証運転を通じて、水素30%混焼発電を検証。中小型水素ガスタービンについては水素100%の専焼実証をおこなう。

・富士吉田水素発電所（イーレックス、および Hydrogen Technology）

イーレックス社は、2022年4月より国内初となる水素専焼の発電所として実証実験を開始した。燃料には製造工程においてもCO₂を排出しない「クリーン水素」を用い、出力は320kWと小規模ながら、次のステップには大型水素実証設備の検討も進める計画。また、今後は水素ステーションやケミカル用途としての水素利用を目的に検討を進めていくとしている。

この2例の大きな違いは、原料の「水素」にある。水素の生成機構が次の様に大きく異なる。

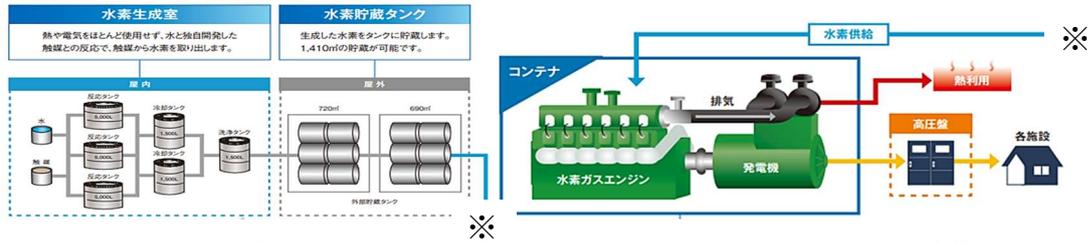
・高砂水素パーク：水素製造能力1,100Nm³/h、ノルウェーHydrogen Pro AS製 アルカリ水電解装置は、発電能力566MWとは1対1の対応をしていない。

・富士吉田水素発電所：水素製造能力270Nm³/h、日本Hydrogen Technology製 鉬石+水による水素発生装置発電能力 270Nm³/hであり、320kWは1.2kW/Nm³、諸文献では、通常 1.0kW/Nm³である。

5. 「富士吉田水素ガス発電所」の詳細

筆者は、知人の紹介により2024年11月2日に「富士吉田水素ガス発電所」現地を見学した。しかし配布資料も無く、説明は通り一遍であり、質疑応答や写真撮影も禁止された。従って、以下は、後日 独自に調査し入手した資料に基づくものである（後にイーレックス社とは確認済み）。

1) フロー図 (イーレックス社)



2) 水素ガス生成設備 (屋内)



3) 水素ガス発電機 (屋外)



4) 詳細仕様 (見学後日の調査による)

- ・ 名称：富士吉田水素発電所 (実証型発電プラント)
- ・ 場所：山梨県富士吉田市新屋 「富士山天然水合同会社」の敷地に設置
- ・ 発電出力：320kW、発電効率 40% 富士吉田市約100世帯の消費電力と言う
- ・ 電力系統：東京電力 (6000V給電網使用) 電力単価や契約単価は機密との事 (イーレックス社)
- ・ 供給水素：純度99.999%、270Nm³/h (300m³/h)、常温 (25℃?)、1MPa未満 (0.05MPa?)
- ・ 電力供給事業者：イーレックス株式会社 (eREX Co., Ltd.) 「新電力」の企業
- ・ 水素ガス供給企業：Hydrogen Technology株式会社 水素生成の特許とノウハウを保持
- ・ 発電装置
 - ① ドイツ 2G社製 水素専焼レシプロエンジン式 能力360kW、効率40.4%
 - ② 施工者：日揮ほか (起工式に日揮社長が出席)
 - ③ 工費：3億円 (作業員3名程度で1-2ヶ月で施工完了した。プレハブ式だろうか?)
 - ④ 設置面積：225m² 変電設備や水素ガス高圧設備も含む 実見でもコンパクトな外観
- ・ 水素生成装置 屋内面積約78m² (23.6坪) の水素生成室 (3層床) 実見でも極めて小さい
 - (屋内)：反応タンク (5000L) 3基、冷却タンク (1500L) 2基
 - 洗浄タンク (1500L) 1基、
 - (屋外)：貯蔵タンク (720m³) 1基および (690m³) 1基
- ・ 稼働期間 着工2021.9、稼働開始 2022.4~2023.3 に実証運転を終了している(後日確認済み)。

