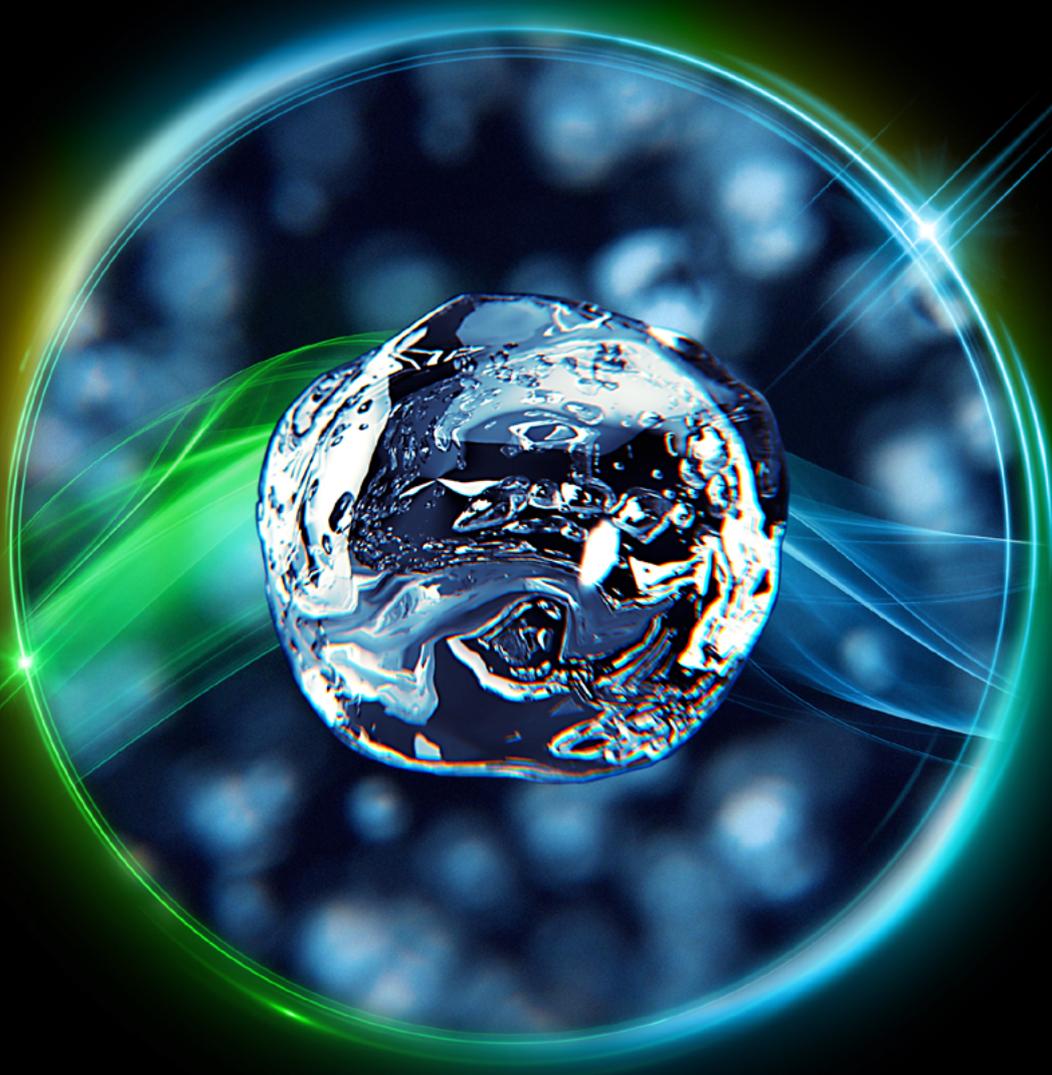


Deloitte.

デロイトトーマツ



水素

実現に向けて

エグゼクティブ・サマリー

カーボンニュートラルの実現は世界の喫緊の課題となっています。国連気候変動枠組条約（UNFCCC）第27回締約国会議（COP27）では、パリ協定の目標達成に向けた努力を更に追求し、誓約から実際に行動に移すことが求められました。現在の国際情勢では、カーボンニュートラルに向けた対策や排出削減への意欲的な取組が世界的な優先事項となっています。

クリーン水素は、今後のエネルギーシステム—特に短期的・物理的に電化が難しいhard-to-abateと呼ばれる部門—のカーボンニュートラル化に、重要な役割を果たしていく可能性が高いでしょう。2030年までに、メタノール製造、石油精製、航空および道路貨物輸送等の部門で利用が見込まれ、その後、船舶等の部門にも拡大することが期待されています¹。デロイトの分析では、クリーン水素プロジェクトの公表ペースは加速しているものの、その多くは実現するかどうか不透明であり、また、公表されているプロジェクトが仮に全て実現したとしても、IEAの「2050年までのネットゼロ・エミッション」（NZE）シナリオで概要が示されている需要を十分には満たせません。実際のところ、NZEシナリオ通りに進めるためには、2030年までに、これまでに公表されている供給能力の3倍の能力が必要になるとみられています。

本レポートは、クリーン水素の大規模な導入を推進するため、また、喫緊の課題である排出削減目標を達成するために現在必要な**現実的な対策**について詳述します。

- **自発的な需要**：新しいグリーンバリューチェーンやオフテイカーの集約を通じ、自発的な需要（特定の部門に対する規制および政策的支援が無くとも発生する需要）を喚起させることが市場に確固たる需要が生まれたという明確なシグナルになります。更に、規制および政策的支援によって発生する需要を喚起させるためや供給部門への投資を促進させるためにも重要です。
- **規制および政策的支援**：水素の排出原単位に関する新しい概念や認証（水素排出原単位指数等）に基づいて、シンプルかつ需要・供給双方に整合のとれた規制および政策的支援を導入し、一方で迅速に許可できるような仕組みを整えることにより、水素の導入と排出量の削減を促進することができます。

- **テクノロジー**：カーボンニュートラル技術の採用で各社が足並みを揃え、技術を速やかに成熟させることが、クリーン水素に対する需要形成にかかわるスピード向上の決め手となります。供給側は、大規模な需要と短期のサプライチェーン構築の制約の間で迅速に需給バランスを取るため、生産拡大に向けた「大きく考え、小さく始め、一気に拡大する」アプローチが必要です。

- **設備・インフラ・供給**：需要側は、可能な場合は既存インフラの再利用との組み合わせにより設備更新サイクルを早めることが必要です。供給側は、再生可能エネルギー電源やグリッド、関連インフラへの大型投資が必要です。

- **コラボレーション**：投資を遅らせる可能性のある体制上の問題や、組織の変革への抵抗感を払拭できる新しい商業モデルおよび事業モデルを適用したコラボレーションが、クリーン水素の製造には不可欠です。

これらの対策（[図表1](#)）はハブ、つまり次の4つを結びつける地理的なエリアを形成することによって、一つにまとめることができます。

- 水素製造に十分な量で、低コストの資源
- 大規模なオフテイカー集団
- 適切な規制および政策的支援
- 規模の経済とインフラの集約を通じ、水素コストの削減に資する、供給側の積極的な意欲

ハブは水素経済に弾みをつけ、世界のエネルギー市場の脆弱性を軽減します。

はじめに

カーボンニュートラルに向けた対策や排出削減への意欲的な取組は、現在の世界的な優先事項となっています。電化を除く、カーボンニュートラル化の数少ない選択肢の1つとして、水素は排出削減において重要な役割を果たし、その需要は高まるでしょう。また、水素が関連する事業活動や雇用を刺激するとみられ、例えば欧州連合（EU）の予測では、2030年までに10億ユーロの投資に対して（直接雇用および間接雇用を含め）約10,000の雇用が創出される見込みです²。しかし、水素開発を速やかに進める方法については明確ではありません。

この2年間で、クリーン水素（再生可能エネルギーによる電力+電気分解、化石燃料+二酸化炭素の回収・貯留等を利用してCO₂排出量がゼロかそれに近くなる方法で製造された水素）の話題に大きな注目が集まり、業界イベント、研究、実験、パイロットテスト等が行われています。また最近、目に見える形で確実に収益の上がる水素開発への投資に更に注目が集まっています。こうした水素にかかわる話題への関心の高まりが、より投資家の興味を惹き、新規水素プロジェクトの公表が相次いでいます。

「COP27のテーマは『実施のための協力』—これは水素においても同じように私たちに必要なものです。水素の導入と利用を推進するために、私たちは協力して取組む必要があります。」— 航空業界幹部

多くの場合、クリーン水素プロジェクトを経済的に成り立つようにするには、政府の多大な支援を必要とするため、最終投資決定（FID）を通過することはめったにありません。世界の気候目標を達成するには、水素を大規模かつ迅速に導入できる、現実的な方法を探ることが急務です。

「水素市場を形成するための規制および政策的支援をただ待つことはできません。需要、インフラ、イノベーション、新しい事業モデル等、他の条件も重要です。」

— 港湾関係幹部

本レポートは、クリーン水素の導入ポテンシャル、供給の動向について評価した上で、水素の生産と需要を大規模に拡大させる5つの主たる要因（自発的な需要、規制および政策的支援、テクノロジー、設備・インフラ・供給、コラボレーション）と対策から成るフレームワークについて深堀りします（**図表1**）。

最後に、水素の導入を促進するために、これら5つの要因が「低炭素ハブ」でどのように結びつけられるかをまとめます。

図表1. 水素の生産と需要を大規模に拡大させる要因と対策

		対策
要因	自発的な需要	<ul style="list-style-type: none"> 集約による自発的な需要の喚起 新しいグリーンバリュープロポジション 「ブックアンドクレーム」方式¹
	規制および政策的支援	<ul style="list-style-type: none"> 新しい概念「水素排出原単位指数（HEII）」 シンプルかつ需要・供給双方に整合のとれた規制および政策的支援 迅速な許可
	テクノロジー	<ul style="list-style-type: none"> 需要側の的を絞った取組：研究開発を通じた技術の成熟とカーボンニュートラル実現への道筋における協調 生産拡大に向けた「大きく考え、小さく始め、一気に拡大する」アプローチとサプライチェーンの拡大
	設備・インフラ・供給	<ul style="list-style-type: none"> 設備の再利用と設備更新サイクルの短縮 インフラ開発の重視 供給主導によるハブ
	コラボレーション	<ul style="list-style-type: none"> 新しい商業モデルと事業モデル 人材重視 グリーンファイナンス

注：デロイトは、民間部門、公共部門のCEO、幹部、リーダー等350名以上にインタビューを行い、クリーン水素の需要と生産、流通をつなげることで市場の動きを促進させる方法について知見を得た。本レポートでは、今後短期間で水素の大規模な導入を推進するために現在必要とされるものを特定することを目指す。別段の指示がない限り、本レポートで「デロイト」はデロイト オランダ、デロイト グローバル、デロイト コンサルティング LLP を指す
1) カーボンニュートラル価値をクレジット化し、非カーボンニュートラル水素に付帯させることで、カーボンニュートラル水素とみなせる方式

出所：デロイト分析

1 現在の展望

1.1 クリーン水素の導入ポテンシャル

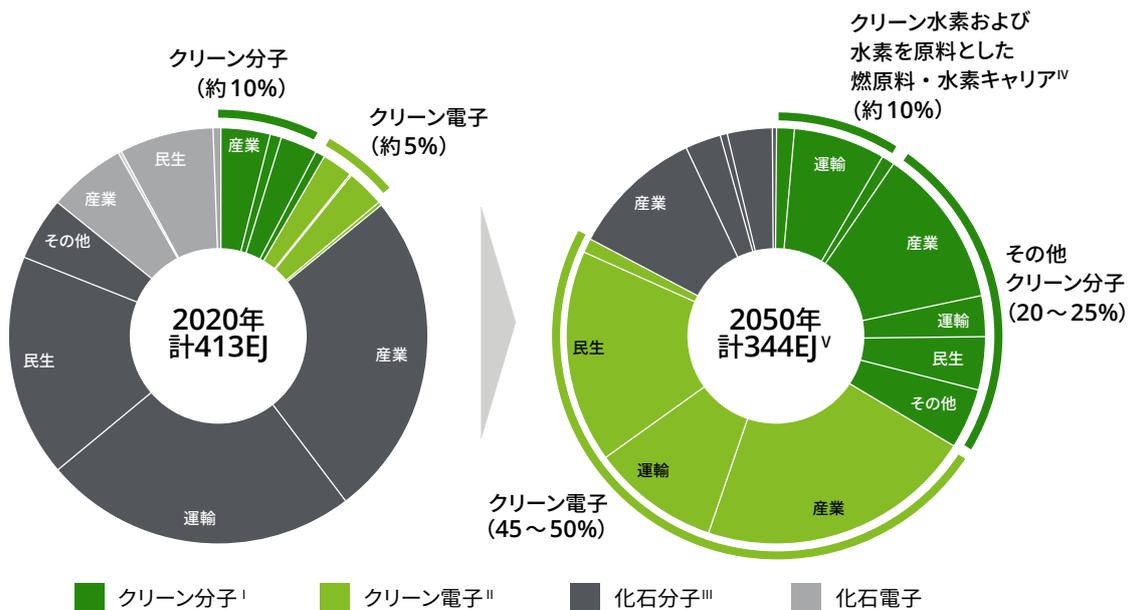
クリーン水素は、今後のエネルギーシステム—特に排出削減が困難な (hard-to-abate) 部門—のカーボンニュートラル化に重要な役割を果たしていくと見込まれます。2030年までに、メタノール製造、石油精製、航空および道路貨物輸送等の部門で利用され、その後、船舶等の部門にも拡大することが期待されています。

世界のエネルギーシステムは2020年³⁾、産業（化学、鉄鋼等）、運輸（乗用車、船舶、航空、道路貨物輸送）、民生の各部門にわたって、主に化石分子から約410エクサジュール (EJ) のエネルギーを消費しています。

電化はカーボンニュートラル化において重要な役割を果たしていますが、分子ベースのエネルギーキャリアは2050年⁴⁾までに全エネルギー消費量の約30%~35%を占めると考えられます。このうち、水素は分子エネルギーキャリアの35%を占めると予想され、この値は全エネルギー消費量の約10%、約35EJとなります⁵⁾ (図表2)。

分子エネルギーキャリアは、排出削減が困難な (hard-to-abate) 部門のカーボンニュートラル化で特に価値を発揮します。なぜなら、高温のプロセスで利用でき、原材料や還元剤として工業プロセスに供給できるからです。また、バッテリーと比較してエネルギー密度が高い、大型車両への燃料として供給でき、再生可能エネルギーで発電した電力を貯蔵することもできます。

図表2. 世界の最終エネルギー消費量 2020年と2050年 (IEA「2050年までのネットゼロ・エミッション」シナリオ) の比較



注：燃料として利用されるエネルギーキャリア、および工業で利用する原材料（石油化学製品用ナフサ、アンモニア製造用天然ガス等）を含む I) 水素、バイオ燃料、熱、およびCCUSを利用した化石燃料を含む II) 再生可能エネルギー、CCUSを利用した天然ガス、CCUSを利用した石炭による発電を含む III) 2050年にも残存する化石分子は、プラスチック等の炭素が製品に含まれているところで利用されるもの、および、低炭素技術の選択肢が乏しい部門（主に工業用油）で利用されているもの IV) アンモニア、メタノール、持続可能な航空燃料 (SAF) 等を含む V) エネルギー効率の改善と電化は、最終エネルギー消費量の削減に貢献する2つの主要な要因であるが、行動変容や材料効率の改善も大きな役割を果たす。これらの改善がなければ、2050年の最終エネルギー消費量は約640EJになると予想されている

出所：IEA「世界エネルギー見通し2022」、IEA「2050年までのネットゼロ」、デロイト分析

クリーン水素の具体的な導入ポテンシャルや時期は、各部門の個別の要因に起因するため、部門によって異なります（図表3）。例えば、化学部門ではグレー水素が既に利用されています。クリーン水素を利用したアンモニアやメタノールの製造では、設備の変更がほぼ不要なため、必要な投資が限定的です。同様に、石油精製部門でも既にグレー水素を利用しているため、クリーン水素への切り替えに必要なプロセスの変更が比較的少ないとみられます。また、新たな規制および政策的支援では、2030年までにこれらの部門や航空・道路貨物輸送の部門が水素を採用することを推進しています。

自発的な需要一すなわち、規制および政策的支援によるものでなく、グリーン製品を求める顧客からの要請によって決定される需要一は、鉄鋼（特に平鋼^{III}）等の部門での水素の早期採用に重要な役割を果たす可能性があります。大規模な採用は2030年以降になる見込みです。

船舶部門では、技術は成熟しておらず、カーボンニュートラル実現への道筋も不透明です（第2.3章 [テクノロジー](#)を参照）。したがって、水素の需要は2030年以降に上向くと考えられます。最後に、乗用車や民生（暖房）部門では、経済性の点から短期的に水素を大々的に利用することはないとみられ、利用するのであればやはり2030年以降になるでしょう。

