

Mizuho Short Industry Focus

革新的技術シリーズ¹ ターコイズ水素の秘めたる可能性

高橋 興道

【要約】

- ◆ カーボンニュートラルの実現に向けては、あらゆる手段を総動員する必要がある。水素は、火力発電用燃料、モビリティの動力源及び産業用熱需要の脱炭素化への有効な打ち手と期待されており、カーボンニュートラル実現に向けての鍵として世界的に注目されている。日本において水素社会を実現するためには、日本国内の需要地へ必要とされる量の低炭素水素を安定的かつ安価に供給することが必要である。2023 年 6 月に改訂されたわが国の水素基本戦略において革新的な水素製造技術に位置づけられたメタン熱分解による水素(ターコイズ水素)製造は、水素の最終需要地に、必要十分な水素を安定的かつ安価に供給できる可能性を秘めている。
- ◆ ターコイズ水素製造技術は、メタン(CH₄)に熱を加えることにより、水素(H₂)と固体炭素(C)を得る方法である。ブルー水素との違いは、水素製造過程で、原料由来の二酸化炭素(CO₂)を発生させず、代わりに固体炭素を副生する点であり、ブルー水素製造と異なり CCS を必要としないことである。ターコイズ水素製造には、LNG 設備や都市ガスインフラを活用することが可能であり、社会実装に向けて整備が必要となるインフラが少なく、段階的かつ迅速な水素サプライチェーンの構築を実現できる。また、CCS を必要としないため、日本国内では、ターコイズ水素製造にも水素製造コストの観点から競争優位性があると考えられる。
- ◆ ターコイズ水素の社会実装にあたっては、水素製造の過程で副生する固体炭素の処理が重要となる。例えば、2040 年の日本政府の水素需要目標の 30%に相当する 400 万トンの水素を製造する場合、1,200 万トンもの固体炭素が副生される。廃棄されるものもあるだろうが、副生炭素は価値を持った原燃料である。
- ◆ 足下では、米国内を中心にコンクリート材料やタイヤ原料としての活用に向けた取り組みが進んでいるほか、将来的には、LiB 導電助剤等の先端用途での活用が期待される。価値ある資源を有効に活用するためにも、副生炭素の活用に必要な研究開発や実証事業、制度整備の進展が望まれる。水素社会実現に向けて鍵となるターコイズ水素の重要性が社会的にも十分に認識され、官民一体となった取り組みが今後活発に行われることを切に願う。

1. はじめに

水素はカーボンニュートラル実現の鍵。日本政府は水素サプライチェーン構築支援を予定

水素は、火力発電用燃料、モビリティの動力源及び産業用熱需要の脱炭素化への有効な打ち手と期待されており、カーボンニュートラル実現に向けての鍵として世界的に注目されている。日本政府も、既存原燃料と低炭素水素²との価格差に着目した支援や拠点整備支援を実施する方針である。これにより、水素の社会実装をけん引する熱意とコミットメントのあるファーストムーバーによる水素供給の大規模化・低コスト化を実現し、需要家が水素の利用を躊躇している状況を改善することが期待される。

¹ 日本産業の競争力強化や社会課題の解決に寄与する技術・イノベーション領域をとり上げるレポート

² 水素製造時等に発生する CO₂排出量(炭素集約度)が一定の水準を下回る水素のこと

国内再エネ型や
輸入型サプライ
チェーンの構築
には課題も

国内における低炭素水素供給では、再生可能エネルギーの導入拡大によって増加が想定される余剰再エネを活用したグリーン水素製造が、エネルギーの有効活用の観点から重要だろう。ただし、日本は国土が狭いことから再生可能エネルギーのポテンシャルが相対的に低く、グリーン水素製造量の大幅な増加は期待しづらい。このため、海外からの低炭素水素輸入が検討されている。他方、輸入型水素サプライチェーン構築では、国内受入拠点の場所や数が限定されるため国内での水素供給に地域的な偏りが生じる可能性があること、国内最終需要地への輸送コストが発生することに加え、日本のエネルギーセキュリティの観点からリスクが残ることは課題といえる。このような観点から、大規模な水素を、安定的かつ安価に供給することを可能とする技術が必要となる。

ターコイズ水素製
造は、安定的水
素供給を可能に

この点、2023 年 6 月に改訂されたわが国の水素基本戦略でも革新的技術開発推進の必要性、とりわけメタン熱分解による水素（ターコイズ水素）製造について言及されている（【図表 1】）が、ターコイズ水素は、国内各地の水素需要に対して必要十分な水素を安定的かつ安価に供給できる可能性を秘めている。本レポートでは、ターコイズ水素製造技術の概観と、日本での導入可能性等について論じることとしたい。

【図表 1】改訂版水素基本戦略におけるターコイズ水素の位置づけ

水素基本戦略 2023年6月6日、再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議
3－6. 革新的な技術開発の推進 2050 年を見据えた中長期の水素利活用の拡大に向けては、「製造」、「輸送・貯蔵」、「利用」において、 以下のような革新的技術の産学官における着実な研究開発が必要となるほか、研究開発を通じた将来の産業を担う人材の育成も重要である。 これらの研究開発に当たっては、 国際動向や基礎研究の有望シーズと産業界のニーズの双方を踏まえつつ、大学・国立研究開発法人等から企業等への研究成果の橋渡しや社会実装に向けて関係府省庁が一体となって取り組む。
【製造】 高効率・高耐久・低コストな水電解技術、高温ガス炉等の高温熱源や メタンの熱分解 、光触媒などを 活用した水素製造技術
【輸送・貯蔵】 高効率水素液化機、水素吸蔵合金などの輸送・貯蔵技術、水素キャリアのコスト低減及びアンモニアクラッキング技術
【利用】 高効率・高耐久・低コストな燃料電池技術、合成メタン(e-methane)や合成燃料(e-fuel)などのカーボンリサイクル製品の製造技術開発

(出所) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議「水素基本戦略」より、みずほ銀行産業調査部作成

2. メタン熱分解による水素（ターコイズ水素）製造の概観と取り組み事例

メタンから水素と固
体炭素を得る技術

ターコイズ水素製造技術であるメタン熱分解は、メタン(CH_4)³に熱を加えることによって、水素(H_2)と固体炭素(C)を得る方法である（【図表 2】）。触媒を活用することにより反応温度を下げる等、より効率的な手法の開発が進められている。

