

# プラチナ投資のエッセンス

## 水素入門 - 投資家の手引き

長期成長が望めるプラチナの需要を支えていくのは、脱炭素化を目指す世界各国が注目する水素経済。本稿では水素経済の概要、それを支える技術とプラチナとの関連を取り上げ、水素市場と水素関連の今後のプラチナ需要を理解するための参考として、既にプラチナに投資している投資家だけでなく、これからプラチナ投資を考えている投資家にも読んでいただければ幸いです。

水素は再生可能エネルギーから生産でき、様々なモビリティ分野や工業分野の脱炭素化を進められる非常に柔軟性の高い燃料で、現在年間 9500 万トンほど生産されている水素のほとんどは、実は化石燃料から作られている。一方、酸素と水を使い全く炭素を排出量せずに水素を生産する方法に水電解装置があるが、そこで触媒に使われるのがプラチナを含む PGM だ。プラチナはまた触媒として、水素が燃料となる固体高分子形燃料電池にも使われており、交通機関の化石燃料の利用を減らす手段に役立っている。水素の中でも炭素排出量ゼロのグリーン水素は数多くの分野の脱炭素化の鍵を握る。

現在、水素の需要のほとんどは化学や石油産業で使われる原料としての需要だが、世界エネルギー機関 (IEA) は 2030 年までに水素の需要は 1 億 5000 万トンに増えると予測している。化石燃料への依存から脱却するために燃料電池への切り替えが増えるほか、直接還元鉄 (DRI) など新たな技術による製鉄の生産やガスタービン方式の発電所などで水素の利用が増えるとする。水電解装置やカーボン回収技術などを利用して生産できる水素 6000 万トンは、化石燃料による水素生産をなくすだけでなく、新たな産業セクターを脱炭素化に導くことも可能だ。現在グレー水素は年間 9500 万トン生産されているが、この脱炭素化が進めば、1 億 2000 万台の自動車が 1 年間に路上で排出する排気ガスに相当する 4 億 3000 万トンの炭素排出量を軽減できる。水素協議会によると、2050 年までにあらゆる技術を使って軽減できる炭素排出量全体の 20% 近くは水素の利用したものになるとしている。

水素経済においてプラチナの需要を生み出すのは、水素を生産するための固体高分子 (PEM) 型水電解装置と水素を燃料とする燃料電池の二つの分野だ。現在、燃料電池は主に燃料電池自動車に使われているが、2030 年までには船舶、列車、オフロード車両、そして定置型発電機などにも利用が広がるだろう。水素関連のプラチナ需要は 2024 年に倍増する予測で、各国政府の政策や資金援助も活発になる中で、水素経済の成長は転換点を迎えるだろう。ゼロエミッション達成に果たす水素の重要な役割を考えれば、さまざまな分野で水素の利用が進むのは当然だ。我々は、水素経済のプラチナ需要は 2030 年までに 27.2 トン近くまで増え、需要全体の 10% を占めると予測している。今後 2 年～5 年間の予測を発表した『[プラチナ投資のエッセンス](#)』では包括的な需要分析を行ったが、本稿では水素関連に焦点を当ててプラチナ需要をまとめた。さまざまな水素技術と脱炭素化への貢献について 2020 年代後半のプラチナ需要を支える背景の理解に役立ててほしい。

**Edward Sterck**

Director of Research

+44 203 696 8786

[esterck@platinuminvestment.com](mailto:esterck@platinuminvestment.com)

**Wade Napier**

Analyst

+44 203 696 8774

[wnapier@platinuminvestment.com](mailto:wnapier@platinuminvestment.com)

**Jacob Hayhurst-Worthington**

Associate Analyst

+44 203 696 8771

[jworthington@platinuminvestment.com](mailto:jworthington@platinuminvestment.com)

**Brendan Clifford**

Head of Institutional Distribution

+44 203 696 8778

[bclifford@platinuminvestment.com](mailto:bclifford@platinuminvestment.com)

World Platinum Investment Council

[www.platinuminvestment.com](http://www.platinuminvestment.com)

Foxglove House, 166 Piccadilly

London W1J 9EF

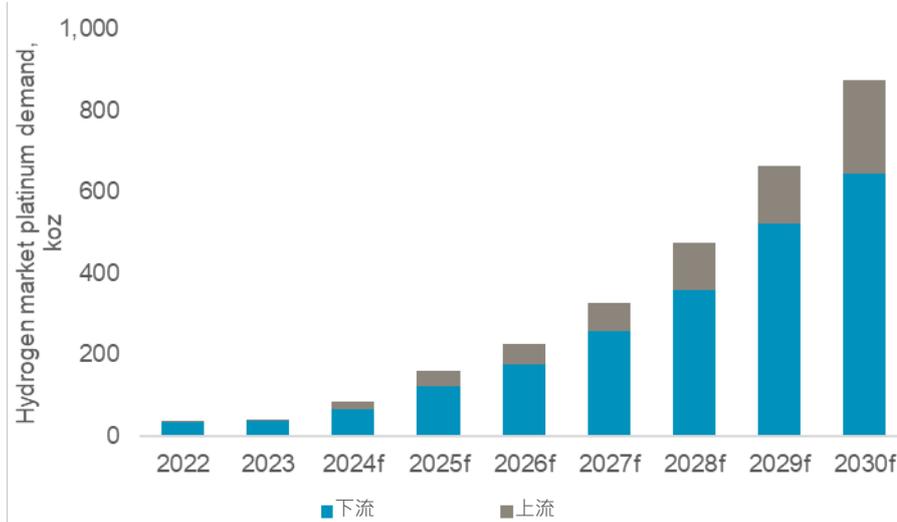
**2024 年 4 月 25 日**

図 1. 水素関連のプラチナ需要のまとめ

		WPIC が予測する水素関連のプラチナ需要								
プラチナ需要(koz)		2022	2023	2024f	2025f	2026f	2027f	2028f	2029f	2030f
モビリティ		19	16	44	95	143	219	312	461	564
	燃料電池自動車	19	15	42	93	138	208	293	427	505
	鉄道	0	0	0	0	1	1	1	3	5
	海運	0	1	1	1	2	4	8	14	24
	オフロード	0	0	0	0	1	5	10	17	30
水電解		0	4	16	39	52	71	116	141	229
	定置型発電機	17	20	23	27	32	39	48	61	81
需要合計		36	40	83	161	226	328	476	663	874

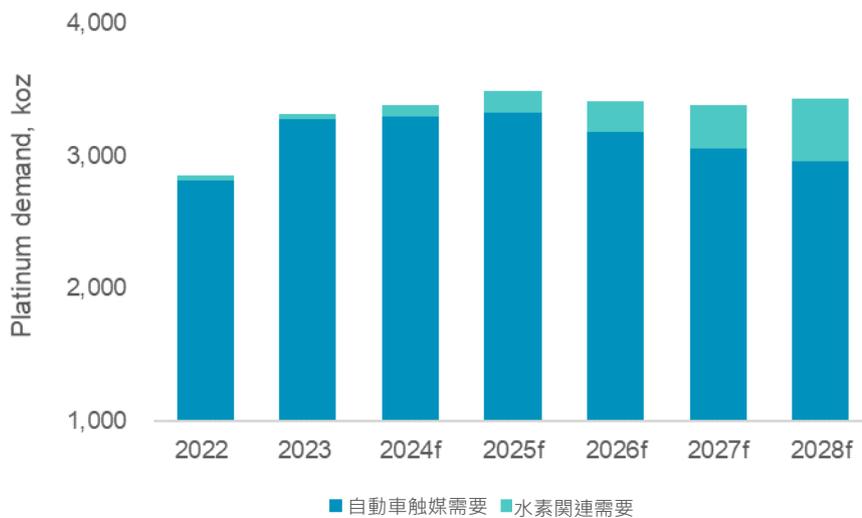
出典: WPIC リサーチ

図 2. 水素関連のプラチナ需要は 2030 年までに年間 27.2 トンに達する



出典: 国際エネルギー機関(IEA)、会社決算報告書、WPIC リサーチ

図 3. 水素関連のプラチナ需要の成長で、エンジン車の触媒需要の減少を補う



出典: メタルズフォーカス (2022 年~2024 年予測)、WPIC リサーチ(それ以降の予測)

# 目次

水素とは.....	3
水素経済とは.....	5
行政の役割.....	8
水素の生産法.....	9
水電解装置ー アルカリ水電解と固体高分子膜(PEM)型水電解.....	17
水素の輸送とサポートインフラ.....	35
結論.....	38

## 水素とは

原子番号「1」、元素記号  $H_2$  の水素は無色、無臭、無毒の気体で、宇宙に最も豊富に存在する元素。単位重量当たりの発熱量が非常に多いという利点を持つ元素の一つだが、体積あたりの密度が非常に低いため取り扱いが難しく、輸送に際しては圧縮や冷却液化が必要となる。

水素は直接燃焼あるいは化学反応のいずれかによって空気中の酸素と結合して水となってエネルギーを放出する。20世紀半ばにはこの原理を利用して液体水素を燃焼反応させることでロケット発射が実現した。一方で1960年代には米国のジェミニ宇宙船にはプラチナを使う水素燃料電池が搭載された。今日では、水素は燃料以外にも世界中の農産業に不可欠な肥料の製造に使われるアンモニア生産など、化学産業の原料として使われる。

図 4. ジェミニ宇宙船のサービスモジュールに燃料電池が搭載された



出典: 米航空宇宙局博物館

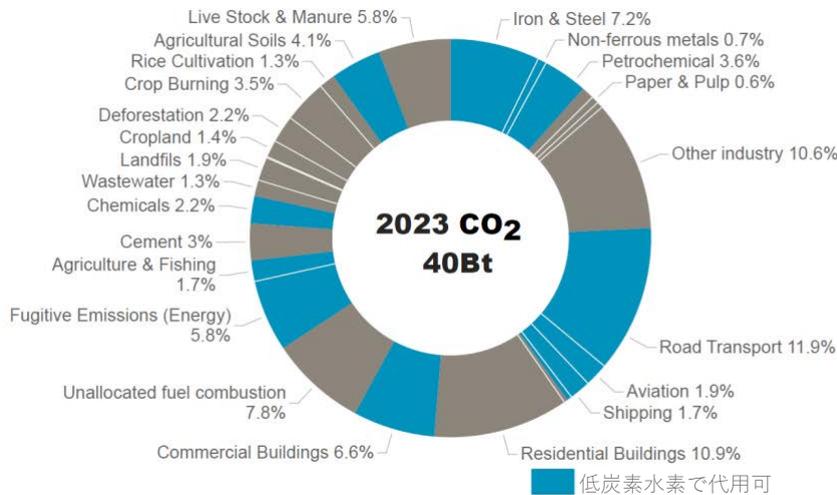
### なぜエネルギー転換に水素が重要か

化石燃料（石炭、天然ガス、石油）を燃やすと排出される温室効果ガスは産業革命以来増え続けており、地球の気候変動、特に温暖化と密接な関係がある。2015年に採決されたパリ協定では、温室効果ガスを軽減することで2050年までに世界の平均気温上昇を1.5度以下に抑えることが目標として掲げられた。この目標を達成するには、エネルギーを作り出す方法を根本的に転換しなければならない。化石燃料を基本とする経済から、金属などそれ以外のものを基本とする経済への転換、つまりエネルギー転換が必要だ。化石燃料への依存から脱却するためには社会や経済の様々な問題が複雑に絡み合い、多くの技術の助けも必要だ。風力や太陽光による再エネやバッテリー技術は温室効果ガスの軽減に貢献できるが、それらを導入できない分野も数多くある。高い積載効率求められる輸送分野では大きくて重量があるバッテリーの搭載は合理的ではないし、電動自動車を導入できない地域もある。このような分野や地域で炭素排出量を減らすことは非常に困難だ。例えば世界の炭素排出量の10%近くを占める製鉄業では、石炭と天然ガスを酸化剤として使って鉄鉱石を還元する過程で温室効果ガスが発生するが、現在の技術ではこの過程を電化することはできない。つまり再エネに変えただけでは製鉄業の炭素排出量を軽減することはできないのだ。しかし石炭の代わりに水素を使って鉄鉱石の還元を行う直接還元法ならば温室効果ガスはゼロだ。

このように燃料にも化学産業の原料にもエネルギー媒体にもなる水素こそが、炭素排出量をなかなか減らせない分野の脱炭素化の鍵となる可能性に年々期待が高まっている。低炭素炭あるいは排出量ゼロの技術によって生産された水素を使って、モビリティ、重工業、発電所などの温室効果ガスを軽減できるのだ。下の図5は世界の産業別の温室効果ガス排出量を表すが、水素技術を使うことによってその軽減を図ることができる分野は青色で示されて

おり、数多くの分野で水素を取り組むことが可能なことがわかる。水素協議会によると、2050年までに削減すべき炭素排出量のうち、約20%は水素を使って減らすことができるとしている。

図 5. 炭素排出量が多い産業の多くは水素を使うことで排出量を軽減できる



出典: Our World in Data (英オックスフォード大学)、WPIC リサーチ

## 水素経済とは？

水素は生産された後に輸送され、燃料として様々な分野で利用される。水素の利用を中心とする技術とプロセス全てを含むエコシステムが「水素経済」(図 6)だ。水素経済は川の流りに例えて上流、中流、下流の領域に分けられるが、それぞれの領域の役割とその中心となる技術を簡単に説明しよう。

**水素経済の上流**とは水素の生産過程を指し、現在は最も効率が高いが炭素排出量も多い天然ガス、石油、石炭を使って水素の大部分が生産されている。しかし、脱炭素化の動きが強まる中で、炭素排出量の少ない再エネを使う生産方法に転換する方向にあり、2030年までに水素生産の50%が低炭素、再エネを利用する方法になるとされている。そしてその中心が電気の力で水を水素と酸素に分解する水電解法だ。

**水素経済の下流**とは水素を利用する分野を指し、今日では大きく3つに分けられる。様々な工業の生産過程で使うアルコールのベースとなるメタノール生産、農業肥料の原料であるアンモニア生産、そして不純物を取り除いて環境規制に則った高品質の燃料を作る過程で水素を使う石油精製の3分野だ。現在は化石燃料を使って水素を生産しているこれらの分野でも、脱炭素化の動きの中で今後はグリーン水素を使うようになるだろうが、エネルギー転換が進むにつれて、この下流領域には合成燃料、モビリティ用の電力や定置型発電機の発電に使われるプラチナベースの固体高分子形燃料電池なども含まれるようになるだろう。

水素経済の上流と下流を繋いでいるのが**中流**で、水素の加工、輸送、貯留を行う分野をさす。現在水素は生産された工場で消費される場合が多いが、水素経済の発展とともに新たに生じる需要を満たすために、国内だけでなく国外にも水素を輸送する必要が出てくるだろう。水素は気体のままでも輸送できるが、液体化、あるいはメタノールやアンモニアなどの媒体に変換して輸送するなど、輸送距離や最終的な利用目的に応じた様々な方法がある。

水素は短期から中期間までであればタンクなどに貯留できる。また地中にある天然の岩層や洞窟などに長期間貯留されていることもある。送配電網に連携された再エネを使って生産された水素の場合、水素の長期貯留施設は送配電網の安定に重要な役割を果たす。というのは、再エネ発電は天候に左右されるため、条件が良いときに発電した余剰電力で水素を製造して貯留しておき、再エネが不足する時には貯留してある水素を使うことで、送配電網のバランスをとることができるからだ。