図表3. クリーン水素の部門別導入ポテンシャル・時期

部門	クリーン水素の役割	時期			
		2030年以降	2040年以降	導入ポテンシャルが高い部門の根拠	
産業	鉄鋼	H DRIまたはBF-BOF ^{II} 用の還元剤、高温プロセスで利用可能	~	✓	(OEM ^{III} による) 平鋼の自発的な需要が見込まれるが、支出には消極的で設備更新サイクルも長い
	アンモニア	H アンモニア製造の原材料	✓	✓	食品（グリーンな食品「farm-to-fork（農場から食卓まで）」）向けの自発的な需要の見込みあり、設備の変更が容易
	メタノール	H メタノール製造の原材料	✓	✓	船舶部門でメタノールの自発的な需要の見込みあり、設備の変更が容易、新たな規制および政策的支援あり
	石油精製	H 水素化分解および水素化処理の原材料	✓	✓	
	その他化学品	M スチームクラッキング用の原材料および／または燃料	~	~	
	セメント	L 発熱量を増加させるためのブースター燃料であるが、低コストのバイオマス燃料と競合する	X	~	
	その他産業 ^I	L ほとんどが直接電化可能／ニッチな用途	X	~	
運輸	道路貨物輸送	H 大型車両による長距離輸送の燃料	✓	✓	自発的な需要の見込みあり、支出に積極的、新たな規制および政策的支援あり、設備更新サイクルは短い
	船舶	H 国際輸送の燃料（水素、アンモニア、メタノール）	~	✓	自発的な需要の見込みあり（コンテナ輸送でコストへの影響が小さい）、カーボンニュートラル実現への道筋において足並みが揃っていない、設備更新サイクルが長い
	航空	H 直接利用、または、持続可能な航空燃料（SAF）を製造するための原材料	✓	✓	自発的な需要の見込みあり（ビジネス旅行等）、設備の変更は不要、新たな規制および政策的支援あり
	鉄道	M 長距離輸送におけるディーゼル列車に代わる燃料	~	~	
	乗用車	L 電化が可能でより経済的	X	X	
民生	家庭	L 電化に関して経済的制約がある場合（断熱性に乏しい建物を電化する際のコストが高い場合等）の代替暖房	X	~	
	業務	L	X	~	
電力	M エネルギー貯蔵により再生可能エネルギーの断続性とバランスを取る	X	~		

■ 高 ■ 中 ■ 低

注： I）非鉄金属、食品、紙、パルプ、ガラス、セラミックス、木材、機械、農業、繊維、製造業を含む II）直接還元製鉄、または、高炉一転炉 III）相手先ブランド製造企業

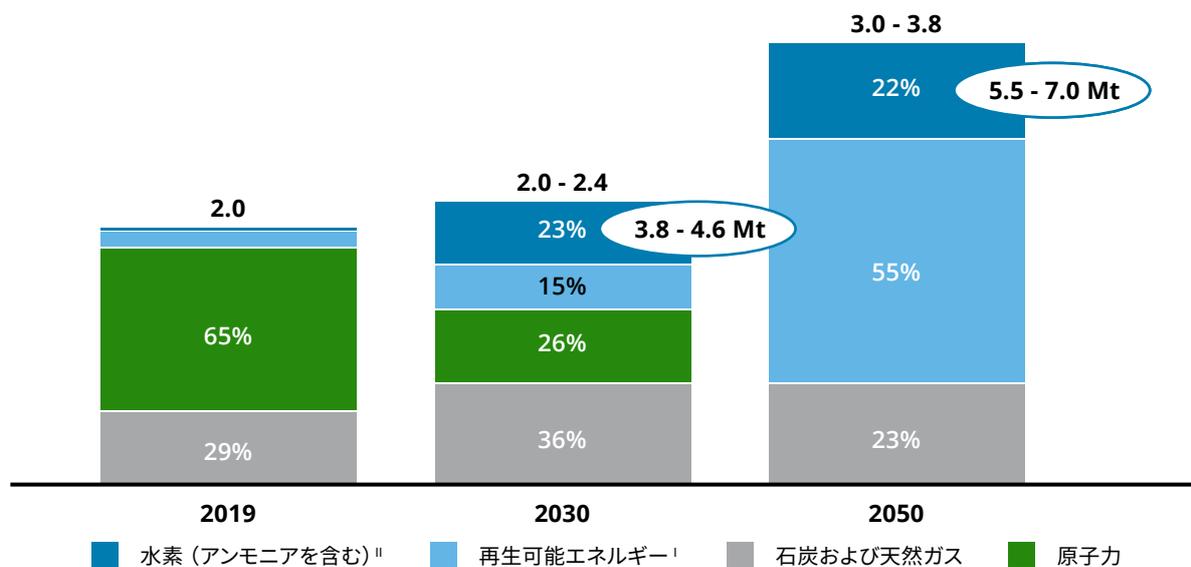
出所：IEA「2050年までのネットゼロ」、デロイト分析

個別の部門または地域におけるクリーン水素の採用に影響を与え得るその他の要因は不明確なままです。例えば、現時点で水素は大型車両による長距離輸送にとって魅力的ですが、バッテリー技術の発展によりこの部門の水素の需要が減少する可能性もあります。

その反面、二酸化炭素も水素も合成燃料（グリーンメタノール等）の製造に必要なため、大気から直接二酸化炭素を抽出する直接空気回収（DAC）の進展が水素の採用を促進させる可能性もあります。

更に、日本や韓国等の発電に水素（アンモニアを含む）の利用を検討している国もあれば（図表4）、発電時間が断続的な再生可能エネルギーによる電力を貯蔵するための水素利用に期待を寄せている国も多くあります。

図表4. 韓国の電力部門におけるクリーン水素需要量 (EJ) — 参考



注：I) 2050年の比率（グリッドからの輸入分を含む）：太陽光60%、洋上風力25%、陸上風力15% II) 専焼・混焼タービンおよび燃料電池を含む
出所：韓国産業通商資源部（「水素経済の導入に関する第1次基本計画」、「電力に関する第9次基本計画」、「2050年のカーボンニュートラルに向けたロードマップ」）、デロイト エネルギーシステムモデル



「今後数年間で、すべての需要を満たす水素は十分になく、価格も高くなるでしょう。だから私たちは慎重に対象をしぼり、合理的な部分から着手する必要があります。」

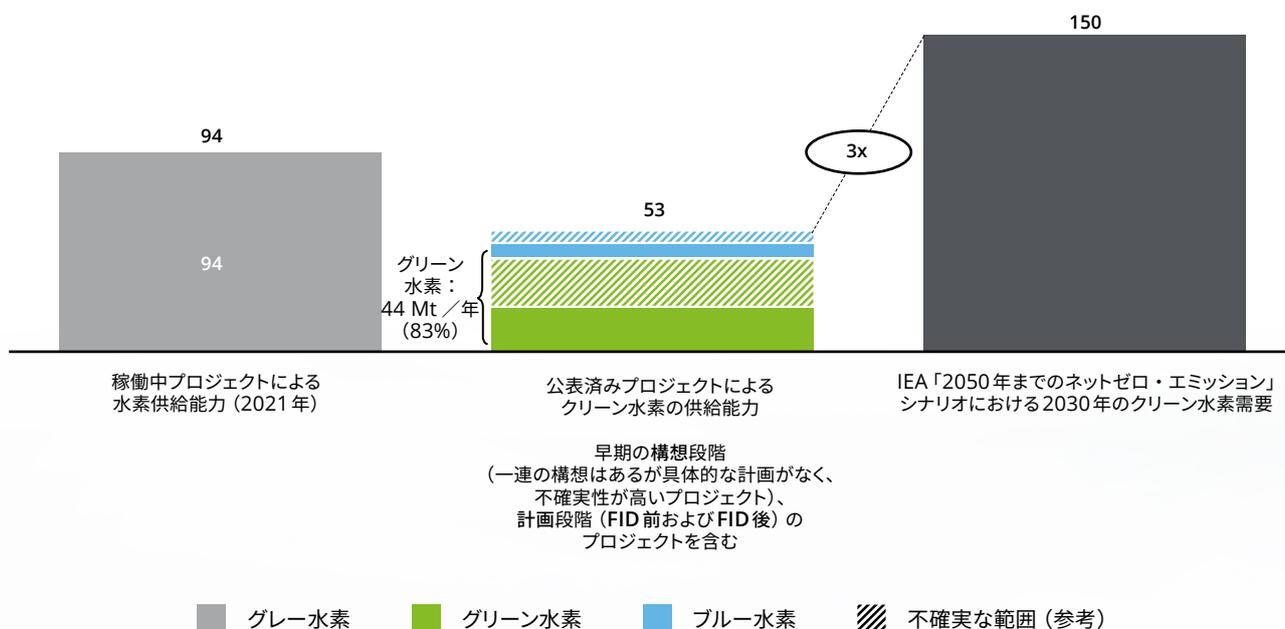
— 化学品メーカー 水素部門 EVP

ほとんどの水素プロジェクトは欧州、中東、米国、オーストラリアで公表されています（図表5）。ブルー水素プロジェクトは、これまでに英国（5.3Mt、公表された供給能力の60%）、米国（1.9Mt、同20%）、カナダ（0.9Mt、同10%）から公表があり、そのほとんどが既存のプラントおよび／または貯留層近くに位置しています。私たちは更に中東やノルウェー等から、より多くのブルー水素プロジェクトの公表があると予想しています。グリーン水素プロジェクトの多くは欧州（13Mt、公表された供給能力の30%）、中東（9Mt、同20%）、オーストラリア（8Mt、同19%）にあり、それぞれ豊富かつ低コストの再生可能エネルギー源を有しています。

各プロジェクトの内容や供給能力の地域差は、自然条件（中東の再生可能エネルギーに関する取組等）、現地の規制および政策的支援（米国のインフレ抑制法案等）のいずれの場合でも生じるでしょう。

全体的に見て、公表されているプロジェクトがすべて実現しても、予想される需要を満たすには十分ではありません（図表6）。IEAの「2050年までのネットゼロ・エミッション」（NZE）シナリオでは、2030年までに、これまでに公表されている供給能力の3倍の能力が必要です。

図表6. 世界の稼働中および公表済みプロジェクトによるクリーン水素の供給能力（2022年8月）と予想される需要（Mt/年）



注：プロジェクトは実現可能性による評価またはランク付けは行っていない

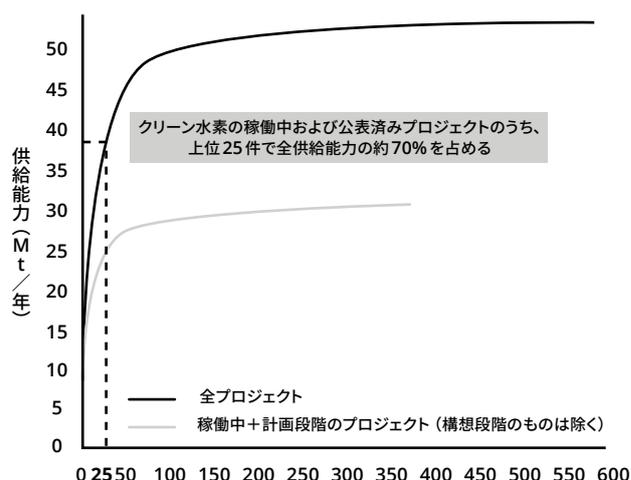
出所：デロイト エネルギーtransitionモニター、IEA「世界エネルギー見通し2022」、IEA「2050年までのネットゼロ・エミッション」シナリオ

約600件の稼働中および公表済みプロジェクトのうち、上位25件のプロジェクトで全供給能力のおよそ70%を占めており（図表7）、多数の小規模プロジェクトから少数の大規模プロジェクトまで、規模のレンジは幅広くなっています。同時に、これらのプロジェクトは、地域の需要先となるプラント1か所へ供給するものから、大規模に製造してインフラのリプレースを促すものまで存在し、水素に対する様々な需要に応えることができます。これについては第2.4章で詳述します。

水素と並んで、デロイト エネルギー・トランジションモニターでは、水素を原料とした燃原料・水素キャリアに関するプロジェクトの公表も多数記録しています（図表8）。これには、主にオーストラリアと中東での80Mtの低炭素アンモニアのプロジェクト（現在の世界の消費量の44%）が含まれています。航空関連では、12Mtの持続可能な航空燃料（SAF）のプロジェクト（現在の世界のケロシン需要の4%）が主に欧州、米国、シンガポールで公表されており、これらの国々では、航空会社と空港間でSAFに関する供給契約が数多く結ばれています。

公表されている低炭素メタノールの供給能力は最大わずか約2Mt（現在の世界の消費量の約2%）で、主に欧州と米国の計画によるものです。船舶部門では、この能力の大半を船舶用混合燃料の製造に利用し、同時にデュアルフューエル船舶の購入も進められています。しかし、公表されている、水素を原料とした燃原料・水素キャリアに関するプロジェクトのほとんどはFID前の初期段階にあり、次の段階に進めるか否かは水素供給量次第です。

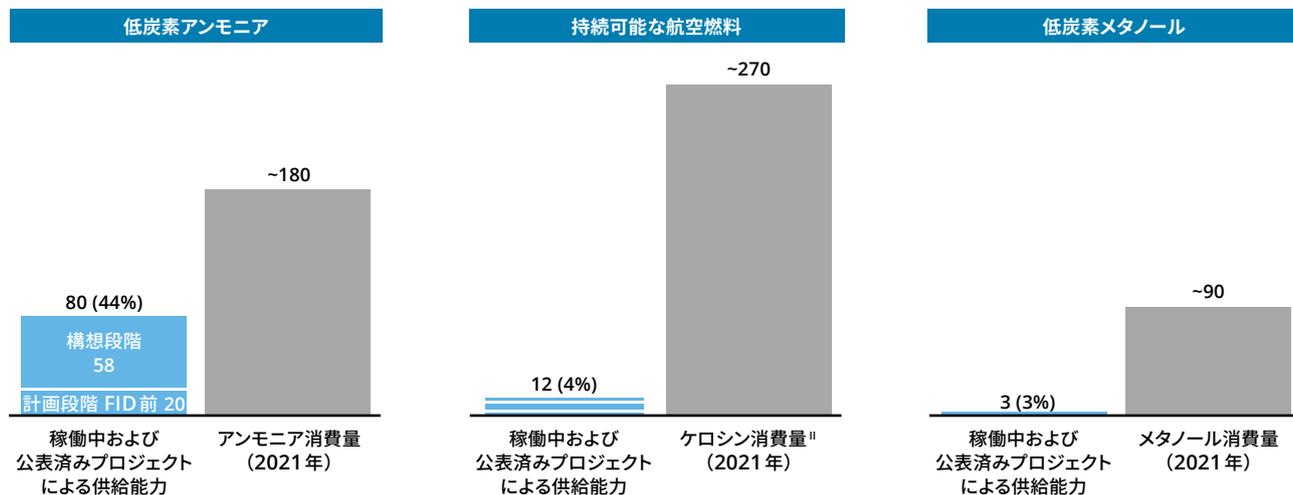
図表7. 世界の稼働中および公表済みクリーン水素プロジェクト（2022年8月）



注：プロジェクトは実現可能性による評価は行っていない

出所：デロイト エネルギー・トランジションモニター

図表8. 世界の稼働中および公表済みプロジェクトによる、クリーン水素を原料とした燃原料・水素キャリアの供給能力¹ (Mt/年、2022年8月)



注：1) 稼働中、計画段階 (FID前およびFID後)、および構想段階 (具体的な計画のないプロジェクト早期) のプロジェクトを含む。プロジェクトは実現可能性によるランク付けは行っていない II) IEAは、2021年のジェット燃料消費量を1日当たり約550万バレルと見積もっている

出所：デロイト エネルギー・トランジションモニター、IEA「石油2021：2026年に向けた分析と見通し」、IEA「アンモニア技術のロードマップ」、各社の報告書

2 要因と対策

2.1 自発的な需要

新しいグリーンバリュープロポジションやオフテイカーの集約を通じ、自発的な需要（特定の部門に対する規制および政策的支援が無くとも発生する需要）を喚起させることが市場に確固たる需要が生まれたという明確なシグナルになります。更に、規制および政策的支援によって発生する需要を喚起させるためにも重要です。

クリーン水素市場を形成する上で需要側の状況が極めて重要です。中でも自発的な需要（規制および政策的支援に関係なく発生する需要）はポイントです。市場の拡大に大きな役割を担う訳ではありませんが、水素が幅広く採用されるための規制および政策的支援を刺激する一助となります。

デロイトは、自発的な需要が見込まれる部門を特徴づける3つの要因を特定しました（図表9）。

1. 企業の利益（市場シェアの拡大等）や消費者の利益（新しい機能や精神的な利益の提供等）に対する感度が高い
2. 社会や政府からの目線が厳しい、風評被害の危険性が高い
3. 最終需要家におけるコスト上昇（水素への切り替えによる価格上昇）が限定的である

「水素の話題では、需要側のことが忘れられることがあります。話の中心はいつも生産についてですから。私たちは対話に需要側を巻き込み、ニーズを把握し、共に変革に向けて協力する必要があります。」

