

第16回FC-Cubicオープンシンポジウム

世界の水電解・燃料電池の動向と今後の技術開発の方向性

みずほリサーチ&テクノロジーズ

サイエンスソリューション部

2025年3月7日

ともに挑む。ともに実る。

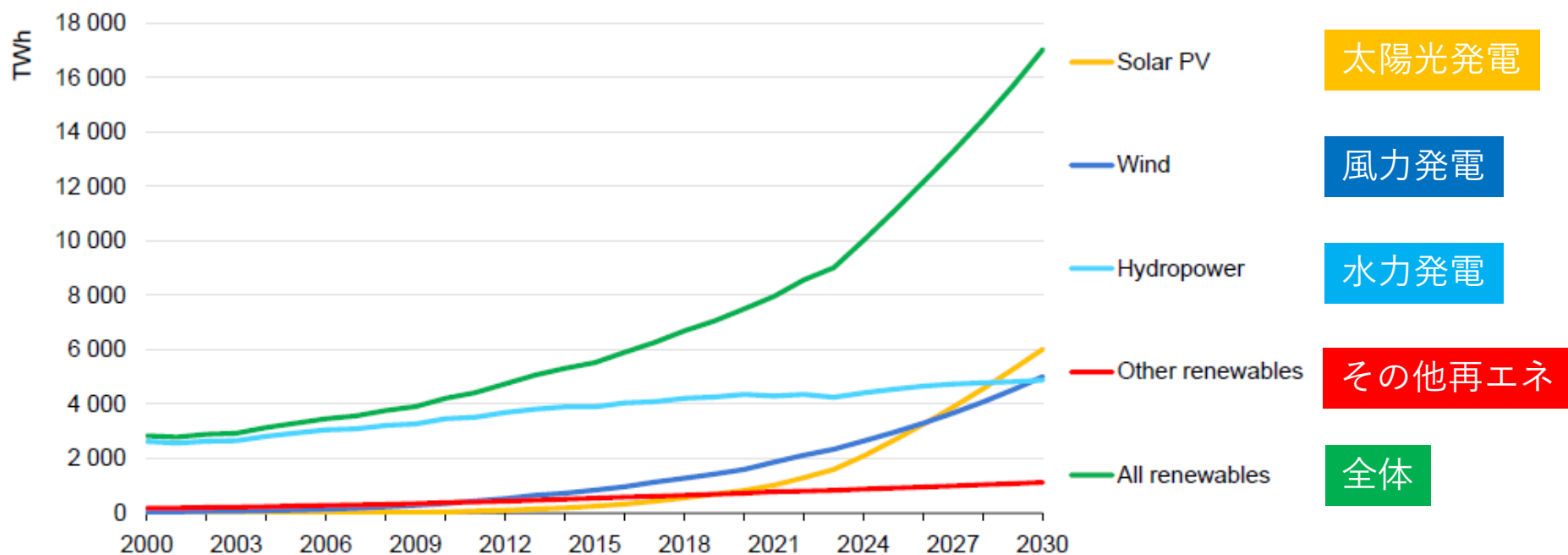


1. 水電解・燃料電池を取り巻く市場動向

【再生可能エネルギーの増加】

- 太陽光発電・風力発電を中心に再生可能エネルギーの導入量は加速度的に増加中
- 国際エネルギー機関（IEA）の最新レポートでは2030年頃には太陽光発電（PV）は3倍、風力発電は2倍の発電量、再生可能エネルギー全体でも約2倍に拡大
 - ー 再生可能エネルギーを活用したグリーン水素製造と様々な利用への期待

再生可能エネルギーの発電量の推移（2000-2030：予測）

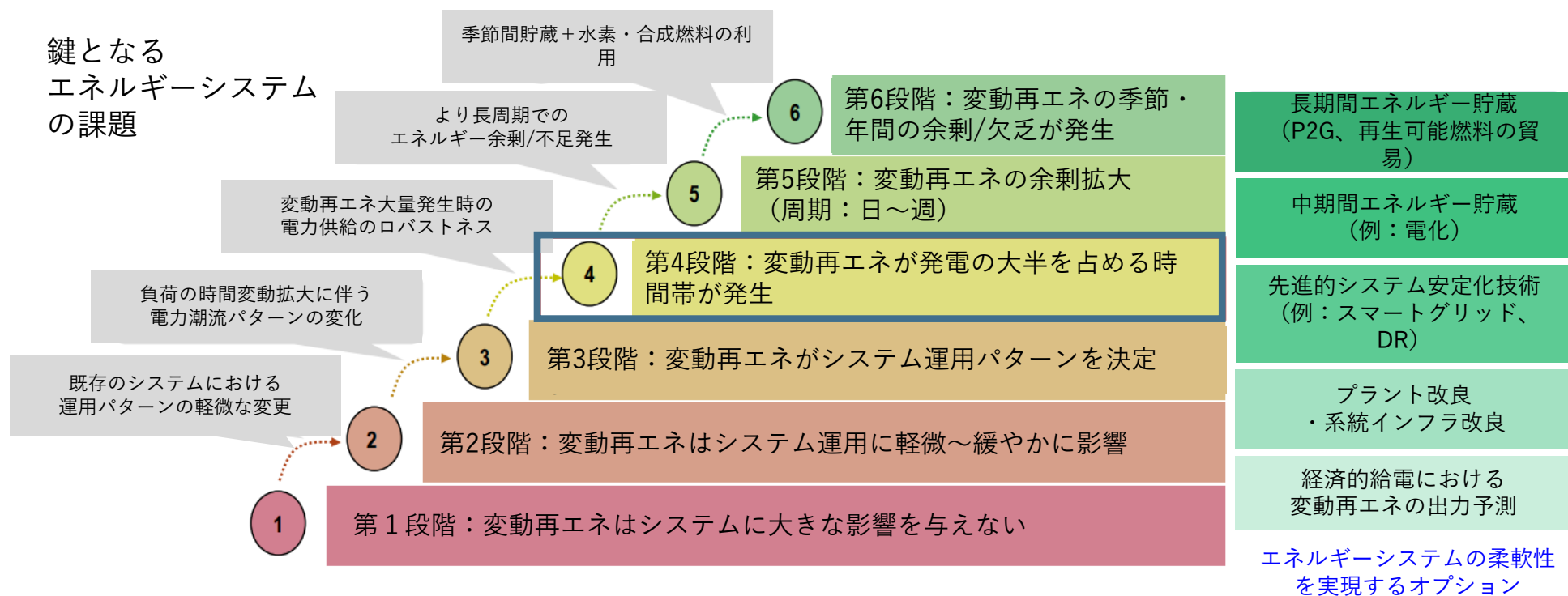


【出所】 IEA, “Renewables 2024 Analysis and forecast to 2030” (2024)

【将来のエネルギーシステムの要請】

- 時間変動する再生可能エネルギーの普及に伴い電力需給アンバランスが増加、エネルギー貯蔵技術が重要性を増す
- 電力供給側での貯蔵・転換と、電化困難なエネルギー需要家の脱炭素化を結びつける「セクターカップリング」の手段が将来の脱炭素化エネルギーシステムでは求められており、「水素」および「水素由来燃料」が脚光を浴びている
- 今後、電力システムを介した再エネ活用として水電解の付加価値（系統混雑緩和、調整力提供等）を最大化するエネルギーシステムの構築が重要（水電解装置をはじめ接続機器と調和した電力システムへの移行）

変動再生可能エネルギー増加に伴いエネルギーシステムに求められる柔軟性

鍵となる
エネルギーシステム
の課題

【出所】 IEA, "World Energy Outlook 2018"に基づき当社作成

- ロシアのウクライナ侵攻を背景に、欧州委員会はエネルギー転換を加速する政策「REPowerEU」を2022年発表、ロシア産の天然ガス脱却を目指す中で水素の役割が大きく拡大
- 欧州にとどまらず、**脱炭素化へのエネルギー転換と自国のエネルギー自給の両立手段**として米国やインドなど、自国内に豊富な水素製造ポテンシャルを持つ国でも水素へ注目が集まっている
- 水素をはじめ、脱炭素化に向けたエネルギー技術はこれらの環境の下で各国の戦略分野となっており、**欧米は自国の経済安全保障・産業保護・育成を意識した政策を発表、水素市場のリードを目指す**

EUの産業政策例 「ネットゼロ産業法案」

- ネットゼロ技術として以下8分野（電解・燃料電池含む）のEU域内でのスケールアップを支援、**2030年の年間生産量の少なくとも4割をEU域内生産・供給することを目指す**

対象（ネットゼロ技術）	支援策
太陽光・太陽熱エネルギー	・ 規制サンドボックス設置でのイノベーション加速 ・ 許認可手続きの短縮化 ・ ネットゼロ技術調達先の多角化（レジリエンスへ貢献） ・ 2030年までにCO₂の圧入能力を5000万トン/年とする ・ ネットゼロ・ヨーロッパプラットフォーム設立（情報交換、スキル強化）
陸上風力・洋上再エネ	
バッテリー/蓄電	
ヒートポンプ・地熱	
電解装置・燃料電池	
持続可能バイオガス/バイオメタン	
CO ₂ 分離回収・貯留	
系統技術	