ブルー水素と異なり、 CO_2 に代わり固
体炭素を副生

ブルー水素との違いは、水素製造の工程で、原料由来の二酸化炭素(CO_2)を発生させず、代わりに固体炭素を副生する点である（【図表 3】）。固体炭素は生成の時点で固定化しているため、気体の二酸化炭素とは異なり、CCS⁴を必要としない。加えて、固体炭素は、カーボンブラックやカーボンナノチューブ等として得られ、カーボンブラックはタイヤの補強材として、カーボンナノチューブは LiB 導電助剤、コンクリート材料等としての活用が期待される。

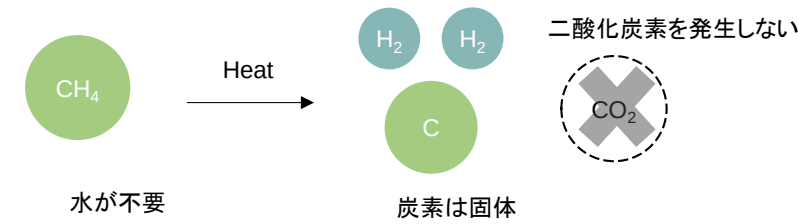
グリーン水素・ブル
ー水素と異なり水
を使用しない

さらに、原料として水(H_2O)を必要としない点は、グリーン水素やブルー水素と異なる特徴である。水を使用しないため、水素を得るために必要なエネルギー投入量は相対的に低く、グリーン水素と比較すれば 20%程度のエネルギー投入量にとどまる。

³ メタンは、天然ガスやバイオガスの主成分であり、天然ガスをマイナス 162℃まで冷却し液化させたものが LNG である

⁴ CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) は、排ガス等から CO_2 を分離・回収し、適地に輸送し、地層へ圧入・貯留する技術であり、それぞれの工程に必要な設備を整える必要がある

【図表 2】メタン熱分解の概要



(出所) みずほ銀行産業調査部作成

【図表 3】低炭素水素の具体例と特徴

水素の色分け	概要	長所	短所
グリーン	・ 再エネ由来の電力を利用した水の電気分解	・ 炭素集約度が低い	・ エネルギー投入量が多い ・ 安定的な水素製造が難しい
ブルー	・ 化石燃料改質／ガス化による水素製造と、発生するCO ₂ を固定化するCCSの組み合わせ	・ 製造コストが低い	・ CCSによるCO ₂ の固定化が必要
ターコイズ	・ メタンの熱分解によって生成される水素。炭素は固体となって生成	・ エネルギー投入量が少ない ・ 原料として水が不要 ・ 副生の炭素は固体で生成	・ 原料となるメタンの消費量がブルー水素と比較して多い

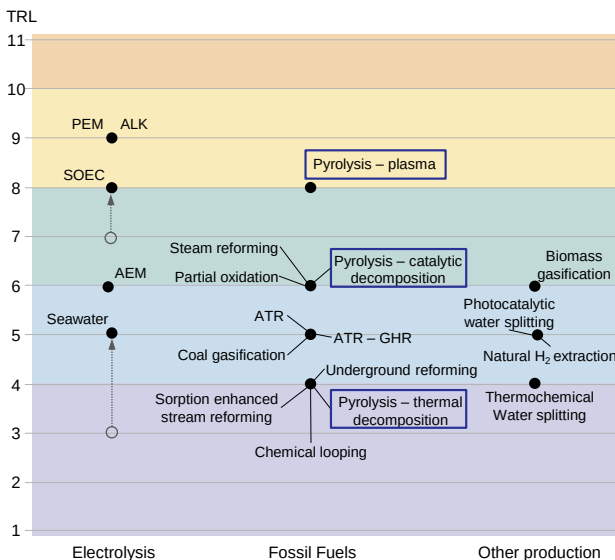
(注) CO₂の固定化を伴わない化石燃料改質／ガス化により製造された水素はグレー水素であり、低炭素水素には分類されない

(出所) 各種資料より、みずほ銀行産業調査部作成

メタン熱分解の
技術成熟度は向
上

国際エネルギー機関 (IEA) は、メタン熱分解の技術成熟度を研究段階からシステムの試運転段階としている(【図表 4、5】)。システムの運転段階とされるアルカリ (ALK) 型、PEM (固体高分子電解質膜) 型水電解の技術成熟度には劣後するものの、プラズマによるメタン熱分解を筆頭に、これに次ぐレベルにまで成熟してきた。さらに、ターコイズ水素製造で先行する Monolith (米) は、自社技術をアルカリ型、PEM 型水電解と同じシステムの運転段階と評価している。

【図表 4】水素製造方法と技術成熟度



(出所) IEA, *Global Hydrogen Review 2023* より、みずほ銀行産業調査部作成

【図表 5】技術成熟度の分類

技術開発の相対的なレベル	TRL	TRLの定義
システムの運転段階	TRL9	想定される全ての条件で運転された実システム
システムの試運転段階	TRL8	試験と実証を通じて完成し性能確認された実システム
	TRL7	フルスケールで、同様な(原型的な)システムを、現実的な環境において実証しているレベル
技術の実証段階	TRL6	工学規模で、同様な(原型的な)システムを、現実的な環境において検証しているレベル
技術の開発段階	TRL5	実験室規模で、同様なシステムを、現実的な環境において検証しているレベル
	TRL4	実験室環境で、機器・サブシステムを検証しているレベル
実現可能性を示すための研究段階	TRL3	解析や実験によって、概念の重要な機能・特性を証明しているレベル
	TRL2	技術概念・その適用性を確認しているレベル
基礎技術の研究段階	TRL1	基本原理を確認しているレベル

(出所) 経済産業省「2050 年カーボンニュートラルに向けた若手有識者研究会 水素関連プロジェクトの今後の取組みに関する提言」より、みずほ銀行産業調査部作成

プラズマ利用では Monolith が先行。副生炭素活用が具体化

触媒を用いた熱分解では、溶融塩・溶融金属・鉄鉱石等を利用

その他のメタン熱分解技術の開発も進展

米国では ARPA-E が支援

日本企業による取り組みも進む

大規模実装に向けた動きも活発に

プラズマを用いたメタン熱分解では Monolith が先行しており、毎時 600kg の水素を製造可能な反応炉を連結することによる大規模化を進めている(【図表 6】)。また、同社は、副生するカーボンブラックをタイヤの補強材として活用するため、Goodyear Tire and Rubber(米)等のタイヤメーカーとの協業に取り組んでいる。