— エネルギー企業 水素部門ディレクター

図表9. クリーン水素の部門別自発的な需要ポテンシャル

部門	グリーンプレミアムの有望なエンドマーケット	自発的な需要をけん引する要因			クリーン水素の自発的な需要ポテンシャル		
		企業／消費者双方の利益に対する高い感度	社会からの厳しい目線	最終需要家におけるコスト上昇が限定的			
産業	鉄鋼	モビリティ用平鋼 ¹ （市場の約15%）	✓	~	~	★ ☆ ☆	
	アンモニア	食品	~	~	~	★ ☆ ☆	
	メタノール	コンテナ輸送（市場の約25%）	~	~	✓	★ ☆ ☆	
	石油精製		~	✓	~	★ ☆ ☆	
	その他化学品	包装資材、化粧品	✓	✓	~	★ ☆ ☆	
	セメント	政府	クリーン水素の導入ポテンシャルは限定的			~	☆ ☆ ☆
	その他産業		クリーン水素の導入ポテンシャルは限定的			~	☆ ☆ ☆
運輸	道路貨物輸送	輸送用車両を所有する大手	✓	✓	~	★ ☆ ☆	
	船舶	コンテナ輸送（市場の約25%）	~	~	✓	★ ☆ ☆	
	航空	ビジネス旅行および貨物輸送	✓	✓	~	★ ☆ ☆	
	鉄道	長距離輸送用ディーゼル列車	✓	~	✓	★ ☆ ☆	
	乗用車		クリーン水素の導入ポテンシャルは限定的			~	☆ ☆ ☆
民生	家庭		クリーン水素の導入ポテンシャルは限定的			~	☆ ☆ ☆
	業務		クリーン水素の導入ポテンシャルは限定的			~	☆ ☆ ☆
電力	電力		✓	~	~	★ ☆ ☆	

↑ クリーン水素の導入ポテンシャル

注：1）平鋼は幅広い用途で利用される薄鋼板および厚鋼板（自動車、機械、家庭用電気器具等）を指す

出所：デロイト分析、各部門の幹部やリーダーへのインタビュー

企業のCEOや幹部とのディスカッションから明らかになるのは、低炭素製品の採用を促す**新しいバリュープロポジション**を作り上げる必要性の高まりです。以下に示す様々な方法があります。

- 鉄鋼**：環境にやさしいグリーンスチール（平鋼）を提供できれば、内燃エンジンからバッテリー式電気自動車への転換を超える環境にやさしい車両（100%グリーンな電気自動車等）を作ること、相手先ブランド製造企業（OEM）は競合に対し、差別化を図れる可能性があります。これは、カーボンフットプリントの削減を目指し、グリーン製品を求めている顧客に新たな利益をもたらすことができます。それに加え、鉄のコストが車両の全コストに占める割合は限定的なため、車両のグリーン化によるコストの増加額はそれほど大きくありません。デロイトの分析では、標準的なセダンの乗用車で約200ドルのコスト増になるとみています。なお、いくつかのOEM（主に欧州）では、グリーンスチールの採用が確約されています。
- 航空**：SAFの利用により航空券の価格は上昇しますが（価格の約30%が燃料費）、航空会社はこの上昇分を相殺する付加的な顧客サービスを検討できます。例えば、グリーン優先セキュリティチェック、優先席、食事のアップグレード、ポイントの付与、環境にやさしいヘッドレストを提供することが考えられます。貨物輸送はもう1つのエンドマーケットになり得ます。大量に貨物を輸送すれば、それぞれの品物にコストが分散し、単位当たりの追加コストが低くなるからです。
- 船舶**：コンテナ輸送は、燃料をグリーン燃料に切り替えても、顧客にとっての製品コストの増加がわずかなため（約1%）、グリーンバリュープロポジションを作る起点となり得ます。これと同様の理由から、グリーン燃料が適用できるもう1つの分野がクルーズ船です。

また、需要は多くのプレーヤーに分散する傾向があるため、**需要を集約し、長期的な契約を結ぶ**こともまた、刺激になると考えられます。例えば、航空会社は「サステナブル・アビエーション・パイアーズ・アライアンス（SABA）」のような購買連合を通じ、法人顧客のスコープ3排出量の削減に役立てています。（1年以上の）長期的な契約は、信頼性が高く、継続的な需要増に寄与するため、リスクを低減でき、サプライチェーンの改善や財務上の決定の動機となる等、連鎖的な利益を生み出します。

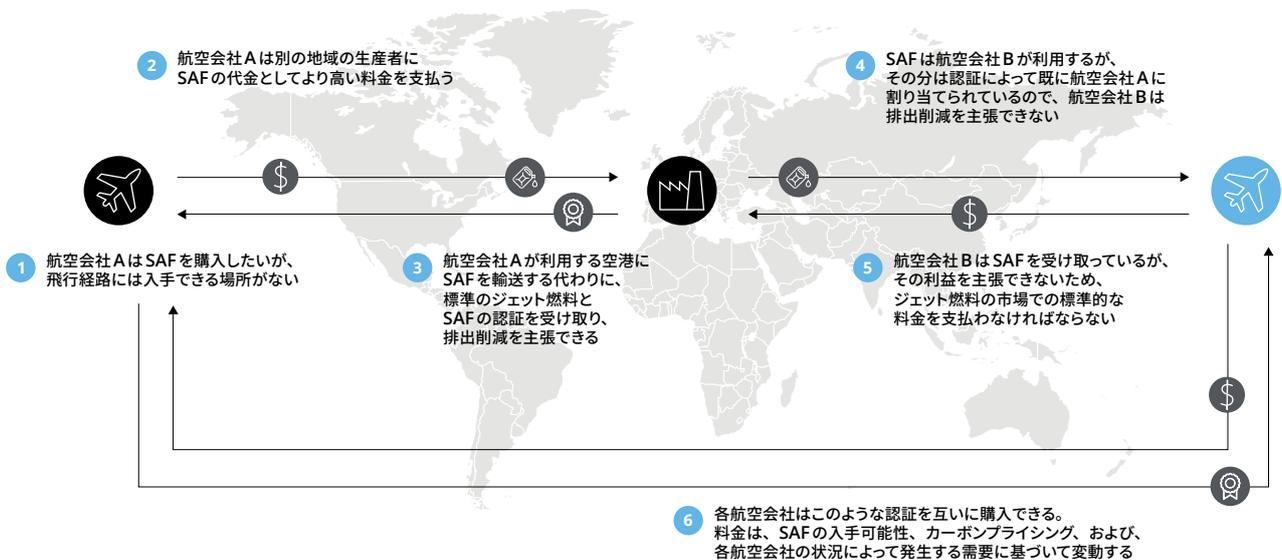
「需要の集約は、それを本当に必要としている市場に確実性を与えます。顧客はグリーン調達の面で協力し、規制強化よりも素早く行動する必要があります。」

— 航空機をよく利用する企業のVP

加えて、市場が成長するにつれて、様々な地域で発生する水素の需要と供給を短中期的にマッチングするのは困難です。世界中の燃料を、必要としている場所に集中的に輸送することは、カーボンニュートラルの効果の一部を失わせ兼ねません。その代わりに、**世界的な「ブックアンドクレーム」方式による認証制度**によりこの問題が軽減され、局所的に需要のある地域が、水素の世界的供給の拡大を刺激できるようになっています。例として、航空業界では、地域的に供給が限られている場合でも、「ブックアンドクレーム」によってSAFを購入することで、航空会社がカーボンニュートラル化できるような支援があります（**図表10**）。

自発的な需要は、部門の特性や個別のエンドマーケットに大きく依存するため、水素の生産や需要を大規模に拡大するには十分とは言えません。新たな規制および政策的支援を考慮すれば、それらの支援によって発生する需要が、自家需要のある分野（石油精製等、水素が既に利用されている分野）および、運輸部門の燃料をはじめとして、市場の規模拡大をけん引すると期待されています。規制および政策的支援については次の章で詳しく取り扱います。

図表 10. 航空業界における「ブックアンドクレーム」の仕組み一例



出所：航空部門の幹部やリーダーへのインタビュー、デロイト分析

2 要因と対策

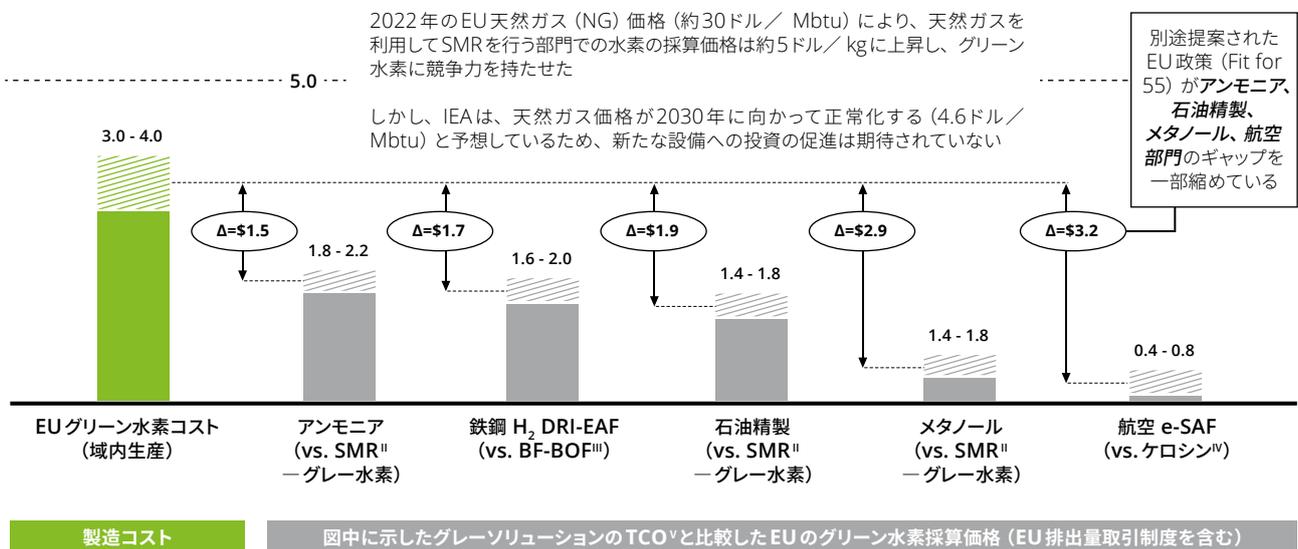
2.2 規制および政策的支援

水素の排出原単位に関する新しい概念や認証（水素排出原単位指数等）に基づいて、シンプルかつ需要・供給双方に整合のとれた規制および政策的支援を導入し、一方で迅速に許可できるような仕組みを整えることにより、水素の導入と排出量の削減を促進することができます。

現在、グレー水素と比較したクリーン水素のコストデメリットが対策の具体化を阻止しているように見受けられます。例えば、天然ガスの価格が現在の高値から2020年の水準⁵⁾に戻り、規制および政策的支援が生み出されなかった場合、EUにおけるアンモニア製造や航空部門向けのグリーン水素の価格は、2030年までに競争力を失うでしょう（図表11）。現在の規制および政策

的支援は、経済的状況、現地の資源、産業の成熟度、市場を刺激する方法に関する政治的な姿勢等を反映するため、国や地域により様々です。このような地域的多様性すべてにわたり、デロイトは、需要・供給起点、供給起点、輸出起点、試行段階という4つの新しいアーキタイプ（原型）を特定しました（図表12）。

図表 11. 特定の部門における、EUのグリーン水素のコストと採算価格のバリューギャップ（2030年、ドル/kg水素）¹⁾ — 参考



注：1) すべての数値は実質値（無償排出割当を除く）。コモディティ価格はIEA「世界エネルギー見通し2022：2050年までのネットゼロ・エミッションシナリオ（2030年時点）」（天然ガス4.6ドル/Mbtu、石炭52ドル/t、二酸化炭素140ドル/t、原油35ドル/バレル）に基づく II) 水蒸気メタン改質 III) 高炉一転炉 IV) CO₂排出コストを含む V) 総所有コスト

出所：IEA「世界エネルギー見通し2022」、デロイト エネルギーシステムモデル

例えばEUは、再生可能エネルギー指令 (RED III)、炭素国境調整メカニズム (CBAM)、排出量取引制度 (EU-ETS) によるカーボンプライシング等の需要側に対する指令と、欧州共通利益に適合する重要プロジェクト (IPCEI) への助成金等の供給側の対策を組み合わせています。

需要側の対策は、グレー水素に対してグリーン水素の競争力を高めようとするますが、供給側のイニシアチブは、現在その外郭が

決まりつつある欧州水素銀行等、追加の措置を通して域内での生産を保つことにより、供給の保証力向上に取り組むものです。EU関連で考慮すべきは、2022年の天然ガス価格の大幅な上昇により水素が優位性を持つようになったことです。天然ガス価格の不確実性が長期化する場合、この事象が今後のEUにおける水素開発を促進させる上で大きな意味を持つ可能性があります。

図表 12. 地域ごとの規制および政策的支援のアーキタイプ¹⁾

主な規制および政策的支援のアーキタイプ	需要・供給起点	供給起点	輸出起点	試行段階
	欧州、日本、韓国	米国	オーストラリア、中東、LATAM	中国、インド
供給	<ul style="list-style-type: none"> •IPCEI (EU) (約100億ドル/年)：国の支援 •H2Global (ドイツ/オランダ) (約40億ドル)：供給と需要をマッチングするためのオークションベースのメカニズム •欧州水素銀行 (EU) (約30億ドル)：市場構築メカニズム •GI^{III}基金 (日本) (約30億ドル)：大型電解槽の研究開発のための助成金 	<ul style="list-style-type: none"> •IRA^{IV}：クリーン水素に対して最大3.0ドル/kg水素の税額控除 •IRA：CCUSに対する税額控除 •IIJA^V：地域のクリーン水素ハブの支援と電解槽の開発のための助成金 	<ul style="list-style-type: none"> •助成金 (オーストラリア) (約10億ドル)：クリーン水素製造、サブライチェーンの開発とハブのための助成金、および、ニューサウスウェールズ州におけるグリーン水素製造用の電力に対する税額控除 •ETS (メキシコ)：炭素税制度の試験的導入と施行 •税制上の優遇措置 (コロンビア/ドミニカ共和国)：再生可能エネルギーを利用した水素製造や発電に対する税制上の優遇措置 	<ul style="list-style-type: none"> •グリーン水素政策 (インド)：グリーン水素/アンモニアの合同調達メカニズム。電解槽の設備利用率を高めるために再生可能エネルギーによる電力の預け入れを奨励 •国家水素ミッション (インド)：グリーン水素製造、電解槽の製造、研究開発プロジェクトおよびパイロットプロジェクトに向けた約24億ドルの助成金
流通	<ul style="list-style-type: none"> •エネルギー向け CEF^{VI} (EU) (約60億ドル)：助成金 •国家計画 (韓国)：アンモニア・液化水素荷役ターミナルの建設 	<ul style="list-style-type: none"> •IRA：貯蔵に対する税額控除 		<ul style="list-style-type: none"> •免除 (インド)：送配電料金の免除 (特に水素製造用の電力に関するもの)
需要	<ul style="list-style-type: none"> •RED III (EU)：2030年における産業部門に対するRFNBO^{VI} 50%の指令と運輸部門に対するRFNBO 2.6%の指令 •EU-ETS (EU)：炭素税 •助成金 (日本・韓国)：燃料電池車 (FCV) と水素ステーションの建設向け •炭素国境調整メカニズム (CBAM)：EU以外の国の生産者が製造プロセスを環境に配慮したものにするよう促すことにより、炭素漏れリスクの低減を支援 	<ul style="list-style-type: none"> •IRA：自動車での利用に対する税額控除 		<ul style="list-style-type: none"> •助成金 (中国)：燃料電池車 (FCV) と水素ステーションの建設向け

注：I) 規制および政策的支援の説明は網羅的ではなく、主要な部分のみ記載した II) グリーンイノベーション III) コネクティング・ヨーロッパ・ファシリティー IV) インフレ抑制法。税額控除の規模は、ライフサイクルを通じたCO₂排出量による V) インフラ投資・雇用法 VI) 非バイオ由来の再生可能燃料

出所：デロイト分析

米国は、インフラ投資・雇用法 (IIJA) やインフレ抑制法 (IRA) 等、より供給側に焦点を当てています。これらの法令は低炭素分子 (水素を含む) のエネルギー生産者のモチベーションを高めます。例えば、IRAはプロジェクトのFIDを実現させる後押しとして、製造された水素1kg当たり0.6~3.0ドルの税額控除を提供します。

