

第10回FC-Cubicオープンシンポジウム

水素・燃料電池・水電解ー世界の政策とR&Dの動向ー

2023.3.23

みずほリサーチ&テクノロジーズ

1. 海外における水素エネルギー戦略の最新状況

各国・地域における水素政策等の動向

■ 欧州・米国・アジアをはじめ再エネ資源国(豪州・中東等)も水素戦略を打ち出し、水素普及に向けた取り組みを加速

 EU (欧州連合)	 中国
 ドイツ	 韓国
 フランス	 豪州
 英国	 サウジアラビア
 米国	 UAE

✓ 2019年に「欧州水素ロードマップ」を、2020年に「欧州水素戦略」を策定

✓ 2022年にロシア・ウクライナ情勢を踏まえて「RePower EU」を発表し、2030年までに域内での再エネ由来水素の製造量を1,000万トン/年、海外からの再エネ由来水素の輸入量(北アフリカ等を想定)を1,000万トン/年とする目標を設定の上、需要創出のために再エネ指令を改定へ

✓ 2020年に「国家水素戦略」を策定し、2030年までに国内再エネ水素製造能力を5GWにする目標を設定

✓ 国内市場創出に70億ユーロ、国際パートナーシップ構築に20億ユーロの助成を2020年に採択

✓ 2020年に「水素戦略」を改定し、2030年までに電解装置を6.5GWにする目標を設定し、生産する水素については再エネ由来と原子力由来を想定

✓ 2021年に「国家水素戦略」を策定し、2030年までに5GWの低炭素水素製造能力を開発、2050年には英国の最終エネルギー消費量の20~35%を水素が占めると発表

✓ 2022年にロシア・ウクライナ情勢を踏まえて「エネルギー安全保障戦略」を発表し、2030年の製造能力目標を10GWに倍増させ、うち少なくとも半分を電解水素で調達すると表明

✓ 国家レベルでは、エネルギー省(DOE)主導の「H2@Scale PJ」にて基礎研究から応用開発までの検討を進め、2020年に「水素プログラム計画」にて水素の製造コストと輸送コストを各2ドル/kg、産業用途や発電用途では1ドル/kgを目指すを発表

✓ 州レベルでは、CA州が2020年に「再エネ由来水素製造設備の配備・構築ロードマップ」を策定し、グリーン水素需要が2030年に40万トン/年、2050年に400万トン/年に達すると発表

✓ 現状はグレー水素(95%以上)により世界最大の水素生産国だが、今後グリーン水素の比率を2030年に15%に、2050年に70%に引き上げる方針

✓ 自動車に加えて船舶や鉄道等の「水素ロードマップ」も策定し、2020年12月にはエネルギー法で水素をエネルギーと位置付けた上でグリーン水素認証制度を設定、地方政府レベルでも多数の水素発展計画が存在

✓ 2019年に「水素ロードマップ」を、2020年12月に「2050年カーボンニュートラル推進戦略」を公表

✓ 2021年には韓国大手15社が「コリアH2ビジネスサミット」を発足させ、2030年までに4兆円超の投資実行を発表

✓ 2018年に「水素ロードマップ」を、2019年に「国家水素戦略」を発表

✓ 2030年までに水素産業で世界をリードするための57のアクションプランを示し、各州政府が資金供出等でプロジェクトを支援

✓ 2021年にエネルギー相が2030年までに400万トン/年の水素を生産し輸出する考えを表明し、サウジアラムコCEOが水素生産拡大に向け主要市場で長期供給契約締結を目指していると説明し、欧州等にパイプライン等で輸出することを展望

✓ 2020年にACWAパワーと米・エアプロダクツ・地場事業会社の3社が20万トン超/年のグリーン水素と120万トン/年のグリーンアンモニアを製造するプラント建設で合意し、独・ティッセンクルップが水電解装置を供給予定