【出所】 European Commission” Factsheet: Net Zero Industry Act”に基づき当社作成

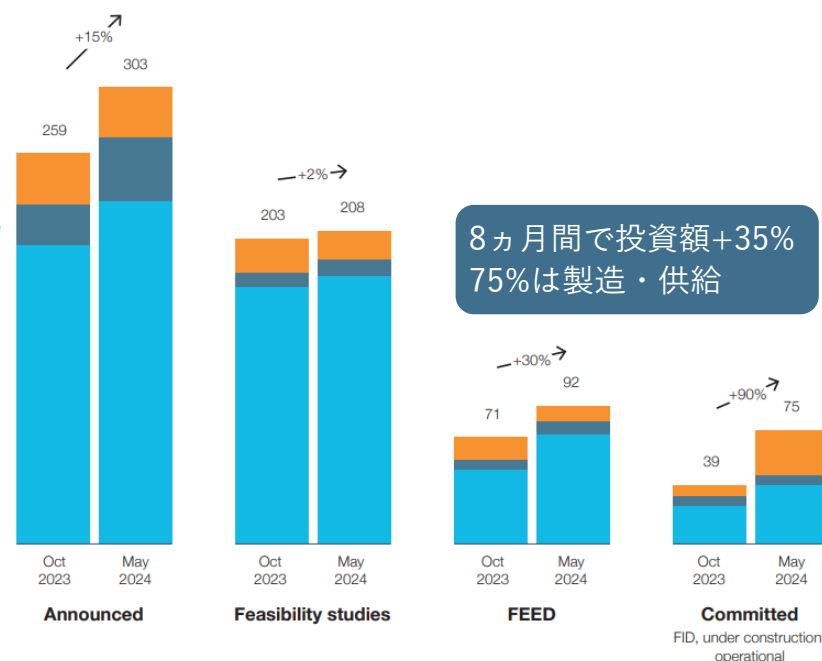
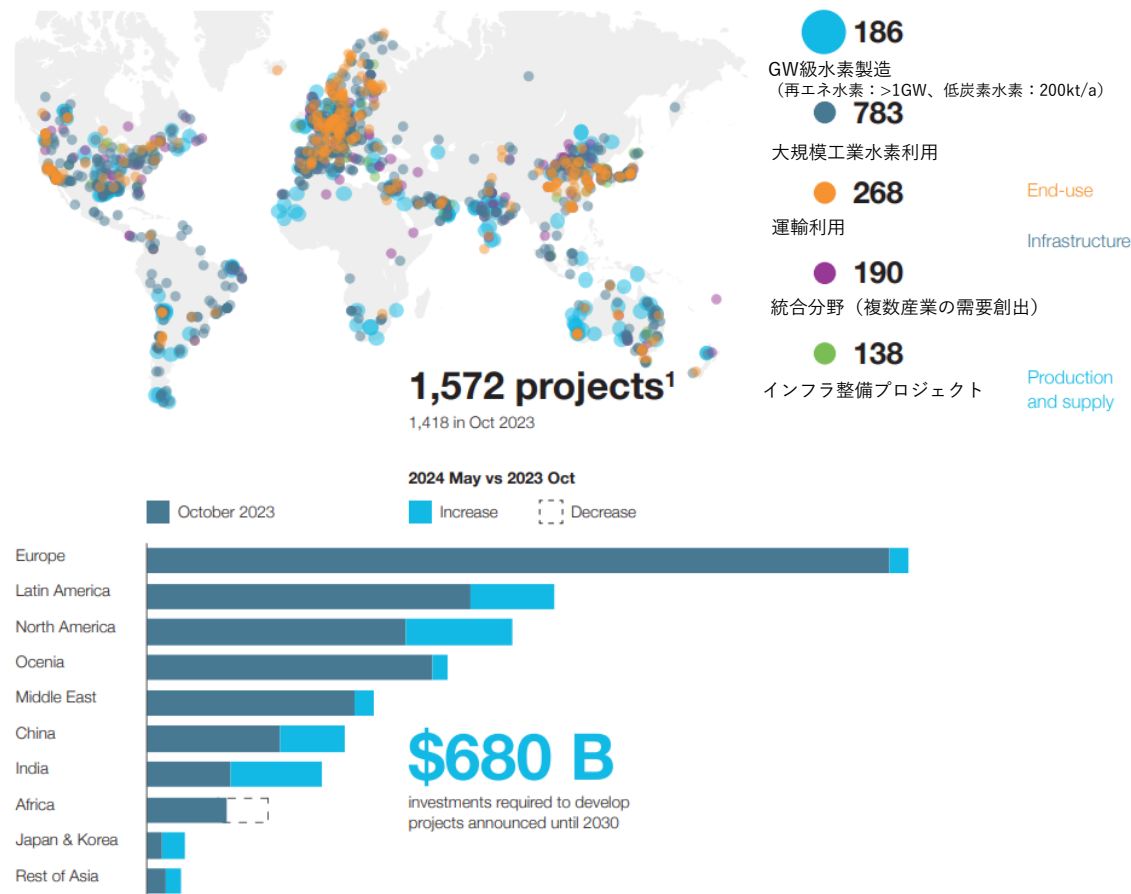
米国の産業政策例「インフラ投資法」

- インフラ投資法で支援の対象となる「**水素ハブ**」では、**水素の利用先や利用する工業製品・材料に関して米国の雇用に寄与するよう、以下の条件が求められている**

対象	要求条件（生産・雇用創出関連）
生産要件	・ 水素利用先が国内であること（強い推奨） ・ ただし、需給バランスの確保のため、ハブ地域外への一部水素の輸出も提案可能 ・ すべての鉄鋼・鋼材は全製造工程が米国内で行われる必要 ・ すべての工業製品は米国内で採掘・生産・製造された部材のコストがトータルコストの55%を超えていること
雇用創出要件	・ 地域のできるだけ多くの住民に技能研修を行い、長期の雇用を生み出す機会を提供するハブを優先

【出所】 DOE ウェブサイト等に基づき当社作成

- 水素関連の発表済プロジェクトは1,500件以上に達し、2023年10月から2024年5月の8ヵ月で120件以上増加、**GW級の水素製造プロジェクトは186件、運輸利用も286件**に達する（欧州・中国・米国に集中）
- 複数の産業分野に対し水素供給する「水素経済圏」（統合分野）の構築も世界各地で進む
- 投資額（発表レベル）も8ヵ月で600億ドル増加、75%は水素製造とサプライチェーンだが**利用サイドでFIDが増加**



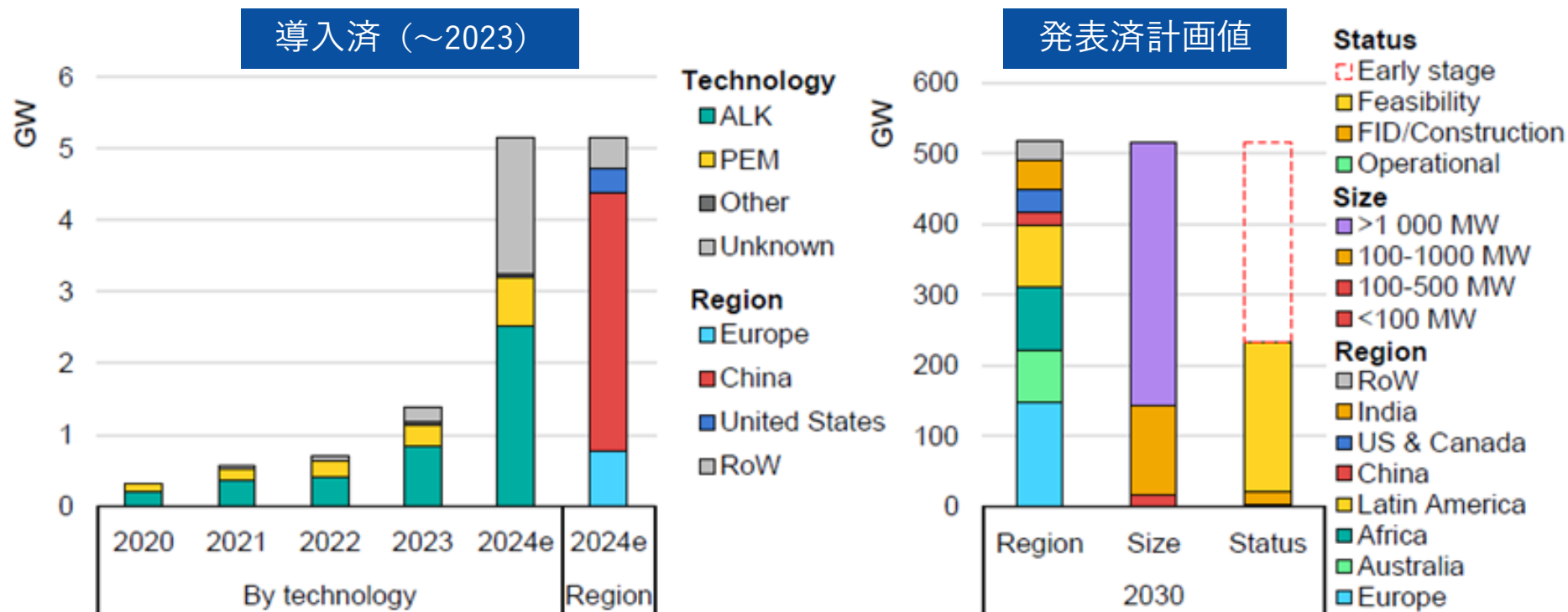
\$370 B
in planning stage and beyond
(versus \$310 B in previous publication)

75%
of investments focus on supply
(in line with previous trend)

投資額（発表レベル）では圧倒的に欧州・北南米・豪州に集中

【出所】 Hydrogen Council, "Hydrogen Insights 2024"

- 最近5年で水電解の導入容量は大きく拡大、2023年にはGW超えの1.3GWに到達
 - － 電解種類の内訳ではアルカリ水電解が約50%を占め、導入地域は中国・欧州が大半だが米国も増加
- 2030年に向けて発表されている計画は既に400GWを突破
 - － 導入地域では欧州が最多だが、豪州、南米、（北）アフリカなどの再エネ資源国が大きな割合を占めている
 - － プロジェクトあたり容量規模は2030年にはGW級が大半、ただし最終投資決定（FID）に至ったものは限定的



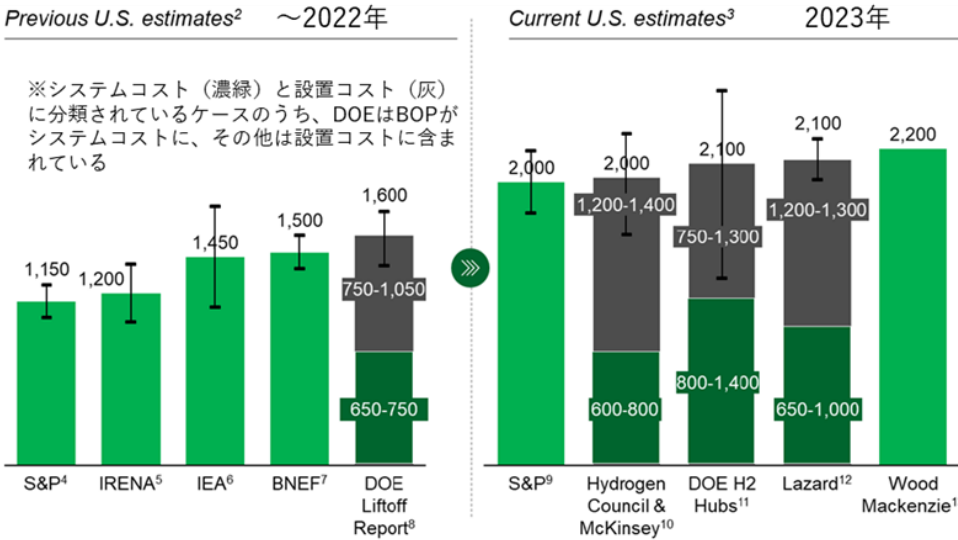
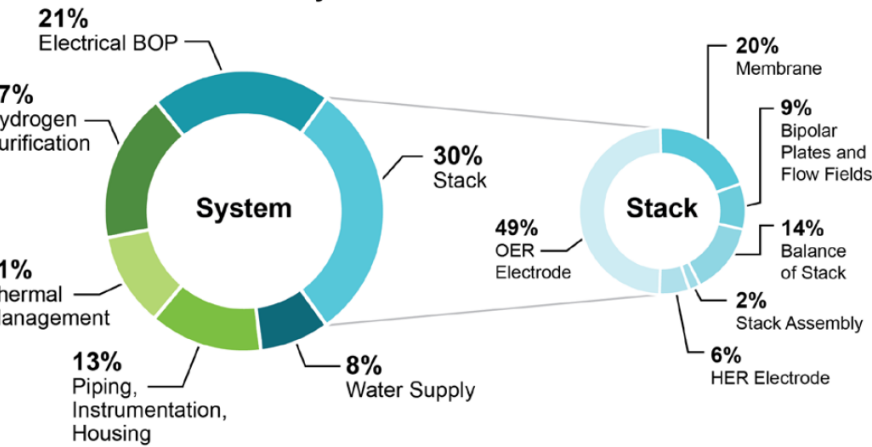
IEA. CC BY 4.0.