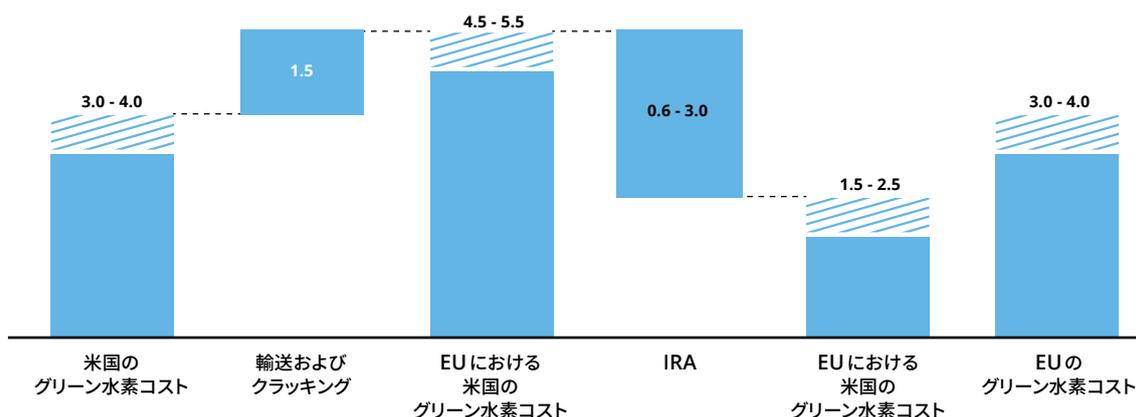
「ポジティブな意味で、IRAは水素と水素を原料とした燃原料・水素キャリアの輸出市場を崩壊させる可能性があります。」
— エネルギー専門家

このインセンティブの規模 — 製造コストのほとんどあるいは全てを補償可能 — は、投資を他の地域から米国に誘致したり、グリーン水素が現地生産されたものより競争力のある価格 (輸送やクラッキングに伴うコストを含む) で、欧州に輸出される可能性を生じさせたりする等、従来市場の崩壊を引き起こしています (図表 13)。その結果、他の地域において、現地生産のためのより競争力のある規制および政策的支援を生み出そうと、モチベーションが高まっています。

オーストラリアでは、ブルー水素やグリーン水素の製造とハブの構築を奨励する、輸出起点による供給側のアプローチを採用しています。これには2億ドル (約3億豪ドル) の国の資金、および3億3,500万ドル (約5億豪ドル) の地域の資金、更には、ニューサウスウェールズ州が公表したグリーン水素の製造にかかる水コストの90%の免除等、地域の奨励金が含まれています。

最初の焦点は、オーストラリアの低コストの再生可能エネルギー源を利用することで輸出を促進することででしたが、輸出プロジェクトが遅れている間に、現地の需要が新たに発生しています。一方で、中東やアフリカ、南米のいくつかの国々もまた、豊富にある低コストの天然ガス、および/または再生可能エネルギー源、ならびに燃料や製品の輸出に関する確立された手腕や結びつきを考慮し、輸出起点のアプローチを追求しています。

図表 13. EUのグリーン水素輸入コストへのインフレ抑制法 (IRA) の影響 (ドル/kg 水素) ー 例



出所：デロイト分析、デロイト エネルギーシステムモデル

他の地域でも新たな試みを行っています。例えば中国では、いくつかの運輸部門に対して需要側の助成金を支給しています。インドでは、供給側への財政的インセンティブの支給、いくつかの部門に対するグリーン水素利用の義務化（草案段階）、再生可能エネルギーによる電力の送配電料金の免除により、グリーン水素の製造を支援しています。このようなアプローチは、今後の進展と共に顕在化するはずです。

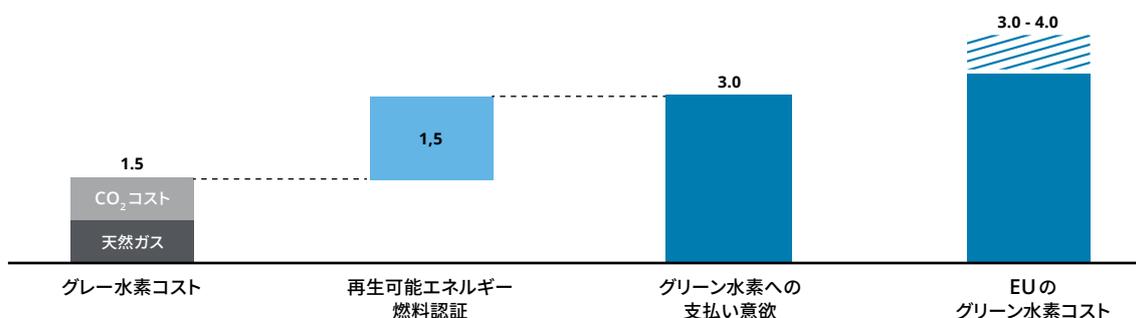
デロイトの分析では、ネットゼロ・エネルギーシステムに向けた大規模な変革には、公表されている以上に規制および政策的支援が必要であると提起していますが、現在の政策でも投資や変更を促進することができます。

これまでのEUの規制および政策的支援は、様々な部門において、水素イニシアチブの経済性やメリットオーダーを変えています。例えばRED IIIには、産業および運輸部門が水素を利用することを求める指令が含まれています。また、オランダにおける指令の内容実現では、石油精製部門で水素を利用する際の「再生可能エネルギー燃料認証」取得を認め、バリューギャップを縮めるのに役立っています（図表 14）。

もう一つ考慮すべき重要なことは、**需要・供給双方に整合のとれた規制および政策的支援の導入**です。設備の変更や開発のためには、両方の大規模な投資が必要だからです。これは、水素が既に利用されている、より検討が単純な用途においても役に立ちます。

「アンモニアの製造でクリーン水素を利用することは、水蒸気メタン改質をただやめるほど単純ではありません。私たちは設備や事業活動を変える必要があります。」
ー 低炭素製品企業 CEO

図表 14. オランダの石油精製への再生可能エネルギー指令 (RED III) の影響 (ドル/kg 水素) ー 例



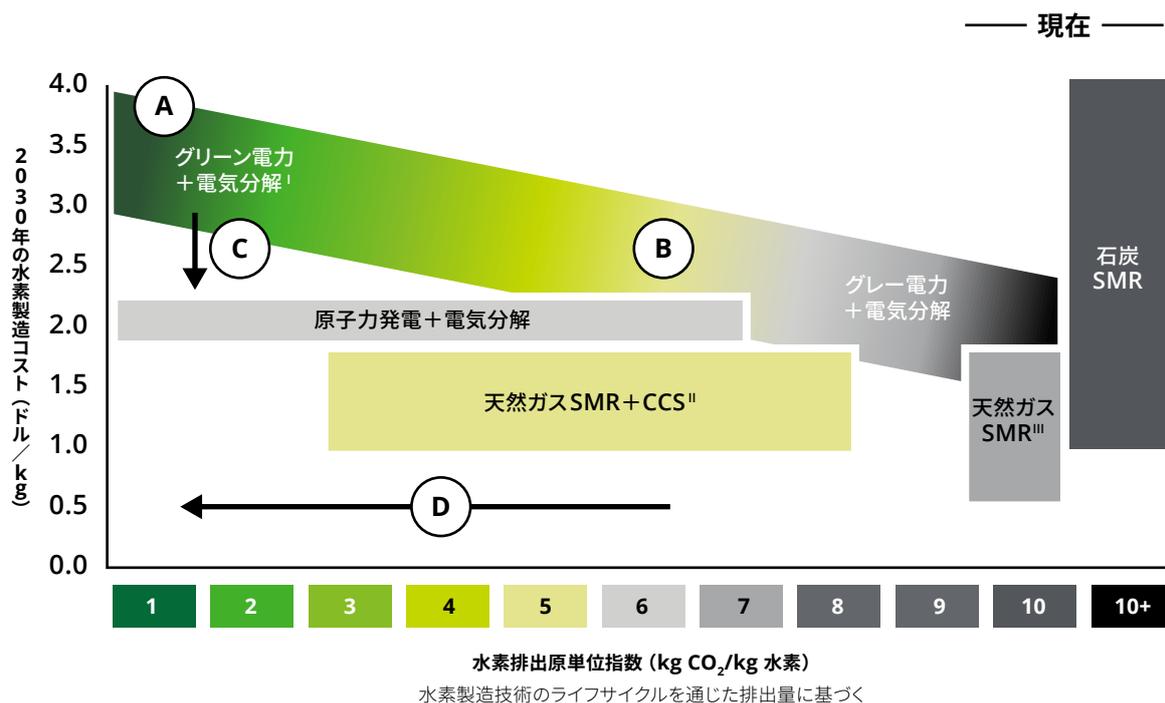
出所：デロイト分析、デロイト エネルギーシステムモデル

加えて、グレー／ブルー／グリーン水素の分類により価格に差異が生じるのを避けるため、また投資を促して排出量を削減するため、デロイトがインタビューを行った業界の幹部たちは、より繊細なアプローチを見出ししていました。水素排出原単位指数 (HEII) の採用です。HEIIは、様々な水素製造技術の排出量と経済性を考慮に入れており、低排出に向けた段階的な移行の一部として、短期間で経済的に実現可能な対策を特定し、採用することが可能となります (図表 15)。

「水素の色分け方式の採用は効率的ではありませんし、投資に遅れが生じます。」 — エネルギー企業 副社長

例えば、電気分解ベースの水素製造において、初めのうちは再生可能エネルギーと非再生可能エネルギーによる電力を合わせて利用することにより、再生可能エネルギーによる電力のみを利用する場合よりも、電解槽の設備利用率を上げ、コスト効率よく稼働できると同時に、需要に応え、排出原単位を低減することができます。

図表 15. 水素排出原単位指数 (HEII)



A グリーン水素の製造はグレー水素よりも2~3倍コストがかかり(2030年)、コストを負担する経済力がない部門もあると予想されるため、政府はその大きな差を埋めるため多額の助成金を支給する必要があります

C 時間の経過と共に製造能力が拡大されるにつれ、設備・インフラ・供給(電気分解等)のコストが下がり、排出原単位が低い水素プロジェクトの製造コストも下がります

B 地域特性に応じた、短期間で排出原単位を大幅に低減する、より経済的に実現可能な対策を選択することができます(電解槽の設備利用率を上げるために、再生可能エネルギーによる電力と非再生可能エネルギーによる電力を併用する等)

D 排出原単位がより低い技術の採用を促進する政策を導入することができます(すなわち、許容可能な低HEIIへの移行)

注：I) 風力発電によるライフサイクル排出量12g/kWh、電解効率70%と仮定 II) ブルー水素の排出原単位については不確実性が大きく、設備が有するメタン漏れ低減能力および炭素回収能力に依存する III) メタンからCO₂への変換で約5kg、SMR促進のためのエネルギー生成で約4kg、天然ガス製造での上流排出で約1kg

出所：気候変動に関する政府間パネル (IPCC)、IEA、デロイト分析

時間の経過と共に製造能力が拡大されるにつれ、更にグリーンな設備やインフラのコストも下がり、それにより排出原単位が低い水素プロジェクトの製造コストも下がるでしょう。また、HEIIの概念が精緻化されれば、HEIIは排出原単位がより低い水素製造技術への段階的な移行を促進する政策を可能にします。

HEIIは、排出量と経済性に着目して水素製造技術を評価するアプローチへの理解を助ける1つの例ですが、そのようなアプローチの利点を説明しやすくします。HEIIを有効なものにするため、業界のリーダーや政府は、協力してHEIIを細部まで精緻化し、幅広い連携を実現し、保証する仕組みを確立すべきです。一度準備が整えば、このようなアプローチによりクリーン水素を既存のプロセス（アンモニアの製造等）に配合することは原則的には価値のあるものになります。しかし、実際にこれを実行に移せるか否かは、製造量全体に対する明確なHEIIベースの認証システム、または製造量の一部を認証するマスバランス方式を備えているかどうかによります。

もう1つ考慮すべきことは、許可申請手続の所要時間が長くなる傾向があり、水素プロジェクトのFID通過が遅れる可能性がある点です。例えば、デロイトの分析では、オランダで洋上風力発電の許可が下りるまでに長い場合で4年かかります。水素プロジェクトがFIDを迅速に通過するには、政策的イニシアチブは、**透明で迅速な許可**と、それを遂行する行政能力によりサポートされるべきです。例えば、ポルトガルでは最近、グリーン水素プロジェクトに関して義務付けられていた環境アセスメントを、2023年3月²に廃止することを決定しました。

「迅速な許可は大きな負担を取り除き、投資家も素早く行動に移せます。」

— エネルギー企業 プロジェクトジェネラルマネージャー

2 要因と対策

2.3 テクノロジー

カーボンニュートラル技術の採用で各社が足並みを揃え、技術を速やかに成熟させることが、クリーン水素に対する需要形成にかかわるスピード向上の決め手となります。供給側は、大規模な需要と短期のサプライチェーン構築の制約の間で迅速に需給バランスを取るため、生産拡大に向けた「大きく考え、小さく始め、一気に拡大する」アプローチが必要です。

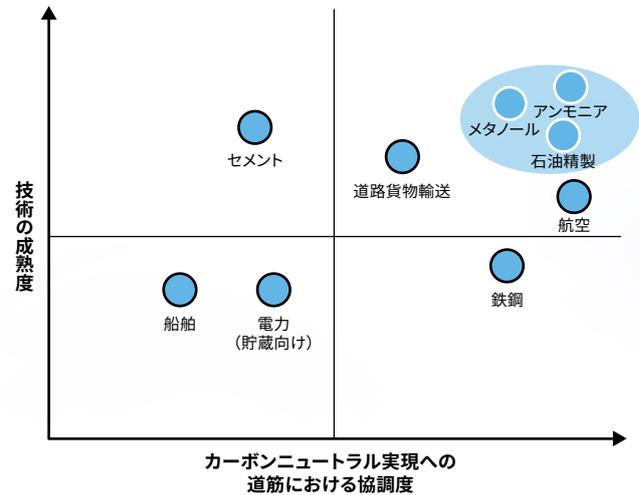
カーボンニュートラル実現への明確な道筋と成熟した技術がある部門は、クリーン水素の採用に向けて迅速に行動すべきですが、その段階に達していない部門は、個別の課題に取組み需要を生み出す的を絞った計画を策定する必要があります（図表16）。それら2つの軸における各部門の立ち位置により、次のような対策が考えられます。

- 的を絞った研究開発およびパイロットテスト— 技術を成熟させ展開するため、投資と試験を増やす
- 連携と協調— 一部のカーボンニュートラル実現への道筋に、各社の足並みが揃うよう連携する。また、投資を促進するため、短期間で成果を上げることに合意する

例えば、メタノールやアンモニアの製造、および石油精製部門では、プロセス中で既に水素を利用しており、設備をわずかに変更するだけで、クリーン水素を採用することができます。つまり、これらの部門は技術が比較的成熟しており、カーボンニュートラル実現への道筋においても各社の足並みが揃っています。一方、道路貨物輸送部門もカーボンニュートラル実現への道筋にてある程度足並みが揃っており、水素燃料電池技術もかなり成熟しているものの、バッテリーの改良により、EVとの競争が激しくなる可能性があります。

しかし、技術の成熟度が低い部門もあります。例えば鉄鋼部門では、直接還元製鉄（DRI）やCCS等の方法が知られていますが、いずれも技術の成熟度は高くありません。100%水素を利用したDRIを製造しているプラントはまだなく、現在のDRIプラントは天然ガスを燃料としています。同様に、CCSの効率やCO₂回収能力も改善が必要です。船舶部門では進展が見られず、デロイトの調査では、技術の成熟度が低く、カーボンニュートラル実現への道筋も不透明であることに起因しています。メタノール、アンモニア、（合成）液化天然ガス（LNG）には将来性がありますが、カーボンニュートラル実現への道筋において各社の足並みが揃わないために、高コストで複雑なサプライチェーンを生み出す危険性があります。船舶において、既存と異なる燃料は、現在とは異なる設計、異なる能力を備えたクルー、異なる運用、異なる港湾インフラを必要とするためです。

図表 16. 部門別 技術の成熟度とカーボンニュートラル実現への道筋における協調度¹



注：1) 今後クリーン水素に関して中程度または高い役割を果たすとして先に定義した部門のみ示す

出所：IEA「2050年までのネットゼロ・エミッション」シナリオ、デロイト分析

供給側は、十分な供給能力を備えるため、また、迅速に供給を開始するため、開発の選択肢について異なる考え方をとる必要があるかもしれません。公表されているプロジェクトの約80%は、第1.2章で示したように小規模で（100kt未満）、カーボンニュートラル化できるのはせいぜい地域のプラント数力所分であるため、規模の経済を生み出すほどではありません。製造コストを削減し、更にインフラの開発を促進、社会的費用を低減、規模の大きな工業施設をカーボンニュートラル化できるのは、一握りの大規模プロジェクトだけです。