✓ 2021年に2030年世界水素市場シェア25%を目指すを発表し、欧州や東アジアに輸出することを展望

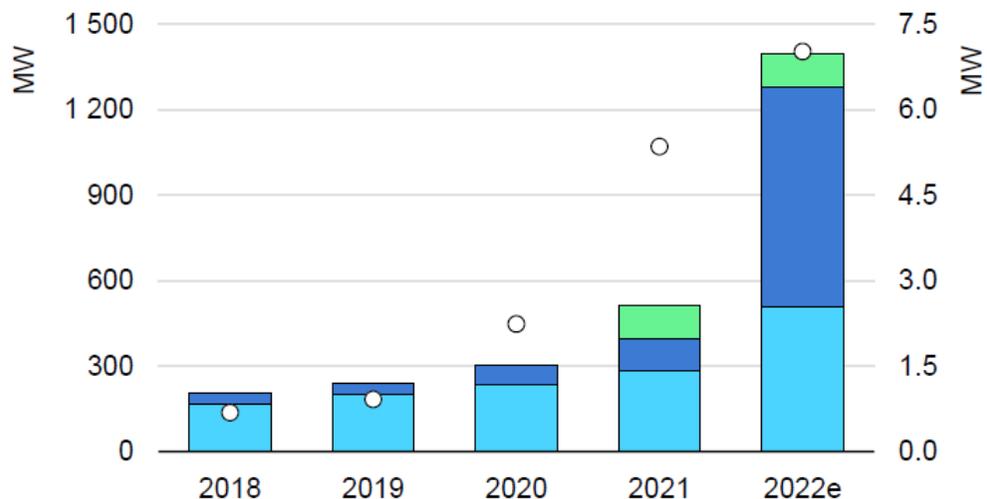
✓ アブダビ国営石油(ADNOC)が水素生産量を現状の30万トン/年以上から50万トン/年への増産を計画

(出所)各国水素戦略及び各種公開情報をもとにみずほ銀行産業調査部作成、当社加筆

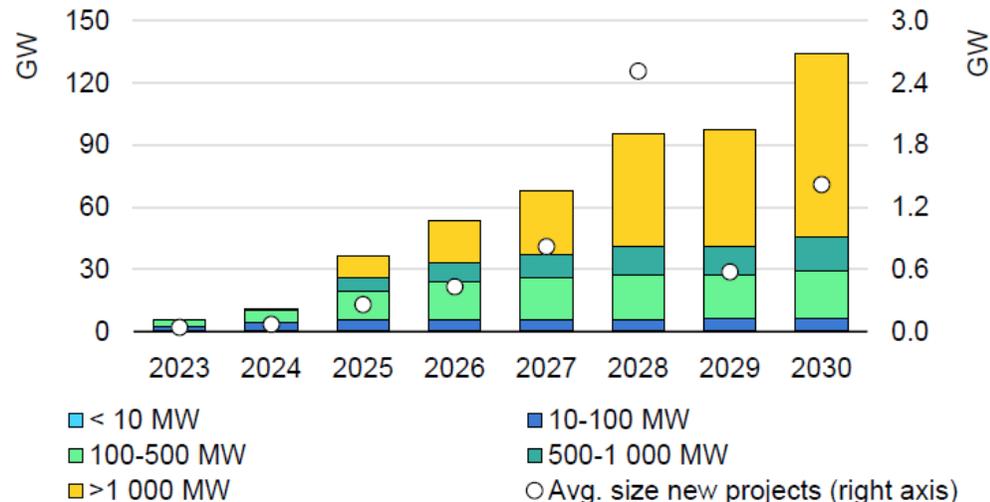
世界の水電解装置の導入状況と将来見通し(2030年)

- 2018年～2022年で水電解装置の導入量は大きく拡大(2022年で1.4GW)、プロジェクトあたりの装置容量の規模(右軸)も拡大傾向だが、直近では数MWの規模
- 2030年頃に向けて発表済の計画でも水電解の導入量は今後世界全体で大幅に増加が見込まれ、**2030年までに134GW**に達する見通し、2025年以降はプロジェクトの規模も**数100MW～GWスケールに拡大**、水電解装置の年間導入規模は20～30GWとなりうる