【出所】 IEA, "Global Hydrogen Review 2024"



- 水電解装置の総資本コスト※は数100MWシステムを前提として現状で2,000ドル/kW以上の状況、系統電力（電気代83ドル/MWh、設備利用率97%）で7.5ドル/kg、太陽光と風力ハイブリッドの再エネ（電気代33ドル/MWh、設備利用率74%）を前提としても5.2ドル/kgと高止まりの状況
- 水電解装置コストのうち、スタックコストは全体の30%（PEM水電解の例）、付帯設備のコスト低減や設置コストの低減が必須

※総資本コスト：電解槽と付帯設備の製造コストにメーカーのマークアップを付加した未設置コスト、さらに設置コスト、および間接費（土地代、サイト準備費用、事前許認可費用、その他予備費、等）を加えた合計、すなわち水電解システムの所有者が負担するトータルの資本コスト



2：特に記載のない限り、アルカリおよびPEMの推定コストに基づく範囲。示された参考文献は異なる年に発表されたものであり、インフレがこれらの年のコスト変動に影響を与えた可能性があることに注意
3：別段の記載がない限り、アルカリおよびPEMの推定コストに基づく範囲（すべて2022ドル）
4：100MWのプロジェクト規模、2020年と2025年の平均推定使用コスト、2021ドル
5：>10MWのプロジェクト規模、2020ドル
6：1MWのプロジェクト規模、2018年の推定使用コスト、2018ドル
7：>プロジェクト規模10 MW、使用コスト2022、2022ドル
8：2023DOEクリーンH2リフトオフレポートより。2MWの電解槽の規模（プロジェクト規模にスケールメリットがないと仮定）、2020ドル
9：100MWのプロジェクト規模
10：1GWのプロジェクト規模、調査回答の広がりや工学分析の不確実性に基づく範囲
11：すべてのプロジェクトにおけるDOE H2Hub申請者の加重平均に基づく（平均350 MW）。コストの範囲は25位および75位パーセンタイルを表す。DOE H2Hubsのシステムコストには、電解槽スタックとBOPの両方に関連する設備コストが含まれるため、他のデータソースと比較してシステムコストが高い。PEMプロジェクトへの応募者は通常、プロジェクト規模が大きく（平均400MW）、総設置コストは低い傾向にある（加重平均で1,900ドル）
12：20MWのプロジェクト規模
13：250MWのプロジェクト規模

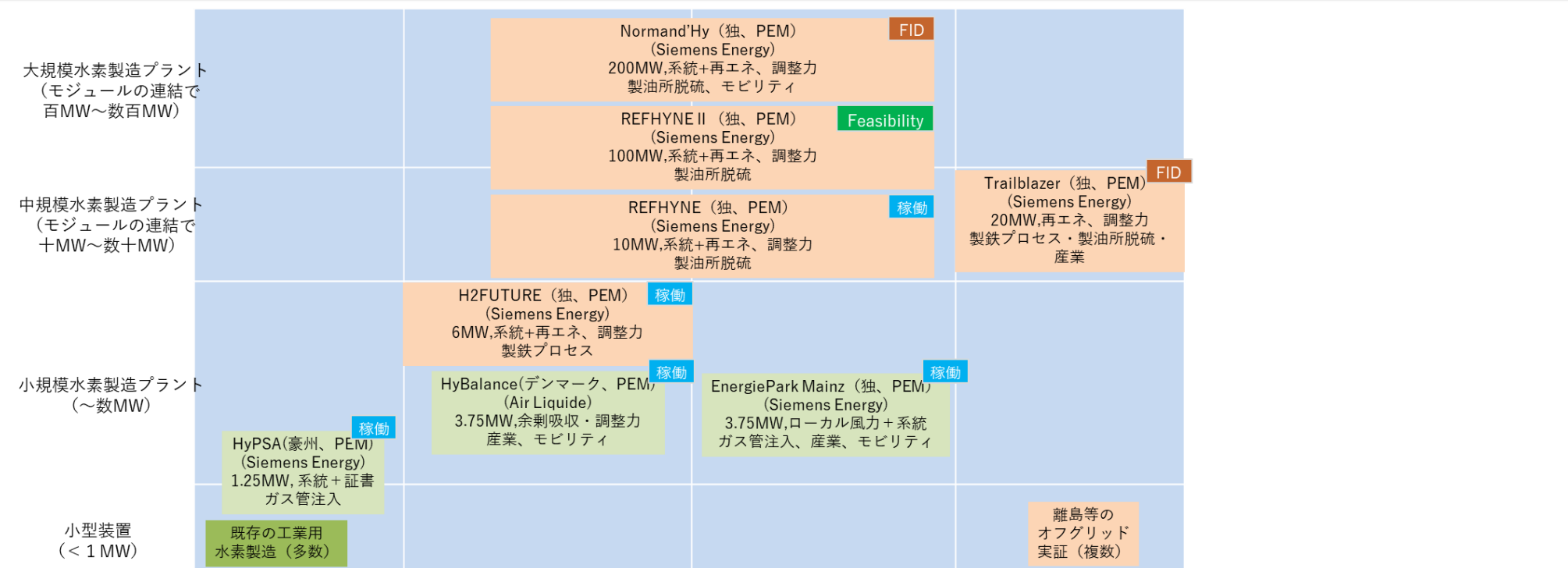
Scenario ^h Based on Electricity Source	Capacity Factor (%)	Electricity Price (¢/kWh)	Electrolyzer Installed Capital Cost (2022\$/kW)		
			\$1,500	\$2,000	\$2,500
			Levelized H ₂ Production Cost (2022\$/kg) ⁱ		
Grid – Average Scenario	97%	8.3¢	\$6.80	\$7.50	\$8.20
Renewable Electricity Scenarios					
Hydropower	50%	3.4¢	\$5.50	\$6.70	\$7.90
Land-Based Wind (Class 1)	51%	2.9¢	\$5.20	\$6.40	\$7.50
Hybrid Wind-PV	74%	3.3¢	\$4.40	\$5.20	\$6.00

【出所】 HYDROGEN SHOT:Water Electrolysis Technology Assessment

【出所】 DOE Hydrogen Program Record #24002, “Summary of Electrolyzer Cost Data Synthesized from Applications to the DOE Clean Hydrogen Hubs Program”



- 水電解水素の低コスト化には、できるだけ高い設備利用率で、かつ安価な電力を調達することが必要だが、**変動再エネの投入は耐久性や設備利用率の課題から、系統を介した変動電力調達、再エネを利用するケースでも系統と交ぜて利用（→系統接続への課題も含めた実証の重要性）**
- 稼働中のプロジェクトは10MWクラスであり、数10MW～100MW以上はF/SおよびFIDの段階（**→大規模再エネ水素製造の実績はなし**）
- 「水素製造コスト」、「電力調達の不足」、「不確実な水素需要」等を理由として延期・中止となるプロジェクトも発生、一方、製油所向け水素、肥料向けグリーンアンモニア等を中心に100MW級のプロジェクトがFIDに至る（**→グリーン水素プロジェクトの峻別が進展**）



系統・安定電源からの調達（系統、水力、地熱、再エネ安定成分等） 系統を介した変動電力調達（出力抑制、調整力、輻輳対策等） 系統・変動再エネ双方からの調達 専従変動再エネからの調達（太陽光、陸上/洋上風力等） 【出所】各プロジェクト情報から当社作成



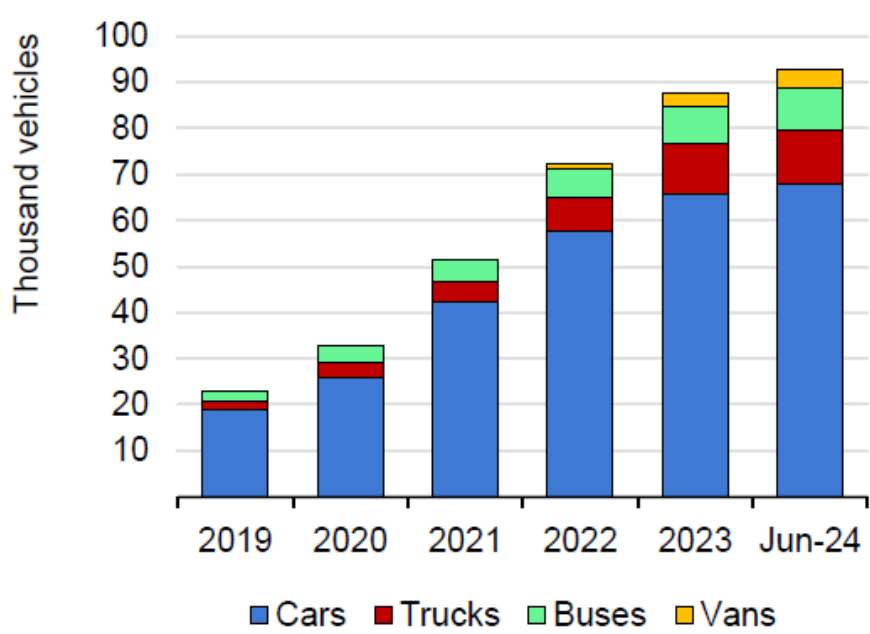
- 中国での稼働・建設中の大型プロジェクトを見ていくと、中央国営企業の主導のもの、再エネ資源の豊富な内陸部、水素需要の見込まれる沿岸部に大別、用途は化学工業品の生産、製鉄などグリーンケミカル・スチールの原料向けが多い
- 中国で「内陸を中心とした膨大な再生エネ資源と、再エネ産業の成熟」「アルカリ電解槽の安価な国産の電解槽技術」「世界最大となる既存の水素需要」によりグリーン水素製造プロジェクトを後押し