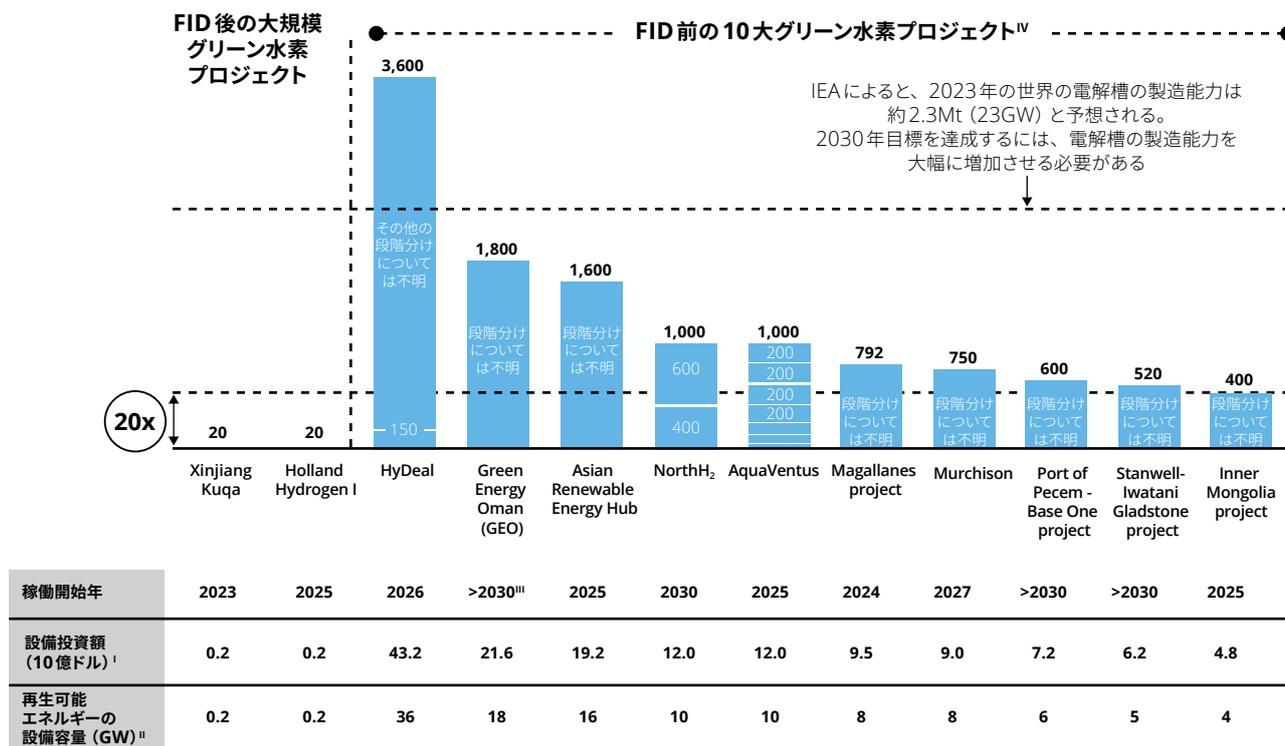
参考までに、デロイトの分析では、世界でも十指に入る大規模グリーン水素プロジェクトでも、製鉄所1棟（約700ktの水素が必要）と肥料工場1棟（約300kt）しかカーボンニュートラル化できません。

「どれほどの水素が必要かを把握することは極めて難しいです。私たちに本当に多くの大規模プロジェクトが必要ですが、簡単にはいきません。」 — 製鉄会社 水素担当副社長

大規模プロジェクトの実現が強く望まれているにもかかわらず、FIDが済んでいる2つの大規模プロジェクトでも、それぞれ2023年（中国）、2025年（欧州）¹⁰に約20ktの供給能力しか備えられていないのが現実です。また、FID前のプロジェクトでは、上位から10番目の規模のものであっても、その供給能力を実現するには、前述した2つのプロジェクトと比較して供給能力を約20倍に増加させる必要があります。そして、これは2030年までに実現しなければならず、技術、運用、およびサプライチェーンの面で極めて大きな課題を投げかけています（図表17）。

このような課題を考慮すると、より現実的なアプローチが必要です。すなわち、大きな目標を見据え、一なぜならそれが必要とされているから、そして、望む効果を得られるから一その一方で、現時点の技術的制約やサプライチェーンの制約に対処しながら、小さく始め、量を作り出すことを目指すつまり「大きく考え、小さく始め、一気に拡大する」のです。並行して、研究開発とデジタル化を通して技術開発を促進し（洋上での電気分解技術の成熟や設備効率の向上等）、サプライチェーンの規模も拡大しなければなりません。

図表 17. 現在計画されているFID前の10大グリーン水素プロジェクトとFID後の大規模グリーン水素プロジェクト (kt/年、2022年8月)



注：I）グリーン水素の製造能力1kt当たり1,200万ドルと仮定 II）電解槽で水素を100kt製造するために必要な洋上風力発電を平均1GWと仮定 (kt/y)
III) 2026年以降-FID目標 IV) すべてのプロジェクトは段階的アプローチをとると公表されているが、大半は段階毎の能力を明示していない

出所：IEA「グローバル水素レビュー2022」、デロイト エネルギートランジションモニター

2 要因と対策

2.4 設備・インフラ・供給

需要側は、可能であれば既存インフラの再利用との組み合わせにより設備更新サイクルを早める必要があります。供給側は、再生可能エネルギー電源やグリッド、関連インフラへの大型投資が必要です。

水素をまだ利用していない部門で見られる、標準的な設備更新サイクルや交換率の低い傾向は、水素の採用を妨げており、今後直ちに**設備更新サイクルを早める必要があります**。特に、デロイトの分析では、カーボンニュートル化が困難な (hard-to-abate) 部門でカーボンニュートル化が推進されている設備は世界の全設備の1%に届きません。設備更新サイクルは通常長く、交換率も低いです。例えば鉄鋼部門では、高炉の製品寿命が40年、毎年交換率を5%とすると、2025年に更新を開始したとして、すべての設備更新が完了するのに2065年までかかることになります。

設備更新を早めることは可能ですが、そのアプローチや可能性は部門によって異なります (図表 18)。例えば、航空部門では従来の燃料の代替、ドロップイン燃料としてSAFを利用できます。鉄鋼部門では、既存の設備向けの燃料に、最大20%のクリーン水素を配合することで短期的な部分移行が可能ですが、高炉から直接還元製鉄 (DRI) 設備や電気炉 (EAF) への切り替えには長い年月がかかります。道路貨物輸送部門は鉄鋼部門よりも設備のライフスパンがはるかに短いですが、設備 (車両) 数は極めて多く、製鉄所が約500であるのに対し、トラックは世界で約3,000万台存在しています。

グリーン水素に対応した設備への完全な更新を待つことで水素導入の進展が遅れるよりは、グレー水素からグリーン水素へと段階的に移行すれば (第2.2章のHEIIの低減)、排出量の削減や大規模な供給能力の迅速な開発につながり、需要側に燃料電池車 (FCV) 等の新しい設備への投資を動機づけます。

大規模なクリーン水素の供給は、水素を輸送するための輸送手段やインフラへの投資、また、水素を製造するための再生可能エネルギー電源やグリッドへの投資等、かなりの投資が必要となります。

図表 18. 設備更新の動向と促進容易性一例

部門	設備更新の動向 (2022年7月)		設備更新の促進容易性
	カーボンニュートル化を推進する稼働中のプロジェクト	世界の設備数	
アンモニア	7プラント 約1.20%	580プラント 100%	H 水素は現在の製造プロセスで既に 原材料 として利用されている
航空	航空機の変更は不要 100%	30,000機 100%	H E-SAF および Bio-SAF は運用中の航空機で ドロップイン燃料 として利用可能
セメント	35プラント以上 ^I 約1.00%	3,600プラント 100%	H 水素は現在の製造プロセスで ブラスター燃料 に適している
鉄鋼	4プラント 約0.70%	550プラント 100%	M 水素は設備を大幅に変更せずに 高炉に配合 することが可能 (最大20%)。100%水素を利用するには 全設備の変更 (直接還元製鉄炉) が必要
道路貨物輸送 ^{II}	4,000台 (トラック) 約0.01%	3,000万台 (トラック) 100%	L 水素の利用には 全設備の変更 (新しいFCVトラック) が必要
船舶 ^{III}	5隻 約0.01%	7万3,000隻 100%	L 水素 (液化状態またはアンモニア/メタノールの状態) の利用には 全設備の変更 (新しい船舶) が必要で、カーボンニュートル実現への道筋は不透明

注： I) 熱源、またはクリンカーの部分的な代用としてバイオ燃料を利用し、排出量の課題に取組んでいるプラントが主となっている。プロセスでの排出量より一層削減するために追加対策が必要 II) 大型車両による貨物輸送に関するプロジェクトのみ III) 国際輸送 (ばら積み貨物船、タンカー、コンテナ輸送船) に関するプロジェクトのみ。稼働中のLNGプロジェクトは除く

出所：デロイト エネルギー・トランジションモニター、デロイト分析

需要地と供給地が近接している場合は、**既存設備を最大限再利用することが大きな役割を果たします**。地域内の水素の輸送やCO₂の貯蔵には、それぞれ既存の天然ガスのグリッドや使われなくなった貯蔵タンクを利用できます。しかし、海上での長距離輸送または大量輸送の場合は、水素を液化したり、アンモニアに変換したりする必要があり、そのために、新しい船舶やターミナル、クラッキング設備等が必要になる可能性があります(図表19)。同様に、CO₂をeメタノール等の合成燃料の生産者に輸送、貯蔵するための新しいインフラも必要となります。

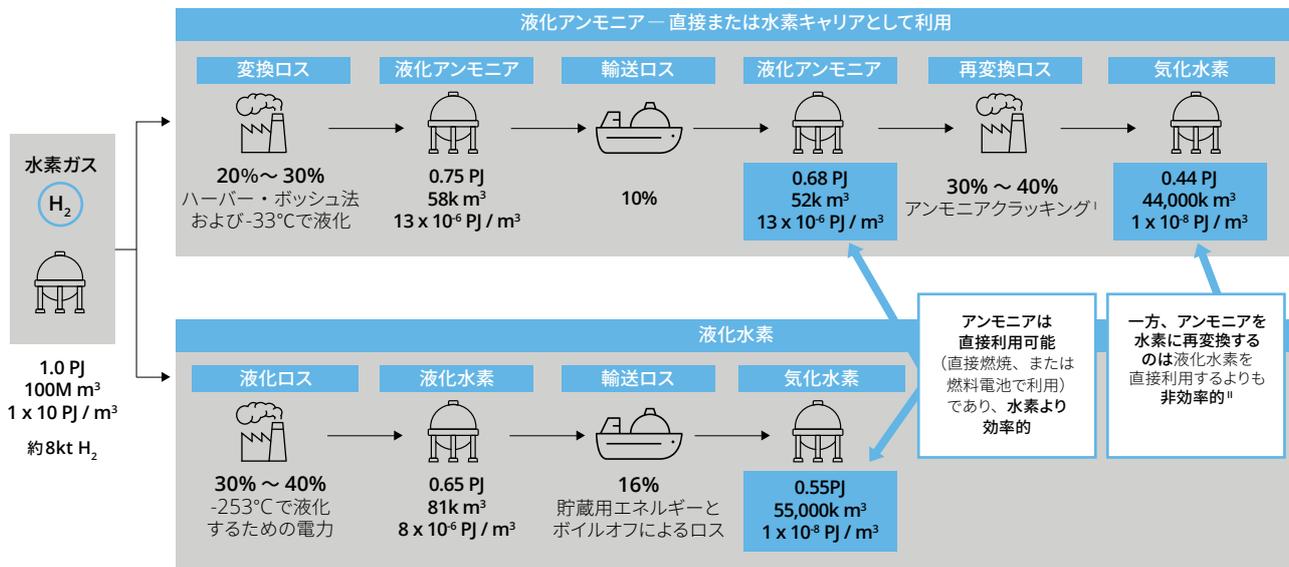
インフラは運輸部門でも大きな役割を果たします。水素ステーション、充電ステーション、船舶燃料やSAFの積込基地を開発するために投資が必要になります。例えば現在、大型車両による貨物輸送用に世界で約200の水素ステーションが稼働しています(圧力350bar)。

その重要性にもかかわらず、現在**インフラの開発**にはほとんど注意が向けられていません。グリッドの改良や新しいパイプラインに関する話題はしばらくの間続いていましたが、ほぼ行動に移されていません。これは、水素を潜在的なオフテイカーに輸送する方法を知らない中東のサプライヤー等、供給側、オフテイカーのいずれにとってもリスクを増大させ、進展を遅らせます。

インフラへの投資に興味を示している民間企業もあり、官民連携(PPP)等を通じたコラボレーションが開発を促進させます(第2.5章参照)。

一方、再生可能エネルギー電源とグリッドの容量を増加させるために、供給側の投資も必要です。例えば、2030年に予想されるグリーン水素需要¹¹を満たすためには、風力および太陽光発電で最大8.0テラワット(TW)の電源が必要となります。この値は現在稼働中の設備容量の8倍、稼働中の設備容量と公表された計画における設備容量を合計した値の4倍です。デロイトの分析では、この不足分に対する世界的な対策の一つとして、太陽光や風力ポテンシャルが豊富で、発電コストが極めて低い、中東やオーストラリア等で見られる**供給主導のハブ**を通して実現させる方法があります。ハブの詳細については第3章を参照してください。

図表 19. アンモニアと水素の比較 — 1 PJの水素を輸送する際の輸送効率一例



注： I) アンモニアのクラッキングは多くのエネルギーを消費し、500°C以上の高温を必要とする II) 再変換後の水素の利用にもマイナス面がある。(トラック等で利用する) PEM燃料電池が微量のNH₃に対しても脆弱であるため、更なる分離と純化が必要

出所：「運輸部門における水素のエネルギーキャリアとしてのアンモニアの制限」(Chatterjeeら、ACS Energy Letters 2021)、デロイト分析

2 要因と対策

2.5 コラボレーション

投資を遅らせる可能性のある体制上の問題や、組織の変革への抵抗感を払拭できる新しい商業モデルおよび事業モデルを適用したコラボレーションが、クリーン水素の製造に不可欠です。

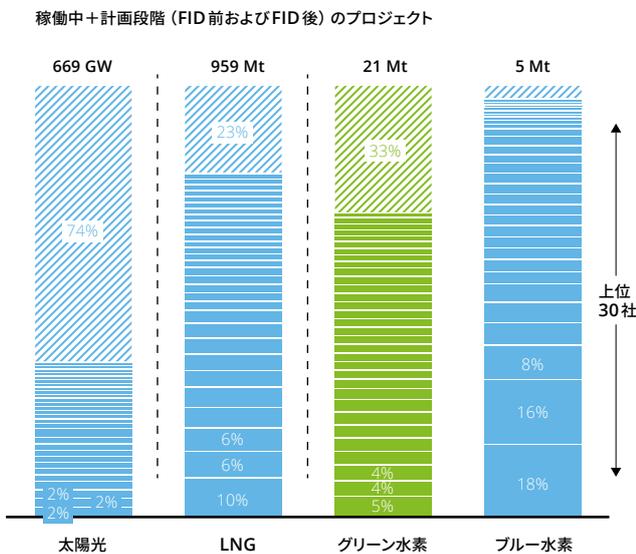
エネルギーサプライヤーとオフテイカーの提携、および政府機関、金融機関、テクノロジー企業との提携は、資本、知識、リスクの障壁の克服に役立ち、現在の停滞した市場を動かし、必要とされる大規模プロジェクトを始動させます。

クリーン水素の稼働中および公表済みプロジェクトのうち、80%は少数の企業が協力して開発していますが、エネルギーサプライヤーはバリューチェーンを超えて（例えばオフテイカーと）手を組み、また幅広いエコシステムで（例えばテクノロジー企業および投資会社と）提携し、資本、リスク、能力をシェアしています（図表20）。デロイト エネルギートランジションモニターによれば、現在、提携プロジェクトのわずか10%ほどがオフテイカーと共に開発されており、そのほとんどが複数のサプライヤー間で開発されています（図表21）。

現在のクリーン水素の供給能力は、ユーティリティ企業や国際石油会社（IOC）または国営石油会社（NOC）のような大手企業に支配されています。これらの企業は、稼働中および公表済みプロジェクトの約50%を占めています。また、資本、オフテイカーのネットワーク、および二酸化炭素の回収・貯留に必要な深い知識等を備え、大規模エネルギープロジェクトを開発した経験があります。

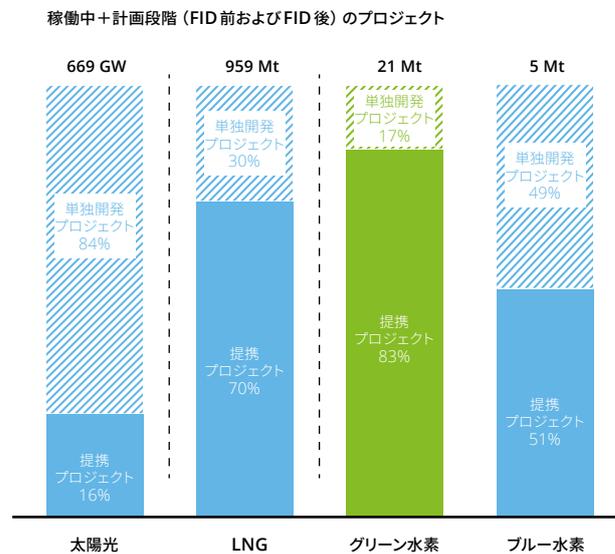
IOCとNOCは自社の製油所や化学プラントで水素の需要を生み出すことができます。加えて、新興のクリーン水素部門は、資本や技術力、イノベーションをもたらし得る新規参入企業、工業用ガス会社等、これまでにない新しいプレーヤーを引き付けています（図表22）。