導入済総設備容量(運転開始年別)



計画中または建設中総設備容量



(出所) IEA, "Global Hydrogen Review 2022"をもとに当社作成

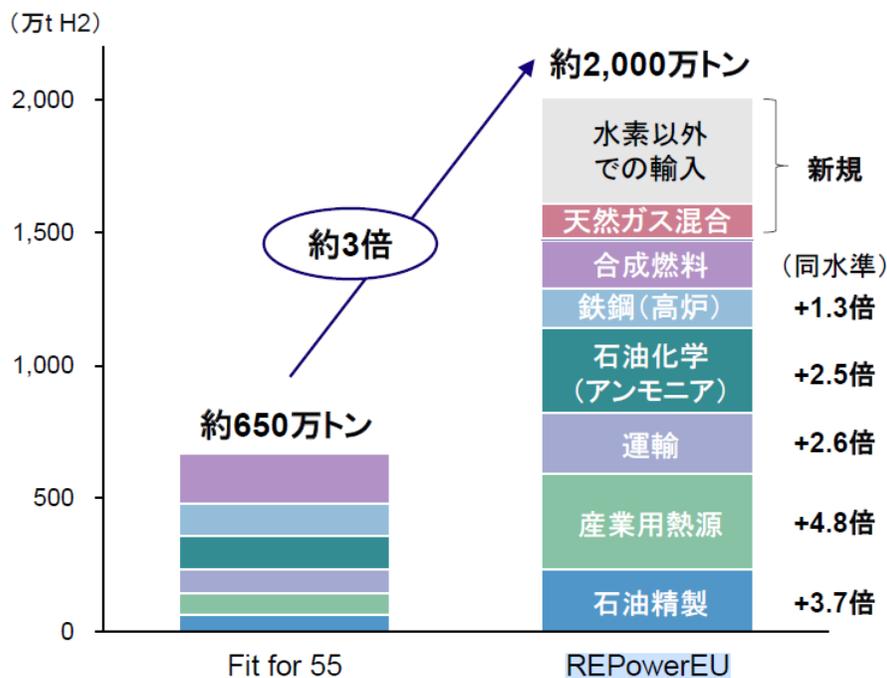
134GW=約940万トンのグリーン水素製造量

(電解エネルギー消費量4.5 kWh/Nm³、稼働率40%前提)



- 欧州委員会はロシアのウクライナ侵攻を受け2022年3月に概要を発表したエネルギー政策パッケージ「REPowerEU」について、5月18日にその詳細を発表、ロシア産化石燃料への依存を**2030年よりも早期に脱却**し、かつ2021年に発表の政策パッケージ「Fit for 55」での**2030年GHG55%削減**の目標を計画、この実現には2,100億ユーロの投資が更に必要とする
- 目標実現に向けた手段として再生可能水素にも重点が置かれており、特に**2030年に2,000万トンの再生可能水素導入**(域内製造1,000万トン、輸入1,000万トン)、25年までに水電解装置の**年間生産能力を17.5GWに引き上げる**といった目標を設定
- 欧州委員会はタクソミーにて、製造から消費で生じる**CO₂を7割超減らした水素をクリーンとする規則**を施行

セクター別水素利用の見通しの変化(2030年時点)



クリーンな水素製造に係る環境基準

環境基準	内容
Certify (欧州)	製造段階までに出るCO ₂ を6割削減、今後基準引き上げを見込む
EUタクソミー規則	製造から輸送、燃料消費までに発生するCO ₂ を7割超削減
低炭素水素法案 (英国)	製造時までに出るCO ₂ を85%程度削減
【参考】インフラ法 (米国)	製造時のCO ₂ を8割以上削減