触媒によるメタン熱分解は、溶融金属や溶融塩を用いる手法と、鉄鉱石等のその他触媒を用いる手法に分類できる。溶融金属を用いる手法には Palo Alto Research Center (PARC、米)等が、溶融塩を用いる手法には C-Zero(米)等が取り組む。鉄鉱石触媒を用いる手法には Hazer(豪)が取り組んでおり、豪州において年 100 トン規模の水素製造の実証事業に取り組んでいる。

プラズマ・触媒を用いない、熱によるメタン熱分解プロセスにも、欧州化学最大手である BASF(独)や 2015 年設立の Modern Hydrogen(米)、2017 年設立の Ekona Power(加)といった新興企業が取り組んでいる。

米国では、ARPA-E⁵⁾により、これまでに 8 件のメタン熱分解プロジェクトが支援されている(【図表 7】)ほか、毎年 Methane Pyrolysis Cohort Annual Meeting が開催され、研究開発成果の共有等が行われている。また、米エネルギー省は、Monolith が、Oliver Creek にメタン熱分解設備を導入する際、約 10 億ドルの融資保証を約束している(【図表 8】)。

日本企業による取り組みも進む。荏原製作所は、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の支援を受け、副生炭素の析出により生じる触媒の失活(コーキング)の発生を防ぐため、特殊なプラントの設計に取り組む(【図表 9】)。戸田工業とエア・ウォーターは、北海道豊富町において未利用の天然ガスを活用した水素製造に取り組む点の特徴である。伊原工業は、粒子状の金属触媒ではなく、板状の金属触媒を使用することで、副生炭素への触媒混入の割合を低減する方法を開発している。あいち産業科学技術総合センターは、伊原工業と連携し、得られた副生炭素を活用した導電性複合材料の用途開発を進めている。その他、マイクロ波化学は、住友化学とともに、マイクロ波を用いた高効率な製造プロセスの開発に取り組んでいる。

千代田化工建設、中部電力は、Hazer の技術を利用し、年間 2,500 トン規模の水素製造の実証試験を 2020 年代後半にも開始する予定である。双日も、スタートアップである Hycamite(フィンランド)への出資を通じ、大規模な水素製造を検討している。また、三菱重工業は、Monolith や C-Zero へ出資するとともに、同社長崎カーボンニュートラルパークにおいてメタン熱分解の技術開発に取り組む、2026 年以降の商用化を目指す。

【図表 6】ターコイズ水素製造の手法と技術開発に取り組む事業者例

手法	概要	事業者など	
		非日系	日系 灰色は出資、()内は出資先等
プラズマ 【試運転段階】	- プラズマを用いたメタン熱分解 - 高速起動が可能 - プラズマ生成に多くのエネルギーを要することが課題	Monolith(米) HiiROC(英)	三菱重工業(Monolith)
溶融金属・溶融塩	- 反応器に溶融金属や溶融塩を充填してメタン熱分解を行う 1,000℃以上の高温で溶融金属/塩を取り扱う技術が必要	C-Zero(米) PARC(米)	三菱重工業(C-Zero)
触媒 【実証段階】	- 活性金属種としてNiやFeを担持した触媒や鉄鉱石などを触媒として用いたメタン熱分解 - 固体炭素の析出による触媒の失活が課題	Hazer(豪) Hycamite(フィンランド)	荏原製作所、戸田工業、伊原工業・エア・ウォーター、IHI、三菱重工業 千代田化工建設(Hazer)・中部電力、双日(Hycamite)
熱 【開発段階】	プラズマや触媒を利用することなく反応を起こす	BASF(独) Modern Hydrogen(米) Ekona Power(加)	三浦工業(Modern Hydrogen) 三井物産(Ekona Power)

(出所)各種資料より、みずほ銀行産業調査部作成

⁵⁾ 米エネルギー省エネルギー高等研究計画局 (Advanced Research Projects Agency – Energy)

【図表 7】米国 ARPA-E による支援状況

事業名	事業期間	支援額	事業者
Molten-Salt Methane Pyrolysis Optimization Through in-situ Carbon Characterization and Reactor Design	2020年5月 ～ 2022年4月	\$1,997,532	C-Zero
Carbon Dioxide-Free Hydrogen and Solid Carbon from Natural Gas via Metal Salt Intermediates	2019年6月 ～ 2023年12月	\$3,690,304	Johns Hopkins University
Electrothermal Conversion of Methane into Hydrogen and High-Value Carbon Fibers	2020年5月 ～ 2023年7月	\$1,500,000	Johns Hopkins University
CarbonHouse	2020年3月 ～ 2024年6月	\$3,726,606	Massachusetts Institute of Technology
High Value Energy Saving Carbon Products and Clean Hydrogen Gas from Methane	2019年9月 ～ 2022年6月	\$3,475,124	NanoComp
High-throughput Methane Pyrolysis for Low-cost, Emissions-free Hydrogen	2019年6月 ～ 2022年12月	\$3,946,540	Palo Alto Research Center
From Hydrocarbon Feedstock to Recyclable Carbon-Based Automotive Bodies with Positive Hydrogen Output	2019年9月 ～ 2023年12月	\$3,447,862	Rice University
Co-Synthesis of Hydrogen and High-Value Carbon Products from Methane Pyrolysis	2020年4月 ～ 2024年9月	\$1,877,548	Stanford University

(出所) Advanced Research Projects Agency – Energy,
U.S. Department of Energy HP より、
みずほ銀行産業調査部作成

【図表 8】米国・クリーン水素戦略(抜粋)