プロジェクト	所在地	事業者	規模	電解種	併設電源	用途	投資額 (億円)	進捗	完成年
①中国石化新疆庫車グリーン水素サプライチェーンモデル事業	新疆ウイグル自治区	中国石化	260MW	AWE	PV 300MW	自社化学工業生産	30	稼働中	2023
②内モンゴル納日松ソーラー発電グリーン水素生産モデル事業	内モンゴル自治区オルドス市	三峡集団、満世投資集団	75MW相当	AWE	PV 400MW	化学工業生産、FCトラック	23	稼働中	2023
③寧東エネルギー・化学産業パークグリーン水素事業【事例Ⅱ】									
a. 寧夏寧東基地宝豊能源集団グリーン水素生産活用モデル事業	寧夏回族自治区	宝豊能源集団	150MW相当	AWE	PV 200MW	自社オレフィン製造、FCトラック	32	稼働中	2021
b. 国家能源集団寧東グリーン水素フルサプライチェーンモデル事業Ⅰ期	寧夏回族自治区	国家能源集団、寧夏地元石炭、地域電力会社	105MW	AWE	PV 62MW	工業生産、FCV	38	建設中	2024E
④大連海水水素製造産業一体化モデルプロジェクト【事例Ⅲ】	遼寧省大連市	大連潔淨能源集団水素科技公司	40MW	AWE	PV 100MW	N.A.	8	建設中	2023E
⑤内モンゴルウランチャブ風力・ソーラー発電によるグリーン水素・アンモニア事業	内モンゴル自治区ウランチャブ市	中国石油	250MW	PEMWE (海外製品)	風力 350MW PV 150MW	自社の化学工業生産	41	建設中	2024E
⑥吉林大安グリーン水素/アンモニア	吉林省大安市	吉林電力	230MW相当	PEMWE/ AWE	風力 700MW PV 100MW	N.A.	62	建設中	2026E
⑦国際グリーン水素製鉄モデルプロジェクト	内モンゴル自治区包頭市	水木明拓水素エネルギー	750MW	AWE	風力 500MW	製鉄、金属製品	400	建設中	2026E

【出所】 各種公表情報に基づき作成、電解槽規模について、公表値が水素発生量Nm3/hで示されている場合は1,000Nm3/h=5MW相当として換算

- FCEVの販売台数については、市場投入開始から2024年上半期で全世界で累計約9.2万台。内訳は、乗用車6.8万台、トラック1.2万台、バス0.9万台、商用バン0.3万台程度
- FCEV市場は、その絶対値はまだ小さいものの2018～2023年の5年間でCAGR約50%、2024年に入り、物価・エネルギー高の影響もありステーションでの水素販売価格の急上昇等が影響し、販売台数は縮小傾向
- 今後は車両価格の低減に加え、ユーザの選択肢・利便性が増える（参入メーカーの増加、車種の多様化、水素ステーション拡大）ことが重要、水素ステーションはグローバル全体で1,200箇所突破（うち、中国は400箇所以上）

2019年から2024/6年までのFCEVの販売台数の推移



【出所】 IEA, “Global Hydrogen Review 2024”

主要各社の乗用車FCEVの動向

企業名	製品動向
トヨタ自動車	MIRAI累計2.5万台、2025/2に第三世代FCシステムとして乗用車向け、大型商用車向け、汎用向けを展示会で公表
本田技研工業	2021年にClarity生産停止、2024年にSUV（CR-V）ベースのプラグインFCEVの生産開始、2025/2に2027年度に量産開始予定の次世代燃料電池モジュールを公表
現代自動車（韓国）	NEXOはシェアトップ（累計3.7万台）、2022年に日本市場へも再参入、2024年の販売台数は前年比半減
上海汽車集団（中国）	2020年にMPVタイプのEUNIQ7を販売開始、航続距離約600km、累計で約500台
長安汽車（中国）	新ブランド「（深藍）Deep Blue SL03」を発表、約70万円で販売開始、160kW出力、航続距離700km
BMW（独）	SUV（X5）ベースのFCEVの少量生産を開始（ix5）
ルノー（仏）	グループの合併会社HYVIAが2024/2にマスター・バンH2-TECHの新モデルを発表、長距離航続仕様は水素で400km走行可能な仕様
ステランティス（伊）	2024/2に初の量産FCEVバン、e-Expart Hydrogenを発表、航続距離400km

- データセンター（DC：Data Center）向けに定置用燃料電池が米国を中心に注目
- データセンターに常用電源として導入する場合、海外では主な導入理由は電力不足、SOFCメーカーのBloom Energy社が他社を大きく引き離し（右表）、一方で国内の常用実証ではDX・GXが目的で燃料電池に水素が用いられる
- データセンターへの非常用電源としての導入は実証事例が存在、燃料電池導入実証実施の目的は脱炭素

企業	DCへの取り組みなど	燃料供給手段
Bloom energy	● 稼働済みDCに対する商用導入が多い ● 天然ガスやバイオガスでの常用稼働実績が豊富 ● 電力不足に伴い導入容量やコーポレートPPAが増加、最大1GWの供給契約を締結 ● 容量20MWのデータセンターの常用電源に利用されている	天然ガスパイプライン
Plug Power	● MicrosoftとDC非常用電源3MWの実証	水素トラック輸送と推定
Ballard	● VertivとDC非常用電源400kWの実証 ● 1MWの太陽光発電と1MWの蓄電池を併用してマイクログリッドを形成	—
Bosch	● 自社内のDC電源供給で実証中 ● 欧州でデータセンターへの燃料電池導入を検討（実証はドイツ政府からも支援）	—
本田技研	● 米国ホンダは社内DCで500kW実証 ● 国内はNEDO事業で三菱商事、トクヤマと80kWのDC実証	水素パイプラインを設置予定

導入企業	段階	導入国・地域	導入時期	容量	用途・利用ガス	導入理由
Equinix	導入	米国・シリコンバレー	2021/6	20MW	常用・天然ガス	エネルギーの信頼性と持続可能性
Teledata	導入	英国・マンチェスター	2021/12	1.2MW（PPA利用）	常用・不明（水素対応はしている）	脱炭素とDCのレジリエンス強化
Nxtra by Airtel	導入	インド・ベンガルール（バンガロール）	2022/12	500kW	常用・天然ガスで稼働、商用利用可能になり次第、水素希望	電力不足（必要量を迅速に供給できず）
GDS DC	実証	シンガポール	2023/9	（最終的に）80MW	常用・不明	電力不足（グリッド制約）
Amazon	導入（予定）	米国・シリコンバレー	2024/7	15年間20MWのコーポレートPPA	常用・天然ガス	電力不足（DCの成長に追いつけず）
AEP	導入（予定）	米国・カリフォルニア	2024/11	100MW分発注、2025年に拡張注文の予定で最大1GWの供給契約	常用・天然ガスまたは水素	電力不足（AIデータセンターに供給）

【出所】 各種公表情報に基づき当社作成

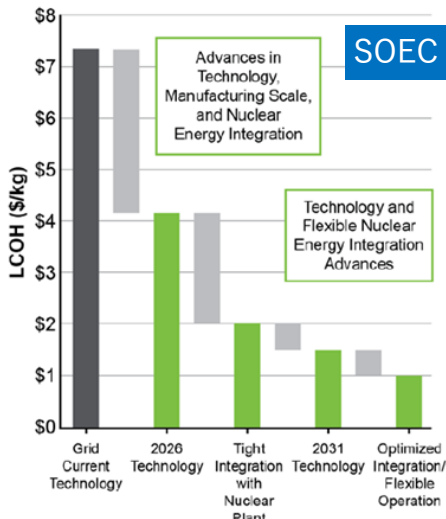
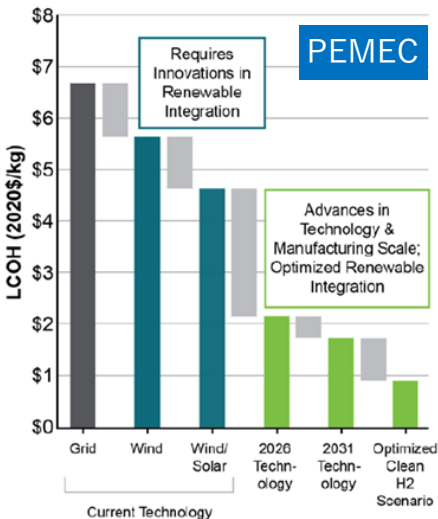
2. 水電解・燃料電池の技術開発課題と方向性

	アルカリ水電解 (AWE)	固体高分子形水電解 (PEMWE)	固体高分子形水電解 (AEMWE)	固体酸化物形水蒸気電解 (SOEC)
概念図				
TRL	商業化段階	商業化段階	技術開発段階	実証段階
特徴	・最も技術面で成熟しており、大出力装置の導入実績が豊富なほか、設備コストも他の装置より経済的 ・周辺機器含め装置が大きくなる傾向にあるため、技術的には集中型水素製造に適していると想定	・AWEに比べると負荷追従性に優れる、設備がコンパクトになることが特長 ・変動の大きい再エネとの接続や分散型水素製造に適していると想定 ・要素技術・部材は固体高分子形燃料電池と共通点が多く、コストダウンポテンシャルがあることも想定 ・貴金属を多く要するため、普及に向けては貴金属使用量の低減やリサイクルが重要	・AWEとPEMWEの利点を活用できるポテンシャルを有する ・アルカリ性環境であるため非貴金属触媒の適用が可能、PEMWEと比べて貴金属使用量を低減できる点から注目 ・PEMWEと比べてカソードへの水透過量が少なく、システムの簡素化の可能性 ・電解液濃度を低減することで逆電流問題の抑制、高濃度アルカリ溶液を扱う複雑さが解消されるというメリット	・特に常温電解に比べて効率で大きく優れ、排熱利用が期待できる工業プロセスでの利用が有力と想定（約10kWh/kg-H₂の熱で40kWh/kg-H₂の電力消費量を実現） ・同技術はe-methaneやe-fuel、化学品などの原料となる合成ガス製造にも共電解方式で適用できる ・現状アルカリ・PEMに比べ、耐久性や負荷追従性の点で技術成熟度には改善の余地あり
主な課題	・AWEは多孔質隔膜を用いているため、PEMWEと比較して水素純度が低い ・クロスオーバー抑制のため隔膜を厚くする必要があり、PEMWEと比較して、電流密度が低い ・負荷を低減すると、クロスオーバーが増加する可能性があり、下限運転範囲に制限がある ・起動停止時に逆電流が発生し電極の劣化が進行する ・装置フットプリントが大きい	・現状のアノード触媒でのIr使用量では、将来のPEMWEの大量導入に伴ってIrの年間使用量が年間供給量を超過する可能性があるため、アノード触媒におけるIr使用量を圧倒的に低減する技術およびリサイクルが必須 ・カソード触媒および多孔質輸送少（PTL）・双極板（BPP）のPt使用量低減も重要 ・電解質は現状フッ素系が主流であるが、PFAS規制の対象となる可能性	・アニオン交換膜のイオン伝導性、化学的安定性、機械的強度の両立が大きな課題、特に高濃度アルカリ溶液中で、顕著に劣化が進行 ・貴金属フリー触媒材料の開発 ・装置の大型化に向けた、大面積対応技術も方向性の一つ（AWEのアセットの活用） ・純水供給時の導電率および性能の確保	・高温であるため、構成物質の熱膨張の関係から、コールドスタート、負荷変動に時間を要する ・高温、水蒸気存在といった環境での運転が必要であり材料耐久性やガスシール性確保に課題 ・基本的に、SOFCの大型化の課題と同様な課題を有する（平板型でのセル面積の大面積化およびスタック化）