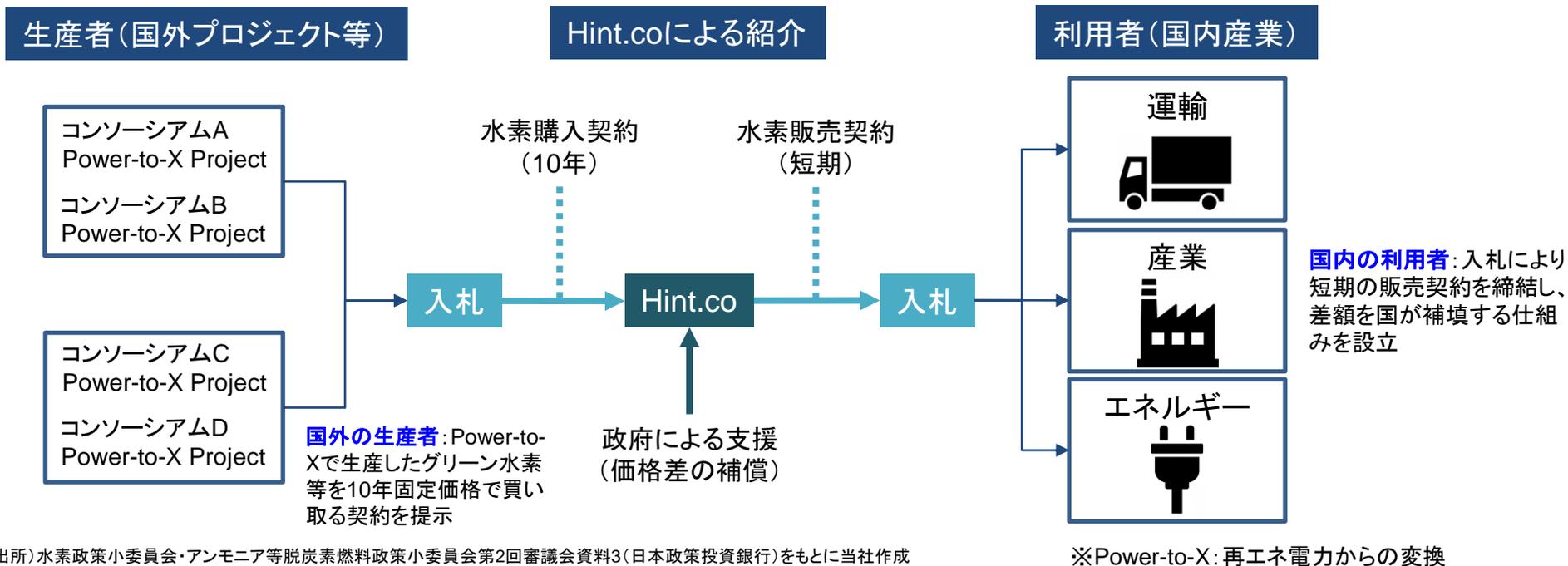
- クリーン水素のCO₂の削減に関する**包括的な国際標準は現時点で存在しない**
- CO₂削減技術に投資マネーを呼び込むべく、EUや英国、米国が先駆けて基準を明示し、**国際標準作りで先行したいとの思惑**あり

(出所) 欧州委員会資料"Implementing The REPowerEU Action plan"等をもとに当社作成

ドイツ: グリーン水素の国外生産・輸入プロジェクト発足



- ドイツ連邦政府は**2020年6月に「国家水素戦略」**を採択、水素技術の市場展開を加速するための投資として€70億、国際パートナーシップを促進するための投資として€20億が明記
- 2030年までに**合計5GWの水電解システムを整備**(2035~2040年までにさらに5GWの水電解システム整備を計画)
- 2021年6月、BMWi(ドイツ連邦経済・エネルギー省)は**「H2Global」に9億ユーロの予算を拠出**すると発表
 - ・ グリーン水素の**ドイツ国外での生産とドイツへの輸入を推進**するプロジェクト
 - ・ 水素製造企業であるリンデ、エンジン・機械メーカーであるMANエナジーソリューション、鉄鋼のティッセンクルップ等国内16社で設立(2022年12月段階で51社が参画)