- ・天然ガスを利用した第3の生産方法である**メタン熱分解**は、高熱を用いてメタンを水素と固体炭素に分解する
- ・固体炭素は工業用ゴムやタイヤ製造、インク、触媒、プラスチック、コーティングなどの特殊製品のために付加価値の高い副生物として提供できるため、これは**魅力的な選択肢**
- ・**メタン熱分解による水素製造のコストは、販売される炭素製品の価格に大きく依存しているため、高価値かつ大規模な炭素市場は、極めて重要**
- ・2021年、DOEは、**MonolithTM Inc.(旧Monolith Nebraska, LLC)**がネブラスカ州ハラムにあるOliver Creekの施設に**メタン熱分解技術を導入するために、約10億ドルの融資保証を条件付きで約束することを発表**
- ・この施設で製造された水素はアンモニア肥料の製造に使用される。また、この施設の導入により、建設中の約1,000人の雇用と、施設の運営を支援するための高賃金で高度なスキルを持つクリーンエネルギー関連の75人の雇用が創出されると予想されている

(出所) U.S. Department of Energy, *U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap* より、みずほ銀行産業調査部作成

【図表 9】NEDO によるターコイズ水素製造への支援例

事業名	事業期間	事業実施者	取り組み概要
メタン活性化と炭素析出の反応場分離による水素製造	2021年4月 ～ 2023年3月	物質・材料研究機構、静岡大学 太陽鋳工、東京工業大学 高知工科大学、荏原製作所	・従来のメタン直接分解では、炭素析出によるメタン活性化触媒の失活(コーキング)が発生するが、適切な分離システム構築することで、高純度水素の連続製造を可能とする
ガス循環によるメタンからの水素製造と二酸化炭素資源化	2023年10月 ～	物質・材料研究機構、荏原製作所 高知工科大学、東京工業大学	・メタンと二酸化炭素の混合ガスから水素を抽出すると同時に、高付加価値炭素を製造するシステムを開発する
メタン直接分解による水素製造技術開発	2021年4月 ～ 2023年3月	伊原工業、東京理科大学 愛知県、名古屋大学 静岡大学	・メタン直接分解反応装置の熱効率を向上(反応温度700℃において水素収率60%を達成)させるとともに生成炭素の特性解析と幅広い利用方法の検討等を行う
メタン直接改質法による鉄系触媒を用いた高効率水素製造システムの研究開発	2021年4月 ～ 2023年3月	戸田工業、エア・ウォーター	・メタン直接改質反応炉から水素精製装置までの一連のシステムを統合したパイロットスケール設備にて、高純度水素(99.99%以上)と、高導電性のCNTが得られる高効率水素製造システムを構築する
北海道豊富町未利用天然ガスを活用した地域CO2フリー水素サプライチェーンの構築	2023年8月 ～ 2025年8月	戸田工業、エア・ウォーター	・北海道豊富町で温泉に付随して産出される未利用天然ガスを水素として活用することにより、エネルギーの地産地消を推進する

(出所) 各種資料より、みずほ銀行産業調査部作成

3. 日本におけるメタン熱分解の導入可能性

触媒によるメタン熱分解を中心に技術が発展

日本は、効率的なターコイズ水素製造を可能とする触媒技術やマイクロ波技術、プラント設計技術を有しており、日本政府も NEDO 事業を通じて技術開発を支援している。官民の取り組みを通じ、ターコイズ水素製造技術は急速に発展している。

ターコイズ水素製造では既存のガスインフラが活用可能

ターコイズ水素製造の強みは、既存のガスインフラにターコイズ水素製造装置を外挿することで水素の製造ができる点であり、沿岸部、内陸地を問わず、LNG 調達・都市ガス供給インフラとして整備された既存設備の活用が可能である。地域における一体的な取り組みが必要となる大規模な受入拠点の整備とは異なり、需要家のニーズに応じて段階的に水素利用機器への転換を図ることができる点も強みである。ターコイズ水素関連機器の製造事業者、施工事業者が、人的、物的なリソースの制約に直面することも一定程度回避できる。なお、ブルー水素製造でも、既存の LNG や都市ガスインフラを活用可能であるが、CCS 設備が必要な点がターコイズ水素製造と異なる。

整備されたガスインフラがターコイズ水素の社会実装を加速

整備されたガスインフラを最大限活用していくことで、小規模実証から大規模社会実装までの移行が円滑かつ急速に進むことが見込まれる。足下では、グリーン水素の実証が進むが、ターコイズ水素の社会実装のスピードの速さから、今後、国内における水素製造を主導していく可能性を秘めている。現在、発表されているプロジェクトだけでも、2030 年頃には、日本国内で数万トン規模のターコイズ水素製造が行われる見込みであり、2020 年代後半にかけてさらに多くのプロジェクトが動き出す可能性が十分にある。

ターコイズ水素への政策的な支援も重要に

しかしながら、現在は、ターコイズ水素製造に対する社会的な認知度が低く、大規模実証事業が開始されるタイミングがグリーン水素製造と比較して遅い。このため、現在、日本政府において制度設計が進められているサプライチェーン構築支援等の政策資源が、時宜を得て適切に投じられないリスクもある。この点、日本におけるターコイズ水素の重要性が適切に認識され、必要な政策資源が投入されることが望ましい。

日本の水素利用技術の性能が一段と向上する可能性

また、日本は、水素を活用した発電技術や、ボイラ、バーナー、モビリティ、給湯器等、多様なアプリケーションを有している。ターコイズ水素製造により水素をユーザーに利便性高く供給することができれば、これらアプリケーションの利用が促進されるだろう。そして、水素需要がスピーディーに立ち上がることによって、水素利用機器の性能が一段と向上する可能性がある。

ガスインフラの大規模増強は必要ない見込み

なお、ターコイズ水素製造の大規模導入によって、既存のガスインフラの大きな増強は必要ないだろう。例えば、2040 年における日本政府の水素需要目標の 30%にあたる年間 400 万トンの低炭素水素をターコイズ水素で製造する場合、原料となる LNG は、1,600 万トン(天然ガス換算 195 億 m^3) 必要となるが、日本の年間 LNG 輸入量 7,000 万トンと比較すれば、20%程度の増加である。反対に、将来的には人口減少や再生可能エネルギーの導入拡大等によって LNG の需要減少が見込まれる。

合成メタン導入を見据えた証書の発行等の措置も必要

ただし、都市ガス業界では、ガス全体に占める合成メタン⁶の割合を 2050 年までに 90% まで高めることを目指しているなか、合成メタンを再度水素として用いることの是非はある。この点、ターコイズ水素製造に用いる天然ガスは、既存の都市ガス配管を経由して供給されることが想定されるため、天然ガスと合成メタンの適切な管理が必要となる。例えば、合成メタンの需要家が、従来型の天然ガスを消費しているとみなされることがないよう、合成メタンを消費していることを示す証書の発行等の対応策を講じる必要があるだろう。