図 6. 水素経済と水素の主な利用



出典: WPIC リサーチ

## PGM で水素生産と利用が可能に

水素経済は PGM 触媒による化学反応を利用して生産する水素を主なエネルギー源として利用する経済システムだ。つまりプラチナの物理的・化学的特質が水素経済の発展を支えることになる。水素経済のプラチナ需要は 2030 年までに新たに 26.4 トン～28.0 トンになる予測で、以下には水素経済のそれぞれの領域で使われる技術と PGM (具体的にはプラチナ)の役割についてまとめた。

### 上流

プラチナ、イリジウム、ルテニウムなどの PGM は水電解を使う水素の生産において触媒として、化学反応の効率を高め水素への変換を促進する役割を担う。

水電解装置だけでなく、風力タービンや太陽光パネルの重要な建材であるガラスファイバーを製造する際のブッシングにもプラチナとロジウムの合金が使われている。水素を生産するための熱源として再エネ需要が増えれば、ファイバーガラスの需要も増え、プラチナの需要に繋がる。

## 中流

水素経済の中流領域でプラチナの需要を生み出すのは、水電解装置で生産された水素の精製と、輸送のために水素を液体有機水素キャリア (LOHC)に変換するプロセス。不純物の多い水素ガスは燃料電池のパフォーマンスに影響するため、触媒を利用して精製する作業は重要だ。

## 下流

プラチナ、パラジウム、ロジウムは何十年も昔から石油精製における水素化プロセスに使われており、2023年の工業のプラチナ需要の約6%を占めている。またアンモニア生産のハーバー・ボッシュ法では、プラチナ製のガーゼが使われる。

水素経済の下流領域で、プラチナが新たに使われ始めた分野としては、陸上、海上輸送からオフロード車までのモビリティや定置型発電機に使われる燃料電池がある。これ以外でも水素を利用するグリーンスチールや合成燃料は直接プラチナを必要としないが、これらの需要が増えて水電解装置の生産が増えるという意味ではプラチナの需要に結びついている。

図 7. 水素経済に使われる PGM

Production (Upstream)	Processing & Transport (Midstream)	Use (Downstream)
Electrolysis • Pt, Ir, Ru	Hydrogen Purification • Pt, Pd	Fuel Cells Mobility • Pt
Fibreglass Production • Pt, Rh	Ammonia Production • Pt, Ru, Pd	Fuel Cells Stationary • Pt
	LOHC • Pt, Ru	

出典: WPIC リサーチ

## 行政の役割

初期段階にある新しい産業分野が、持続可能なビジネスに発展するために必要な成長とイノベーションを援助するという点で、行政は重要な役割を果たす。グリーン水素経済には高い生産コストや、不安定な技術、インフラの未整備など解決すべき多くの問題がある。

世界各国が脱炭素化を目指す中で、行政のサポートは水素経済の発展には不可欠だ。2023 年末の時点で水素戦略を発表している国は 61 カ国に上り、合わせると国別エネルギー分野の炭素排出量の 8 割以上を含む。各国の水素戦略には拘束力のない水素の生産目標から、水素の利用を積極的に開拓する施策、水素への投資を保護するものまで、様々なものがある。図 8 はいくつかの国の水素ロードマップを示したもので、内容は多岐にわたるが、産業の脱炭素化から合成燃料の生産目標まで、国家レベルで水素利用が進められていることがわかる。

図 8. 各国の水素戦略目標

Country	Description
United States	10 Mt of “clean” hydrogen production by 2030, 20 Mt by 2040 and 50Mt by 2050.
European Union	10 Mt of hydrogen domestically produced and 10Mt imported by 2030. 42% of hydrogen used in industry to be renewable by 2030, rising to 60% in 2035.
China	Province based production targets, combined 2025 target of 1.1Mt.
Germany	Install 10 GW of electrolyzers by 2030, increase industrial and mobility hydrogen demand. Replace reliance on natural gas via hydrogen, 1,800km hydrogen pipeline.
India	5 Mt of “green” hydrogen by 2030 and 125 GW of renewable energy additions. Plans to expand to 10 Mt/yr so include development of exports.
United Arab Emirates	1.4 Mt of hydrogen by 2030, 7.5 Mt by 2040 and 15 Mt by 2050. Mix of electrolysis and SMR with CCS production.
Panama	Utilise hydrogen derivative fuels for 5% of maritime bunkering by 2030.
Japan	3 Mt of hydrogen by 2030, 12 Mt by 2040 and 20 Mt by 2050. Further, target to replace 1% of gas supply in existing pipelines with synthetic methane, rising to 90% by 2050. Targeting industrial hydrogen use in steel and petrochemical industries.
Korea	Targeting 2.1% of total electricity generation via hydrogen and ammonia by 2030, rising to 7.1% by 2036.

出典: 各国政府のプレスリリース、WPIC リサーチ

このような戦略目標の多くは政府の脱炭素化計画の方向性を示しているという点では有益だが、法的拘束力を持たないため、水素に投資を考えている投資家にとってはあまり強い説得力を持たない。ある意味ではこのような緩い政策こそが水素経済が大きく発展する機会を妨げてきたとも言える。しかし、欧州連合(EU)や米国など主要国では、広範囲な経済援助とともに強制力のある目標を設定する動きが強まってきており、罰則を伴う目標設定は様々な産業が向かうべき将来の方向性をはっきりと示すことになるだろう。例えば EU 圏内の水素需要の 42% は 2030 年までに再エネによる水素でなければならず、低炭素技術の需要の促進力となった。

まだ開発初期段階にある水素技術はコストが高く、化石燃料と価格競争ができる段階になるまで、多くの研究開発費と量産化によるコストの低減の両方が必要で、その実現には長い時間がかかる。そこで各国政府は水素経済のバリューチェーン全体が中期的、長期的に安定して発展できるよう様々な経済支援を行っている。以下にそのいくつかを紹介するが、今でも次々に新しい政策が発表されている。

- **助成金と補助金** 直接的な補助金は水素プロジェクトの設備投資コストを下げてプロジェクトの開始を促すために用いられる。オーストラリア政府の 20 億オーストラリアドルに上る再エネ水素プロジェクト、「Hydrogen Headstart」などがこれにあたる。
- **税金の控除** 5000 億ドル規模の米国のインフレ抑制法 (IRA) では、水素 1 キロに対し、最高で 3 ドルの税金を控除する。
- **差額決済契約 (CfD)** イギリス政府の再エネ支援スキームがこれにあたり、生産コストが高い水素生産事業の支援を行う。再エネ発電事業者の事業開始から 15 年間、低炭素エネルギーコストと通常の燃料の市場価格の差額を政府が補填する。
- **競争入札スキーム** EU の 8 億ユーロ規模の水素銀行パイロットプロジェクトがこれにあたる。入札したグリーン水素生産事業者のうちコストが低い事業者から順に落札者を選び、水素 1 キロにつき最高 4.5 ユーロの固定額の奨励金を 10 年間にわたって支払う。

十分な経済支援を伴う政府主導の積極的な水素目標は、水素需要を喚起し投資家と事業者が水素経済を築く基盤となる。

## 水素の生産法

水素は宇宙に豊富に存在するが、単体ですぐに利用できる形態にあることはほとんどなく、一般的には酸素と結合した水や、炭素と結合した化合物である天然ガスなどの形で存在する。したがって水素生産には結合物を取り除くための物理的、化学的プロセスが必要となる。

商業化されている水素生産の技術は二つに分類できる。天然ガス、石油、石炭などの化石燃料を燃焼させ、改質プロセス (水素と二酸化炭素が発生) を経て水素を得る方法と、電気エネルギーを使って化学的に水を電解して水素を得る方法の二つだ。この他にもバイオマスを用いる方法、熱化学法、光触媒を使う方法もあるが、現時点では小規模なものにとどまっている。

### 化石燃料の燃焼による水素生産

#### 水蒸気改質と石炭ガス化

現在の水素需要のほとんど全て (99.9%) は、化石燃料から作られた水素で供給されている。石炭ガス化、部分酸化法、水蒸気改質 (SMR) などの方法で化石燃料から水素を生産する方法は、低コスト (水素 1 キロにつき約 1 ドルから 1.5 ドル) であるというのが一番大きな理由だ。

**水蒸気改質** は天然ガス (主にメタン) を高圧力下で超高温の水蒸気と化学反応させて、水素と一酸化炭素 (さらに水と反応させて二酸化炭素となる) を得る方法。効率がよく安定している製法で、豊富にある天然ガスを原料とすることからコストは低いが、副産物として二酸化炭素が発生する。

**石炭ガス化** は石炭を原料として、高温で酸素とともに燃焼させて合成ガス (syngas) を作り出し、水素、メタノール、尿素、二酸化炭素などを含む合成ガスの中から水素を抜き出す方法。

通常、水蒸気改質は天然ガスが豊富に入手できる製油所で行われ大量に水素を生産するには都合が良い。水素が化学原料として必要で、石炭が豊富に入手できる場合には石炭ガス化法が有効だが、二酸化炭素の排出量が多いため

問題になる場合もある。中国では石炭ガス化法が広く用いられているが、米国や欧州では水蒸気改質が盛んである。

化石燃料を使う水素生産は、世界の炭素排出量の約 3.5% に当たる炭素を排出しているとする統計もあり、脱炭素化の流れを考えると炭素排出量の多い地域では石炭ガス化法を見直すことになるだろう。それに変わるのが低炭素燃料や再エネを用いる水素生産だ。

### 低炭素燃料による水素生産

炭素排出量が少ないか、ゼロの水素生産法はいくつかあり、現在は以下の方法が有効な水素生産法として注目されている。水蒸気改質と二酸化炭素回収と貯留 (CCS) を組み合わせた方法、メタン熱分解、そしてバイオマスガス化の 3 つである。二酸化炭素回収と貯留は比較的発達した技術で、化石燃料から水素を作る生産過程を脱炭素化する際の中間的技術とされている。メタン熱分解とバイオマスガス化の技術開発はまだ初期段階にあり、普及には解決すべき問題がいくつかある。

**二酸化炭素回収と貯留** は、水蒸気改質と石炭ガス化に付随する技術として捉えられる。水素生産過程で発生した二酸化炭素を回収して貯留し、それを他の過程で利用する。大気中に排出される二酸化炭素を約 75% 抑えることができる上に化石燃料を使う既存の施設を利用できるため、再エネによる水素生産よりもコストを低く抑えられることが利点となる（現時点でのコスト比較）。しかし天然ガスを使うことや、炭素排出量をゼロにすることはできないことなどから、多くの国では最終的にグリーン水素生産に行き着くまでの途中で採用する技術と位置付けられている。

**メタン熱分解法** は、天然ガスの主な成分であるメタンを水素と炭素に分解する方法。発生した炭素を回収、貯留することで、二酸化炭素が大気中に放出されることを防ぎ、炭素排出量が少ない方法とされる。回収した炭素（カーボンブラック）はタイヤ、印刷インキ、グラファイトなどに利用できる。

この方法はまだ水蒸気改質や水電解と商業規模で競合できる段階にはなく、今後の技術開発と行政の支援によって、将来有効な水素生産法となる可能性もある。

**バイオマスガス化法** は、植物や動物などの生物系バイオマスや、木質類などの廃棄物系のバイオマスを無酸素下で熱分解（乾留）させ、水素や一酸化炭素、二酸化炭素などを含む合成ガスを得、そこから水素を分離させる方法。この方法では、ガス化過程で発生する二酸化炭素は植物が成長する間に光合成によって大気から取り込んだ炭素とみなし、炭素排出はゼロと捉えられる。しかし炭素排出全体のバランスは、原料になるバイオマス、その収集や輸送とガス化の効率などに依存する。

### 水電解 – 電気による水素生産

脱炭素化を目指す世界にとって、再エネによる水素は有益なエネルギーで、水素の中でもよりエコであるグリーン水素を生産する手段は水電解装置による電解法が主流となっている。

電気の力で水を酸素と水素に分解して水素を取り出す水電解装置にはいくつかの種類があり、それぞれ一長一短ある。電解には大量の電力が必要となるため、まず、電力を得る方法によって生産される水素が分類される。水電解装置のタイプについては後述する。

今の段階では、水電解による水素は化石燃料から作る水素の約 2 倍のコストがかかるため、水素供給のうちのわずか 0.1% を占めるにとどまっている。

しかし今後技術開発が進めば、2030年までには水蒸気改質や石炭ガス化による水素と同等の価格水準にまで下がるとされている。

## 地下の天然水素

水素は自然界でも様々なプロセスで生成される。例えば、鉄分を豊富に含むカンラン岩と地下水が反応すると、水の中の酸素が鉄と結びついて水素ができる。これは化学的には可能なプロセスであることはわかっていたが、最近まで採算が取れる規模で自然界に水素が存在することは知られていなかった。

一箇所に大量に存在する天然水素は偶然のきっかけで発見された。1987年、西アフリカのマリで地下水を汲み上げるために掘られた井戸で、タバコの火に引火して爆発を起こすほどの無臭のガスが吹き出したことがあった。この井戸はその時は塞がれ、その後長い間忘れられていたが、2012年に天然ガスを採掘していた会社が再びこの採掘孔を開けて調査したところ、濃度の高い水素の存在が確認された。この天然水素を使って近隣のブーラケブグー村に電気が供給されるようになると、商業利用できるほどの量が集中している天然水素を世界中で探索する動きが高まった。天然水素はコストもかからない理想的な生産方法のように見えるが、利用のための開発はまだ探索段階だ。

## 水素の虹色

上述した通り燃料としての水素は様々な原料から生産されているため、生産過程が環境に与える負荷は原料によって異なり、そこから生じる問題や課題も様々だ。異なるタイプの水素に対して虹色をつけて区別する方法を紹介する。

**グリーン水素:** 再エネを使って水電解装置で生産されるグリーン水素は、炭素排出量がゼロに近く、また純度も高い。

**イエロー水素:** 再エネが利用できる時はそれを使い、できない時はそれ以外の燃料も使う水電解装置で生産される水素で、炭素排出量は中程度、純度は高い。

**ピンク水素:** 原子力発電による電力を利用した水電解装置で生産される水素で、炭素排出量は最低限で純度は高い。

**ターコイズ水素:** メタン熱分解法を用いて生産される水素で、副産物としてカーボンブラックができる。炭素排出量は少なく純度も高い。

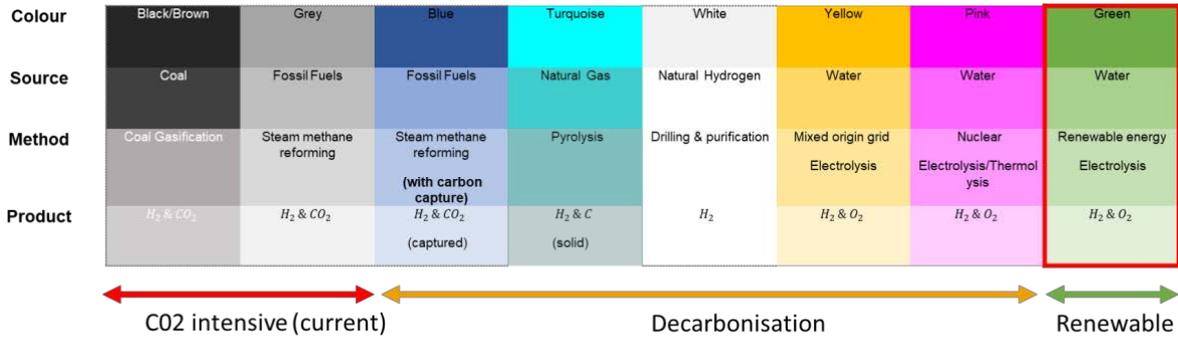
**ブルー水素:** 天然ガスあるいは石炭の水蒸気改質によって生産される水素で、発生する二酸化炭素は回収し貯留される。炭素排出量は低から中程度だが、水素中の不純物が多い。