図表 20. エネルギーキャリア別 上位企業への集中状況
(世界の稼働中および計画段階プロジェクトの供給能力に対する割合 (%))

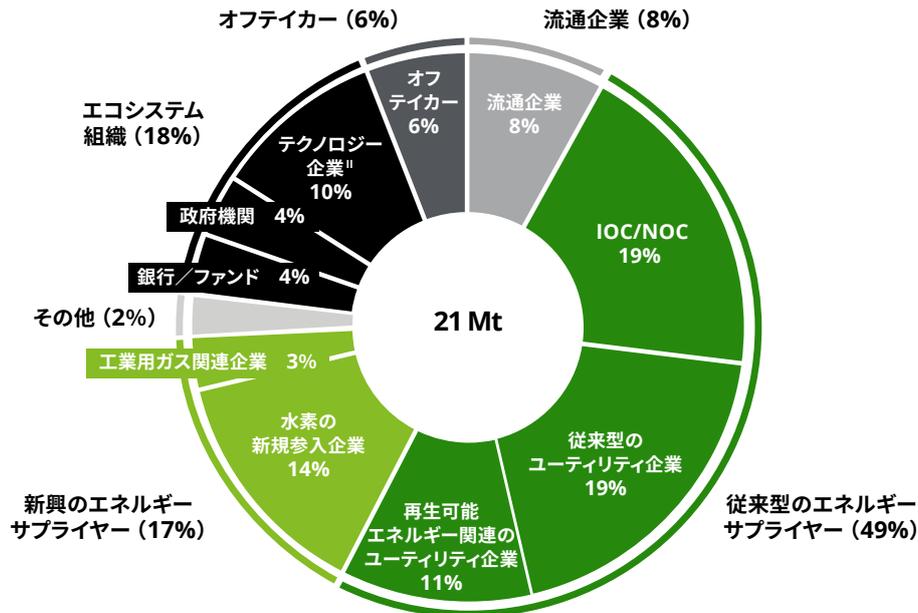


出所：デロイト エネルギートランジションモニター

図表 21. エネルギーキャリア別 提携プロジェクトと単独開発プロジェクトの割合
(世界の稼働中および計画段階プロジェクトの供給能力に対する割合 (%))



図表 22. グリーン水素の稼働中および計画段階プロジェクトの企業タイプ別供給能力¹



注： I) プロジェクトの供給能力は、出資率が明らかな場合は出資率に基づき、不明な場合は企業数で等分し、関与企業に割り当てている
 II) テクノロジー提供企業、相手先ブランド製造企業 (OEM)、建設会社、エンジニアリング企業を含む

出所：デロイト エネルギートランジションモニター

コラボレーションは変わらず重要ですが、市場が進化するにつれてその形態が変わり、提携するプレーヤーが少なくなると予想されます。現段階では、サプライヤーの大きな集団が協力して知識をもたらし価値を生み出してきましたが、多くの企業が関与することは、優先順位や意思決定のアプローチが異なる中で折り合いをつける必要があるということです。このため複雑性が増し、類い稀なプロジェクトマネジメント能力が必要で、進展を減速させ得ます。

その結果、開発の次段階では、より迅速に行動できる合理化したコラボレーションを伴うことが期待されます。LNGと同様のモデルに沿うと、製造プロジェクトではオフテイカーによるより多くの投資が期待されます。その一方で、大手には大規模なグリーン水素プロジェクトの開発力があり、引き続き主要な役割を担うと思われま

す。障壁を取り払い、必要な投資を同時に行える、サプライヤーとオフテイカーのコラボレーションの価値は、鉄鋼部門におけるバリューチェーンのカーボンニュートラル化に関するシェル-デロイトの共同研究のために実施された、クロスバリューチェーンインタビューでも明らかになりました。

[鉄鋼部門におけるバリューチェーンのカーボンニュートラル化：共に新しい道を作る](#)

しかし、単なるコラボレーションよりも更に重要なこととして、時に投資を遅らせる体制上の問題に対処できる、新しい商業モデルや事業モデル、リスクモデルの必要性があります。FIDを通過したプロジェクトが希少であることから明らかである通り、現状のように、ただ複数のプレーヤーが手を組むだけでは、バリューギャップに効率的に対処できず、プロジェクトを実現できません。それに代わり、例えば水素バリューチェーンに沿って協調または統合が進んだ**新しい事業モデル**を検討する必要があります。これにより、価値とリスクを共有し、まだ初期段階にある停滞した市場に対して積極的な投資を促すことができます (図表 23)。



「水素の導入に向けて新しい事業モデルが必要です。多くの場合、テクノロジーは問題ではありません。チャンスは、どう取組むか、どのように協力するかにかかっています。」
— 製鉄会社 VP

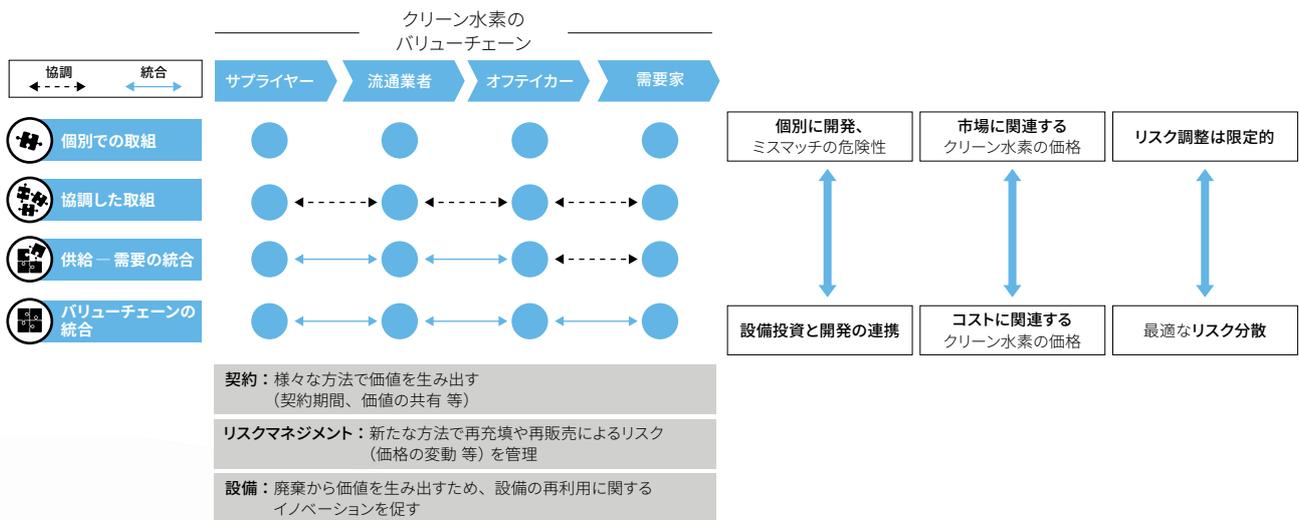
統合が進めば、商取引でより透明性のある対話や準備が行われるようになり、また、市場価格ではなくコストベースの価格が使用されるようになります。これにより助成金の必要性も下がります。更に、企業は契約、リスクマネジメント、設備のライフサイクルの観点で価値を生み出す方法について考えるようになります。契約に関しては、オフテイク契約の固定価格以外にも、バリュードライバーを考慮に入れて様々な方法（契約の期間、産業間のオフテイク契約 等）で価値を作り出すべきです。再充填や再販売による余分なリスクに対処するために、新しいリスクマネジメントアプローチが必要となり、保険会社が重要な役割を果たします。

最後に、既存のインフラには、廃棄あるいは大幅なレトロフィットが必要となるものが出てくるのが避けられないと見込まれます。企業は廃棄から価値を生み出すため、設備の再利用、および／またはリサイクルに関するイノベーションにどのように弾みをつけるかを理解する必要があります。これについては第2.4章で述べます。

このような新しい事業モデルは、「サービスとしてのトラック輸送」のような革新的なソリューションの導入を促進させることもできます。水素トラックは高価で経済的ではないため、水素トラックに投資して貨物輸送業者にリースすることを決定した企業もあります。こうすることで水素トラックの市場を生み出すことができ、入手価格も下がります。同様に鉱業に携わる企業は、低排出の船舶を購入し、他社に運用を任せることで、サプライチェーンの積極的な統合を促進しています。

コラボレーションと並んで、人材開発にも更に細心の注意が必要です。水素経済が新たな雇用を生み出すことも理由ですが、そのような人材が希少であることが水素プロジェクトを開発、稼働させる上で主な障害となり得るからです。能力開発と人材を引き付けてつなぎとめるための効果的な対策として、教育、既存の能力の上に構築するリスクリング、新たな挑戦をするスタッフが自由に行動できるようにするためのオートメーション、定年の延長等に注力すべきです。

図表 23. 事業モデルの検討



出所：デロイト分析、各部門の幹部や専門家350名以上へのインタビュー



3 実装

3.1 ハブ

水素の大規模導入を促進するために必要な条件を備えた特定の場所が成功の鍵です。ハブは水素経済に弾みをつけ、世界の既存エネルギー市場の脆弱性を軽減します。

水素の大規模導入を促進するには、第2章で述べた5つの要因とともに、ハブ、つまり次の4つを結びつける地理的なエリアの形成が求められます。

- 水素製造に十分な量で、低コストの資源
- 大規模なオフテイクー集団
- 適切な規制および政策的支援
- 規模の経済とインフラの集約を通じ、水素コストの削減に資する、供給側の積極的な意欲

ハブは、需要を十分に満たすことで地域のエネルギー市場を充足させ、また、経済的に成り立つクリーン水素に対価を支払ってくれる他の地域に余剰生産分を輸出することでグローバルな取引市場の基盤を作り上げます。

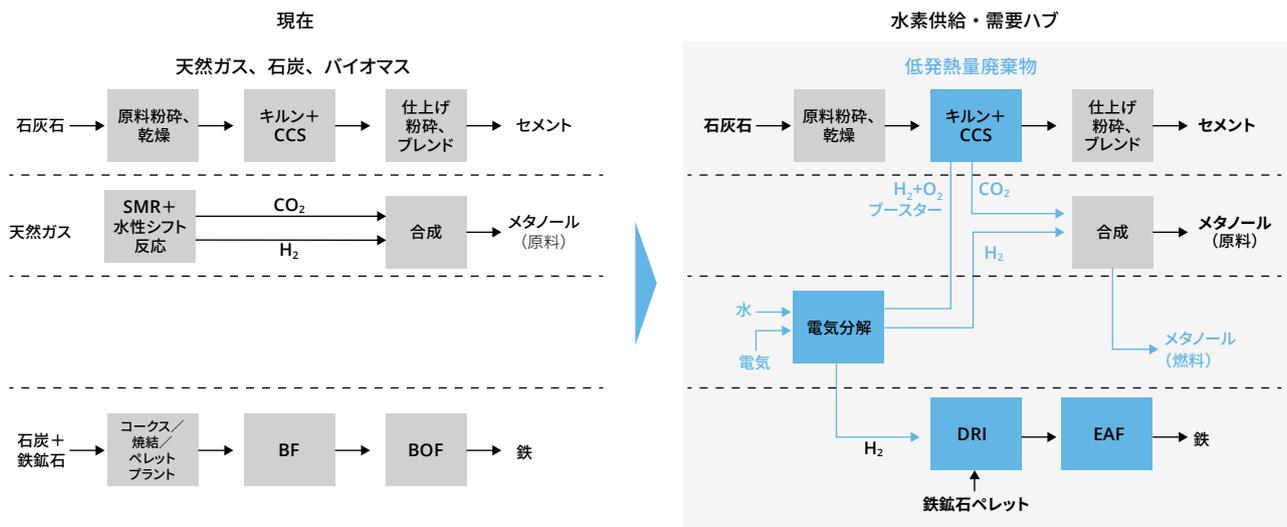
現在新たに形成されているハブは、供給主導、需要主導、またはその両方に分類できます。このうち、供給・需要の両方で主導するタイプのハブは、サプライチェーンの形成とコスト削減の両側面により、地域規模のクリーン水素導入を促進する鍵となるでしょう。このタイプのハブは、総じて次のような地域にあります。地元の巨大産業の需要を満たす十分な水素を供給できる地域、需要が密集しており、シンプルで低コストの輸送で済む地域、政府が透明性のある規制、基準と枠組み、助成金を通して供給・需要の両方の構築を支援する意欲のある地域です。

これらの要素の中でも、コラボレーションへの意欲は、新しい事業モデルの構築、水素の採用の支持、市場アクセスの許可、部門を超えた設備の共有等、多くの活動で極めて重要です。例えば、電解槽の導入はセメントやメタノール、鉄鋼の製造に相乗効果を生み、新しい提携モデルや商業モデルを創出する土壌となります(図表24)。

デロイトの分析では、多くの場合、供給主導のハブは中東や米国メキシコ湾岸等、製造能力が地域の需要を超えるような場所にあります。あるいは、代替エネルギー不足や全体的な供給不足の地域へ供給する場合のように、経済的状况を背景として収益性の高い輸出市場が形成されているような場所にもあります。しかし、こうした輸出が持つ可能性は、社会的に認められるか、また、水素が地域の社会福祉を改善するために利用されるという期待があるか等、より広い文脈で考慮されるべきです。そのため、政府はクリーン水素から得られる社会的利益と経済的利益の適切なバランスを取る方法を検討しています。

「私たちは単なる燃料移行でなく、真のエネルギー移行を望んでいますー例えば、地域社会にあまり利益をもたらさない、現在のような化石燃料の輸出世界と同じ状況になることを望んでいません。」ーエネルギーシステム専門の大学教授

図表24. 特定の部門におけるカーボンニュートラル化の道筋ー模式図



出所：デロイト分析、各部門の幹部や専門家350名以上へのインタビュー

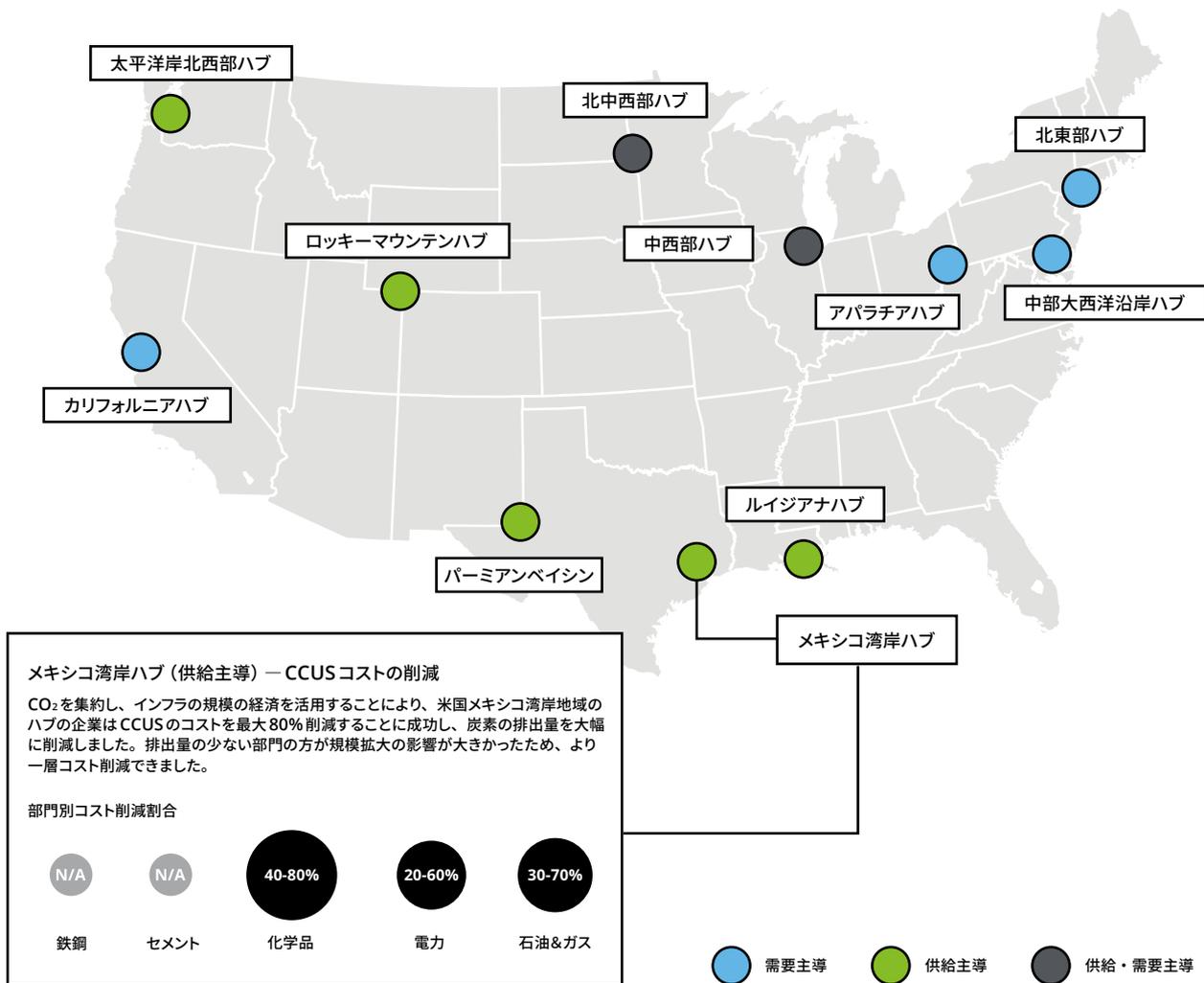
また、デロイトは、需要主導のハブは、再生可能エネルギーや天然ガス、二酸化炭素貯蔵量が不十分で、構造的に地域内の水素供給量が少ない地域で生まれている傾向があると分析しています。例えば、日本と韓国はLNGへの依存からクリーン水素に切り替える流れの中で小規模の現地生産用に若干の水素製造能力を備えています。このような動きの初期段階では、最初にサプライヤーとオフテイカーの間で取引が発生し、それと並んで、需要地とオフテイカーが供給能力の構築に投資することが見込まれます。