4. メタン熱分解による水素製造コスト

国内水素製造では、ターコイズ水素にもコスト競争力があり、ターコイズ水素の中では、触媒による方法に競争力がある

ターコイズ水素製造が社会実装されるための条件は、商用規模で供給できていることに加え、コスト競争力を有することが不可欠である。一定の前提の下、輸入した LNG を原料にターコイズ水素を国内製造する場合のコストを試算した結果、353~479 円/kg- H_2 となった(【図表 10】)。コストの内訳は、原料コストが 82~88%、製造設備が 12~17%、その他コストが 1%程度と、原料コストが大宗を占め、ブルー水素との比較では、原料メタンの量が倍増するため原料コストの割合が大きい一方、CCS コストが負荷されないため両者の間に大きな差は生じなかった。例えば、CCS に要するコストを 17,500 円/t- CO_2 (96 円/kg- H_2)⁷と仮定した場合、ブルー水素の製造コストは 330 円/kg- H_2 となる。また、再生可能エネルギー由来のグリーン水素の製造コストは 627 円/kg- H_2 となり、この結果、日本国内における水素製造コストの観点からは、ターコイズ水素にも競争優位性があるといえるだろう。さらに、ターコイズ水素の製造方法の中では、現在、技術的に最も成熟しているプラズマによる方法に比べ、電気を利用しない触媒やその他熱による分解にコスト上の優位性がある結果となった。

⁶ 水素と二酸化炭素から合成されるメタン

⁷ みずほ銀行産業調査部、Mizuho Industry Focus Vol. 242 【革新的技術シリーズ】日本の CCS 事業の発展と将来像 (2023 年 10 月)

海外からの輸入水素は国内産に比べ安価

原料となるメタンの調達コストを下げる取り組みが重要

副生炭素の有効活用が重要。副生炭素の有効利用が進めば、20 円/Nm³ も現実味を帯びる

副生炭素の需要産業の立ち上げが重要

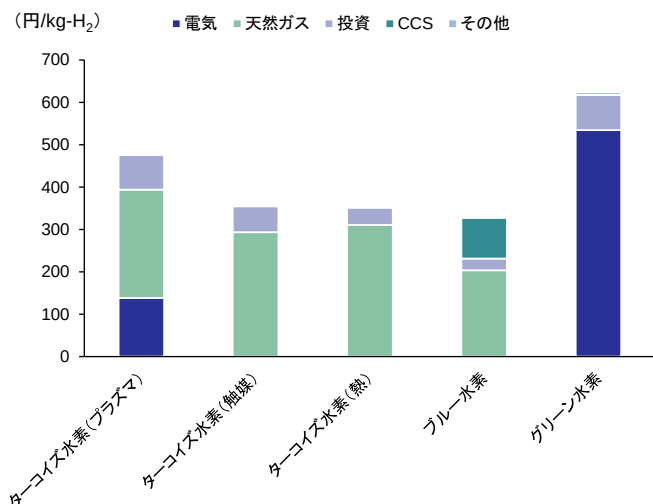
他方、資源産出国と比較すれば、コストの差を埋めることは現実的ではない。例えば、天然ガスが豊富に存在する中東においてブルー水素を製造し、アンモニアとして日本に輸入する場合の水素調達コストは、290 円/kg-H₂ 弱と最も低い⁸。ただし、輸入拠点以外の地域で水素を活用する場合、国内輸送が必要となる点は留意すべきであろう。

日本において水素社会実現に向けた鍵を握るターコイズ水素であるが、製造コストに占める原料コストの割合が大きいことから、天然ガスや LNG の価格の高さが課題となる。この点、LNG 調達の大規模な長期契約の締結が解決策になりうる。日本は、LNG のサプライチェーンを世界に先駆けて構築してきた国であり、かつ、世界最大の輸入国（2022 年時点）であるが、将来的な LNG の需要減少が見込まれるなか、日本企業は LNG 関連権益の確保や調達の長期契約の締結に踏み切りにくい環境にある。ターコイズ水素製造は、日本の天然ガス需要を下支えし、日本企業の LNG 関連の権益確保や長期契約締結への動機づけとなる可能性がある。

水素製造コストを下げるもう一つの方法は副生炭素の活用である。今後、副生炭素の有効活用が進むことで、副生炭素の取引により得られた収益が、実質的な水素製造コストを低下させると期待される（【図表 11】）。例えば、セメントの重量当たり単価と同等の価値を副生炭素が持つと仮定すると、実質的な水素製造コストは、前出の 353～479 円/kg-H₂ から 45 円/kg-H₂ 程度低下する。仮に、この 2 倍強の炭素価値が認められれば、日本政府が 2050 年目標として掲げている 224 円/kg-H₂（20 円/Nm³-H₂）も現実味を帯びる。

炭素技術は日本にとって優位性のある技術である。例えば、カーボンナノチューブは日本で誕生し、炭素繊維は日本企業が世界市場の過半を握っている。炭素繊維の市場シェアが高い背景として、炭素繊維を需要する航空・自動車分野における日本の競争力の高さが挙げられる。副生炭素の活用に関しても、日本が世界をリードするために、副生炭素の需要の立ち上げが重要だろう。

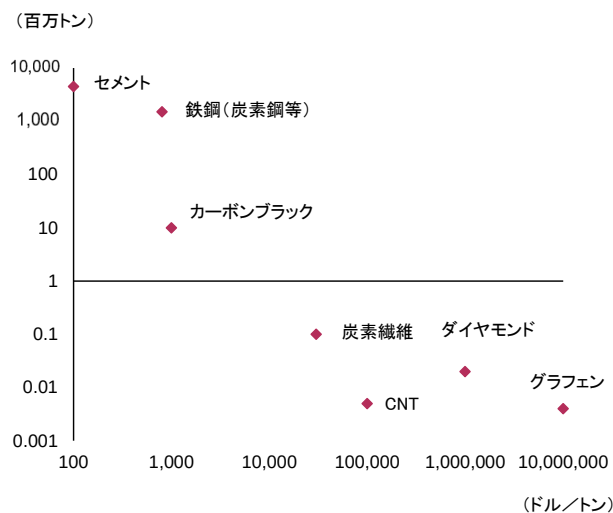
【図表 10】水素製造方法別の水素製造コスト



(注) 天然ガス価格\$7.6/MMBtu、再エネ電気価格\$0.074/kWh、CCS コスト 17,500 円/t-CO₂、1 ドル 150 円

(出所) 各種資料より、みずほ銀行産業調査部作成

【図表 11】炭素関連製品の市場規模と単価



(出所) Advanced Research Projects Agency - Energy, U.S. Department of Energy HP より、みずほ銀行産業調査部作成