- CN社会を実現するためにクリーンエネルギーとインフラへの投資を通じて経済成長と雇用を促進、2035年までに電力脱炭素化、2050年までにGHG排出ネットゼロを表明
- 社会・環境対策の枠組み「**Build Back Better Framework**」を発表、そのなかで**気候変動対策に5,700億ドル**を投じ、2030年のGHG排出量削減目標(2005年対比▲50~52%)達成を目指す方針
- 水素製造コストは2030年頃までに1ドル/kgを目指し(2025年までに2ドル/kg)、2022年2月、**インフラ投資・雇用法(超党派インフラ法: BIL)**において、①地域クリーン水素ハブ(80億ドル)、②クリーン水素電解プログラム(10億ドル、5年)、③クリーン水素製造およびリサイクルRD&D活動(5億ドル)の投資を計画

今後の水素需要の見通し

	運輸用途	産業用途	電源・発電用途
既存需要	・マテリアルハンドリング ・バス ・乗用車(LDV)	・石油精製 ・アンモニア製造 ・メタノール製造	・分散電源：一次電力およびバックアップ電力
新規需要	・商用車(MDV/HDV) ・鉄道、船舶、航空 ・建機 ※脱炭素化・電化が困難な領域(長距離商用航空機、等)はe-fuelの可能性	・製鉄・セメント製造プロセス ・工業熱 ・合成燃料	・火力発電(水素/アンモニア) ・可逆燃料電池 ・長期エネルギー貯蔵

➡ 現在の1,000万トンから**2~4倍**の需要拡大

(出所)DOE, "Hydrogen Program Plan"をもとに当社作成

水素関連の具体的施策

環境基準	金額	内容
Section 30431. Zero Emissions Vehicle Infrastructure Grants.	2億ドル	州のエネルギープログラムを通じた 水素充填インフラ (2億ドル)への金銭的支援
Section 30443. Domestic Manufacturing Conversion Grants	350億ドル	BEV・PHV・ FCEV とその部品の製造に関わる国内拠点のコンバージョンに補助金
Section 136204. Clean Hydrogen.		水素製造設備 に係る10年間税控除(ライフサイクル排出量により、控除額が変動)

➡ 燃料電池・水素製造(水電解)への補助金・税制優遇

(出所)White House, JETRO資料等をもとに当社作成



- 2021年10月、国内外のクリーン水素（グリーン水素とブルー水素）の先導、インフラ構築、日常での水素活用、サプライチェーン基盤強化に向けた水素先導国家ビジョンを策定、水素経済のマイルストーンを公表