**グレー水素:** 天然ガスを原料とし水蒸気改質で生産され、発生する二酸化炭素は回収されない。炭素排出量は中程度以上で水素中の不純物が多い。

**ブラウン水素、ブラック水素:** 石炭ガス化で生産される水素はブラック水素、褐炭のガス化による水素はブラウン水素とされる。二酸化炭素は回収されず、炭素排出量は多く、不純物も多い。

**ホワイト水素:** 天然水素を指す。

図 9. 炭素排出量を虹色で表した様々な生産法による水素



出典: WPIC リサーチ

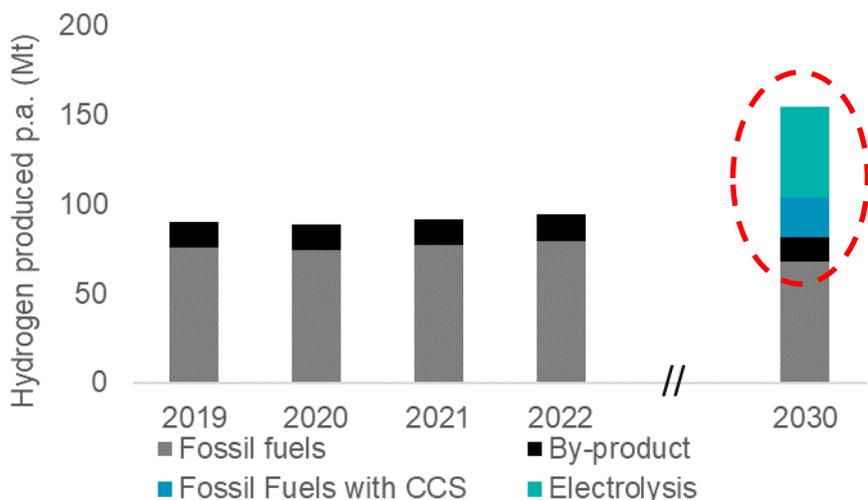
### 水素の供給サイドの変化と優位に立つ技術

ここまで見てきた様々な水素の生産方法の中で、技術的に勝ち残るのはどれだろうか。現在年間 9500 万トン生産されている水素はそのほとんどが化石燃料によるが、市場には変化の兆しが見られる。今後 10 年間で、交通、発電、工業など多くの分野で水素需要が増えても、新たな需要に対応できる水素は豊富にあるとされているが、これから求められる水素は生産過程の炭素排出量が少ない水素だ。従って水素の供給サイドの成長は、低炭素技術を使った水素の生産のコストをいかに抑えるかにかかっている。

国際エネルギー機関(IEA)は 2030 年までに世界の水素供給は 50% 増えると予測している(図 10)。2030 年以降、炭素排出量が多い化石燃料による水素に代わり、低炭素水素の生産を支える技術の主流は水電解と炭素回収になるだろう。しかし水素の需要が増えることはもとより、水素生産の経済性を高めるためには以下の事柄も重要だ。

- **行政による政策、奨励金、法的な枠組み:** 水素生産に非常に大きな影響を与える補助金や助成金、法規制などは水素生産を増やしていく上で有効な手段だ。
- **補助金及びカーボンプライシング:** カーボンプライシングの導入は、炭素排出量軽減の強化策とともに 低炭素、ゼロ炭素の水素生産技術の普及を推し進める。カーボンプライシングが炭素排出の多い技術に適用されれば、それによって生産される水素は高コストとなり競争力が下がる。その一方でグリーン技術に補助金を支給すれば開発初期のコストが抑えられ、より安価に市場に提供することができる。この二つの政策を組み合わせでエネルギー転換技術を促進できる。
- **国際協力:** 国境を跨ぐ輸送や貿易枠組みに関する合意を含む、国や国際機関の相互協力が水素の世界的な流通を助け、供給を支えることができる。
- **技術開発:** 今はまだ低炭素水素のコストが高いため、水電解装置、炭素回収と貯留技術に対する先行投資は非常に重要だ。これらの技術開発が進んで水素生産の経済性が高まれば、設備投資の有効性や効率性が高まり、新たな企業が水素生産市場に参入しやすくなる。
- **利用しやすい再エネ:** グリーン水素の生産で最も負担が大きいのは電力で、それは再エネの発電量が不安定なことや供給システムが未整備であることなどに起因する。したがって水素のコストを下げて供給を増やすためには、再エネ設備と水電解装置を組み合わせ、地理的にも再エネ発電に有利な場所に設置することが重要だ。

図 10. IEA によると、2030 年までに 50% 増える水素供給を支えるのは水電解による水素生産



出典: IEA、WPIC リサーチ

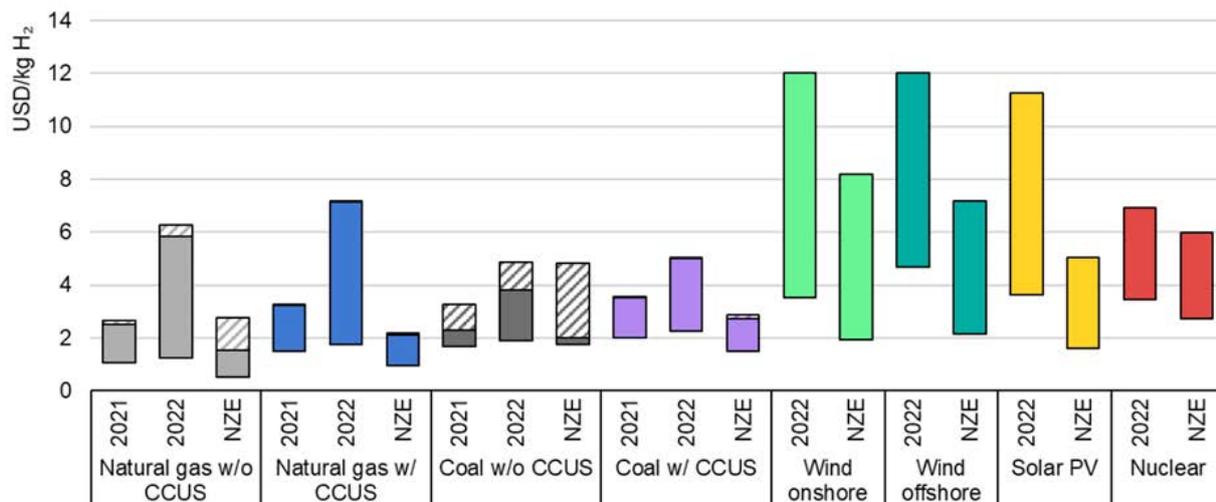
### 二酸化炭素の回収・貯留技術と水電解技術

化石燃料を使いながら二酸化炭素を回収する水素の生産法と、水電解による生産法が低炭素水素生産の主流になっていくだろう。IEA は、2030 年までに新たに供給される水素の約 70% は水電解による水素、残りの 30% は二酸化炭素の回収と貯留 (CCS) によると予測している。エネルギー転換の途中の技術と認識されている二酸化炭素回収技術 (CCS) は、その回収プロセスに化石燃料を使うが、気候変動問題の国際会議、COP 28 で合意した通り化石燃料の利用が減っていくとすれば、2030 年以降は CCS 技術の利用は減っていくはずだ。EU の「Hydrogen Second Delegate Act (2023)」では、すでに 2030 年までに再エネによる水素が全体の 42% を占めるように、2035 年までにはそれが 60% になるように定めている。CCS 技術も最終的には化石燃料を使わない技術開発を目指しているが、低炭素水素の定義そのものを、長期間にわたる温室効果ガスの排出量に基づいて厳格に定めようとする動きもある。

現在の CCS 技術は、水電解装置や再エネによる水素生産と比べると相対的にコストが低く、既存の石炭・天然ガス設備が使えるため新たにサプライチェーンを構築する必要もない。これが、従来から石油や天然ガス産業が発達している地域で採用されやすい理由となっており、米国、英国、オランダなどで CCS 技術が発達している (図 11)。米国と EU では、CCS 技術による水素は低炭素水素として政府の補助金が支給されている。

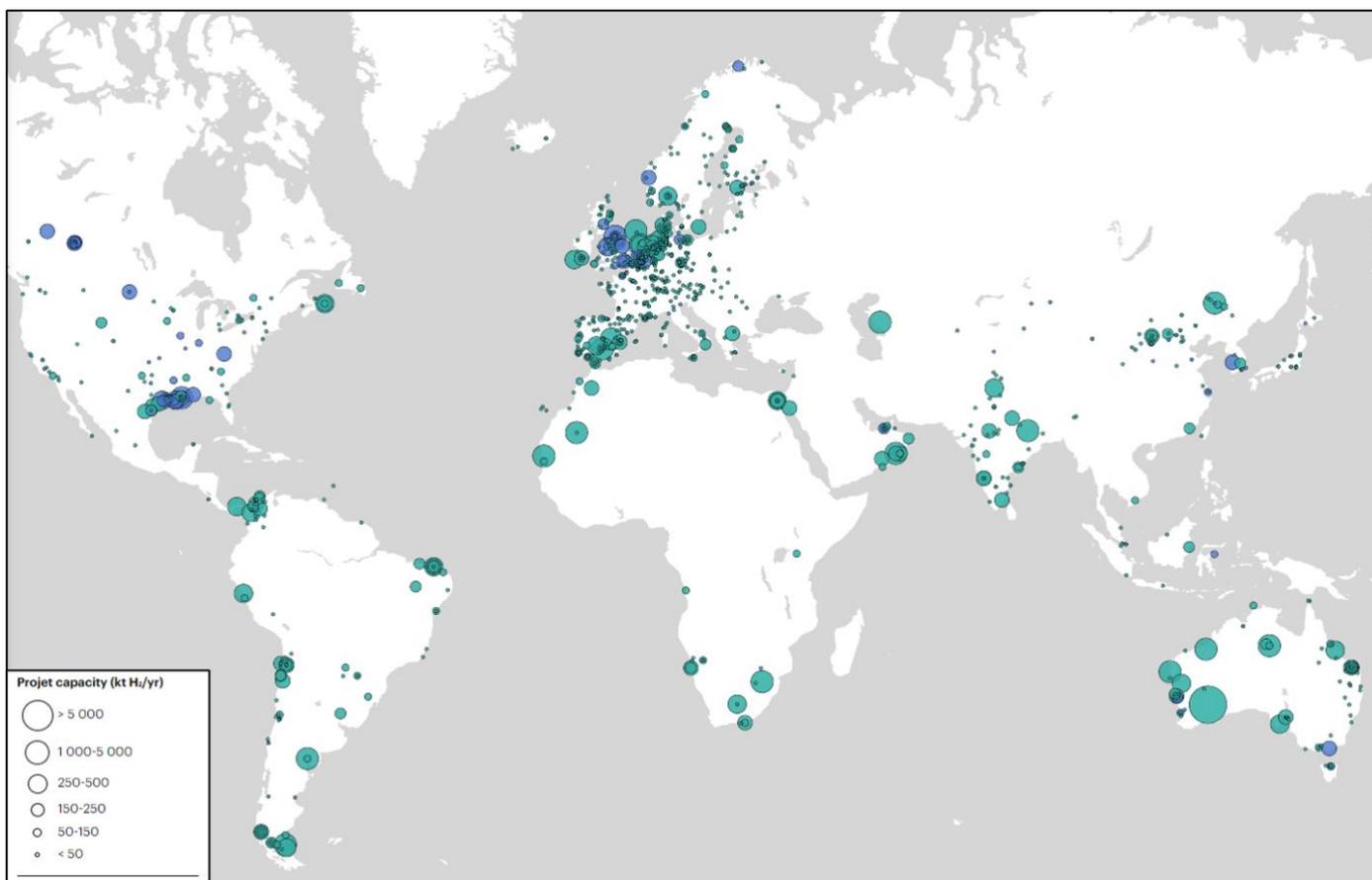
もう一つの水素生産方法である水電解装置の量産が進んで設置コストが下がり、再エネの供給が地理的に有利な場所に多く設置されていけば、水電解による水素のコストは CCS (図 10)と同水準になる可能性がある。しかし、再エネを使う水素のコストがまだ高い状況でも、水素を使う分野の脱炭素化を効果的に進めていくためには、ブルー水素は特に重要で、水素産業の発展移行期の技術とされている。

図 11. 生産方法別の水素生産コスト（2021 年～2022 年の実績と 2030 年の予測）（米国エネルギー省エネルギー情報局による「Net Zero Emissions by 2050」シナリオ）



出典: IEA

図 12. 2030 年までに着手される水電解装置（緑色）と CCS（青色）設置プロジェクト計画



出典: IEA

## 水電解装置の種類とプラチナへの影響

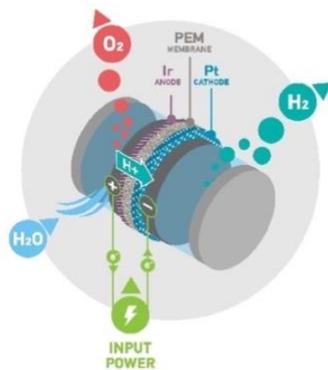
2030 年までに新たに生産される水素の大部分は水電解装置による水素とされ、現在、アルカリ水電解(AEL)装置 と、プラチナを使う固体高分子(PEM)型水電解装置の二つの技術が商業化されている。まだ商業化はされていないが、アニオン交換膜 (AEM) を使う水電解装置と固体酸化物膜 (SOEC) を使う水電解装置は今後の技術開発が期待されている。

以下に、今後の成長シナリオと将来の傾向に入る前に水電解の中心になる技術について説明したい。

**固体高分子膜 (PEM):** 気体バリア性の高い固体高分子 (ポリマー) 電解質膜を使って水を水素と酸素に分解する技術。アルカリ電解よりも後発の技術で設備費用がかかるが、不安定な電源にも対応できるため、再エネ電源と組み合わせるのに適している。電解装置の製造が増えればコストが大幅に下がるだろう。

PEM 型水電解装置の電極には触媒としてプラチナとイリジウムがコーティングされている。エネルギー効率アルカリ水電解装置同様に高いが、装置を5分の1の大きさまで小型化でき、オフショアの集合型風力発電所や都市部に設置する場合には利便性が高い。また PEM 型水電解装置による水素は純度が 99.99% と高いため、精製プロセス抜きでそのまま燃料電池などに利用できる。さらに 200 bar までの高圧で運転ができるため、直接高圧水素製造が可能となる。水素ガスは常圧下だとエネルギー密度が低く、利用するには高圧化が必要だが、PEM 型水電解装置だと高圧充填のプロセスを省略することができ、生産過程の低コスト化につながる。PEM 型水電解の主な触媒はプラチナとイリジウムだが、高価なイリジウムの代わりにルテニウムを使う研究も進んでいる。一般的には技術開発によって高価な触媒を「節約」する流れにある。

図 13. プラチナとイリジウムを利用して水素を作る PEM 水電解装置の仕組み



出典: WPIC リサーチ

**アルカリ水電解 (AEL):** 最も古くからある電解技術で、金属を使ってアルカリ性溶液を水素と酸素に分離する。PEM 型水電解装置ではアノード (陽極) で酸素が発生するため触媒が酸性環境に晒されて劣化しやすく、それを防ぐために貴金属を使うのだが、アルカリ水電解ではその心配がなく、安価な金属でも使えるため低コストとなる。酸素が発生するアノードはニッケルがコーティングされたステンレス、水素が発生するカソード (陰極) には硫化ニ