⁸ みずほ銀行産業調査部、Mizuho Industry Focus Vol. 237 日本が水素を巡るグローバル競争を勝ち抜くために ～〈みずほ〉の考える水素の需給構造と打ち手～（2023 年 2 月）。同レポートでの分析における為替レートは 110 円／ドルとしている

水素の需要地域に応じて水素供給方法は多様。レジリエンスの観点からは複層型サプライチェーンの構築も重要に

なお、水素の社会実装に当たっては、地域の特性や経済合理性も踏まえつつ、多様な手法を組み合わせることで、水素の安定的かつ大規模な水素供給を実現することが望ましい(【図表 12】)。石油コンビナート等、水素の大口需要家が複数立地する臨海部の拠点においては、輸入した水素を長距離輸送することなく使用できるため、大規模輸入による水素調達コストが最も低くなる。また、需要量が小規模であって、余剰再エネが豊富にある地域では、需要家に近い場所での余剰再エネを活用した国内グリーン水素製造が選択肢になる。ただし、経済性の観点からは、余剰再エネを再エネ電気対比割安なコストで活用できることが前提になる。そして、ガスインフラを活用するターコイズ水素は、様々な規模の水素需要に柔軟性高く対応する調整弁になる。加えて、ターコイズ水素は、他の手法と組み合わせた複層型のサプライチェーンの構築にも適しており、水素サプライチェーンのレジリエンスの強化にも寄与するだろう。

【図表 12】低炭素水素の供給方法の類型と比較

類型	適用適地	供給規模	製造設備コスト	水素製造コスト
輸入 大規模輸入	 コンビナート	大	—	○ 290円/kg-H ₂ ~
国内製造 グリーン水素製造	 余剰電力供給場所	小	高	× 624円/kg-H ₂ (注)
国内製造 ブルー水素製造	 ガスインフラ利用場所	大中小	高 (CCSを含む)	○ 330円/kg-H ₂
国内製造 ターコイズ水素製造	 ガスインフラ利用場所	大中小	低	○ 353~479円/kg-H ₂

(注) 余剰再エネの調達コストにも依存

(出所) 各種資料より、みずほ銀行産業調査部作成

5. 日本における社会実装に向けた道筋

水素の社会実装は、コスト競争力ある水素が商用規模で供給されることで実現

ターコイズ水素製造が社会実装されるための条件は、コスト競争力のある水素が商用規模で供給できていることである。そして、ターコイズ水素がコスト競争力を持つためには、前述したとおり、原料調達等に係るコストの削減と、副生炭素の有効利用が必要である。原料調達の観点では、既存インフラの活用のほか、原料調達の大規模化・長期化によるコスト削減も考えられる(【図表 13】)。また、日本は、ターコイズ水素製造の原料となる天然ガスが豊富に存在する北米等とは異なり、原料となるメタンの多くをLNGとして輸入する必要がある。天然資源に乏しい国での水素活用方策は同様の状況にある他国の道標となり、また、水素分野における日本の競争力の源泉となるだろう。

大学や企業の技術を大きく育てる仕掛けが重要

また、商用規模での水素製造の実現には、大規模化に必要な資金が集まる環境も重要となる。日本の有望な技術を大学発・社内ベンチャー等として切り出し、これまでの競合や系列関係に縛られず、関係者の熱意と資金によって、早急に大きなビジネスに飛躍させることも求められる。

国内外の関係者が注目する企業も生まれている

例えば、革新的なアンモニア生産技術の商用化に取り組む東京工業大学発のつばめBHB には、石油天然ガス開発、石油精製、石油化学、海運、物流、食品、金融、リースといった幅広い業種の企業が出資し、事業の拡大を支援している。また、同社は、世界の革新的なクリーン技術を有する企業 100 社「Global Cleantech100」を選定するCleantech Group(米)が、アジア大洋州地域を対象に有望な 25 社を選出した「2022 APAC Cleantech 25」に選出されている。このような取り組みが、ターコイズ水素製造を含めた水素・アンモニアの利活用の中で広がっていくことが望まれる。

【図表 13】ターコイズ水素製造技術を社会実装するための打ち手



(出所) みずほ銀行産業調査部作成

適切な KPI 設定
がターコイズ水素
普及の起爆剤に

加えて、価格競争力のある低炭素水素を国内で製造するためには、国レベルでの適切な KPI の設定が重要だと考える(【図表 14】)。例えば、革新的な技術の迅速で大規模な商用利用を実現するためには資金調達が重要となるため、国内外の投資家を惹きつけることが有効な手段となる。このような観点からは、Global Cleantech100 に選ばれる企業を生み出すことも重要であろう(【図表 15】)。

ターコイズ水素
を「ベース水素」
とし、製造目標を
400 万トンに

また、ターコイズ水素が、国内の水素需要の立ち上げにおいて重要な役割を有していることに鑑み、ターコイズ水素を「ベース水素」と位置づけ、国レベルでの製造目標を設定することは、水素社会実現に向けた予見性を一段と高める。その際、ベース水素であることに鑑み、2040 年の日本政府の水素需要目標の 30%に相当する 400 万トンと設定することも一考である。

副生炭素の有効
活用に向けた段
階的なアプロー
チも重要

他方、400 万トンのターコイズ水素製造に伴い発生する 1,200 万トンもの副生炭素の取り扱い、課題となろう。炭素市場において大きなウエイトを占めるカーボンブラックの市場規模でも 61.3 万トン(2022 年、日本)である。米国のクリーン水素戦略(U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap)に明記されている通り、炭素市場を構築することは、極めて重要である。