削減目標	中期目標(NDC) 2030年までに▲40% (2018年対比)	長期戦略 2050年までにカーボン ニュートラル	水素の 位置づけ	電力、輸送、産業部門の低炭素化に水素を 利活用可能												
水素・燃料 電池政策の 全体像	<ul style="list-style-type: none"> 産業通商資源部が「水素経済活性化ロードマップ」(2019/1)にて水素・燃料電池政策の全体像を策定 <ul style="list-style-type: none"> 2018年6月産業通商資源部が、水素・燃料電池産業の創出へ2.6兆ウォン(2,500億円)を予算計上(～2022年) 2019年に第三次マスタープランを公表。水素をエネルギーミックスの重要な役割と位置づけ。燃料電池技術へ注力 産業通商資源部が「水素輸入タスクフォース」(2020/6)と「水素委員会」(2020/7)を発足 「水素経済の育成および水素安全管理に関する法律」を施行(2021/2) 水素インフラの構築と水素SCの基盤強化の為、「水素先導国家ビジョン」を策定(2021/10) 															
定量目標	FCEV等の利用アプリケーションや水素ST等 の導入目標 <table border="1" data-bbox="375 839 940 996"> <thead> <tr> <th></th> <th>2022年</th> <th>2040年</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>FCEV</td> <td>8.1万台</td> <td>620万台</td> </tr> <tr> <td>FCバス</td> <td>0.2万台</td> <td>6万台</td> </tr> <tr> <td>水素ST</td> <td>320箇所</td> <td>1,200箇所</td> </tr> </tbody> </table>		2022年	2040年	FCEV	8.1万台	620万台	FCバス	0.2万台	6万台	水素ST	320箇所	1,200箇所	施策例	<ul style="list-style-type: none"> 産業通商資源部 <ul style="list-style-type: none"> バスの耐久性向上に向けた実証 既存STにおける実証実施のための特例法設置 水素・アンモニア発電実証推進団を発足(2021/11) 産業通商資源部、環境部 <ul style="list-style-type: none"> 再エネ水素ステーション技術開発実証 	
	2022年	2040年														
FCEV	8.1万台	620万台														
FCバス	0.2万台	6万台														
水素ST	320箇所	1,200箇所														
新政権 の動向	<ul style="list-style-type: none"> 2022年7月5日、国務会議にてユン新政権における「新政権のエネルギー政策方向」を議決 <ul style="list-style-type: none"> 2030年エネルギーミックスのうち、原発の割合を30%以上に拡大(前政権時は23.9%) クリーン水素のサプライチェーンを構築し、世界一の水素産業を育成 2022年10月～12月に「第10次電力需給計画」を策定し、2023年3月に「国家カーボンニュートラルグリーン成長基本計画」を策定、11月に2030年商用車3万台、液水ステーション70基、水電解技術の国産化率100%等の定量目標を設定 															

(出所)環境省「脱炭素化に向けた水素利活用に係る国内外の動向」をもとに当社作成



- 政府は2022年3月23日に「**水素エネルギー産業中長期計画(2021年～2035年)**」を公表、2025年/2030年/2035年に向けた発展目標と対応する取り組みを設定、特に2025年に向けては、具体的な数値目標、並びに応用示範事業(交通・貯蔵・発電・産業)を例示
- モデル事業を含め、決して新規の内容が示されたわけではないが、「**水素**」にフォーカスした**中長期政策として、今後の具体的な政策を繋ぎ合わせる中核を担う**ことが期待

政府で掲げられた主要発展目標('25, '30, '35)

2025年:コア技術・プロセスの掌握と各種インフラの整備

- コア技術と製造プロセスの基本的な掌握
 - 一燃料電池車保有台数: **約5万台**
- 水素燃料補給ステーション建設第一弾の配備
 - 一再エネ由来水素の規模: **10-20万トン/年**
 - 一酸化炭素削減効果: **▲100-200万トン/年**

2030年:カーボンピークアウト目標の達成を強力に下支え

- 水素産業技術イノベーション体系の完備
- クリーンエネルギー(≡再エネ)製水素生産・供給体制の形成

2035年:エネルギーの「グリーン転換」における役割の発揮

- 水素エネルギー産業システム・多様な応用エコシステムの構築
- 末端消費に占める水素活用比率の大幅な増加

(出所) 中国政府政策文書等をもとに当社作成

政策で言及された具体的な取組事項

2025年までに注力する「水素産業イノベーション応用モデル事業」

- | | |
|----|---|
| 交通 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 鉱業・港湾・園區等での固定ルート走行トラックでの実証 ■ 都市バス、配送車両、衛星車両等の公共分野での実証 ■ 船舶、航空機、その他分野での実証 |
| 貯蔵 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 再エネ資源/水素需要に優れる地域での商業運用事業の探求 ■ FCEV 実証路線等における分散型再エネと連携した低コスト水素の地産地消モデル |
| 発電 | <ul style="list-style-type: none"> ■ マイクログリッドにおける熱電併給燃料電池活用の促進 ■ 基地局併設燃料電池を活用した[公・民]各施設での応用 |
| 産業 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 水素製鉄、合成アンモニア/メタノール、石油・ガス生成への応用 |