ッケル、ニッケルモリブデン合金、ニッケルとすずの合金など活性化されたニッケル合金を用いる。アルカリ水電解は水素と酸素を分ける隔膜にガス透過性の高いものを使うため安価で済むが、再エネと連携する場合には効率が悪くなる。

アルカリ水電解でも、少ないエネルギーでも化学反応を促進するプラチナ触媒を使うことはできるが、効率よりもコストを優先させてニッケル合金が使われることが多い。その場合は水電解装置のオン・オフが頻繁に繰り返されることで劣化が大きくなりやすいのが欠点で、長期使用で水素生産の効率が悪くなる。そこで近頃は**プラチナ触媒を使い、高圧で機能して寿命も長い高性能のアルカリ水電解装置**を生産しているメーカーもある。

**アニオン交換膜(AEM)水電解:** 原理は PEM 型水電解に似ており、高圧でも機能するアルカリ性アニオン交換膜を電解質膜に用いる新しい技術。開発目的の一つにクロスオーバー（酸素ガスが水素ガス側に混入する）による効率の低下を防ぐということがある。PEM 型水電解同様に、AEM 水電解も水溶液を用いないため、腐食によって溶液が流れ出すなどの環境への被害はない。また、装置の小型化と軽量化も可能だ。

電極には安価な鉄、ニッケル、コバルトなどを用いることができるが、中には少量のプラチナを混ぜて効率の向上を目指す装置もある。しかし、商業化するにはまだ多くの課題がある。まずアニオン交換膜の伝導性は PEM 型水電解で使われる陽イオン伝導性よりもかなり低いため、水素と酸素ガスの発生効率が悪い。また交換膜の耐久性が低いため装置の寿命が短い。こういった問題は今後の研究開発によって解消され将来的には商業化されるだろう。

**固体酸化物膜:** まだ開発の歴史が浅いが非常に注目を集めている期待の高い技術。水蒸気を摂氏 500 度から 850 度に加熱して電気分解で水素を作る。エネルギー効率は約 90% と高い。ちなみに現在の AEL 水電解と PEM 水電解の効率は 60% から 80%。

将来性には期待がかかるものの、固体酸化物水電解装置は今の技術では内部コンポーネントの耐久性が低いため劣化しやすく、コストも最もかかり維持費も大きい。高温での動作が必要となるため起動と停止にかかる電力コストも大きい。しかし工業過程の廃熱利用と組み合わせることができれば、エネルギーコストを大幅に軽減することができ、化石燃料によるグレー水素と水素 1 キロあたり同水準の低いインプットコストで水素生産が可能となる。

固体酸化物形電解セル (SOEC) を原子力エネルギーと連携し、低コスト、低炭素の原子力エネルギーと廃熱を使ってピンク水素を生産する技術は、グリーン水素の生産コストを下回る可能性がある。特に製鉄所やアンモニア生産工場では廃熱が豊富にあり、そこに SOEC 生産法を組み合わせる利点は非常に大きい。

図 14. 水電解技術のまとめ

	Alkaline	PEM	SOE	AEM
Electrolyte	Aqueous potassium hydroxide	PFSA membranes (e.g. Nafion)	Yttria Stabilised Zirconia (YSZ)	Anion exchange ionomer
Cathode	Nickel, Nickel – Molybdenum alloy	Platinum, Platinum – Palladium alloy	Nickel/YSZ	Nickel and Nickel alloys, Platinum
Anode	Nickel, Nickel – Cobalt alloys	Iridium oxide, Ruthenium oxide	YSZ	Nickel, Ferrous Cobalt oxides.
Operating Temperature	60 - 80	50-80	500-850	50-60
Operating Pressure	30	70	1-25	1-30
Stack Lifetime (h)	60-80k	60-80k	<10k	
Technology Readiness	Matured	Commercialised	Demonstration	Large prototype
Capital Cost	USD 500-1400/KW	USD 1000-1800/KW	USD 2800-5600/KW	

出典: Centre for Energy Finance、WPIC リサーチ

## 水電解—アルカリ水電解と固体高分子(PEM)型水電解

2023 年末までに設置された世界中の水電解装置の生産能力は 1GW 以上、今後の設置計画も含めると、2030 年までには 250 GW を超えるとされている。地域別の設置数のトップは欧州と中国だが、インフレ抑制法 (IRA) が成立した米国でもこれから増えるだろう。しかし、2024 年の大統領選挙でトランプ氏が当選すれば同法に対する政治的な圧力が強まる危険もある。

水電解装置の設置プロジェクトは既に発表されていても、それが確実に実現するとは限らない。2030 年までの設置計画全体の中で、建設着手どころか、最終的な投資資金配分 (FID) ですら決まっているのは 20% 以下だ。しかし完成に 6 年以上を要するような大型プロジェクトではこういった状況はそれほど珍しいことではない。全体の半分はフィジビリティスタディが終わって少なくともそこまでの投資は行われている。また 2022 年はプロジェクト数そのものが 74% 増えた。発表された計画全てが実行されない懸念はあるが、水素生産に対する期待が高まる中、行政の後押しとともに、設置や投資は今後増えていくだろう。

アルカリ水電解装置と PEM 型水電解装置は世界各国のメーカーが製造している。2030 年までに生産される予定の水素の 95% 近くが水電解技術を使うとされるが、どの水電解技術が主流になるかという点は、プラチナの観点からは重要だ。プラチナの触媒はアルカリ水電解装置にも使われ始めているが、それが今後どの程度の需要に成長するかはまだ未知数で、一般的には PEM 型水電解装置がプラチナの需要に直接貢献する技術だ。そこでそれぞれの水電解技術の将来性に関する我々の見解を述べる前に、技術の選択を左右する背景について説明したい。

### 水電解装置の選択

生産者からすれば当然、投資に対するリターンが最大になるような水電解技術を選ばなければならない。設備費用、運転コスト、再エネの供給コスト、資金の年間返済額、生産される水素から得る利益などを考慮し、水素の生産コストが最も低くなるよう調整する。エネルギー供給コストが固定の場合、水素の生産コストを低く抑えるためには、上述の設備費用、運転コストに加え、稼働率の 3 つが重要で、水電解技術によってそれぞれ一長一短がある。

一般的には PEM 型水電解装置の設備費用はアルカリ水電解装置よりも高い (図 15) が、メンテナンス費は低く、稼働率も高いため、運転コストと単位当たりのコストを低く抑えることができる。

### 設備投資

新しい技術を利用する場合の初期コストは高くなりがちだが、それを低く抑えるためには 3 つの効果的な方法がある。生産規模の拡大、生産量の拡大、そして技術革新だ。

**生産規模の拡大によるコスト減 (規模の経済) :** 水素生産の規模を拡大すれば大幅に費用は抑えられる。工場あるいはプロジェクトの規模が大きくなればなるほど、単位あたりの固定費用、原料の大量購入、設備建設費などが節約できる。例えば化学産業では工場の規模が 10 倍になっても設備費用は 5 倍にしかならないと言われる。従って水電解装置プロジェクトの規模が大きくなるにつれ、単位当たりの費用は下がる。

**生産量の拡大によるコスト減:** 同じものの生産量が増えれば、製造過程の自動化やサプライチェーンの効率化が可能になり、それによってコストを下げる事ができる。

**技術革新によるコスト減:** 技術革新により、製造工程の設計改善、効率を上げるための基本的な技術の向上などがコスト軽減に貢献する。

以上のようなことが考慮されながら、研究開発によって技術革新が進み、水素プロジェクトの規模と生産量が拡大し、単位あたりの水素生産コストが下がっていく。このプロセスは通常、学習曲線効果あるいは経験曲線効果とも言われ、コスト競争力のもととなるものだ。

どのタイプの水電解装置を選ぶのかという点に話を戻すと、アルカリ水電解の方が発達した技術であるため、PEM 型水電解よりも経験曲線効果がより進んでいると言える。つまり技術革新がより進んでおり、より大きな規模のプロジェクトに対応できることになる。通常、PEM 型水電解スタックは 5MW 規模の水素生産が可能であるのに対し、アルカリ水電解スタックは単体でその 2 倍の 10MW だ。そして建設費は、アルカリ水電解装置の平均は PEM 型水電解装置の半分 (図 15)。

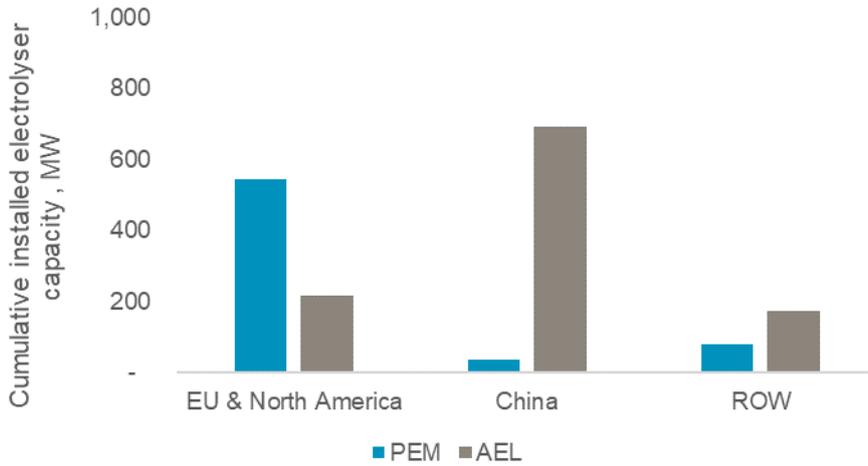
このコスト差は地域によってさらに拡大する。アルカリ水電解装置の製造技術が非常に進んでいる中国では、世界の平均よりも 6 割 安く建設できる。とはいえ、統計があるわけではないが、運転の安定性、生産量と運転コストにはそれほど差がないと言われる。一方で中国の PEM 型水電解装置のコストは世界の 3 倍 (図 15)。2023 年終わりの設置数ではアルカリ水電解装置が世界のマーケットシェアの推定 65% を占め、PEM 型水電解装置に対して優位にある。

図 15. 水電解装置の技術的サマリー

2022 uninstalled capital cost (\$/ Kw)			
	Global Avg.	China Avg.	Delta
PEM	1,000	630	-0.4x
AEL	500	210	-0.6x
Delta	2.0x	3.0x	

出典: 米国エネルギー省、CEDC、WPIC リサーチ

図 16. 中国とそれ以外の地域ではアルカリ水電解が主流で 2023 年のマーケットシェアは 65%。PEM 型水電解は欧州と北米が中心。



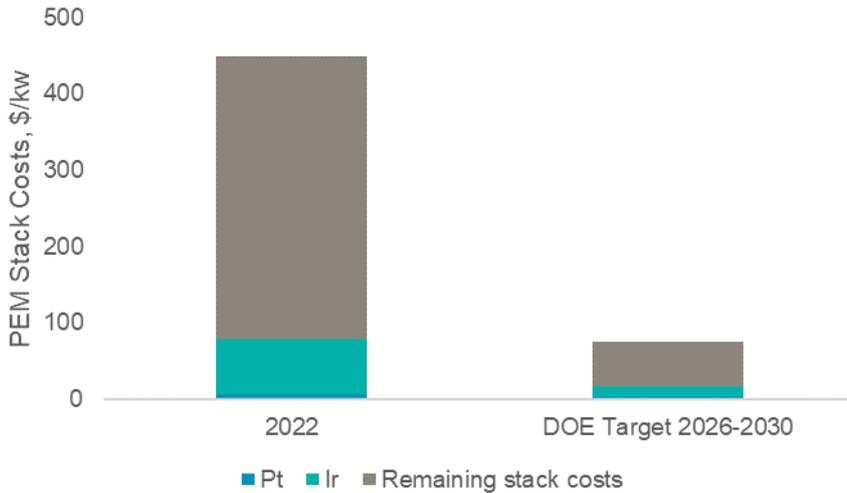
出典: IEA、WPIC リサーチ

PEM 型水電解技術はアルカリ水電解技術よりも研究開発が遅れている反面、コスト軽減のための今後の技術開発の余地が大きいことにもなる。学習（経験）曲線は、初期に短期間で大きなコスト軽減を達成できれば急勾配で上昇し、その後コスト軽減が容易に実現できなくなるにつれて平坦になる。例えば太陽光パネルの設置には、最初非常にコストがかかったが、時間とともに下がり、10 年後には当初の 1 割になった。PEM 型水電解装置に関してはこのような極端なコスト軽減は不可能かもしれないが、太陽光パネルが先例となる面もあるだろう。100 年も前からあるアルカリ水電解技術の学習曲線はかなり進んでいるため、さらなるコスト削減はあまり望めなく、新しい技術である PEM 型水電解のコスト削減の度合いの方がはるかに大きく、早く下がるだろう。多くの技術関係者は中国以外の PEM 型水電解技術のコストは 2030 年までにはアルカリ水電解技術と並ぶとしている。

PEM 型水電解装置のコストを下げる努力はまず、製造工程の自動化や、貴金属の使用を節約できる触媒の開発など、比較的容易な技術から始まっている。昨今開催された水素関連の会議で技術コンサルティング会社の英 Wood Group が発表したところによると、PEM 型水電解スタックの製造は手作業の部分が非常に多く、スタック一つにフルタイムの技術者二人が二日かかっているが自動化すれば 2 時間半で組み立てられるという。

現在、PEM 型水電解装置スタックの材料コストのうち、プラチナやイリジウムなどの貴金属が約 15% を占める。イリジウムは現在プラチナの 4 倍近くのプレミアムで取引されているため、この貴金属材料費のほとんどはイリジウムだ。つまり PEM 型水電解技術の高いコストの負担になっているのはプラチナではなくイリジウムであるということだ。技術開発が進めば少ない触媒でも寿命と効率が上がるようになり、2030 年までには必要な量は今よりも 8 割減ると言われている。当然プラチナも対象だが、高価なイリジウムの節約よりはゆっくりしたペースとなるだろう。触媒に関する研究開発は今までも相当進んでおり、今後の開発はより高価なイリジウムに集中すると思われる。

図 17.水電解装置のコスト軽減にはイリジウムの節約が有効で、現在プラチナは安価なためそれほど節約対象にはなっていない



出典: ヘレウス、米国エネルギー省、ジョンソン・マッセイ、WPIC リサーチ

最後に技術革新は水電解装置の効率向上に大きな役割を果たしていることを付け加えたい。図 18 にあるように、米国エネルギー省は、技術革新のおかげで、2030 年までに PEM 型水電解装置のコストと寿命はアルカリ水電解装置と同じ水準になるとしており、PEM 型水電解装置はより高い生産効率を維持しつつも、コストは下がっていくということだ。

PEM 型水電解装置はアルカリ水電解装置よりも効率良く、より高い電流密度を得ることができるようになるだろう。つまり少ない電気エネルギーでより多くの水素が生産できるということで、この点は装置を設置できる面積が限られるが高い生産性が求められるオフショアおよび都市部での水素生産には利点となる。

図 18. 米国エネルギー省による、PEM 型水電解装置とアルカリ水電解装置のパフォーマンス目標で、2030 年までにコストと共に同水準となることを目指す

Characteristic	Units	Alkaline		PEM	
		2022	2030	2022	2030
Performance	A/cm <sup>2</sup>	0.5	2	2	3
Efficiency	kwh/kg H <sub>2</sub>	51	45	51	43
Lifetime	Operation h	60,000	80,000	40,000	80,000
Capital Cost (Stack)	\$/kw	250	50	450	50
System Cost	\$/kw	500	150	1,000	150