■ 水素製造コスト1ドル/kgに向けた技術戦略を策定、重点課題として以下の3つを掲げる

重点技術開発	ポイント
製造スループット向上	■ 先進的な高スループットの生産技術を用いることで、量産によるコスト低減効果を高める必要 ■ 製造のタクトタイムを短縮するためのアプローチは電解技術によって異なる。全電解槽に共通する課題として、セル・スタック組み立て自動化による生産工程削減、品質管理が課題、ロボット工学、ビックデータ解析、AI、自律システムなどを組み合わせて対応する必要
電解槽性能向上	■ 「資本コスト低減」「性能・効率向上」「長寿命化」を目指し、部材レベルからシステムレベルまで技術開発が必要 ■ 電解種に共通するコスト低減としては、主に「量産」、「BOP標準化」、「加速劣化試験の開発や動的運転への対応」
エネルギーシステムの統合	■ 再エネとの直接接続の課題として「水電解装置の設備利用率の低下」、「変動電力が電解槽の性能や耐久性に及ぼす影響の理解進化」とし、以下の3つを課題解決策として提示 ・ ハイブリットシステム（電解槽の設備利用率向上） ・ 運転戦略の最適化（起動停止に伴う劣化を低減するため、電解槽を停止せず最低負荷を低減する、等） ・ 再エネの再設計（水素製造を最適化する再エネシステム設計、例えば、水素製造に適した風力タービンの設計など） ■ ハードウェアコスト（電解槽コストや運転コスト）だけではなく、ソフトウェアコスト（電解システムの所有者が負担する可能性のある全てのコスト）の低減が必須（例えば、設置コスト、サイト準備、土地代、許認可、試運転、配送等）

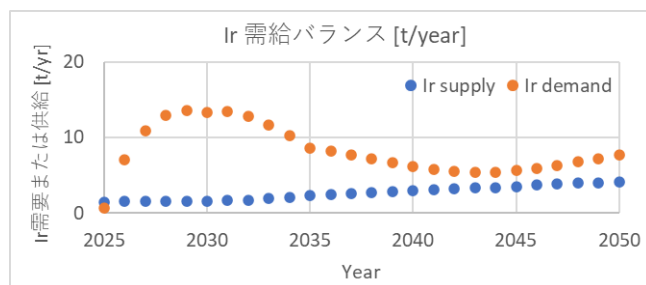
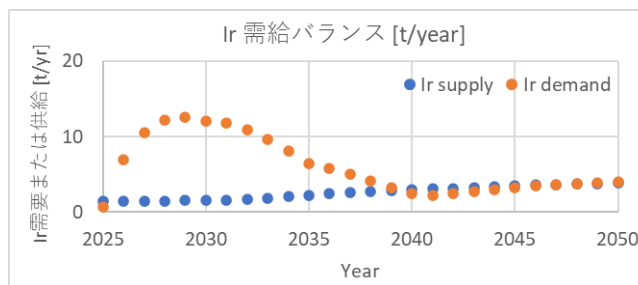
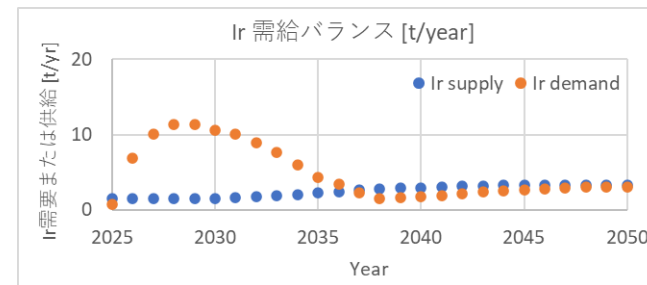


PEMEC	SOEC
<最適ケースの前提> ・ 電気料金1.2¢/kWh、設備利用率74%が前提（太陽光と風力の合計容量200MWに対し、電解槽は100MW） ・ 再エネハイブリットはテキサス州が前提 ・ 再生可能エネルギー税額控除の使用も想定	<最適ケースの前提> ・ 原子力発電電力利用、原子力発電の廃熱利用前提 ・ 電気料金2.0¢/kWh、設備利用率95%が前提（電力市場価格が高い場合は売電量を増やし、水素製造で使用する電力を低減するなど、水電解側に柔軟な運転が必要） ・ 水電解装置においては、原子力発電との統合最適化、柔軟な運転が前提

- NEDO技術開発ロードマップにて、欧米中を中心に水電解の取り巻く状況（市場・政策・技術開発）を見据え、日本の取り組むべき方向性について論点を整理
- CNに向けたエネルギー転換において莫大な再エネが必要となるが、電化が困難なHard-to-abate領域では水素が重要な役割、その需要を賄うために海外からの輸入が必須、再エネ水素製造向けの水電解市場の獲得に期待
- 一方、国内のエネルギー自給率を向上させるための再エネ導入の拡大（再エネ主電源化）に向け、国内での一定の水電解市場の創出が必要で直近では以下の取り組みが重要
 - ・ 制度設計と連動した水電解装置の実証の計画・推進（「実証の場」構築）
 - ・ 水電解装置の系統への付加価値提供（調整力提供、系統混雑緩和など）と技術・制度面の課題解決、更には国、電力業界、水素関連団体、および系統に適した水電解、電源、装置、蓄電装置、水電解装置などを提供できる産官学が一体となり、再エネ主電源化を最大化する系統および周辺機器の在り方の議論
 - ・ 水素利用側（下流）との連携による水素需要の規模、水素の貯蔵・利用の仕方に伴う水電解装置の規模の設定および運用方案の確立
 - ・ 実証を通じて電解槽の開発・設計へのフィードバックを行い、インフラ設備としての電解槽の信頼性・安全性確保、投入電力・量産・スケールアップ等への対応を想定した技術要件の確立が急務
- 海外輸入水素や海外主要国への技術輸出に対しては、国内の「実証の場」での技術の蓄積も踏まえた上で、製造地での電力事情（系統および再エネの供給方法の把握）に適応したシステムおよび運用方法の検討を進め、並行して電解槽の加圧対応等を推進する必要
- 将来の水電解装置の競争力確保に向け、安価なクリーン電力の確保を進め、革新的な技術開発の推進や数量効果、生産性向上、付帯設備や設置コストのコスト低減により、従来技術の延長に留まらない水準の水素製造コストの実現を目指す
- 材料開発や電解槽の設計、システム評価・運用最適化の支援を加速するための産学官連携による評価・解析技術（耐久プロトコル・部材評価手法の確立・高度解析・MI・自動自律実験、等）の基盤確立と有効活用によるプレーヤーの裾野拡大、競争力強化を推進

- Irの需給バランスについて、製品寿命とリサイクルを考慮した包括的な分析を行った文献を参考に、ロードマップの前提条件に基づいたIr目付量の目標値を検討
- 2035年での0.014mg/W（1.8V@4.0A/cm²前提で0.10mg/cm²）以下の場合、2040年頃にNZE 2024シナリオでの水素需要量のうちシェア40%を満たすPEMWEの導入が可能
- 2035年頃までは技術開発から実証段階と考え、2040年頃に十分なPEMWEが市場に導入されることを想定し、Ir目付量を0.1mg/cm²を目安と設定（→目付量低減と起動停止・変動運転を含んだ耐久性との両立が技術開発の鍵、また、市場見通しやリサイクル技術等の前提条件に影響することに留意）

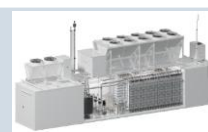
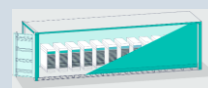
項目	文献[1]の仮定*1	今回の試算条件
水素需要量	NZE2022に準拠	NZE2024に準拠
設備利用率	60%	40%（※文献[1]に対して1.5倍のPEMWE需要量となる）
PEMWEシェア	40%	40%
目付量	2020年1mg/Wから、2030年頃に0.04mg/Wまで低下	2025年0.123mg/Wから、2035年0.014mg/Wまで指数関数的に低下（動作点1.82V@2.0A/cm ² から1.8V@4.0A/cm ² の性能向上とあわせて、2025年0.4mg/cm ² から2035年0.10mg/cm ² へ削減する水準）
動作点電圧	2020年1.8Vから2040年1.7Vまで低下	1.8V（70%LHV）で一定
動作点電流密度	--（mg/cm ² 換算しない）	2025年1.8A/cm ² から2035年4.0A/cm ² まで増加
システムエネルギー消費率	2050年までに6.5%まで低下	2050年までに6.5%まで低下（※整流器変換効率98%、補機損失率5%）
リサイクル率	2020年70%から2035年100%へ上昇	2020年70%から2035年90%へ上昇、その後一定

▼Ir目付目標0.12mg/cm²

▼Ir目付目標0.10mg/cm²

▼Ir目付目標0.08mg/cm²


【出所】 [1] Mark Clapp et. al, Catalysis Today 420 (2023) 114140

© 2025 Mizuho Research & Technologies, Ltd.