中長期目線での各取り組みの方向性

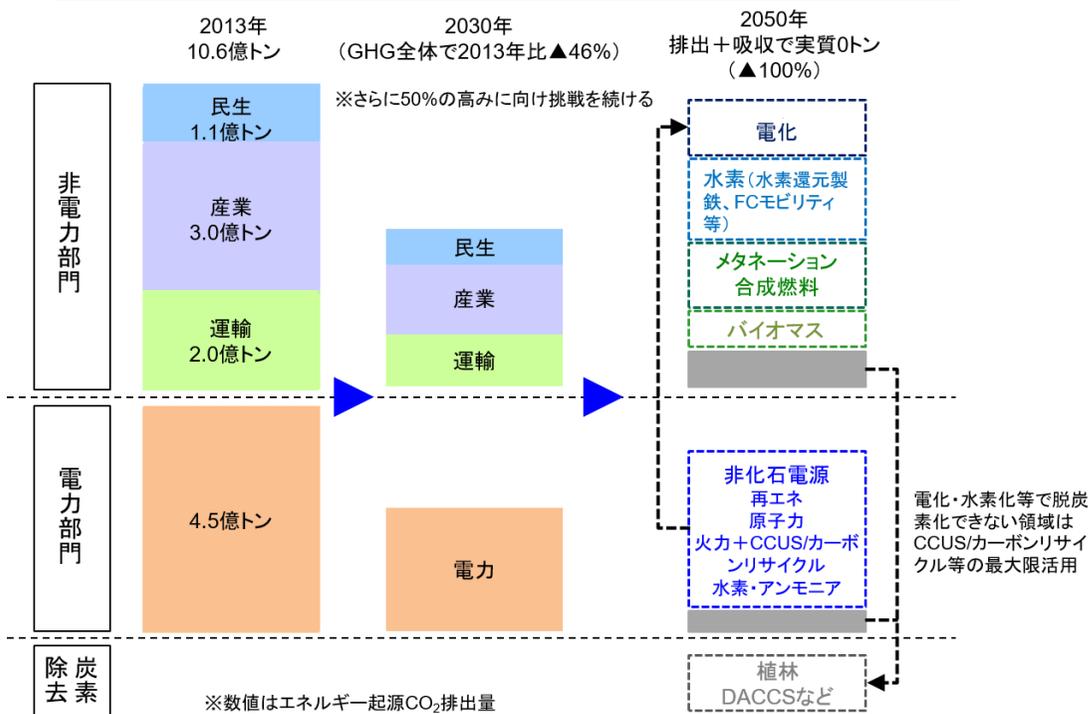
- 技術イノベーション体系の完備
- インフラ構築の統一的な促進
- 多様な示範応用事業の着実な推進

日本:カーボンニュートラルへ向けた道筋と水素戦略・定量目標



- カーボンニュートラル実現に向け、水素(アンモニア、合成ガス・燃料含)は電力部門・非電力部門で一定の役割を担うと期待
 - 電力部門ではゼロエミ火力用燃料として活用、非電力部門では輸送用燃料や工業利用、熱の脱炭素化に寄与
- 自国資源に限られる日本では、国内資源を最大限活用しながらも海外からクリーン水素調達を図ることが必要
 - 2030年以降に本格的に商用規模の国際サプライチェーンが構築される見通し、一方、**並行して余剰再エネ等を活用した国内の水素製造の可能性も検討する必要**