出典: 米国エネルギー省、WPIC リサーチ

### 運転コストと再エネとの相性

次に PEM 型水電解技術とアルカリ水電解技術それぞれの再エネとの相性を見てみよう。どちらの水電解技術もグリーン水素を生産できるが、水素生産の効率及び運転コストは、再エネをどう供給するかによって大きく変わってくる。まず装置の設計上、アルカリ水電解装置は電力供給が安定していることが重要だが、PEM 型水電解装置は不安定な電力供給でも柔軟に対応できる。

再エネを電源として水電解装置と連携した場合、風が吹かない時や太陽が雲に隠れる時など天候によっては、水電解装置は電源出力が十分でない状態となる。アルカリ水電解装置の電解質膜は透過性が高いため水素と酸素の混合を完全に防ぐことができなく、不安定な電源だと混合の度合いが高まる。酸素と水素は混合比率が 4% (水素が 4%、酸素が 96%)を超えると爆発の危険性があるため、水電解装置にはこの比率が 4%未満でも自動停止する安全システムがある。これは電源の出力が 25%~30% 以下になるのと同じだが、その段階になると水素の製造が止まり、以下の二つの問題が生じる。

- **再稼働に要する時間:** アルカリ水電解装置の再稼働は時間がかかるため、電源出力を 25% まで高めるまでの間、停止している時間が長い。通常 PEM 型水電解装置よりも 30 分余計にかかる。
- **電極の劣化:** アルカリ水電解装置のニッケル電極は 5000 回から 10000 回のオン・オフを繰り返すと大きく劣化することがわかっている。つまりアルカリ水電解装置で頻繁に運転停止・再稼働を繰り返すと電極の劣化が早まる、装置の寿命が縮まる、メンテナンスコストと設備費が増加するといった問題につながる。

再エネによる PEM 型水電解装置とアルカリ水電解装置の水素生産量を同じ期間で比べた場合、上記のような問題が原因でアルカリ水電解装置の生産量は低くなり、これがアルカリ水電解による水素生産の総コストを上げることに繋がる。

この問題は、蓄電バッテリーや水電解装置のスタックシステムを利用して電源の安定度を高めることで幾分軽減することもできるが、その分コストがかさみ、対策としては限度がある。また安定した電力供給が可能な送配電網に水電解装置を繋ぐことで再エネ電源とのバランスをとる方法もあるが、そうすると送配電網の電力が何かによって生産される水素の定義が変わることになる。つまり再エネによるグリーン水素なのか、それとも化石燃料によるグレー水素なのかという問題となり、政府の補助金との絡みが出てくる。送配電網に繋ぐ方法は中国では多く用いられているが、規制の厳しい西側諸国で広まるかどうかは疑問が残るところだ。

PEM 型水電解技術の最も大きな利点は再エネとの相性が非常に良いことで、電源出力が少なくなっても電解プロセスが停止することはなく、直接再エネ電源と連携できる。装置の設計によっては電源が 10% 以下、あるいはゼロになっても停止しない。つまり PEM 型水電解装置は電源出力が増減する、あるいはオン・オフの繰り返しにも柔軟に対応でき、初期設備投資の費用は大きいですが、それ以降の長期的な運用コストは低いと言える。

## 政策などの影響

中国以外の地域では、PEM 型水電解装置の方が太陽光発電や風力などの再エネにより柔軟に対応できるという理由で普及が進んでいる。米国と EU の水素関連の政策が進めば、これからの水電解装置は電力販売契約 (Power Purchase Agreement : PPA) を通じて直接あるいは間接的に再エネ電源と連携しなければならない方向に進んでいくだろう。2023 年に定められた EU の「再生可能エネルギー指令: Renewable Energy Directive」は再エネを使う水電解装置に関する厳格な法的枠組みで、米国でも同様の枠組みが税金控除 (45V tax credit regulations) として導入されている。生産された水素が再エネ利用あるいはグリーン水素として認定されるためにはこのような規制に定められた条件を満たさなければならず、それによって優遇税や補助金を受けられるかどうか、あるいは最終的に市場に供給できるかどうかが決まるため、水素のコストに関わることになる。

**追加性(Additionality):** 水電解装置が利用する電力源が本当に再エネへの投資を促進し、化石燃料からの転換につながっているのかという観点が重視され始めている。つまり、水素を生産しても、既存の（古い）送配電網を利用した形態は本当に有益なのかどうかということだ。EU では 2027 年までに水電解装置が使う電力供給は水電解装置が設置されてから 3 年以内に構築された再エネプロジェクトから供給しなければならない。

**時間的相関性(Temporal Correlation):** 水素生産と再エネによる発電が、電力販売契約上の同一の 1 時間以内に行われることを指す。

これらの定義が意味するところは、EU 域内では 2027 年以降の水電解装置の電源は専用の再エネ電源と連携して直接供給された電力か、あるいは電力販売契約に基づく送配電網につながる新たな再エネ電源でなければならないということだ。後者であれば、水電解装置が送配電網から得る電力は再エネが利用できる時のみ使うこと、結局は送配電網と直接連携された水電解装置ということになり、結果的には電力供給の不安定さという点は逃れられない。

とすると時間的相関性の考え方に適しているのは、不安定な再エネ電源の供給に素早く対応できる柔軟性の高い水電解装置、つまりプラチナを使う PEM 型水電解装置ということになる。アルカリ水電解装置よりも利用率が高まり、メンテナンスに必要な停止時間も減ることになる。さらに再稼働にかかる時間が短いため、再エネ以外の他の電源を使うこともできる。これは再エネ発電量が需要を超えるために本来ならば制御される電力を使う、あるいは送配電事業者に対して、送配電網の需給バランスに応じて柔軟に水素生産を調整することによって調整サービスを提供することで可能になる。制御予備力契約（control reserve agreement）の元では送配電事業者は、余剰電力や、需要が少ない時に電力を使う水電解装置の運用業者に対して損失補償を行うが、このような取り決めは利用率の向上とともに水電解装置プロジェクトの正味現在価値（NPV）を増やすことにも貢献し、アルカリ電解装置に対して初期投資が大きい PEM 型水電解装置プロジェクトの欠点を補うことにもつながる。さらに、今年 EU 水素銀行を通じて、水素 1 キログラムにつき 4.5 ユーロの補助金が支払われる計画もあり、水素生産の促進に役立つことが期待されている。

今後、アルカリ水電解装置は、中国を除くと**アルカリ水電解装置が安定して運転操作できる**地域で普及していくだろう。再エネの割合が高い送配電網を持つ地域や原子力発電所のある地域では、送配電網からの電力を直接水電解装置に供給でき、低炭素水素を生産できるからだ。また水力発電や地熱発電、あるいは異なる再エネを組み合わせた発電は安定性が高いため、アルカリ水電解装置に適している。安定した電力供給があり、かつ設置面積の制限がないところではアルカリ水電解技術はコスト的に効率の高い水素生産方法となる。

## 水電解装置のまとめ – 東西の違い

水電解装置の普及傾向には既に地域性があり（図 19）、アルカリ水電解装置は中国を中心としてアフリカ、南米、オーストラリアに多く、PEM 型水電解装置は欧州と北米に多い。アルカリ水電解装置が優勢であることと地域による技術の違いは今後も変わらないだろうが、我々は 2030 年までには PEM 型水電解装置が世界の 38% のシェアに成長すると予測している（図 17）。

2030 年までに設置される世界の水電解装置のうち 3 分の 1 は中国で、そこではコスト面で有利なアルカリ水電解装置が 90%~95% のマーケットシェアを占めることになるだろう。その一方で北米と欧州では PEM 型水電解装

置が増えていくと見られ、それを支えるのは厳しい再エネ水素規制、設置面積を有効に使えることと長期にわたる規模拡大が可能な点である。

図 19. 2023 年のアルカリ水電解と PEM 型水電解装置の地域分布

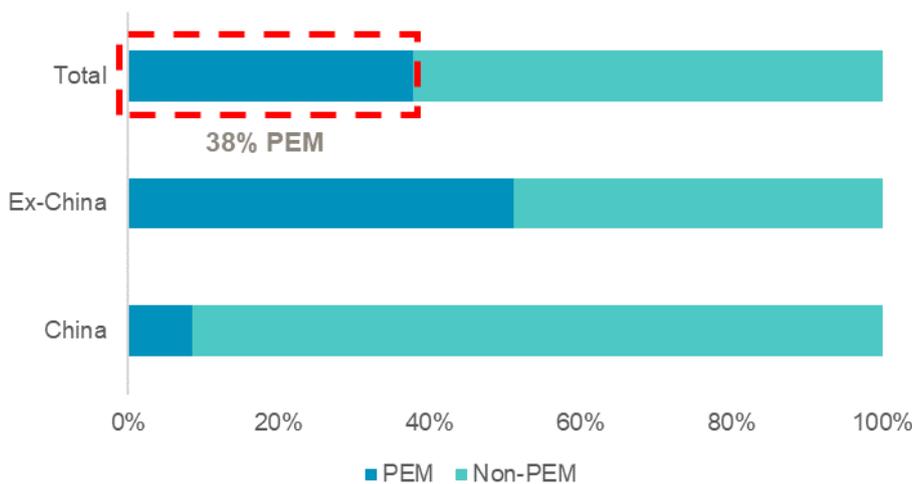
	PEM	ALK
US & EU	70%	30%
China	5%	95%
Rest of the World	30%	70%

出典: IEA、WPIC リサーチ

10 年単位の発電プロジェクトとしては、PEM 型水電解装置は運転コストが現在高いのが欠点だが、戦略的な価値は高い。10 年から 15 年ごとに取り替える必要がある水電解装置スタックの技術進歩は早く、性能の向上によって生産効率と再エネ利用率が上がり、今後コストは下がっていくだろう。つまり同じ設置面積でより多くの水素を生産できる新しい水電解装置と取り替えることになり、長い目で見ればアルカリ水電解装置のコストパフォーマンスを超えることができる。

再エネプロジェクトの普及によって、今後オフピークに余剰となる再エネが増えることを考えれば、今の段階で PEM 型水電解技術に投資することは長期的な価値がある。そしてこの戦略的な展望があるからこそ、持続可能な成長と柔軟性を求める先行的なエネルギープロジェクトにおいて PEM 型水電解技術が有利な選択肢であるわけだ。とはいえ、業界の発展スピードは早く、どのような技術が有利になるかは、これからの技術革新とその利用がどれだけ採算性が取れる規模に広げられるかによるだろう。

図 20. 設備投資が低いアルカリ水電解装置が高いマーケットシェアを占め続けるだろうが、PEM 型水電解装置は再エネと直接連携できる地域では普及していくだろう

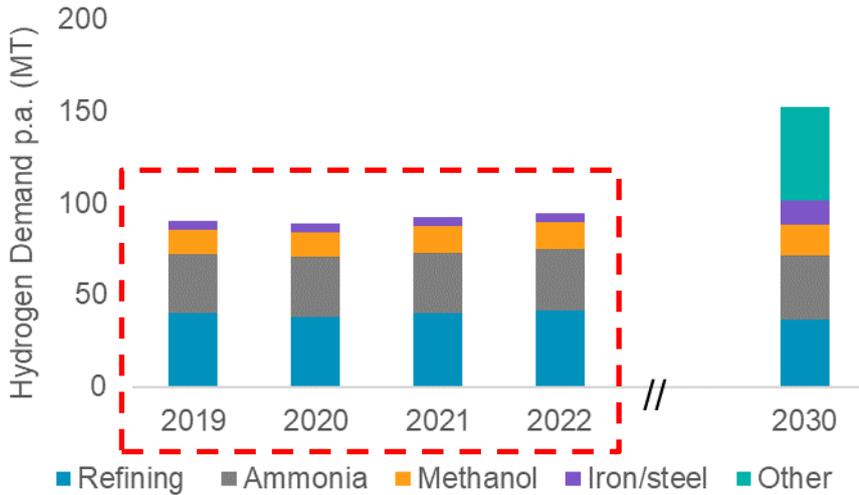


出典: IEA、The orange group、WPIC リサーチ

## 水素は何に使われる？

水素の需要には従来の需要と新しい需要の二通りある。従来の需要とは、化石燃料を使う生産過程の副産物として出来る水素をその場で使う石油化学や肥料生産の水素需要を指し、水素を原料にアンモニアの生産や石油精製を行っている。量にして 9500 万トンというこの水素需要はそのほとんどがグレー水素で、2030 年まであまり増えも減りもしないと予測だ。一方で新しい需要とは、燃料電池自動車や直接還元鉄など新しい分野の水素需要で、今後年間平均 37% 増加するとされる水素需要の実質的な中身だ (図 21)。

図 21. 化学産業、石油化学産業の水素需要は 2019 年以来ほとんど増減がない



出典: IEA

## 従来の水素利用

### 石油精製

水素は、石油の精製過程で反応剤、触媒、水素化処理のキャリアーとして重要な役割を果たしている。水素を用いることで不純物が少なく、効率の良い燃料に精製し規制に準じた、そして市場が求める高品質の石油製品が生産される。石油精製プロセスでの水素の使われ方を以下にまとめた。

**水素化分解:** 水素を触媒として使い、石油系原料を高温高压下で高オクタン価ガソリン、ディーゼル、ジェット燃料などに分解する。

**水素化処理:** 水素化脱硫(HDS)とも言われ、このプロセスで石油製品から硫黄、窒素などの不純物を除去する。

**接触改質:** 直留ナフサから水素を利用してオクタン価の高いガソリンを製造する。

**水素化精製:** 水素を利用してオレフィン、ジオレフィンなど各種の石油留分を精製してパラフィンなどより有益な製品にする。

**異性化:** 酸性触媒を水素加圧化で使い、高オクタン価のガソリン基材を製造する。

## 化学生産

**アンモニア生産**は従来からある水素需要の中で石油精製に次いで需要の多い分野で、農産物生産に必要な肥料生産には欠かせない。主なアンモニア生産方法として高温高压下の触媒上で水素と窒素を反応させるハーバー・ボッシュ法が使われる。

アンモニアはエネルギー媒体あるいは燃料としての将来性が高い物質でもある。水素を輸送する媒体としての利用、燃料電池やエンジンの燃料として利用する研究も進んでいる。

**メタノール** は様々な産業で原料あるいは中間素材として使われるアルコールの一種で、一酸化炭素と水素を触媒（通常は銅-酸化亜鉛）を通して合成する。

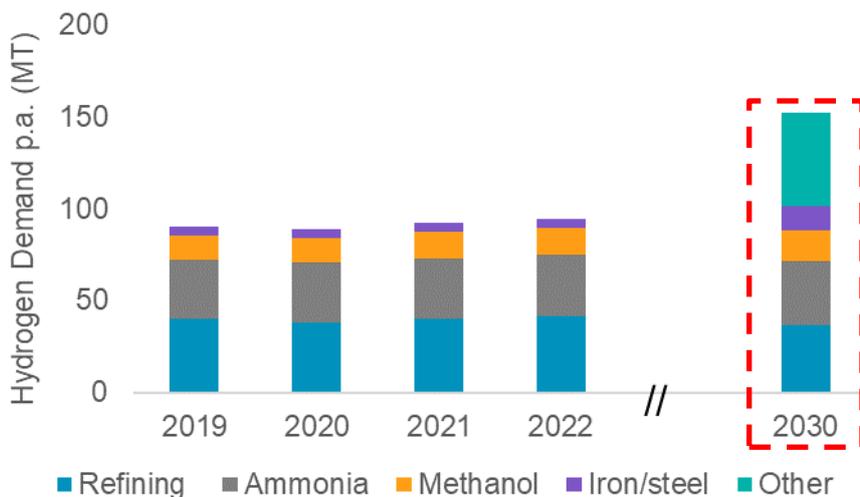
## 脱炭素化のための水素

脱炭素化に果たす水素の役割には二つの面がある。現在グレー水素を使っている産業で、そのグレー水素の代わりにグリーン水素を使って炭素排出量の軽減を図るということが一つ。それとは別に、新たに生み出される水素の需要に低炭素水素を利用することにより、その産業の脱炭素化を推し進めるというのが二つ目だ。