- Enapterは2.4kWの小型システムであるが、両極PGMフリー、低濃度アルカリ溶液(0.18M KOH)の製品を販売
- Verdagyは広い運転レンジと応答速度を強みとする20MWモジュールを開発中。製品の貴金属使用状況や電解液濃度は非公開
- EvoIOHは純水供給・両極PGMフリーの50MW大型モジュールを開発中
- 主要プレーヤーの技術開発の方向性としては、貴金属使用については両極PGMフリーを目指していく方向性、電解液濃度については、1M以下の低濃度アルカリ溶液や純水を供給していく方向性であると推測

企業名(国)		スタック・モジュールサイズ	電流密度	運転レンジ	応答速度	貴金属使用量	電解液濃度
Enapter (イタリア)		2.4kWを基本単位として、数WMの製品を展開	—	3-100% (AEM Nexus)	—	両極 PGMフリー (アノード触媒はCuCoOx)	1wt%KOH (0.18Mと試算される)
Verdagy (米国)		20MWモジュールを連ねて100MW以上を目指す (セルは1.2m×2.7mの大型セル)	0.1-2.0A/cm ²	5-100%	1分単位で負荷変動が可能(再エネ変動追従を強みとする)	—	—
EvoIOH (米国)		最大50MWモジュール(単一スタック最大5MW)	—	—	—	両極 PGMフリー	純水供給
Cipher Neutron (カナダ)		10kWスタック	0.7A/cm ² (定格、BOL)	20-120%	—	両極 PGMフリー	1MKOH

【出所】 各社ウェブサイト情報より当社作成

【電解質膜】

- アニオン交換膜ではイオン伝導性、化学的安定性、機械的完全性を両立することが重要
- EvonikのDURAIONはNafionに匹敵するイオン伝導性を発揮、化学的安定性はDioxide MaterialsのSustainion X37-50を用いて10,000h以上の運転（電圧変化0.7μV/h）を達成した事例が存在（温度60℃、電流密度0.74A/cm²、電解液1M-KOH、両極PGMフリー）
- 各社製品の引張強さはNafionに匹敵する水準であるが、破断伸びはNafionと比較して低い

【触媒】

- PGMフリー触媒の開発においては、触媒とアニオン交換膜を組み合わせた場合の性能と耐久性の両立が求められる
- レビュー論文のデータを基にPGMフリー触媒と市販のアニオン交換膜を合わせた性能評価の事例を以下に整理
- 現状では両極PGMフリーでPEMに匹敵する性能を有する事例も存在するが、耐久性については報告がない/数百時間オーダーの運転事例が大半であり、性能と耐久性の両立には更なる研究開発が必要
- 両極PGMフリーはアノードPGMフリーと比較して高性能事例は少なく、カソードPGMフリー触媒に関する事例は更に少ない

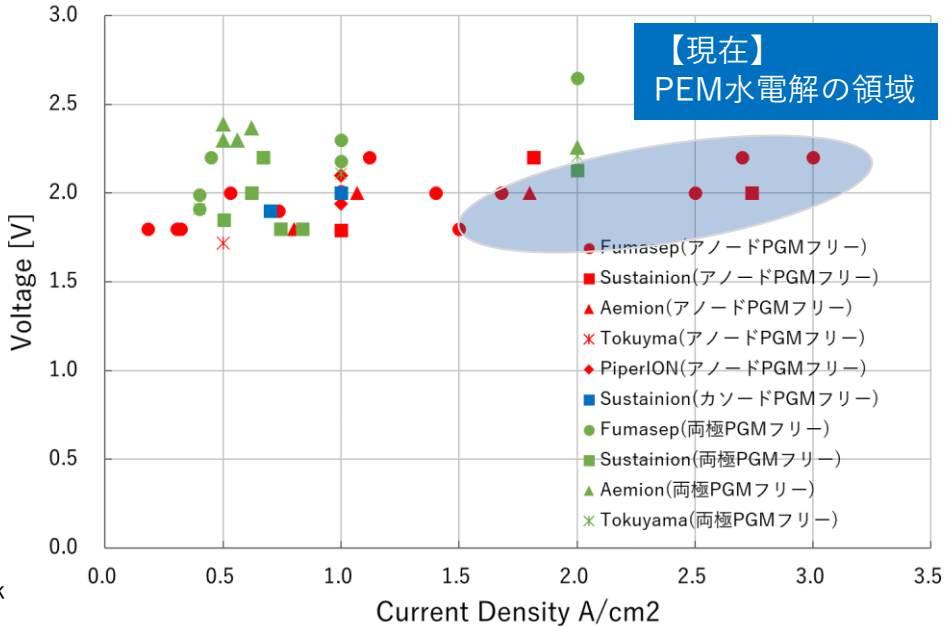
アニオン交換膜の性能比較

性能	Sustainion X37-50 (Dioxide Materials)	Amenion series (Ionomr)	FAA series (Fumatech)	DURAION (Evonik)	参考: Nafion N-115
OH-伝導度 [mS/cm]	80	>80	40	108 ^[1]	111 ^[1] ※H ⁺ の伝導度
ASR [Ω m ²]	0.045	0.13	0.3-0.5	-	-
IEC [meq/g]	-	2.1-2.5	1.85	-	0.95-1.01 ^[2]
引張強さ [MPa] (破断伸び %)	Cracks when dry (Cracks when dry)	60 (80-110%)	25-40 (20-40%)	-	43 in MD、32 in TD ^[2] (225% in MD、310% in TD) ※50%RH、23℃

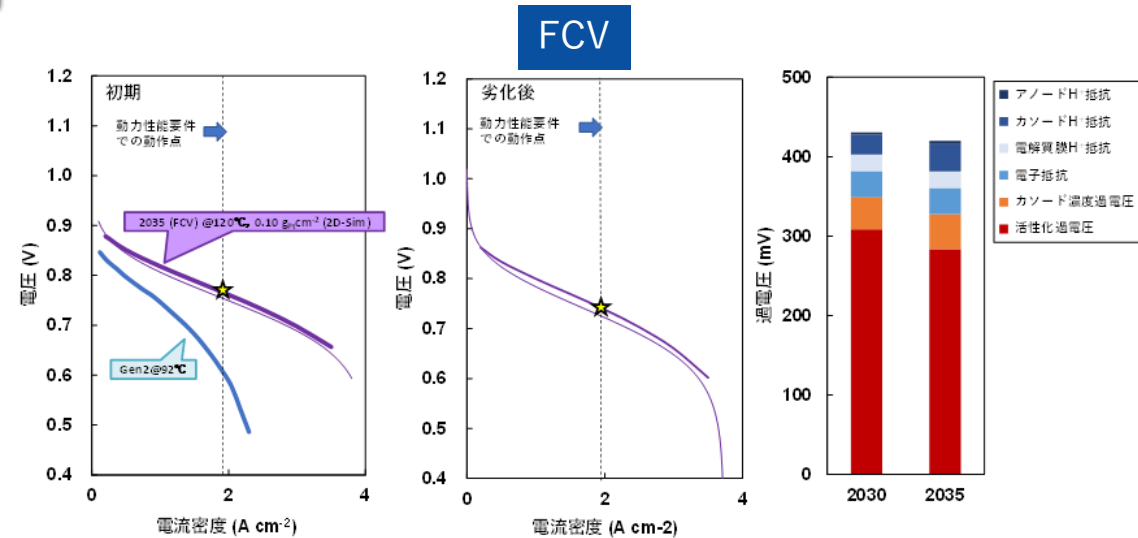
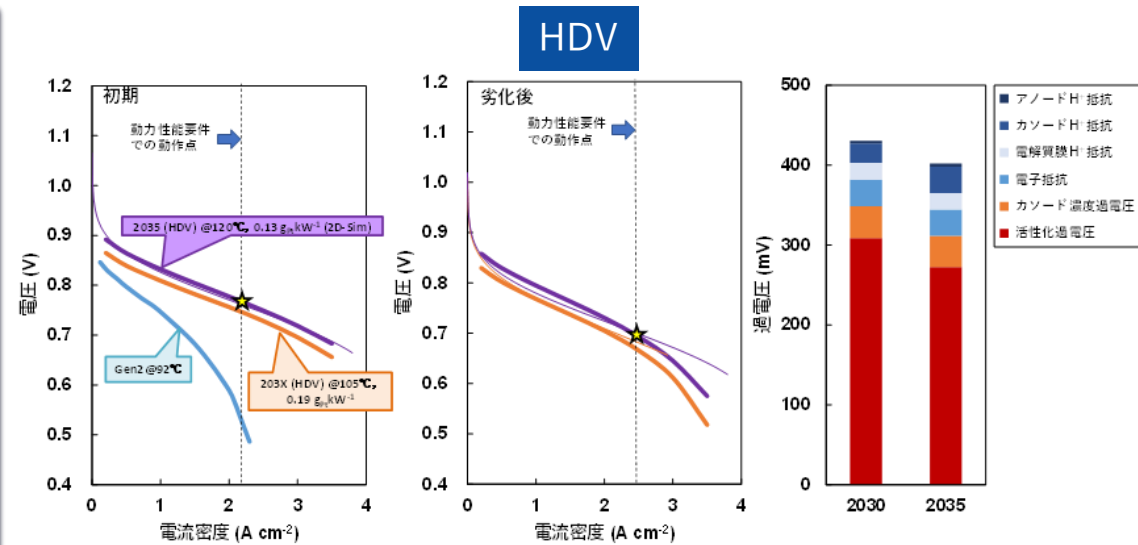
[1] Evonik, Anion exchange membrane (AEM) for cost competitive water electrolysis by Evonik
[2] <https://fuelcellearth.com/pdf/naion-N115-N117-N1110.pdf>

他【出所】 Ng, W.K, et. al., “Commercial Anion Exchange Membranes (AEMs) for Fuel Cell and Water Electrolyzer Applications: Performance, Durability, and Materials Advancement. Separations 2023”

両極PGMフリー触媒の研究開発



- FCV（乗用車）については高いエネルギー密度が要求される大型セグメントが市場の有力なポテンシャルと想定
- 2035年目標についてPt目付0.1mg/cm²前提で耐久後の動力性能要件を満たすI-V特性（その他の材料・部材物性は2035年HDVと同水準）
- 現行技術の推移に基づき、2035年頃には粒子径3 nm程度のPtナノ粒子の1/2程度までの溶出速度低減を仮定し、HDVでは50,000h、FCVは10,000hの耐久時間を設定