デロイトの最近のハブに関するビジネス事例研究では、ハブの一員として参加した場合、単独での投資と比較し、同じ製造量、

同じ排出削減を達成しながら、企業のインフラコストを最大95%削減できることが分かりました(図表25)。ハブには、エコシステム内で一時には以前の競合と一協力して場合によってはインフラまでも共有し、ハブのメンバーの中で「協力しながら競争する(co-opetition)」感覚を築く、新しい方法が必要です。それにより事業が推進され、イノベーションを促進し、相互の利益を拡大します。

「ニワトリが先か卵が先か、つまり設備とインフラ、どちらが先に手に入るか等と考えずにコラボレーションを始め、エコシステムを実現させましょう。」— 運送会社 CEO

図表 25. 米国で生まれたハブ一例



出所：デロイト分析、各部門の幹部や専門家350名以上へのインタビュー

日本のコンサルタントの見解

はじめに

本レポートでは欧米デロイトの視点から、進展しつつある水素利活用を更に促進させるために必要な5つの要素を提示した上で、水素の本格的な社会実装に向けて当該要素をある一つの地域に集積させる「ハブ」という考え方を紹介しています。

欧州では再エネ由来の水素を産業や運輸部門（石油精製、鉄鋼、モビリティ等）で利用するモデルが想定されている一方で、米国ではCCUSと水素をセットとし、水素需要又は供給能力が豊富なハブを構成することで双方の導入を進めようとしています。また米国は、将来的に水素の輸出国になることを構想しています。欧米に対し日本では、発電向け水素（特に輸入水素）が将来的に大勢を占める可能性があるという点や、水素及びアンモニア需要創出と大規模サプライチェーン構築のための拠点を整備する方向で検討している点で、相違点が存在します。ただし、水素の大規模導入に必要な5つの要素やそのポイント、要素をある地域に集積させるハブという欧米の考え方そのもの等は、日本において参考に資する情報だと言えます。そうした情報をベースに、ここでは現在既に検討が進んでいる日本型の水素の地域集積の類型について整理した上で、日本で実証等の取組を加速し社会実装を進めていく上での要件等を日本型の類型も踏まえ、2050年までの長期視点も考慮し検討したいと思います。

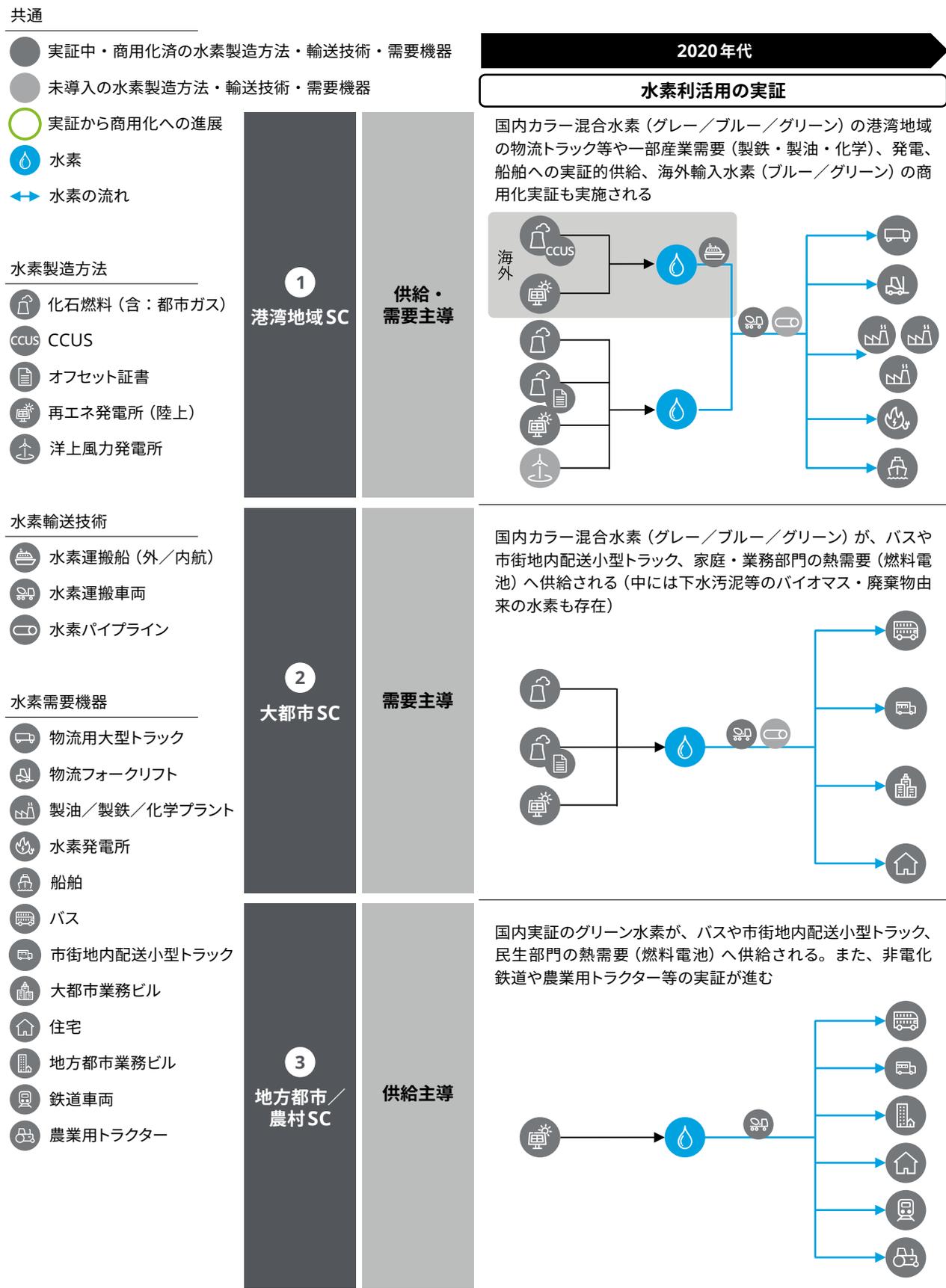
日本型の水素の地域集積：水素サプライチェーン

日本政府における水素の拠点整備としては、3つの類型が検討されています：大規模発電利用型、多産業集積型、地域再エネ生産型です。政府と一部差異はあるものの、日本における水素の地域集積「水素サプライチェーン（以降、水素SC）」は、主に3つに整理できると当社は考えています：①港湾地域SC、②大都市SC、③地方都市／農村SCです。レポート本編では米国内における水素のハブを、「供給主導」、「需要主導」、「供給・需要主導」という3つの軸で整理しています。こちらの軸を考慮しながら、日本での水素SCが現在から将来にかけてそれぞれどのように変遷し、社会実装されていくのか、そのイメージを整理します。

1. 港湾地域SCは、港湾の物流トラックや産業部門・発電部門等の水素需要に対し足元はグレー／ブルー／グリーンの混合水素が供給され、将来は海外から大規模・大量に輸入されたブルー・グリーン水素及び国内洋上風力等由来のグリーン水素が供給されるSCです。大型需要と大規模水素供給がつながるモデルであることから、本編における供給・需要主導に該当します。また、発電所とコンビナートは隣接していることが多いことから、日本政府で検討している大規模発電利用型と多産業集積型を統合したようなSCであると考えます。
2. 大都市SCは、市街地のバスやトラック、一部業務・家庭部門等の熱需要に対する水素利用に対し、足元はグレー／ブルー／グリーンの混合水素が供給され、将来は海外から大規模・大量に輸入されたブルー／グリーン水素や国内のグリーン水素が供給されるSCです。再エネ適地等から遠く水素供給源が限られていることに比し需要は一定量存在することから、本編における需要主導に該当します。
3. 地方都市／農村SCは、市街地のバスやトラック、一部業務・家庭部門等の熱需要、電化が難しい機器（農業用トラクター等）における水素需要に対し、2020年代から将来にわたって、地方に存在する再エネ電源由来のグリーン水素を供給するSCです。再エネ適地が豊富な地域での水素製造がけん引するモデルであることから、本編における供給主導に該当します。また、こちらは日本政府の地域再エネ生産型と類似するSCであると考えます。

これら3つのSCについて、2020年代にはそれぞれで実証が始まり、2030年代には商用化が進む中各地で水素利活用が定着し、2040年頃にはそれぞれのSCを繋ぐ国内の輸送網（内航船や都市間パイプライン）も整備され、水素が一般的に利用される社会になるのではないかと考えられます。（[図表26](#)）

図表 26. 日本型ハブの時間軸での変遷イメージ

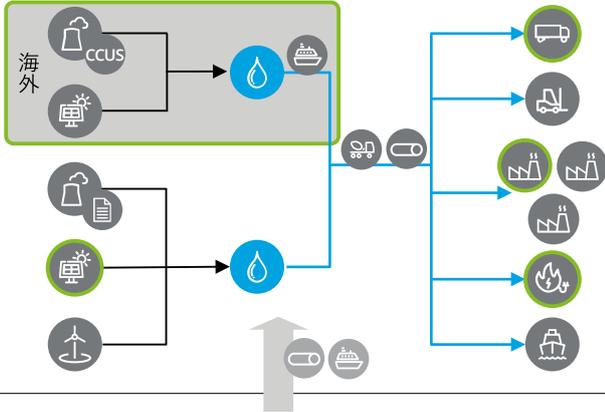


出所：デロイト トーマツ コンサルティング作成

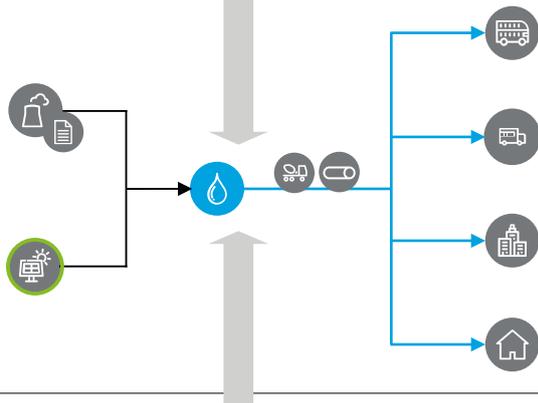
2030年代

水素利活用の商用化

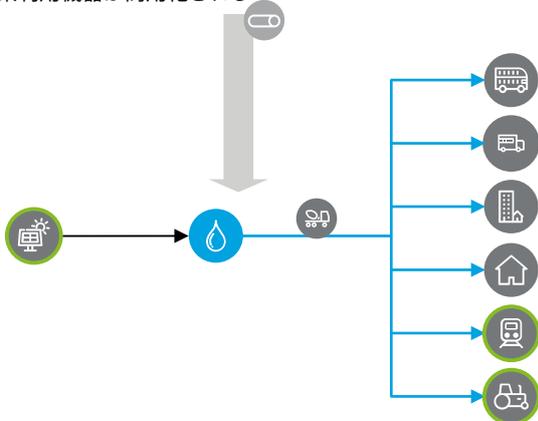
海外水素（ブルー／グリーン）が商用輸入され、港湾地域の物流車両・製油・発電に供給され、産業・船舶の実証にも利用される。洋上風力導入地域は当該発電由来のグリーン水素も供給される。輸送方法にパイプラインが登場する



国内水素のうちグリーンが商用化し、水素源がブルー／グリーンに集約されはじめ、都市内輸送法についてパイプラインが登場する



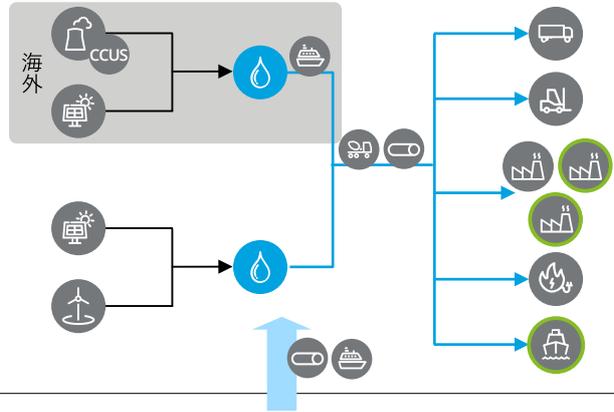
国内グリーン水素製造や、非電化鉄道や農業用トラクター等の水素利用機器が商用化される



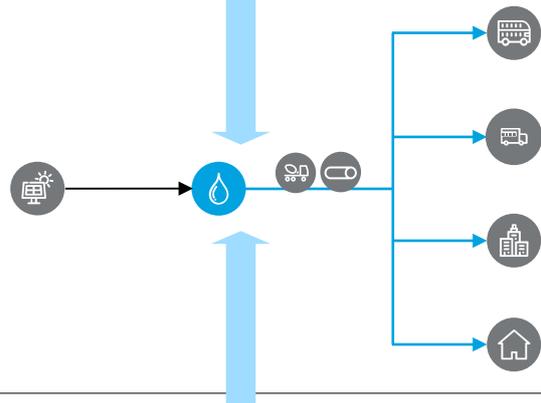
2040年代

水素社会の定着

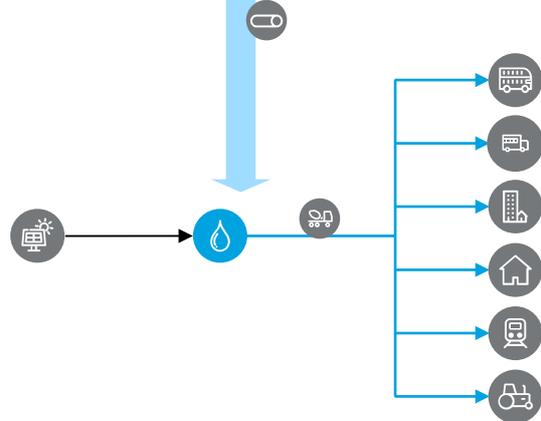
産業部門（鉄鋼・化学での水素利用）及び船舶での利用が商用化される。2030年代に構築された水素サプライチェーンを都市間パイプラインや内航船を通じて別需要地・内航港湾に展開される



都市間パイプライン等を通じて、別地域からの水素供給を受け入れる（水素供給余剰がある場合は逆も然り）



都市間パイプライン等を通じて別需要地に水素供給が展開される



日本での実装に向けて

日本では現時点で、各地で既の実証等の取組が多数進んでいます（取組の一部を前述の水素SCの3類型に紐づけ整理したものが図表27です）。

2050年を見据えたハブでの取組継続の必要性

これらの取組が2050年を見据えて継続されることの重要性を、改めて言及したいと思います。これは前述した水素SCの3つの類型に対して共通して言えることです。

本編でも述べられている通り、ハブにより水素導入が促進されることが期待されます。水素が広範に導入された社会の姿は、現在の化石資源を前提に最適化されたものとは異なります。また、時間軸の観点から見ても、水素に関連する事業の本格化は2030年以降であり、図表26でも示した通り、事業ごとに実証から商用化へ到達する時間軸は異なっており、2050年代まで水素を取り巻く環境は変化していきます。そのため、水素需給に関わる各プレイヤー（水素供給技術や需要機器のメーカー、自治体等）が協調し、実証等の取組を継続的に重ねていくことが必要です。

取組の継続は成功の果実をもたらす得ます。行政（国や自治体）の視点では水素に関わる新たな産業の振興につながり、企業の視点ではイノベーションや新規事業の創出につながる可能性があります。競争戦略論の大家であるマイケル・E・ポーター教授は、その著書¹²の中で「クラスター」を「ある特定の分野に属し、