後ほどさらに詳しく述べたいと思うが、今日使われている 9500 万トンのグレー水素をグリーン水素に置き換えれば、4 億 3000 万トンの二酸化炭素、つまり 1 億 2000 万台の車が 1 年間に路上に排出するのに相当する二酸化炭素の量を軽減することができる。

さらに言うと、新たな水素の需要が脱炭素化に役立つためには、二つの条件を満たすことが必要だ。第一にはその生産活動の炭素排出量を軽減すべき必要があるということ。もう一つは水素の利用が既存の方法、あるいは水素以外を利用するよりも経済的に有利で、かつ利用できる規模の拡大が商業化に適していなければならないということだ。水素の新しい利用を量的に査定する方法として「水素の梯子 hydrogen ladder」という考え方がある。

図 22. 燃料電池自動車や合成燃料など新しい需要は年間の水素需要全体を約 50% 押し上げるだろう



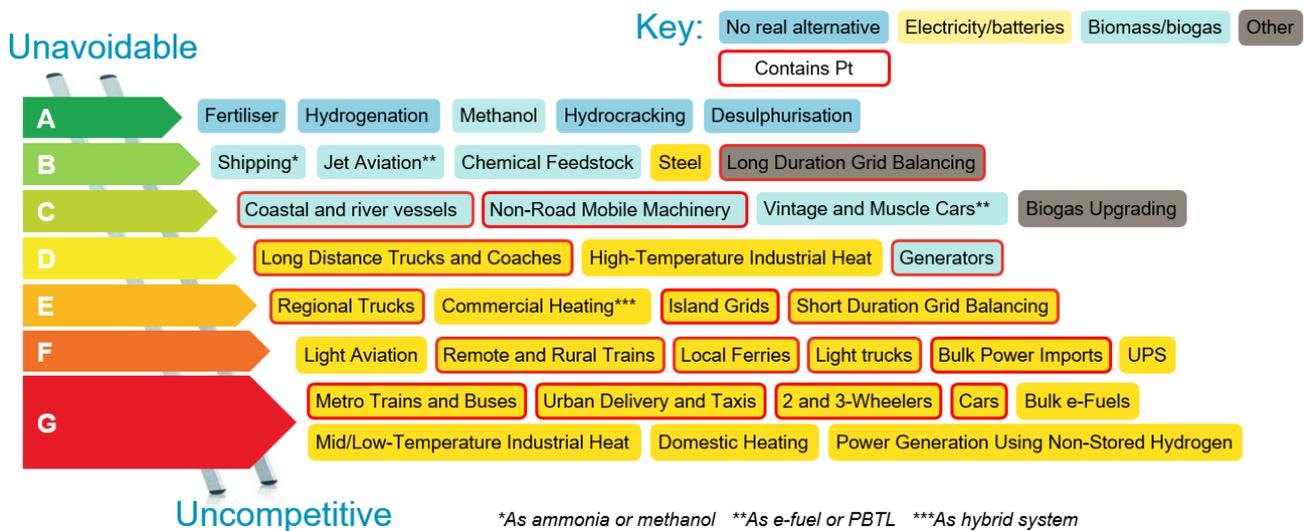
出典: IEA

# 水素の梯子

「水素の梯子」という方法を使うと、水素を脱炭素化の一環として利用することが技術的に意味のある分野どうか明確になる。技術革新や水素以外の技術による脱炭素化の可能性なども考慮した上で、ある分野で水素を利用した場合に 2035 年までにその市場で主流になるかどうか、つまり水素を利用することによるメリットが市場に大きく受け入れられるかどうかという観点からさまざまな利用分野をランク分けすることができる。

下図 23 を見ると、水素利用が必然である分野が一番上(A の緑色)に、水素利用のメリットが少ない分野が一番下(G の赤色)に並ぶ。水素利用が必然であるとは、水素を原料として使わなければならない、あるいは現状では技術的に水素以外に代替がないことを意味する。そして一番下のメリットが少ない分野とは、水素の利用は可能だが現在は水素以外の技術のほうが有利な分野。ここで注意が必要なのは、水素利用が必然である分野の水素需要が増えているということではないことで、水素の需要を予測する作業において、その分野にとって水素は不可欠であるという認識に過ぎない。

図 23. 燃料電池自動車や合成燃料など新しい需要は水素需要全体を約 50% 押し上げるだろう



出典: マイケル・リーブライク/リーブライクアソシエイツ

一番上の (緑色 A) 列は現在、水素以外で代替できないアンモニア生産などの分野だ。現状では消費する水素のほとんど全部が化石燃料から生産されており、世界の温室効果ガスの約 2% を排出している。従ってこの分野の脱炭素化がまず行われなければならない、その際グレー水素からグリーン水素への転換にはプラチナを使う水電解装置が必ず使われるため、プラチナの需要に大きく貢献することになる。

この水素梯子を下に見ていくと、現在水素を使っていないが、脱炭素化の流れの中で水素を利用できる分野になるのが B グループ から G グループで、ここが新たな需要分野。グリーン水素と回収された炭素を使って航空機燃料となる合成燃料の生産や燃料電池自動車などが含まれる。

この新しい需要分野の説明に入る前に、新しい水素需要がプラチナに与える影響について考えてみたい。

### ニッチな水素利用が大きなプラチナ需要を作り出す:

図 23 の中に記された様々な利用分野の中で、赤線で囲まれたものは燃料電池と水電解装置の利用を通じてプラチナの需要に直接貢献する分野だ。これらは見ての通りほとんどが C グループから G グループに属し、ある程度の大きさのマーケットシェアが期待できる分野から、特定地域のニッチな分野まで様々ある。ここは重要な点で、水素経済は社会全体が脱炭素化を目指す中で、数ある技術や手段の一つであり、図 23 にあるように、分野によっては水素ではなく、バッテリーによる電動化の方が有効である場合もある (黄色枠)。

自動車と言えば燃料電池技術はバッテリー電気技術よりもエネルギー効率の点では劣る。そのため水素の利用は、積載量が多く運転頻度が高い車でのみ主流になると考えられる。つまり大きなバッテリーの重量や充電の時間が障害ならば、水素の燃料電池が脱炭素化に有効な手段になると言うことだ。

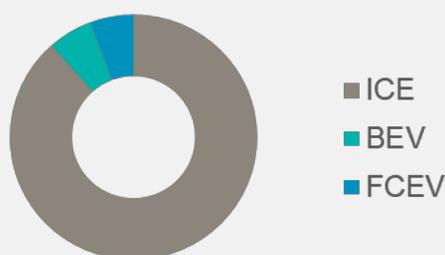
図 24. 燃料電池自動車や合成燃料など新しい需要は水素需要全体を約 50% 押し上げるだろう

Application	Use Case	% Market Share 2030	Koz Pt. 2030
FCEV Cars	Premium SUV/ First mover countries	0.3%	91
FCEV Trucks/Vans	Range extender/ cold storage	1%	42
FCEV Heavy Duty	High utilisation cycles	6%	372

出典: 国際自動車工業連合会、WPIC リサーチ

水電解装置と燃料電池には量としては比較的高い割合でプラチナが含まれるため、これらの技術を利用する分野は、たとえわずかでも成長すればプラチナ需要全体に与える影響が大きい。たとえば、普通乗用車、小型商用車、大型車のセクターで燃料電池自動車が 2030 年までに占めるマーケットシェアはそれぞれ 0.003%、1%、6% になると我々は予測している。決して大きなシェアとは言えないが、この燃料電池需要をプラチナ需要に換算すると、15.6 トン以上になるのだ。(ちなみに 2023 年のエンジン車全体のプラチナ需要は約 93.3 トン。) 2030 年以降も中型から大型トラックの燃料電池車の需要が伸びれば、2040 年までには 10% の半ば台にまでシェアが広がる見込みだ。

図 25. 大型車の燃料電池自動車のマーケットシェアは 2030 年までに 6% を超える



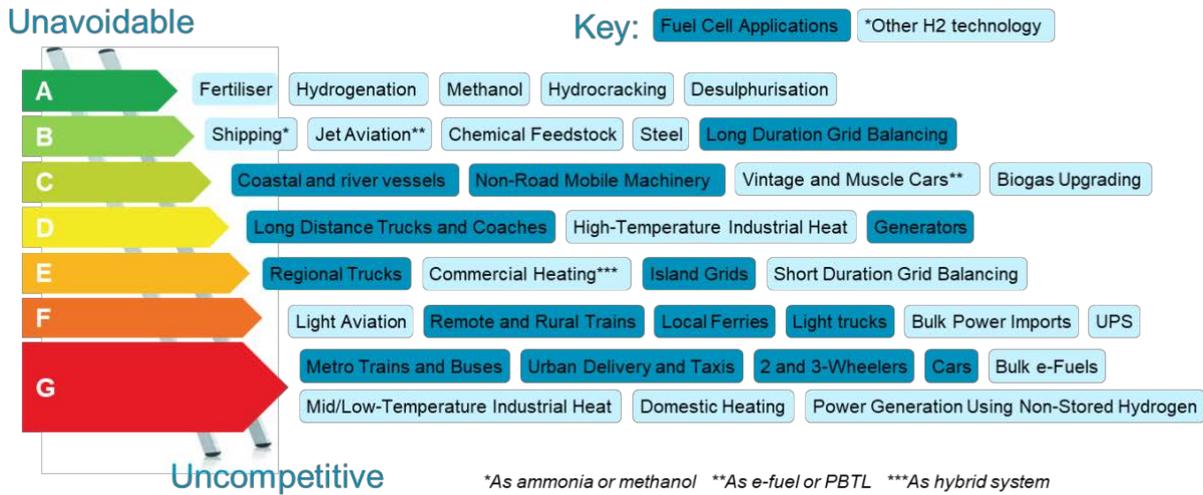
出典: WPIC リサーチ

## 燃料電池

世界各国が炭素排出量削減を目指す中で、燃料電池にはさまざまな利用が期待されている。予備電源であるディーゼル発電機や船舶の補助動力装置の代替として、あるいは一般的なモビリティから運輸まで、燃料電池の用途は多岐にわたる（下図 26 の濃い青色）。

水素を取り入れて酸素との電気的化学反应によって発電を行い、排出するのは熱と水のみという燃料電池技術の研究開発は 100 年も前から行われている。

図 26. 水素の梯子の中には燃料電池技術が有効な分野が多くある（濃い青色）



出典: マイケル・リーブライク/リーブライクアソシエイツ

燃料電池の用途は多岐にわたる（図 27）。ポータブル・モバイル・定置型それぞれのタイプで異なる容量に対応できる様々な種類があり、モバイルタイプの燃料電池の触媒としては、水素と酸素の反応を最適化できるプラチナが優れている。電池内部の化学的に複雑な環境や電力密度の高い環境でも安定性が高く、長期間の使用でも触媒効率が衰えないからだ。

モビリティの分野では、燃料電池自動車だけでなく、鉄道、船舶、重機などのオフロード車両の利用も考えられる。これらの分野ではバッテリー技術と並んで、電動化が困難な用途でも今後燃料電池の利用が大いに進展する可能性がある。

図 27. 燃料電池には色々なタイプがあり、モビリティには PEM 形燃料電池が使われ、その他のタイプの燃料電池は定置型発電機に使われることが多い。

Name	Acronym	Common uses	Industries	Operating Temp °C	Electrical Eff. (%)	Contains platinum?
Proton exchange membrane fuel cell	PEMFC	Portable, mobile	Road transport, Consumer	<120	~55%	<b>Yes</b>
Phosphoric Acid Fuel Cells	PAFC	Stationary	Stationary power	120-150	~40%	<b>Yes</b>
Alkaline Fuel Cell	AFC	Stationary, mobile	Stationary power	<100	~65%	<b>Some</b>
Molten Carbonate Fuel Cell	MCFC	Stationary	Stationary power	600-700	~55%	<b>No</b>
Solid Oxide Fuel Cell	SOFC	Stationary	Stationary power	500-100	~60%	<b>No</b>

出典: WPIC リサーチ

### 燃料電池自動車

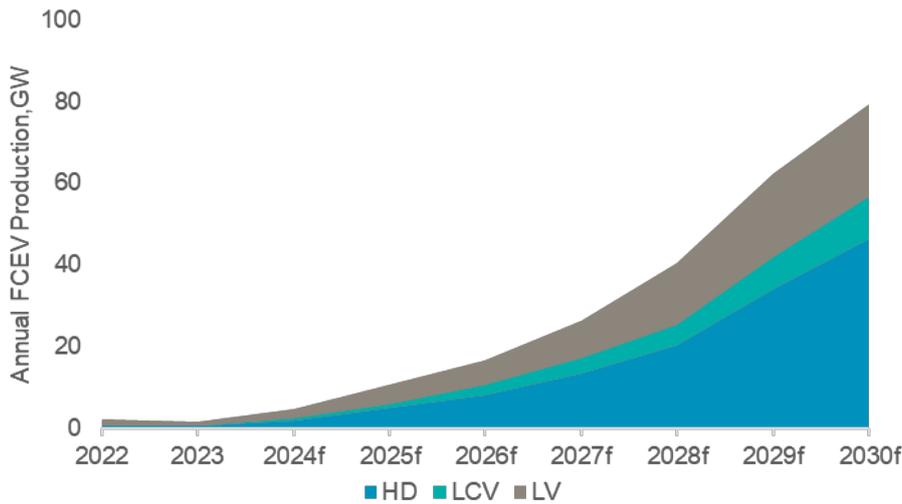
燃料電池自動車 (FCEV) はバッテリー電気自動車 (BEV) とマイルドハイブリッド電気自動車 (MHEV) の両方の特性を持つ。BEV 同様に動力源は単体あるいは複数の電気モーターだが、モーターを動かすのは重いバッテリーではなく燃料電池だ。燃料電池は膜電極接合体 (MEA) からなるセルが複数重なったスタックからできている。MEA にはプラチナが担持された電極、カソード (正極) とアノード (負極) と、それに挟まれた電解質膜があり、水素ガスがアノードでプラチナ触媒と反応して水素イオンと電子に分かれる。電子は外部回路を通して発電した後カソードに流れ、水素イオンは電解質膜を通してカソードで空気中から取り入れられた酸素と結合し水となって排出される。

燃料電池を別とすれば、FCEV に使われている部品やシステムの約 80% は BEV と共通だ。さらに FCEV は MHEV と同様に回生ブレーキからの電力を貯める小型の補助バッテリーを搭載しており、高速運転などで利用できる。しかし FCEV の主たる動力はあくまでも電気モーターで、MHEV のようにエンジンではない。重要なのは、FCEV は充電のために送配電網に繋ぐ必要がないという点で、これは路上充電施設や家庭の充電施設にアクセスがない街中では便利だ。また FCEV の充電時間はエンジン車の燃料補給同様に 3 分から 5 分と速い。航続距離も長くまた車両も軽い。