6. 「富士吉田水素発電所」の考察 (資料は独自に入手)

1) 「Hydrogen Technology社」の山本泰弘社長の発言 2021年08月07日公開 (Net情報より)

『当社は、水を触媒※1とし天然鉱石※2との反応により外部からの熱や電気をほとんど使用せず天然鉱石から水素を取り出し、水素を生成する工程 (過程) から使用に至るまで、「ほとんど二酸化炭素 (CO₂) を排出しない」という画期的な世界初の新技術の開発に成功しました。』

2) 特許関係：特許第6381143号(特開2018-39710)、特開2021-1097、特開2022-35006、特開2024-

ここで、③のSiO₂の影響は無視、かんらん岩比重を3000kg/m³、富士吉田の水素量は公称 270Nm³/h =24.3kg/hとして、①②③式から水素発生量および、反応缶 1 基当りの岩石量、水量を求めた。

下表はその結果を示す（途中の計算工程は省略する）。反応缶容量は妥当である。

項目	かんらん石重量	かんらん石容量	水重量	水容量	水容量計	<15m ³ (反応缶 5m ³ ×3基)		岩石容量	水容量
単位	kg	kg	kg	m ³	m ³	可否	充填率	m ³	m ³
①	26791.48	8.93	4483.35	4.48	13.41	OK	0.89	4.47	1.49
②	6209.14	2.07	1093.50	1.09	3.16	OK	0.21	1.05	0.36
③	6985.28	2.33	1093.50	1.09	3.42	OK	0.23	1.14	0.36

なお、Hydrogen Technology社の山本社長はインタビューで、「反応槽に入れる水は、300Lで十分なのだが、槽内の酸素（空気）を追い出すために800L入れている」と言っている。上記の表では**360L (0.36m³)**なので、ほぼ合っている。従って、この「富士吉田水素ガス発電所」装置は、世上いろいろな疑念があるものの、以上の考察から決して、根拠のないものではないと判断する。

7. 天然水素

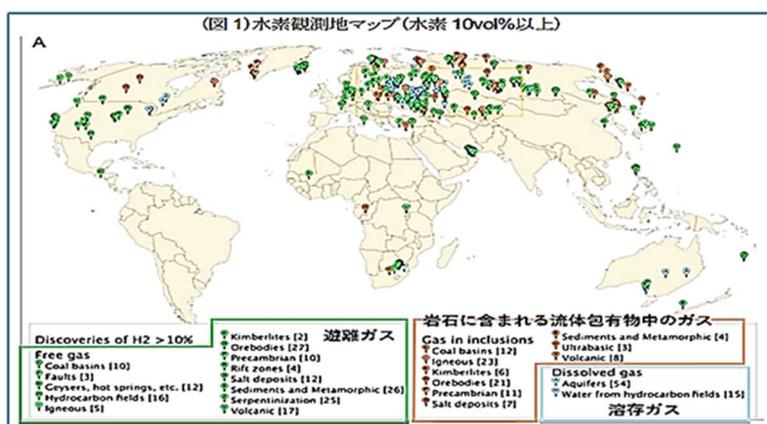
7-1. 最近のニュース情報他

10年位前までは、天然水素（Native / Natural /地中水素 Geologic Hydrogen、ホワイトともゴールド水素とも呼ばれている）は、ほとんど存在しないか、あっても採掘不可能と考えられていた。だが、2012年、西アフリカのマリで見つかった天然水素が状況を一変させた。鉱床が見つかったその村では、カナダ企業のHydroma社が地中の水素をその場で燃焼・発電し、地域の電力を供給している。この発見をきっかけに、天然水素の探索が活発化している。日経エレクトロニクス 2024. 12. 09によれば、2023年5月、フランス北東部のグラン・テスト地域圏の地下に大規模な天然水素（ホワイト水素）鉱床が発見された。調査結果によると推定埋蔵量は3400万トン。特定の鉱床において、天然水素の埋蔵量を具体的に推定できたのは、今回が世界で初めてと言う。現在実施されている天然水素探鉱案件や各種機関の主なプレイヤーは、フランス、豪州、米国の政府機関・大学と各国のスタートアップ企業である。米コロラド州のKoloma（コロマ）社は、これまでビル・ゲイツのブレイクスルー・エナジー・ベンチャーズなどからも資金を獲得していて累計調達額は、2023年に3億ドルを突破している。