共通性と補完性によって結ばれた、互いに関連する企業と機関から成る、地理的に近接した集団である」と定義し、クラスターはイノベーションを刺激し、新規事業が生まれやすいと整理しています。本編で整理されているハブ（水素製造に十分な量で低コストの資源、一定規模以上のオフテイカー、法的支援等の組合せ及び地理的な集積）はクラスターの概念と共通性があります。ハブの形成においては、金融機関・投資家等のプレイヤーが果たす役割も重要であると考えます。資金面でのリスク・リターンを分散し担えるプレイヤーとのコラボレーションによって、産業のエコシステムの成熟が進み、事業規模の拡大・産業振興が進むことも期待できます。したがって、日本の水素SCにおける継続的な取組は、連続的・有機的な産業集積・新規事業創出、更にエコシステム成熟の実現につながると考えられます。加えてこれらの成功の果実は2050年まで段階的に得られる（例：発電は2030年代だが鉄鋼分野は2040年代）ため、長期視点での継続が必要です。

なお、本編の第2.5章（コラボレーション）では実証等の取組が進展し、次の段階に移行する頃の実証の結果等も含めより前向きなプレイヤー同士が連携する構図になるため、プレイヤー数が少なくなる可能性を示唆しています。こうした状況を回避するために、取組を展開するプレイヤーは、取組の位置づけや実証の出口（＝事業化時のビジネスモデル）を必要に応じて適宜定義し直し、2030年頃に得られる「果実」を再確認しても良いかもしれません。

図表27. 日本における水素の実証取組事例（一部）



出所：環境省ホームページ (https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/demonstration-business/) より
デロイトトーマツ コンサルティング作成

時間軸に応じた政府支援（規制整備・緩和等）の必要性

ハブでの取組を継続することの必要性と共に日本向けの視点として、水素インフラ導入を後押しする上でハブに必要な5つの要素の中でも特に政府支援、それも時間軸に応じた支援の重要性について強調したいと思います。政府支援は、水素SCの3類型に対して共通して重要です。

日本政府では水素の値差支援や水素事業を展開するための規制等が議論されています。値差支援については炭素集約度に応じた支援を行うことを議論しており、その考え方は本編で述べられている「水素排出原単位指数（HEII）」と共通しています。「日本型の水素の地域集積」や図表26でも記載した通り、2020年代の実証に用いられる水素は、その製造量の少なさから必ずしもグリーン／ブルー／グレーと単一の色に分類されるような水素ではありません。一方で、炭素集約度に応じた支援が実現すれば、黎明期から低炭素水素の導入拡大も可能となるため、このような値差支援を含んだ政府支援パッケージ（市場設計・規制誘導措置）が早期かつ柔軟に導入されることで、日本での取組が加速することが期待されます。

このような政府支援のパッケージが、2050年を見据えて段階的に進化していくことの重要性に触れたいと思います。図表26や本編の図表3・16で示されている通り、水素を利用する機器の成熟度や商用化時期には差異があります（例：モビリティや発電は2020～2030年代だが、鉄鋼や船舶は2040年代）。この点は、水素に関する技術開発や事業が起こっていく時間軸が、水素という広い産業の中でも分野ごとに違うことを示しています。水素に関する政府支援も、例えば当初はモビリティや発電分野から始め、これらが商用化後は支援を低減し技術開発や商用化が長期的時間軸で進む鉄鋼や船舶等へ支援を移行していくことが必要でしょう。このように注力すべき分野が時間軸で異なるため、政府支援の具体メニューは分野ごとに最適化することが必要でしょう。例えば値差支援においては、発電と鉄鋼における化石燃料と水素のパリティー価格は違うため、支援額を変える必要があります（図表11）。時間軸上での水素を取り巻く状況変化に応じて政策支援の対象やその具体メニューも変化させていく必要があります。

とはいえ、まずは水素関連の取組を足元で加速するために、日本政府で現在議論されている政府支援パッケージが少しでも早く導入されることを期待します。導入されることにより企業が事業として取組み始めることから、導入はあくまでスタートラインでありそこから初めて競争やイノベーションが誘発されるでしょう。

最後に

ここまで日本型のハブ、そして日本型ハブの将来の姿を整理した上で、日本において水素が社会実装されるために必要なことを整理してきました。日本型のハブの3つの類型には、港湾起点のSC以外にも地方都市／農村を起点としたものもありました。これは化石資源の多くを諸外国より輸入し、港湾を起点に多くのSCが最適化された現在のエネルギーSCとは異なるモデルも、水素においてはあり得ることを示しています。更に言えば、一定程度日本のエネルギー需要が国内生産の水素で賄われる可能性があることに加え、2030年以降の長期視点に立ち洋上風力等の導入を考慮した場合、国産水素が占める割合は更に増えるかもしれません。

ここから長い年月をかけ水素の社会実装は進み、時間軸に応じて徐々に変化していきます。日本には3つのSCに関連する水素の輸送、水素発電、燃料電池等の技術を有する企業が多数存在し、それら企業による更なる技術開発も着実に行われています。例えば、燃料電池車を世界に先駆けて市場に展開した自動車OEMや液化水素運搬船の開発でも世界をリードしている企業は、その代表です。「日本型の水素の地域集積」で描いた将来の姿の実現は容易ではありませんが、水素戦略を世界に先駆けて提示した日本政府と日本企業が共に手を取り合い、新たなイノベーションをリードすることを期待しています。

執筆者 (和訳版)

和訳監修・執筆者

森田 竜史

執行役員／パートナー
デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
tatmorita@tohatsu.co.jp

越智 崇充

ディレクター
デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
takochi@tohatsu.co.jp

村野 晋介

シニアマネジャー
デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
smurano@tohatsu.co.jp

岩國 知彦

シニアスペシャリストリード
デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
tiwakuni@tohatsu.co.jp

岩井 由香

シニアコンサルタント
デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
yuiwai@tohatsu.co.jp

大倉 一郎

執行役員／パートナー
デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
iokura@tohatsu.co.jp

吉見 望

ディレクター
デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
nyoshimi@tohatsu.co.jp

河原 竜太

シニアマネジャー
デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
ryokawahara@tohatsu.co.jp

大室 理人

マネジャー
デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
momuro@tohatsu.co.jp

田中 寛樹

マネジャー
デロイト トーマツ グループ合同会社
hiroki.tanaka@tohatsu.co.jp

問い合わせ先

デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
エネルギーユニット マーケティング事務局
jpdcpu_rkmr@tohatsu.co.jp

執筆者 (原文)

主な執筆者

当社のインサイトを活用し、変化を生かした企業活動の実現をご支援いたします。貴社の課題解決に役立つ斬新なアイデアをお探しでしたら、ぜひお問い合わせください。



Tarek Helmi
パートナー
"Future of Energy" リード
デロイト南北ヨーロッパ オランダ
thelmi@deloitte.nl



Daniel Grosvenor
パートナー
デロイト南北ヨーロッパ 英国
dgrosvenor@deloitte.co.uk



Geoff Tuff
DC プリンシパル
資源・エネルギー・生産財の
持続可能性・気候変動リーダー
デロイトコンサルティング LLP
gtuff@deloitte.com



Leon Pieters
パートナー
デロイトグローバル消費財リーダー
leonpieters@deloitte.nl



Stanley Porter
DC プリンシパル
グローバル資源・エネルギー・生産財リーダー
デロイトコンサルティング LLP
sporter@deloitte.com



Wendy Rudder
パートナー
デロイト南北ヨーロッパ オランダ
wrudder@deloitte.nl

主な寄稿者

EMEA (ヨーロッパ・中東・アフリカ)

Eric Vennix - evennix@deloitte.nl
Peter Sanders - psanders@deloitte.nl
Vincent Oomes - voomes@deloitte.nl
Jeroen van der Wal - jvanderWal@deloitte.nl
Michal Arament - marament@deloitte.nl
Matthew Guest - mguest@deloitte.co.uk
Tom Cope - tcope@deloitte.co.uk
Laureano Alvarez - jalvarez@monitordeloitte.es
Johannes Trüby - jtruby@deloitte.fr
Sebastien Douguet - sdouguet@deloitte.fr
Eline Brugman - ebrugman@deloitte.com
Bart Cornelissen - bpcornelissen@deloitte.com
Jacek Guzek - jguzek@deloitte.co.za
Benjamin Combes - bcombes@deloitte.co.uk
Thomas Schlaak - tschlaak@deloitte.de

南北アメリカ

Kate Hardin - khardin@deloitte.com
Shari Boyd - shboyd@deloitte.com
SJ Maxted - smaxted@deloitte.com

Sharene Williams - sharwilliams@deloitte.com
Adriaan Davidse - adavidse@deloitte.ca
Cesar Garcia Brena - cesgarcia@deloittemx.com
Carlos Salvador de Regules - cderegules@deloittemx.com
Arvind Ramakrishnan - arramakrishnan@deloitte.ca
John England - jengland@deloitte.com
John Peto - jpeto@deloitte.com
Andrew Swart - aswart@deloitte.ca
Jurgen Beier - jbeier@deloitte.ca

アジア太平洋

Chris Lin - chriskylin@deloitte.com.cn
John O'Brien - johnobrien@deloitte.com.au
Matt Judkins - mjudkins@deloitte.com.au
Will Symons - wsymons@deloitte.com.au
Shubhranshu Patnaik - spatnaik@deloitte.com
Yong Ho Choi - yongchoi@deloitte.com
Yotaro Akamine - yotaro.akamine@tohmatsu.co.jp
Ian Sanders - iasanders@deloitte.au

謝辞

本レポートの作成にあたり、ご協力いただきました方々に感謝申し上げます。

Mohamed Chahbari - mchahbari@deloitte.nl
Michal Arament - marament@deloitte.nl
Rik Schuppers - rschuppers@deloitte.nl
Oscar Kraan - okraan@deloitte.nl
Koen Jeene - kjeene@deloitte.nl

Elena Pavlenko - epavlenko@deloitte.nl
Ramon Klein Velderman - rkleinvelderman@deloitte.nl
Alex Beutel - abeutel@deloitte.com
Matt Floyd - mafloyd@deloitte.com
Tom Cope - tcope@deloitte.co.uk

ツール

デロイトのツール



Deloitte Energy Transition Monitor

世界のあらゆる部門やエネルギー媒体（クリーン水素を含む）を網羅した、30,000以上のエネルギー移行の需要・供給イニシアチブに関するデータベース。関与企業、成熟段階、スケジュール、供給能力、拠点に関する見解を含みます。



Deloitte European Electricity Model (DEEM)

欧州の電力システムに関する特別仕様の最適化モデル。抜本的な転換（政策変更、技術のブレークスルー等）が電力料金、資産価値、投資、企業戦略に与える影響を評価できます。



Deloitte Energy System Model (ESM)

ESMは排出量や一次エネルギー供給への影響を含め、エネルギーキャリア、部門、地域、企業によるエネルギー需要シナリオを予測します。この予測は、妥当と思われるカーボンニュートラル実現への道筋に関する企業の計画や技術・経済モデルに基づくものです。



Hydrogen Pathway Explorer Model (HyPE)

グリーン水素・クリーン水素製造のポテンシャル、技術の選択、投資、世界の国々との取引について評価する特別仕様の最適化モデル。



Deloitte Decarbonisation Solution

部門やビジネスに合わせたインタラクティブモジュールのスイート。現時点および将来の排出フットプリントの集計、排出量削減目標の特定、排出量低減プロジェクトの評価、ポートフォリオの最適化、短期・長期リスク評価、計画に対するレポート等をサポートします。



Deloitte Applied Research on Energy model (DARE)

EU域内27カ国およびその他国々のエネルギーシステム最適化モデル。エネルギーシステム全体の技術経済モデリングが可能であり、エネルギー移行の過程に伴う主な不確実性について定量的なインサイトを提供し、EU加盟27カ国それぞれの経済活動を幅広く考慮して主要な部門のエネルギー移行の道筋を提供します。

脚注

- 1 IEA「2050年までのネットゼロ」(IEA (パリ)、2021年5月) <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- 2 欧州委員会エネルギー総局 Jan Cihlar、Ainhua Villar Lejarreta、Anthony Wangら「欧州における水素の製造：コストと主な便益の概要」(欧州委員会出版局、2020年7月) <https://data.europa.eu/doi/10.2833/122757>
- 3 IEA「2050年までのネットゼロ」(IEA (パリ)、2021年5月) <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- 4 IEA「2050年までのネットゼロ」(IEA (パリ)、2021年5月) <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- 5 IEA「2050年までのネットゼロ」(IEA (パリ)、2021年5月) <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- 6 主に自動車、機械、家電で利用される
- 7 デロイト エネルギーtransitionモニター
- 8 IEAの「2050年までのネットゼロ・エミッション」(NZE) シナリオに掲載されたEUの天然ガス価格の見通し
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>
- 9 出所：'[Absolutely crucial](#)' | [Portugal scrapping mandatory environmental assessments for green hydrogen projects](#)
| [Hydrogen news and intelligence \(hydrogeninsight.com\)](#)
- 10 デロイト エネルギーtransitionモニター
- 11 IEAの「2050年までのネットゼロ・エミッション」(NZE) シナリオ
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>
- 12 Porter, M. E.、「On Competition : Updated and Expanded Edition」、Harvard Business Review Press、2008年(竹内弘高監訳、『[新版]競争戦略論Ⅰ・Ⅱ』、ダイヤモンド社、2018年)

Deloitte.

デロイト トーマツ

デロイト トーマツ グループは、日本におけるデロイト アジア パシフィック リミテッドおよびデロイトネットワークのメンバーであるデロイト トーマツ 合同会社ならびにそのグループ法人（有限責任監査法人トーマツ、デロイト トーマツ コンサルティング 合同会社、デロイト トーマツ ファイナンシャル アドバイザリー 合同会社、デロイト トーマツ 税理士 法人、DT 弁護士 法人およびデロイト トーマツ グループ 合同会社を含む）の総称です。デロイト トーマツ グループは、日本で最大級のプロフェッショナルグループのひとつであり、各法人がそれぞれの適用法令に従い、監査・保証業務、リスクアドバイザリー、コンサルティング、ファイナンシャル アドバイザリー、税務、法務等を提供しています。また、国内約30都市に約1万7千名の専門家を擁し、多国籍企業や主要な日本企業をクライアントとしています。詳細はデロイト トーマツ グループ Web サイト (www.deloitte.com/jp) をご覧ください。

Deloitte (デロイト) とは、デロイト トウシュ トーマツ リミテッド (“DTTL”)、そのグローバルネットワーク組織を構成するメンバーファームおよびそれらの関係法人（総称して “デロイト ネットワーク”) のひとつまたは複数を指します。DTTL (または “Deloitte Global”) ならびに各メンバーファームおよび関係法人はそれぞれ法的に独立した別個の組織体であり、第三者に関して相互に義務を課しまたは拘束させることはありません。DTTL および DTTL の各メンバーファームならびに関係法人は、自らの作為および不作為についてのみ責任を負い、互いに他のファームまたは関係法人の作為および不作為について責任を負うものではありません。DTTL はクライアントへのサービス提供を行いません。詳細は www.deloitte.com/jp/about をご覧ください。デロイト アジア パシフィック リミテッドは DTTL のメンバーファームであり、保証有限責任会社です。デロイト アジア パシフィック リミテッドのメンバーおよびそれらの関係法人は、それぞれ法的に独立した別個の組織体であり、アジア パシフィック における 100 を超える都市（オーストラリア、バンコク、北京、ベンガルール、ハノイ、香港、ジャカルタ、クアラルンプール、マニラ、メルボルン、ムンバイ、ニューデリー、大阪、ソウル、上海、シンガポール、シドニー、台北、東京を含む）にてサービスを提供しています。

Deloitte (デロイト) は、監査・保証業務、コンサルティング、ファイナンシャル アドバイザリー、リスクアドバイザリー、税務、法務などに関連する最先端のサービスを、Fortune Global 500® の約9割の企業や多数のプライベート（非公開）企業を含むクライアントに提供しています。デロイトは、資本市場に対する社会的な信頼を高め、クライアントの変革と繁栄を促し、より豊かな経済、公正な社会、持続可能な世界の実現に向けて自ら率先して取り組むことを通じて、計測可能で継続性のある成果をもたらすプロフェッショナルの集団です。デロイトは、創設以来175年余りの歴史を有し、150を超える国・地域にわたって活動を展開しています。“Making an impact that matters” をパーパス（存在理由）として標榜するデロイトの約415,000名の人材の活動の詳細については、(www.deloitte.com) をご覧ください。

本資料は皆様への情報提供として一般的な情報を掲載するのみであり、DTTL、そのグローバルネットワーク組織を構成するメンバーファームおよびそれらの関係法人が本資料をもって専門的な助言やサービスを提供するものではありません。皆様の財務または事業に影響を与えるような意思決定または行動をされる前に、適切な専門家にご相談ください。本資料における情報の正確性や完全性に関して、いかなる表明、保証または確約（明示・黙示を問いません）をするものではありません。またDTTL、そのメンバーファーム、関係法人、社員・職員または代理人のいずれも、本資料に依拠した人に関係して直接または間接に発生したいかなる損失および損害に対して責任を負いません。

Member of
Deloitte Touche Tohmatsu Limited

© 2023. For information, contact Deloitte Tohmatsu Group.



IS 669126 / ISO 27001



BCMS 764479 / ISO 22301