現在までに FCEV は普通乗用車、小型商用車、大型輸送車向けに開発されており、2022 年末の時点で世界の FCEV 車は約 7 万 2000 台、80% が普通乗用車、1% が小型商用車、19% がトラックやバスだ。FCEV はまだ少ないが、ヒュンデ、トヨタ自動車、ポッシュなど世界の大手企業が投資拡大を決定しており、今後急速に増えるだろう。我々の [hydrogen outlook](#) で発表したボトムアップ分析によるメーカーの生産拡大計画では、200 万台以上の様々なタイプの FCEV が 2030 年までには走り回るようになるだろう。

今後の FCEV 需要の伸び、特に短期間の伸びは主に大型車セクターで起こる見込みだ (図 28)。大型輸送車の排気ガスは温室効果ガスの約 25% を占めており、脱炭素化は必須だ。乗用車のセクターで脱炭素化を進めるには消費者個人の選択を説得するような方法が必要だが、民間企業が多い大型輸送業界では環境問題に関心の高い企業が脱炭素化に沿った効率の良い変化を導入しやすい。

図 28. 自動車の燃料電池需要は大型車が牽引



出典: WPIC リサーチ

商用車は高い稼働率、長距離輸送、かつ大きな積載量に対応できなければならない。脱炭素化に最適な技術を選ぶには FCEV と BEV それぞれ特徴を考慮に入れなければならない。

**大型輸送車:** 大型輸送車の燃料電池システムは同等の出力のあるバッテリーシステムと比べると非常に軽い。米の非営利団体 Clean Air Task Force によると、米国のクラス 8 サイズ(約 8 トン~9 トン)の中型トラックで、BEV 貨物トラックだと、ディーゼル車に比べて積載量が 10% から 20% 程度減るが、FCEV 貨物トラックだとそれは 5% 以下に抑えられる。つまり BEV では大型で重量のあるバッテリーに積載量が犠牲になるが、FCEV ではそれほど影響はない。また FCEV の航続距離は 500 キロから 1000 キロと長く、燃料補給も時間も短い上に送配電網が必要ではないため、僻地で充電が必要な長距離輸送車には非常に有利となる。

**小型商用車:** 燃料電池の利用が増えているのは、冷蔵のために巨大なバッテリーが必要となるような冷蔵車、BEV のバンや小型トラックのレンジエクステンダーとしての小型燃料電池だ。商用車の BEV が重過ぎて牽引できなかったり、航続距離が問題になる場合だと、燃料電池システムの方が便利だろう。ステランティス、フォルシア、ミシュランの三社のジョイントベンチャーである Symbio では、2030 年までに年間 20 万台の小型商用車 FCEV を生産する計画がある。

**普通乗用車:** 現在市販されている FCEV はヒュンデの Nexo とトヨタ自動車のミライの 2 モデルにとどまり、このセクターでは FCEV よりもバッテリー技術の方が受け入れられている。バッテリーの技術開発、政府の補助金、新しい車種の登場などで、BEV のマーケットシェアは 2020 年から 2023 年の間に 4 倍、12% となった。消費者の一部には抵抗も見られるが普通乗用車の分野では BEV が脱炭素化の主な手段と認識されており、FCEV の普及は世界的にもゆっくりとしか進まないだろう。

図 29. BMWiX5 Hydrogen SUV と ヒュンデ Nexo



出典: BMW、ヒュンデ

普通乗用車のセクターでも商用車用の水素補給インフラの発達とともに、将来的にはニッチな需要を満たす FCV が登場することは考えられる。というのは、2016 年を思い出せばわかるように、普通乗用車市場は非常に早く変わることもあるからだ。かつて EU では普通乗用車のディーゼル車のマーケットシェアは 50% を占めていた。しかし、ディーゼルゲート事件が起こると消費者心理が急変し、8 年後の 2023 年には、ディーゼル車のシェアは約 15% に縮小してしまった。その時期に BEV は 1% から約 25% に成長した野田。つまり普通乗用車の FCEV は、今は非常に少数だが、消費者センチメントが大きく変わるかも知れず、水素補給ネットワークの整備が今後進めば、FCEV が増える可能性もあるということだ。とはいえ、その可能性が高いのは普通乗用車でも大型高級車、あるいは自動車産業が発達し燃料電池技術が進んでいる市場に限られるだろう。

- **技術先進国:** ヒュンデの Nexo や、トヨタ自動車のミライなどの登場でもわかる通り、燃料電池の主なメーカーの本社がある国、日本と韓国では普通乗用車の FCEV が徐々に普及するのではないだろうか。それをさらに進めるためには燃料電池技術の優れた点を戦略的に周知することや政府の補助が必要だ。しかし、現在は BEV の方がコスト的にも充電ステーションの普及の点からも有利で、普通乗用車の FCEV は少数派のままで終わるかも知れない。
- **高級車や SUV:** 高級車を手がける BMW やジャガーランドローバーでは大型のプレミアム SUV を開発し、それ専用の生産ラインを組み立てる計画があることを発表している。昨今の半導体不足問題ももたらした業績悪化や納車の遅れなどを含むサプライチェーン問題から、メーカーは将来の生産リスクの軽減に非常に神経質になっているが、FCEV よりも BEV の方がエネルギー転換を進める金属資源に依存する部分が高く（FCEV の依存度は従来のエンジン車と同程度）、BEV に関しては [リチウムの供給不足](#) が顕在化すれば生産ラインが影響を受ける可能性がある。そのためメーカーでは生産ラインを一元化する動きが見られ、BEV と FCEV の両方のモデルの生産ができるようになる可能性もある。

図 30. FCEV の利点と弱点

Application	Pros	Cons
FCEV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Expanding model availability</li> <li>- Ideal for heavy loads</li> <li>- High payload capacity</li> <li>- Extended driving range</li> <li>- Shorter refuelling times</li> <li>- Zer emissions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Highest CAPEX currently</li> <li>- High current cost of hydrogen.</li> <li>- Limited refuelling infrastructure</li> </ul>
BEV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zero tailpipe emission</li> <li>- Highest energy efficiency</li> <li>- Lower operating costs</li> <li>- Mainstream technology.</li> <li>- Extensive model choice</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Higher CAPEX than ICE</li> <li>- High Depreciation.</li> <li>- Reliance on charging infrastructure availability.</li> <li>- Environmental impact of battery production and disposal</li> </ul>
ICE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Extensive refuelling infrastructure</li> <li>- Familiar technology</li> <li>- Long driving range</li> <li>- Short refuelling times</li> <li>- High power and performance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Greenhouse gas emissions and air pollution</li> <li>- Higher operating costs compared to electric</li> </ul>

出典: WPIC リサーチ

### 燃料電池のプラチナの量を左右する要因

エンジン車同様に、FCEV でも車種によってプラチナを使う量は異なっており、それは3つの要素によって決まる。一般的には大型車は普通乗用車の4倍から8倍のプラチナを使い、小型商用車はタイプによる。

1. **定格出力:** 大型車では出力電力をできるだけ大きくするために、燃料電池の MEA の表面面積をより大きくし水素イオンを多く透過させるようにする。大きな MEA のコーティングにはより多くのプラチナが必要だ。従って 180 KW の燃料電池には 90 KW の燃料電池よりも多くのプラチナが使われることになる。
2. **定格寿命:** PEM 形燃料電池の電解質膜は強酸性で、起動停止を繰り返すうちに触媒が劣化する。大きな出力が必要な大型車の燃料電池には、触媒の劣化を補うため KW 毎により多くのプラチナが使われており、連続して使ってもできるだけ電池寿命を伸ばす仕様になっている。
3. **燃料電池利用の目的とドライブトレイン:** これは定格出力の延長にあるが違う場合もある。というのは、大型車は一般的には大きな電力が必要なためプラチナがより多く使われるが、必ずしも常にそうとは限らないからだ。特に小型商用車では燃料電池を使う目的とドライブトレインで燃料電池の大きさが決まる。普通乗用車よりも大きいバンやバスでもドライブトレインはバッテリーで燃料電池をレンジエクステンダーとして搭載するタイプもある。あるいは冷蔵車のように電力を多く使う場合は、車体の大きさに比べて非常に大きい燃料電池を必要とするものもある。

FCEV のプラチナ需要は 2030 年までに水素関連のプラチナ需要の 55% (15.7 トン) を占める見込みだ。より多くプラチナを使う大型車の FCEV の伸びは、普通乗用車や小型商用車の FCEV のそれよりも、プラチナの需要の増加に与

える影響はより大きく、我々の予測では FCEV 需要の 75% は大型車になるだろう。

### オフロード FCEV (鉄道、船舶、重機)

大型輸送車がいち早く燃料電池をドライブトレインに利用するように変わってきているのと同様に、積載量が多く過酷な運転状況に対応しなければならない分野でも、BEV だと様々な問題があるため、FCEV が有望視されてきている。今後鉄道、船舶、オフロード運転などでは FCEV の利用が進むだろう。カナダの燃料電池メーカー大手巴拉ードはすでにメガワット規模の燃料電池システムをこのような分野に数多く提供している。

図 31. 大きな電力が必要な貨物輸送や土木工事に FCEV は利用できる



出典: カナダ太平洋鉄道、アングロアメリカン

**鉄道:** 燃料電池で走る列車は、ディーゼル機関車の代替として温室効果ガスの軽減と地域の空気汚染防止に貢献できるとの期待が高い。バッテリーで走る列車よりも航続距離が長く、まだ電動化されていない路線や、コスト面で電動化が困難な長距離貨物路線などで活用できる。従来のディーゼル機関車と同じく短時間で燃料補給ができることから、カナダやオーストラリアなど広大な土地を走る貨物線で導入する計画がある。我々は燃料電池列車によるプラチナ需要が 2030 年までに 0.2 トンになると予測している。

**船舶:** 水素には、船舶の新たな燃料として、特に補助動力装置あるいは主要推進力として非常に大きな期待が持たれている。ディーゼル発電機の代わりに補助動力装置として燃料電池を用いれば、照明、暖房、補助機械の動力源としても使え、港湾の排ガス、停止中の排ガスの軽減に役立つ。また燃料電池は船舶の主要推進システムとしても単独、あるいはバッテリーと組み合わせることもでき、ゼロエミッション航海が実現できる。燃料電池船舶のプラチナ需要は 2030 年までに 0.7 トンになると予測している。

**オフロード:** 燃料電池は建設現場、鉱山、耕作機などでも動力源として十分活用できる。燃料電池のトルクと出力は、重量のあるものの運搬、鉱石の採取、耕作作業など条件の厳しいオフロード運転に対応でき、かつ温室効果ガスも軽減しながら、重要セクターの持続可能な活動を可能にする。アングロアメリカンと豪フォーテスキューはすでに燃料電池トラックを鉱山の現場に導入している(上図 31)。我々は燃料電池によるオフロード車のプラチナ需要は 2030 年までに 0.9 トンになると予測している。

### 定置型燃料電池

分散型発電、予備用発電、送配電網の安定化に定置型燃料電池を使うことで、化石燃料への依存を減らして脱炭素化に貢献できる。

**マイクログリッドと予備電源としての利用:** 送配電網に繋がった状態で、あるいは独立した状態で重要なインフラで電力が途切れないよう安定的に電力を供給できる。

**住宅地及び商業用での利用:** 住宅、オフィス、商業施設などに独立したシステムとして、あるいは送配電網の中で熱電併給 (CHP) システムとともに電力供給を行う。

**遠隔地やオフグリッド地域での利用:** 送配電網へのアクセスが限られている孤島や遠隔地への電力供給は困難を伴うが、持続可能で安定的な電力供給の方法として「水素の島 (hydrogen island)」という考え方が登場している。オフピーク時に再エネによる発電で水電解装置を動かし、得られた水素を貯蔵しておき予備燃料として使うというものだ。孤島や遠隔地に持続可能な方法によって安定的に電力を供給できる燃料貯蔵施設を設置することで、この「水素の島」では エネルギーが不足する時にも独自に対応できるようになる。

**工業利用:** 生産過程に使う熱源や電源を様々な工業分野に供給することにより効率を上げながらも炭素排出量の軽減を可能にする。

## 直接還元鉄 (DRI) – 「グリーンスチール」

世界の鉄鋼業の炭素排出量は地球全体の排出量の 10% とされている。従来の主な製鉄方法は鉄鉱石とコークス（石炭を蒸し焼きにして炭素部分だけを残したものを）を原料に高炉で鉄鉱石を溶解する高炉法。ヘマタイト ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) とマグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) からなる酸化鉄である鉄鉱石から鉄を作り出す還元の過程で、コークス中の炭素は酸素に結びついて鉄鉱石から酸素を引き剥がす役目を果たすが、その過程で二酸化炭素が排出される。

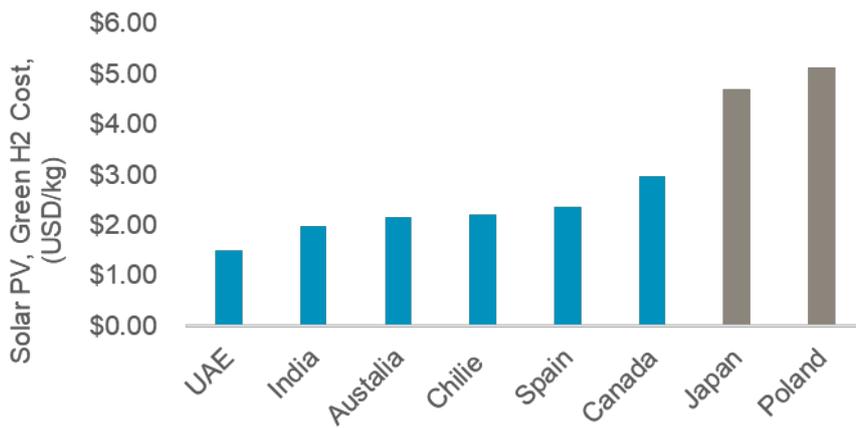
一方、直接還元鉄 (DRI) はコークスではなくグリーン水素を還元剤として使う。鉄鉱石を溶かさずに固体のままシャフト炉の中で低炭素水素を使って還元したあと、電炉 (再エネが動力源の場合もある) に移して溶解し製鉄にする。従来の方法と比べて大幅に炭素排出量が少ない。

再エネを製鉄所の動力源とし、水電解装置によるグリーン水素を使うことによって、鉄鋼業もカーボンニュートラルな産業に代わることができるというわけだ。既にスウェーデン最大の鉄鋼メーカー LKAB は 2050 年までにカーボンニュートラルになると宣言している。

## グリーンスチールの価格競争力

現在グリーンスチールは高炉法による鉄鋼よりもコスト高だが、炭素税が導入され、さらに水素コストが下がれば状況は変わるだろう。コンサルティング会社マッキンゼーによると、グリーンスチールは条件が揃えば採算が取れるという。炭素価格 60 ユーロ/ トンの場合、採算が取れる水素の生産コストは 1.2 ユーロ/キロ、炭素価格 90 ユーロ/ トンであれば、2.0 ユーロ/キロとなる。ちなみに現在の欧州の炭素価格は 61 ユーロ/トンで、過去最高は 82 ユーロ/トンだった。現在、水素は価格競争が存在する生産地では 2.0 ドル/キロ (約 1.85 ユーロ/キロ) 以下に抑えることが可能だが (図 32)、これには中間コスト (圧縮、液化、輸送) と投資家へのリターンは計算に入っていない。2022 年の米国内の中間コストは約 3 ドル/キロと推測されるが、2030 年までに補助金で水素コストが低下すれば、グリーンスチールの生産が可能になるだろう。スウェーデンの HYBRIT グリーンスチール工場は 2026 年までに化石燃料を使わないグリーンスチールを生産し、市場に出す計画だ。