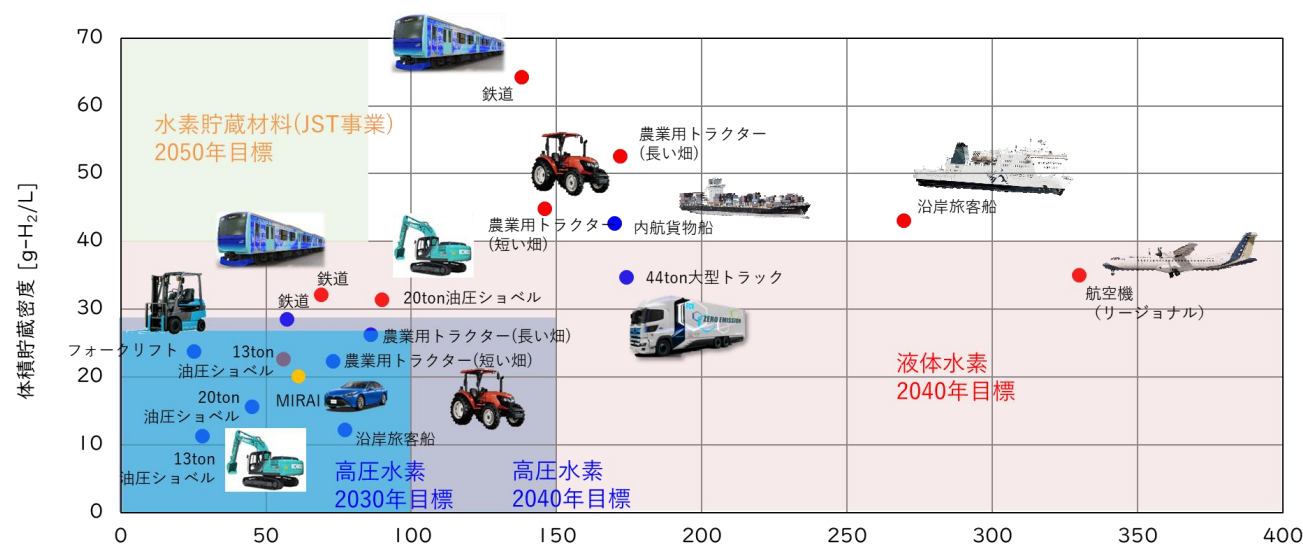


【出所】NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ (FCV・HDV用燃料電池) 解説書

項目	2030年頃の目標値	2035年頃の目標値	2040年頃の目標値
耐久時間 [h]	50,000	50,000 (10,000)	50,000
FCシステムコスト [万円/kW]	0.9	—	—
FCスタックコスト [万円/kW]	0.45	—	—
Pt目付量 [mg/cm ²]	0.24	0.22 (0.14)	0.14
カソード触媒層	0.20	0.18 (0.10)	0.12
アノード触媒層	0.04	0.04 (0.04)	0.02
Pt使用量 [g/kW]	0.19	0.13 (0.1)	0.07
FCシステム体積出力密度 [kW/L]※最大出力ベース	0.6	0.75	0.8
FCスタック体積出力密度 [kW/L]※定格出力ベース	6.76	8.42	10.38

- 高圧水素の2030/40年目標および貯蔵材料システムの2050年の長期的な目標を策定し、続いて2035年の高圧水素低コスト仕様および大型トラック・船舶・航空機向けの液体水素の目標を新たに設定

		2025年頃の目標値	2030年頃の目標値	2035年頃の目標値	2040年頃の目標値
高圧水素貯蔵 目標仕様1 高貯蔵効率仕様	質量密度 体積密度 コスト	6wt% 20g-H ₂ /L 14万円/kg-H ₂	10wt% 28g-H ₂ /L 4万円/kg-H ₂	— — —	15 wt% 29 g-H ₂ /L 2万円/kg-H ₂
高圧水素貯蔵 目標仕様2 低コスト仕様	質量密度 体積密度 コスト	— — —	— — —	4wt% 28g-H ₂ /L 2万円/kg-H ₂	4wt% 29 g-H ₂ /L (1万円/kg-H ₂)
液体水素貯蔵	質量密度 体積密度	— —	— —	20～30 wt% 35 g-H ₂ /L	30～40wt% 40 g-H ₂ /L
貯蔵材料 システム	質量密度 体積密度	— —	— —	— —	【2050年】8wt%以上, 70g-H ₂ /L以上 @1MPa以下



【出所】NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ (FCV・HDV用燃料電池) 解説書

質量貯蔵密度 [g-H₂/kg]

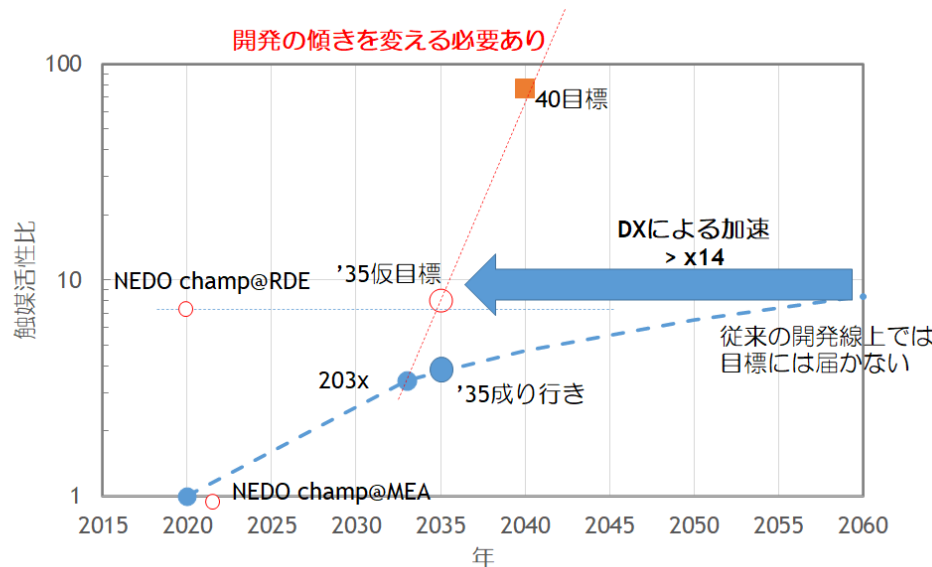
● : 2022年ロードマップ記載目標値
● : 水素充填頻度等を考慮しない要望値

- 現行技術の進化による性能向上を目指す2030年頃までの技術開発に比べて、2035年および2040年の目標達成へは現行技術の延長線上にはない不連続な性能向上が必要

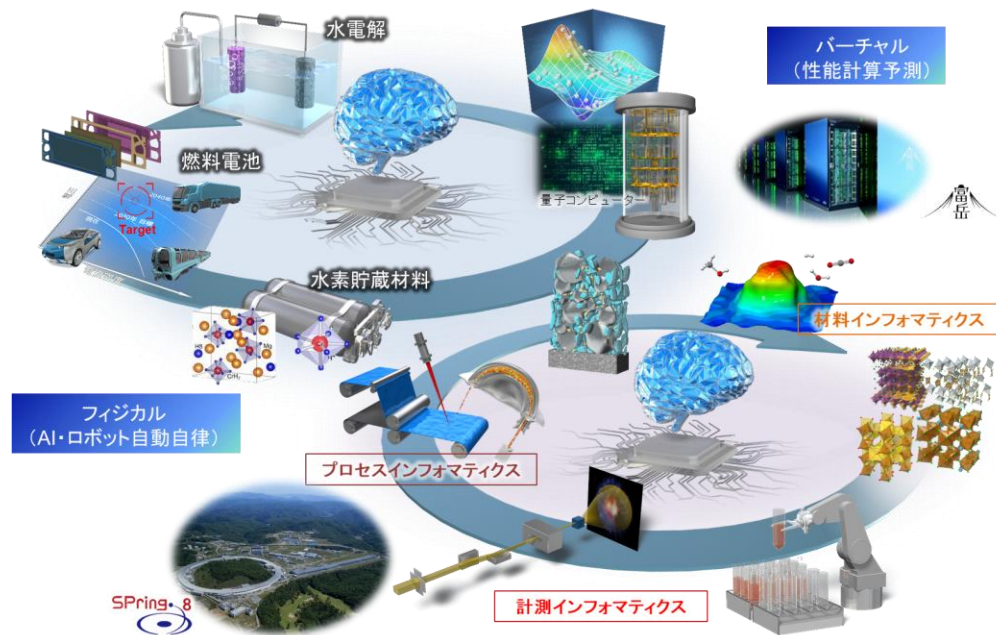


- 製品・システムなどの高性能化などに向けた研究開発を加速し、目標を早期に実現することを期待
- 燃料電池・水素産業分野の材料・プロセス技術開発において現時点の20倍以上の研究開発力をもたらす

【加速・効率化の目安】MI・自動自律実験：材料探索速度を20～100倍、PI：プロセス条件の最適化を20～100倍、MEI：高度解析のスピードを10～30倍以上、NLP（自然言語処理）：データ抽出・ベンチマークコスト1/100～1/250



高度解析、計算科学による現象・機構解明に基づき材料設計の指針を提示、これらの解析・計算データを蓄積し、DX技術を活用することで、従来型の試行錯誤による開発手法を打破し、科学的かつ効率的に材料・プロセスの探索を推進、さらに、その過程で創生された材料候補のデータを蓄積・活用することで開発サイクルを加速



【出所】NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ（FCV・HDV用燃料電池）解説書

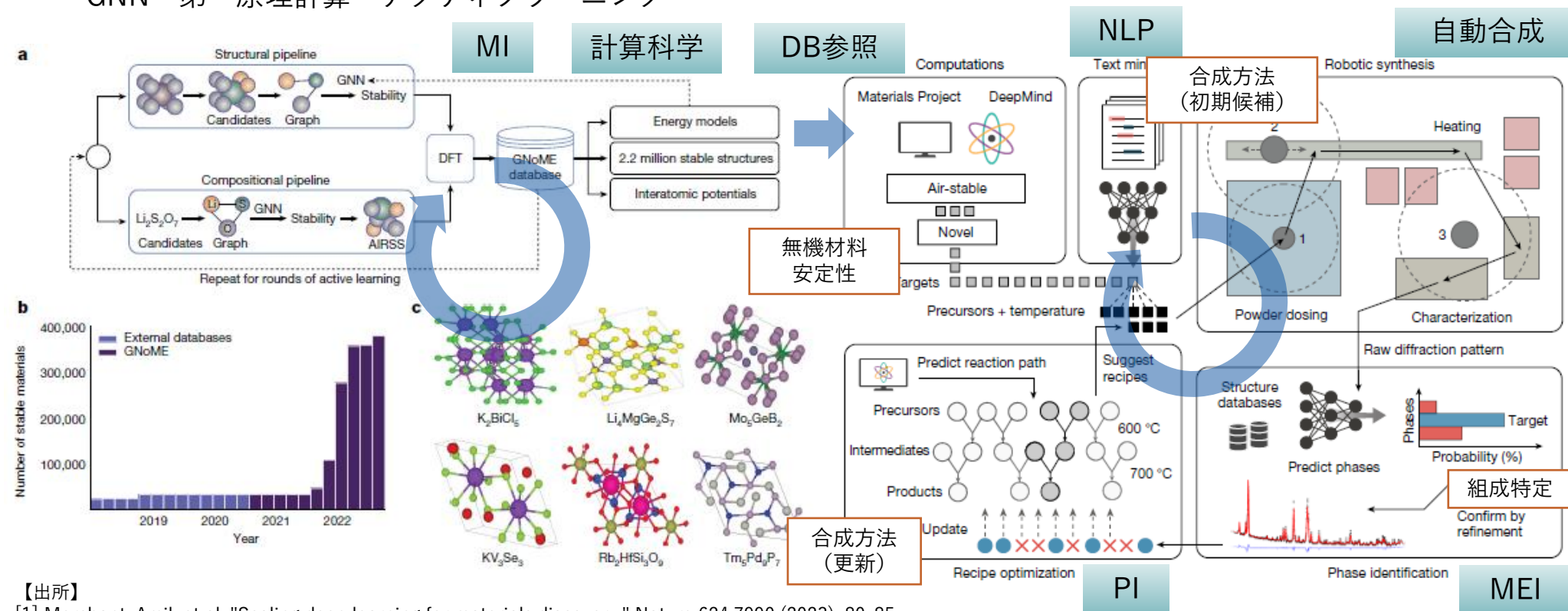
- 多数の候補の生成、スクリーニングによる絞り込み、合成対象の選定、合成方法の検討、プロセス条件の設定、合成、評価など、一連の材料・プロセス開発の加速化するためには、各ステップでのDX技術の導入が必要
- それぞれのDX技術の連携において調和のとれた技術開発が求められる