7-2. 天然水素の埋蔵量

KolomaのHPは「**最大23 Mt/年**(または今日の年間水素需要の30%)を自然に補充する」と記載している。世界規模の年間の水素生成量を試算した研究例は、対象とする生成場や プロセス、計算方法が異なり、その結果には大きな幅がある。最も楽観的に見積もられているZgonnik(2020) は、**22, 680千ton/year**であり、前記のKoloma社と殆ど同じ値である。体積に 換算すると幅があるが254 ±91Bm³ /yearであり、天然ガスの生産量（2019 年）の4.1Tm³と比較すると、約16分の1と小さい。

次頁図に「JOGMEC：天然水素の動向」掲載の、世界の水素発生箇所分布図を示す。ただし、これは、水素含有推定岩石（蛇紋岩、かんらん岩）の分布ではないが、実際は、水素生成に適した地質条件を持つところは、埋蔵されている可能性が高い。これらの条件を満たす地域は、世界中に数多く存在する。例えば、米国、オーストラリア、フランス、スペイン、ロシア、カナダ、オマーン、日本、中国などが挙げられる。



7-3. 岩石と水から水素生成の機構

JOGMEC 2023/8/31 カーボンニュートラル推進本部総括 小杉安由美 「天然水素の動向」より
 地中の水素生成の機構には、水の放射性分解説や微生物（水素生成菌）の関与説など多様なものがある。しかし、天然水素の生成プロセスの中でもっともよく研究されている説は、蛇紋岩化反応説であり、かんらん岩等の超苦鉄質岩が変質して蛇紋岩となる際に、水素が発生する。この蛇紋岩化反応とは、かんらん岩がその主要構成鉱物であるかんらん石や輝石の蛇紋石化変質により、蛇紋岩となる反応のことをいう。かんらん石や輝石は鉄に富む鉱物であり、この「鉄」、そして「水」と「熱」が条件となり、二価鉄が三価鉄に酸化するのに伴い水が還元されて水素が発生する。この反応による水素発生では、鉄がカギとなるため、かんらん石、輝石に限らず、鉄を含む鉱物と水の反応によって水素は発生しうる。なお、反応式は4頁の①②③式を参照されたし。

7-4. 天然水素の価格

国際エネルギー機関（IEA）によると、2021年の世界の水素需要は9千4百万トン、供給コストは**グレー水素※5**で1.0～2.5USD/kg、**ブルー水素※6**で1.5～3.0USD/kg、**グリーン水素※7**で4.0～9.0 USD/kgである。なお、米財務省が提案した、クリーンで炭素ゼロの水素を1kgあたり最大3ドル提供する新しいクレジットに関する規則には、グリーン水素の他に天然水素も含まれている。

仏グラン・テスト鉱床発見者のロレーヌ大学Pironon氏は、天然水素は資源化できれば価格競争力も十分と言う。採掘と精製による水素製造コストは1kg当たり1～2ユーロと試算する。これは、メタンガス由来の水素（グレー水素）よりも2倍ほど高いが、再生可能エネルギー由来の水素（グリーン水素）と比べると3分の1～4分の1程度である。Pironon氏は、水素を発電利用した際のコスト優位性について「仮に1kg当たりの製造コストを2ユーロとした場合、電気代は1kWh当たり0.08ユーロとなる。これは現在のフランスにおける1kWh当たりの電気代0.27ユーロよりも安い」と強調する。ただし、実際の生産性は、今後の採掘技術の進展が鍵を握ることになる。

※5：**グレー水素** 化石燃料由来で、CO₂を回収・貯留せずに大気へ排出する製造工程による水素。

※6：**ブルー水素** 化石燃料から製造する工程でCO₂を回収・貯留する水素。

※7：**グリーン水素** 再エネで水を電気分解してつくる等、製造時にCO₂を出さない水素。

ホワイト水素 自然界に存在する天然の水素。富士吉田水素発電所の水素もこれに準じる。

以上