図 32. 生産地における均等化水素コストと太陽光発電コストの比較



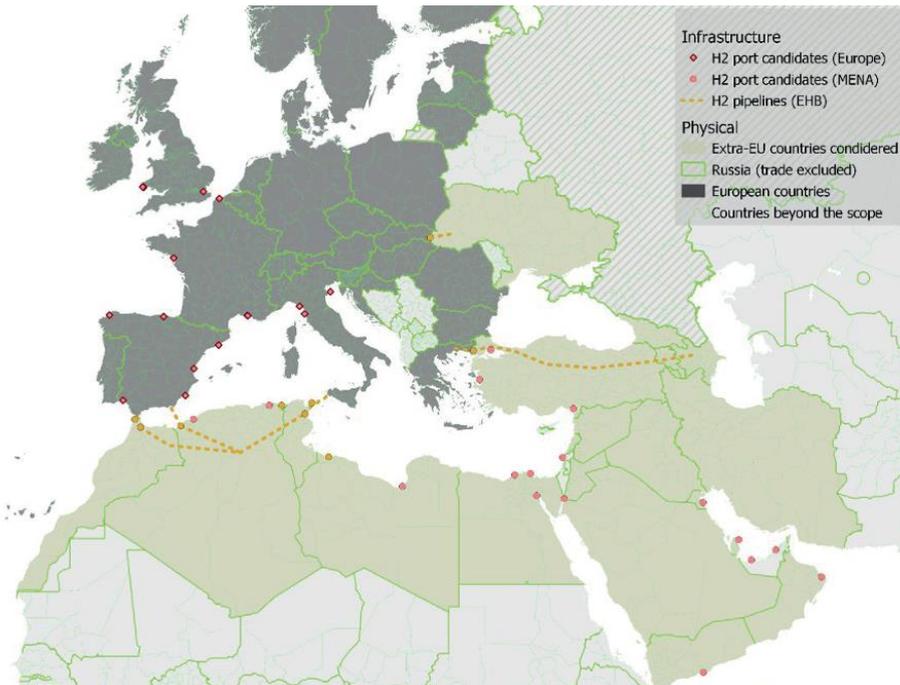
出典: IEA、WPIC リサーチ

## 水素の輸送とサポートインフラ

今日生産されている水素のほとんどは、生産された化学プラントの外に出ることなく、その場で化学製品や石油精製に使われている。しかし水素をエネルギーキャリアとして利用するには、水素経済のあらゆる分野に水素を輸送する必要がある。現在の水素輸送は量、距離ともに限られており、冷却、圧縮などした水素をトラックで輸送しているが、水素経済の発展のためには水素を効果的に世界中に輸送する手段が必要となる。

再エネを使う水素生産で最もコストがかかる部分は電力だが、太陽光や風力が豊富な地域ならば再エネ電力のコストは抑えられる。しかし水素経済の上流で生産された安価な水素が利用されるのは、陸上や海上輸送を経なければならぬ下流だ。輸送にはパイプライン、船舶、あるいはその両方が使われている。Hydrogen4EU による下図 33 は、輸送システムを使って欧州の「水素バックボーン」をどう構成できるかを示している。「水素バックボーン」とは水素の国際的な取引を行うために提案されたネットワークで、港湾とパイプラインを組み合わせ、北アフリカと中東で安価な再エネを利用して水素を生産し、欧州のマーケットに輸送することを目的としている。

図 33. 「水素バックボーン」は、水素の国際的な取引を行うために提案された港湾とパイプラインのネットワークで、北アフリカと中東の安価な再エネを利用して水素を生産し、欧州のマーケットに輸送することが目的



出典: Hydorgen4EU

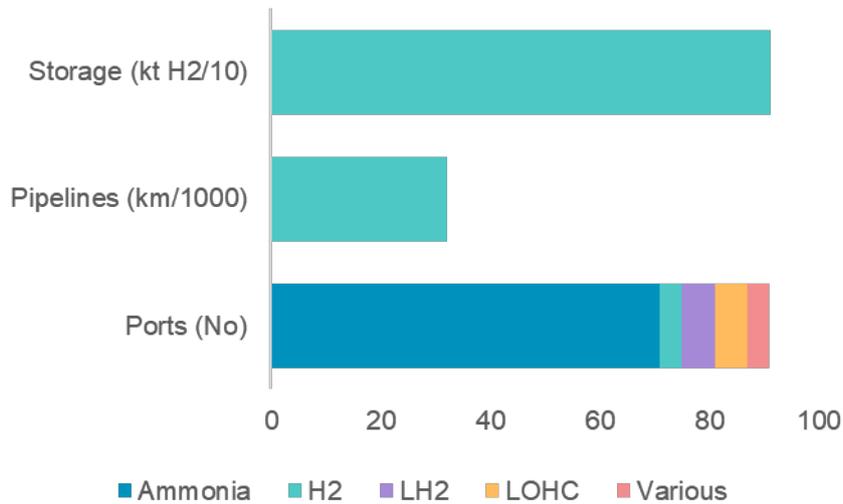
水素ガスは、高い重量エネルギー密度を持つが体積エネルギー密度は非常に小さい。体積に制限される船舶輸送だと水素の輸送はコスト効率が悪いことになるが、幸いにも水素は様々な形に変換できるため、それを利用して輸送すれば経済性を高めることができる。

**水素パイプライン:** 水素をガスのままパイプラインを使って効率的に輸送する方法として3万キロの水素パイプラインの建設計画が発表されている(図 34)。しかしガス専用のパイプライン建設には莫大な投資を要するため、水素パイプラインとしては、主に既存のガスパイプラインを利用しながら新しいパイプラインを加えていく方法が取られるだろう。パイプラインを結ぶ地域は設置コストを考えると主に近距離に限られ、アフリカから欧州にまたがるような長距離ルートは限定されるだろう。

**水素の海上輸送:** パイプライン輸送の欠点を補うには既存の港湾をつなぐ海上輸送が有効だが、体積エネルギー密度の低い水素ガスを効率的に輸送するには水素ガスを変換する必要がある。圧縮、液化、他の物質に変換するなどの選択肢があり、重量エネルギー密度の高い水素を変換した上で輸送すれば輸送効率が高まる。水素キャリアとしてアンモニア、液体有機水素キャリア(LOHC)、メタノール、合成燃料などが知られており、安全に輸送するための技術やインフラも発達している。IEAは、2030年までにアンモニアによる水素輸送が最も多くなるとしている(図 34)。

水素を液体で貯蔵するには極低温に冷やし高圧をかける必要があるが、アンモニアはわずかな加圧で液体化でき常温のまま輸送できる。従って水素をアンモニアに変換した貯蔵や輸送は、水素のままで行うよりも効率的だ。さらにアンモニアの生産、貯蔵、輸送のためのインフラは、農業や化学産業で既に確立されており、新たな投資の必要なくしてそれらを利用することができる。

図 34. パイプラインとアンモニアが水素輸送インフラ計画の大半を占める



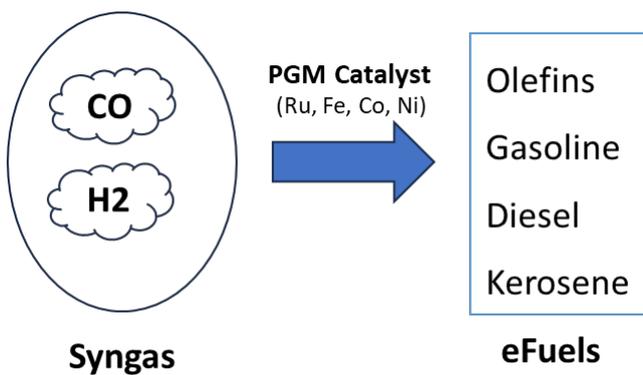
出典: IEA

低炭素あるいは炭素中立燃料である合成燃料は回収された一酸化炭素と水電解による水素から生産される。フィッシャー・トロプスプロセスを使い、触媒には PGM が使われる。

合成ケロシンや合成ディーゼルなどの合成燃料は、車や航空機のエンジンに利用できる。バッテリーや燃料電池は重量の問題があるが、合成燃料は SAF (持続可能なジェット燃料) とともに航空産業の脱炭素化を進める有効な手段だ。SAF はバイオマス、廃油、農業廃棄物などから作られる。

国際クリーン交通委員会によると、EU 圏で合成ケロシンを生産するにはジェット燃料の約 3 倍のコストがかかるが、2050 年までには 1.5 倍にまで下がる見込みだ。炭素排出量の多い燃料を使う航空業界に炭素税が導入されれば、さらなるコスト削減が可能だろう。

図35. 合成燃料の生産過程には PGM 触媒が使われている



出典: WPIC リサーチ

## 結論

脱炭素化の必要性はかつてないほど高まっており、我々が使えるあらゆる手段を使って炭素排出量を減らしていかなければならない。多くの場合それらの手段は二者択一ではなく、複数を有効に組み合わせて実行できる。各国政府の水素プロジェクトに対する援助が 3000 億ドル以上にもなっている今、問題は水素経済が実現するのかどうかではなく、いつ実現し、どういう早さで発展していくのか、そしてそれが水素利用が生み出すプラチナ需要にどう影響するかということになるだろう。

今日、水素経済の実現をもたらす技術は数多くあるが、利用を広げていくには技術革新を通じて経済性、採算性を高めていかなければならない。水素利用、プラチナを使う水電解装置や燃料電池の普及を進めるには価格競争によって価格を下げながら、炭素税なども組み合わせることが必然だ。

今後も状況の変化を見ながら我々の定期的なレポートで水素関連のプラチナ需要予測を提供していくが、今の時点では水電解装置と燃料電池大型輸送車が初期の水素関連プラチナ需要を支え、その後は 2020 年代後半と 2030 年代にかけて広い分野で進む燃料電池利用がプラチナ需要の大半を占めるようになるだろう。

### プラチナ投資拡大を目指す WPIC

ワールド・プラチナ・インベストメント・カウンシル (WPIC) は、具体的な見識の提供と目標を定めたプラチナ投資を促進することを目的として、2014 年に南アフリカの大手 PGM 鉱山会社各社によって設立された。我々は投資家に正確な判断材料となる情報として『[プラチナ四半期レポート](#)』、月刊『[プラチナ展望](#)』、及び『[プラチナ投資のエッセンス](#)』を提供している。また投資家、生産者、経路、地理など全ての面からプラチナ投資のバリューチェーンを分析し、市場の効率を上げ、あらゆるタイプの投資家のために、投資に見合った商品を提供できるようパートナー各社とともに努力を重ねている。

WPIC は投資アドバイスを提供する法的資格はない。詳細は[免責事項](#)を参照。

**免責事項:** 当出版物は一般的なもので、唯一の目的は知識を提供することである。当出版物の発行者、ワールド・プラチナ・インベストメント・カウンシルは、世界の主要なプラチナ生産会社によってプラチナ投資需要発展のために設立されたものである。その使命は、それによって行動を起こすことができるような見識と投資家向けの商品開発を通じて現物プラチナに対する投資需要を喚起すること、プラチナ投資家の判断材料となりうる信頼性の高い情報を提供すること、そして金融機関と市場参加者らと協力して投資家が必要とする商品や情報ルートを提供することである。

当出版物は有価証券の売買を提案または勧誘するものではなく、またそのような提案または勧誘とみなされるべきものでもない。当出版物によって、出版者はそれが明示されているか示唆されているかにかかわらず、有価証券あるいは商品取引の注文を発注、手配、助言、仲介、奨励する意図はない。当出版物は税務、法務、投資に関する助言を提案する意図はなく、当出版物のいかなる部分も投資商品及び有価証券の購入及び売却、投資戦略あるいは取引を推薦するものとみなされるべきでない。発行者はブローカー・ディーラーでも、また 2000 年金融サービス市場法、Senior Managers and Certifications Regime 及び金融行動監視機構を含むアメリカ合衆国及びイギリス連邦の法律に登録された投資アドバイザーでもなく、及びそのようなものと称していることもない。

当出版物は特定の投資家を対象とした、あるいは特定の投資家のための専有的な投資アドバイスではなく、またそのようなものとみなされるべきではない。どのような投資も専門の投資アドバイザーに助言を求めた上でなされるべきである。いかなる投資、投資戦略、あるいは関連した取引もそれが適切であるかどうかの判断は個人の投資目的、経済的環境、及びリスク許容度に基づいて個々人の責任でなされるべきである。具体的ビジネス、法務、税務上の状況に関してはビジネス、法務、税務及び会計アドバイザーに助言を求めるべきである。

当出版物は信頼できる情報に基づいているが、出版者が情報の正確性及び完全性を保証するものではない。当出版物は業界の継続的な成長予測に関する供述を含む、将来の予測に言及している。出版者は当出版物に含まれる、過去の情報以外の全ての予測は、実際の結果に影響を与えるリスクと不確定要素を伴うことを認識しているが、出版者は、当出版物の情報に起因して生じるいかなる損失あるいは損害に関して、一切の責任を負わないものとする。ワールド・プラチナ・インベストメント・カウンシルのロゴ、商標、及びトレードマークは全てワールド・プラチナ・インベストメント・カウンシルに帰属する。当出版物に掲載されているその他の商標はそれぞれの商標登録者に帰属する。発行者は明記されていない限り商標登録者とは一切提携、連結、関連しておらず、また明記されていない限り商標登録者から支援や承認を受けていることはなく、また商標登録者によって設立されたものではない発行者によって非当事者商標に対するいかなる権利の請求も行われぬ。

#### WPIC のリサーチと第 2 次金融商品市場指令 (MiFID II)

ワールド・プラチナ・インベストメント・カウンシル(以下 WPIC) は第 2 次金融商品市場指令に対応するために出版物と提供するサービスに関して内部及び外部による再調査を行った。その結果として、我々のリサーチサービスの利用者とそのコンプライアンス部及び法務部に対して以下の報告を行う。

WPIC のリサーチは明確に Minor Non-Monetary Benefit Category に分類され、全ての資産運用マネジャーに、引き続き無料で提供することができる。また WPIC リサーチは全ての投資組織で共有することができる。

1. WPIC はいかなる金融商品取引も行わない。WPIC はマーケットメイク取引、セールストレード、トレーディング、有価証券に関わるディーリングを一切行わない。(勧誘することもない。)
2. WPIC 出版物の内容は様々な手段を通じてあらゆる個人・団体に広く配布される。したがって第 2 次金融商品市場指令 (欧州証券市場監督機構・金融行動監視機構・金融市場庁) において、Minor Non-Monetary Benefit Category に分類される。WPIC のリサーチは WPIC のウェブサイトより無料で取得することができる。WPIC のリサーチを掲載する環境へのアクセスにはいかなる承認取得も必要ない。
3. WPIC は、我々のリサーチサービスの利用者からいかなる金銭的報酬も受けることはなく、要求することもない。WPIC は機関投資家に対して、我々の無償のコンテンツを使うことに対していかなる金銭的報酬をも要求しないことを明確にしている。

さらに詳細な情報は WPIC のウェブサイトを参照。

<http://www.platinuminvestment.com/investment-research/mifid-ii>

当和訳は英語原文を翻訳したもので、和訳はあくまでも便宜的なものとして提供されている。英語原文と和訳に矛盾がある場合、英語原文が優先する。