Google [1]

- ・ 既存データベースもとにして材料探索空間を拡大、熱力学的に安定な無機化合物のDBを作成、38万種の熱力学的に安定な新規結晶を発見
- ・ GNN・第一原理計算・アクティブラーニング

UC Berkeley・LBNL [2]

- ・ 空气中で安定な新規無機化合物41種類を17日間・355回の自律実験により合成
- ・ 自律実験（アクティブラーニング）で合成法を探索

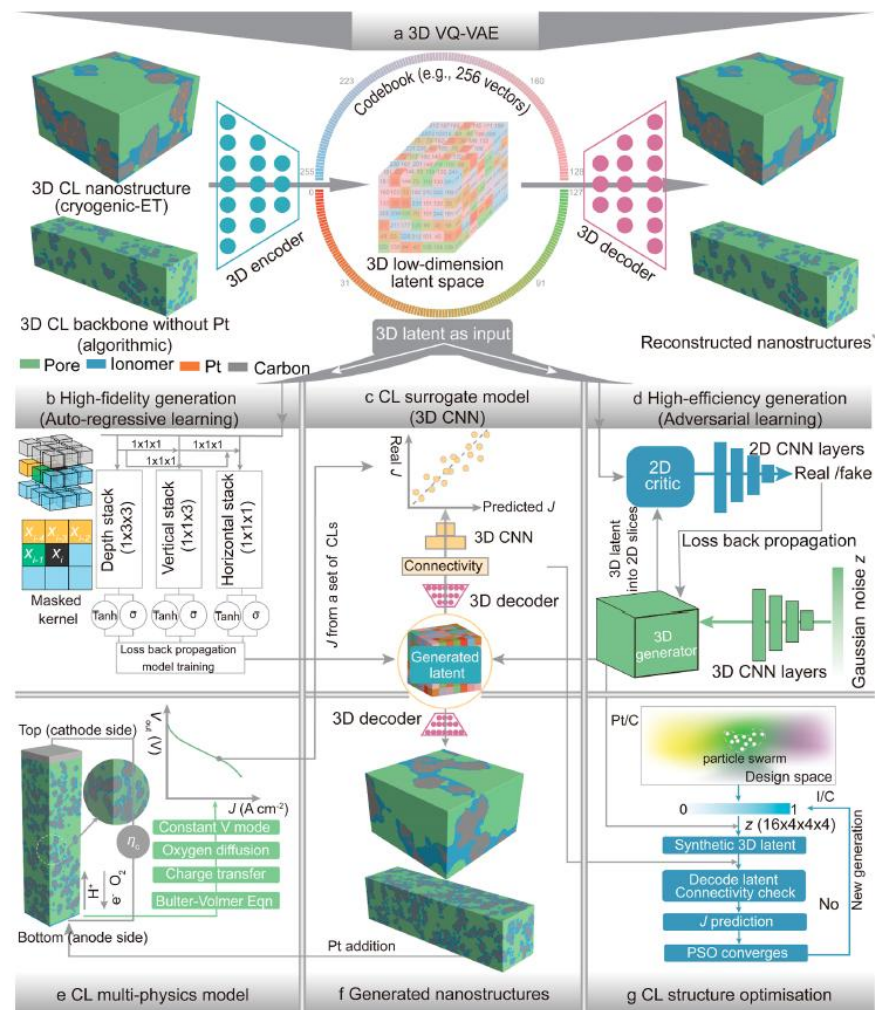


【出所】

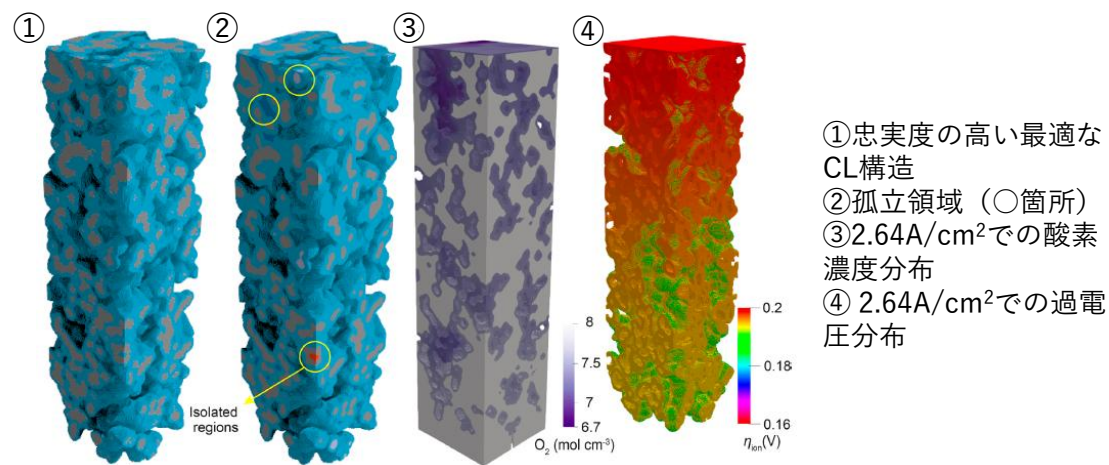
[1] Merchant, Amil, et al. "Scaling deep learning for materials discovery." Nature 624.7990 (2023): 80-85.

[2] Szymanski, Nathan J., et al. "An autonomous laboratory for the accelerated synthesis of novel materials." Nature 624.7990 (2023): 86-91.

- PEFC触媒層の構造と性能の関係を正確に反映し、生成AIを活用したデータ駆動型による効率的に触媒層の設計空間を探索できる最適化技術の研究



- (a) 3D-VQ-VAEは3Dエンコーダと3Dデコーダの学習によって高次元CLナノ構造を低次元潜在空間に変換することを学習、2種類の異なる入力CLナノ構造を使用して、異なるタスクに対して別々に3D-VQ-VAEをトレーニング
 (b) 自己回帰生成モードが (a)からの3D潜像によってトレーニングし、3D潜像を生成するために使用、(f)で高忠実度3D CLナノ構造にデコード、一方、生成は低効率
 (c) データ駆動型CNNモデルにより、生成された3D潜像からデコードされる様々な生成された3D CLナノ構造の電流密度を予測
 (d) 敵対的生成学習モデルを、(a)からの3D潜在のデータ構造を学習するために採用し、次に、高次元CLナノ構造にデコードされる3D潜像を効率的に生成
 (e) 細孔スケールCLモデルは、マルチフィジックスを解くことによって与えられた3D CLナノ構造のJを予測する。予測されたJ値は、(c)のデータ駆動代理モデルのトレーニングにおけるラベルとして機能
 (f) (a)、(g)の2つの異なる入力データセットに対して生成された3D CLナノ構造の実証、(c)の代理モデルからのJによって駆動される様々なPt/CおよびI/C比を有する細孔スケールCL骨格ナノ構造の全体最適化のための粒子群最適化
 (g) の2つの異なる入力データセットに対して生成された3D CLナノ構造の実証



【出所】 Z. Niu, et. al., "Generative Artificial Intelligence for Designing Multi-Scale Hydrogen Fuel Cell Catalyst Layer Nanostructures", ACS Nano 2024, 18, 20504-20517.

3. まとめ

カーボンニュートラル実現に向け、「水素」は再エネ普及拡大と連動し、電化ではCN達成が困難な領域、エネルギー・経済安全保障等の観点で必要不可欠なエネルギー

■ 水電解技術（グリーン水素製造）

- 2030年に向け発表済の水電解装置の導入計画は500GWを突破したが、FIDに至ったものは限定的、グリーン水素製造プロジェクトの峻別が進む、水電解の資本コストは高止まりの状況
- 電力系統を介した再エネ活用として水電解の付加価値（系統混雑緩和、調整力提供等）を最大化するエネルギーシステムの構築が重要
- 水素製造コスト低減に向けては、欧米で先行している水電解装置の実証を進め、電力＜上流＞と利用＜下流＞と水電解との関係を明らかにした上でシステムの技術仕様を確立、安価な電力を使うための変動電力への対応（耐久性や応答性）、数量効果によるコスト低減、評価解析基盤も活用した電解槽の技術進展、付帯設備、設置コストの低減が必要

■ 燃料電池技術

- 燃料電池モビリティの市場形成は黎明期であるが、大型トラック等のHDVを中心に市場拡大が期待、定置用燃料電池はDC向け電源等の新たな市場の可能性
- 本格普及に向けた将来の技術目標は高いが、材料・生産技術を中心に現状技術の限界を打破するため、DX（デジタルトランスフォーメーション）の活用による研究開発の加速が鍵に（水電解の研究開発も同様）

これまで16回にわたり、世界の水素・燃料電池動向について様々な話題を提供させていただきました。あらためまして、ご聴講の皆様および関係者の方に深くお礼申し上げます。

ともに挑む。ともに実る。

MIZUHO



本資料は、当社が信頼に足り且つ正確であると判断した情報に基づき作成されておりますが、当社はその正確性・確実性を保証するものではありません。本資料のご利用に際して、貴社ご自身の判断にてなされますよう、お願い申し上げます。

本資料の著作権は当社に属し、本資料の一部または全部を、①複写、写真複写、あるいはその他の如何なる手段において複製すること、②当社の書面による許可なくして再配布することを禁じます。