アジアのエネル
ギートランジシ
ョンにも貢献できる

さらに、ターコイズ水素製造は、日本のみならず、LNG や都市ガスインフラが整備されているマレーシアやシンガポール等のアジア地域でも親和性が高い。脱炭素化の現実解として、アジアのエネルギートランジションにも貢献できるだろう。

【図表 14】日本が優位性を持つことを達成するための KPI 素案

KPI	意義
①Global Cleantech 100への選出	国内外投資家を引き付け、スピード感ある大規模化を実現
②2040年時点におけるメタン熱分解水素製造400万トン (国内需要目標の30%)	地域分散の肝である余剰再エネの活用による水素製造には限界。大規模化を念頭においた社会システムの構築が可能
③副生炭素の有効活用 (400万トンの水素製造で1,200万トンの炭素が副生)	水素価格の低減に寄与
④アジア地域へのビジネスモデル展開	アジアの脱炭素化に貢献 アジアとの協創を前提とした協力関係をいち早く構築

(出所) みずほ銀行産業調査部作成

【図表 15】 Global Cleantech100 選出企業の概要（ターコイズ水素関係）

企業名	選出年	概要	設立年
Monolith (米)	2023年 2022年	- プラズマを用いた方法により、水素とカーボンブラックを製造。毎時 600kgの水素を製造可能な反応炉を連結することで大規模化を進める - また、副生されるカーボンブラックをタイヤの補強材として活用するため、タイヤメーカーと協業	2013年
Ekona Power (加)	2023年 2022年	- 触媒を用いないパルスメタン熱分解技術に関する特許を取得 - 日量200kgの水素を製造する実証事業を実施中。2024年には、カナダ・アルバータ州において日量1,000kgの水素製造プラントを導入する予定	2017年
C-Zero (米)	2022年	- 溶融塩を熱媒体・触媒として用いる気泡塔反応器によるメタン熱分解プロセスを開発中 - 日量400kgの水素製造のパイロットプラントの運転や日量6,000kgの商用デモプラントの運転を計画	2018年

(出所) 各種資料より、みずほ銀行産業調査部作成

6. 副生炭素の活用に向けた方策

水素コスト 20 円 /Nm³ 実現のため副生炭素の価値向上が必要

既存用途での活用と新規用途開発の両輪が肝要

トランジションの過程における火力発電燃料代替の可能性も

副生炭素の活用は、水素製造コストの低下に寄与するため、副生炭素の有効活用を図ることは極めて重要であろう。政府目標の 224 円/kg-H₂ (20 円/Nm³、2050 年)を達成するためには、平均の炭素価値をセメントの重量当たり単価の 3 倍に相当する 45,000 円/ton-C (135 円/kg-H₂ の水素製造コスト低減効果)にまで高める必要がある。

2050 年時点の水素製造コストの政府目標達成に向けては、米国において取り組みが進むコンクリート等、大規模に副生炭素を活用できる用途への展開を進めながら、並行して、高付加価値領域での市場開拓に向けた研究開発が重要である(【図表 16】)。その際、既存用途活用でも、副生炭素の利用によって品質が向上しなければ、既存原材料の価格水準以上での取引は見込みにくいため、品質向上への取り組みも重要になる。

また、既存用途としては、石炭火力発電がフェードアウトするまでの間、CCS 等の適切な環境対策を講じた上で、石炭の代替燃料としての活用することも一考である。石炭の輸入に充てられてきた資金が、国内で循環することとなり、水素製造コストを下げる原資として使用されることとなる。ただし、本用途は、トランジションの過程での水素需要立ち上げのための時限的な措置であり、トランジションの完了後には実施されるべきではないことは厳しく認識すべきだろう。

【図表 16】 炭素の取扱量と技術的な実現可能性

用途	取扱量	単価	技術的な実現可能性
タイヤ等	0.6百万トン (カーボンブラック市場)	\$1,000/ton-C	△／○
発電	100百万トン (電気事業の受入量)	\$200/ton-C	△
コンクリート	171百万トン (生コンクリートの出荷数量)	\$100/ton-C	○
先端分野	未定 (今後用途拡大を見込む)	未定	△
廃棄	未定	—	○

(出所) 各種資料より、みずほ銀行産業調査部作成

副生炭素は固定化しているが、燃料利用には対策が必要

副生炭素は固体炭素であり、大気中に二酸化炭素として放出される可能性は低く、その性質上、炭素は固定化しているといえるだろう(【図表 17】)。しかし、副生炭素が、将来的に燃料用に使用される場合には、二酸化炭素が大気放出される。このため、サプライチェーンの下流における副生炭素の活用方法に応じて適切な対策を講じる必要がある。

温室効果ガスの放出に関する報告は燃焼した事業者が行う必要

ターコイズ水素の普及に向けたルールの整備や共通理解醸成が肝要

具体的には燃料として利用する場合には、燃料として利用する事業者が法令に基づく温室効果ガスの放出に関する報告や、CCS 等の適切な環境対策を講じる必要があるだろう。また、原料として利用する場合は、直ちに、二酸化炭素として大気放出することは想定されないが、将来的には燃料等として利用されることも排除されない。このため、前述の副生炭素を燃料として直接利用する場合と同様に、燃料として利用した事業者が必要な対応を実施する必要がある。

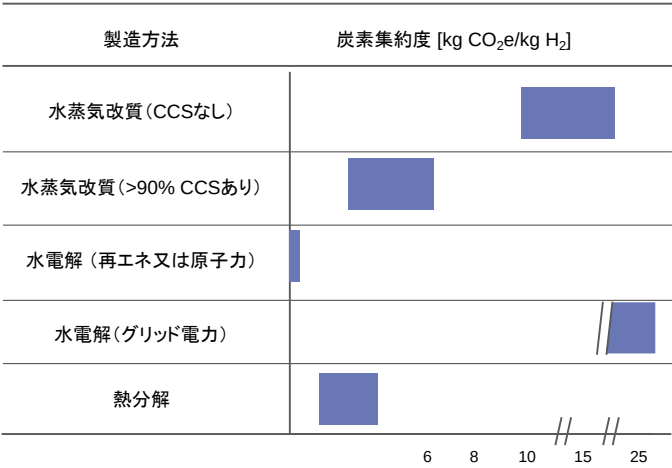
ターコイズ水素の炭素集約度は、ターコイズ水素自体の製造過程で発生する二酸化炭素の量に基づき計算されるべきであり、副生炭素の将来的な燃焼による影響は切り離して考えることが望ましい。これは、水素製造に係る温室効果ガスの算定に当たり、水素と、価値のある共製品や副生成物は分けるべきとの考え方⁹とも整合する。ただし、ターコイズ水素の炭素集約度の議論が、ブルー水素やグリーン水素と比べ成熟していない点は課題であり、今後、必要なルールの整備や共通理解の醸成を進める必要がある。この点、メタン熱分解の炭素集約度が、米国のグリーン水素戦略において示されたことは意義深い（【図表 18】）。

【図表 17】副生炭素の固定化に関する考え方の整理案

用途	炭素の固定化	備考
廃棄	○	大気中に放出しない
環境散布	○	大気中に放出しない
原料利用	○	環境中に放出されない。ただし、継続的なトレーシングが必要
燃料利用	×	燃焼によりCO ₂ が放出

(出所) みずほ銀行産業調査部作成

【図表 18】水素製造技術ごとの炭素集約度



(出所) U.S. Department of Energy, U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap より、みずほ銀行産業調査部作成

高付加価値用途への展開に向けた企業間の連携が重要に

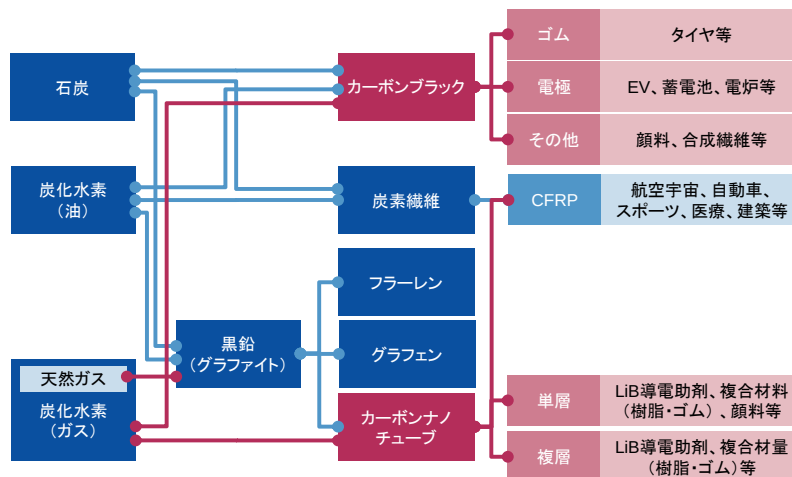
高付加価値用途としては、タイヤの補強材に用いるカーボンブラックの代替のほか、LiB 導電助剤などに利用されるカーボンナノチューブの代替としての活用が期待される（【図表 19】）。例えば、あいち産業科学技術総合センターは、副生炭素から導電性を有する複合素材を試作し、実用化に向けた企業間連携を進めている。米国では、Rice University と石油大手 Shell (英) が、米エネルギー省の支援を受け、副生炭素の高付加価値利用への研究開発に取り組んでいる。

副生炭素の品質向上への取り組みも重要に

高付加価値用途の拡大に向けては、副生炭素の品質の確保が重要になる。例えば、カーボンナノチューブの代替として LiB 導電助剤に用いる場合には、残存金属が発熱等の原因にもなることから、高純度な炭素が求められるだろう。この点、触媒による熱分解により副生する炭素に微量ながら金属触媒等が含まれる点は課題となりうる。金属触媒を副生炭素から分離する技術や、触媒を使わないターコイズ水素製造技術の開発や導入を進めていくことが解決策になるだろう。

⁹ 水素経済のための国際パートナーシップ (IPHE)、Methodology for Determining the Greenhouse Gas Emissions Associated with the Production of Hydrogen

【図表 19】炭素の高付加価値な用途について



(注) 赤色は、副生炭素に関連する項目

(出所) 各種資料より、みずほ銀行産業調査部作成

7. おわりに

ターコイズ水素は水素社会実現の鍵だが課題もある

ターコイズ水素製造技術は、メタンに熱を加えることにより、水素と固体炭素を得る方法である。ターコイズ水素製造には、LNG 設備や都市ガスインフラを活用することができるため、社会実装に向けて必要となるインフラ整備が少なく、段階的かつ迅速な、水素サプライチェーンの構築を実現できる。ターコイズ水素の社会実装にあたっては、水素製造の過程で副生する固体炭素の処理が重要となる。2040 年の日本政府の水素需要目標の 30%に相当する 400 万トンの水素を製造する場合、1,200 万トンもの固体炭素が副生される。

ターコイズ水素の社会実装に向けた官民一体となった取り組みに期待

足下では、米国内を中心にコンクリート材料やタイヤ原料としての活用に向けた取り組みが進んでいるほか、将来的には、LiB 導電助剤等の先端用途での活用が期待される。価値ある資源を有効に活用するためにも、副生炭素の活用に向けた研究開発や実証事業、制度整備の進展が望まれる。水素社会実現に向けて鍵となるターコイズ水素の重要性が社会的にも十分に認識され、官民一体となった取り組みが今後活発に行われることを切に願う。

みずほ銀行産業調査部
資源・エネルギーチーム 高橋 興道
kodo.takahashi@mizuho-bk.co.jp

[アンケートに
ご協力をお願いします](#)



Mizuho Short Industry Focus／219 2023 No.20

2023 年 12 月 19 日発行

© 2023 株式会社みずほ銀行

本資料は情報提供のみを目的として作成されたものであり、取引の勧誘を目的としたものではありません。本資料は、
弊行が信頼に足り且つ正確であると判断した情報に基づき作成されておりますが、弊行はその正確性・確実性を保証する
ものではありません。本資料のご利用に際しては、貴社ご自身の判断にてなされますよう、また必要な場合は、弁護
士、会計士、税理士等にご相談のうえお取扱い下さいますようお願い申し上げます。
本資料の一部または全部を、①複写、写真複写、あるいはその他如何なる手段において複製すること、②弊行の書面に
よる許可なくして再配布することを禁じます。

編集／発行 みずほ銀行産業調査部

東京都千代田区丸の内 1-3-3 ird.info@mizuho-bk.co.jp