2050年カーボンニュートラルへ向けた道筋のイメージ



(出所) 資源エネルギー庁「水素・アンモニアを取り巻く現状と今後の検討の方向性」をもとに当社が作成

2050年へ向けた水素供給の道筋

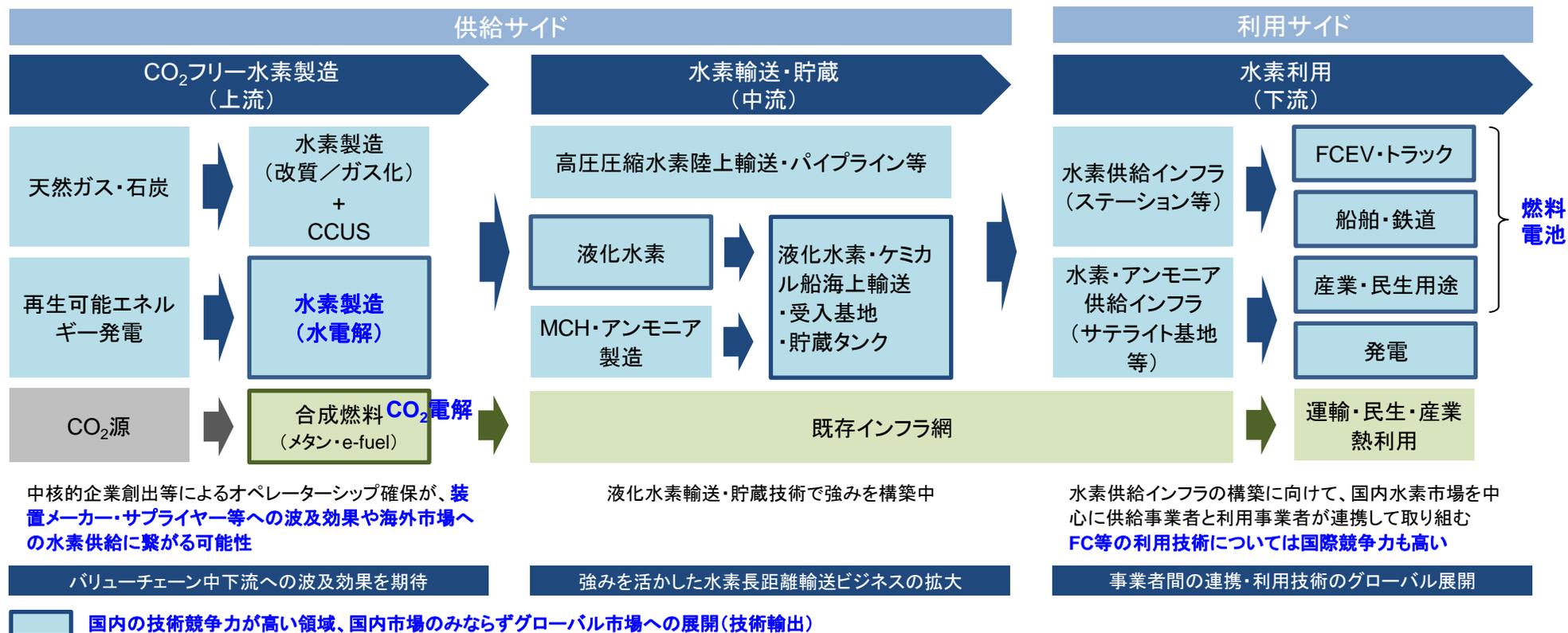
	短期 (~2025頃)	中期 (~2030頃)	長期 (~2050)
実績・目標量	約200万トン	最大300万トン	2000万トン程度
コスト目標	—	30円/Nm ³	20円/Nm ³ 以下
既存供給源 (副生水素等)	水素供給源として最大限活用	供給源のクリーン化 (CCUSの活用等)	
輸入水素	実証・準商用化等を通じた知見蓄積、コスト低減	商用ベースの大規模国際水素SC構築	調達源多様化・調達先多角化を通じた規模拡大
新たな国内供給源 (電解水素等)	実証を通じた知見蓄積、コスト低減	余剰再エネ等を活用した水電解の立ち上がり	水電解水素の規模拡大・新たな製造技術の台頭

(出所) 資源エネルギー庁「今後の水素政策の課題と対応の方向性 中間整理(案)」をもとに当社作成

日本:水素バリューチェーンにおけるビジネス機会の確保と技術



- 日本の水素関連事業者にとって、上流から下流まで水素バリューチェーン全体でビジネス機会が存在しうる
- 上流領域では、日本企業がグローバルに水素製造・供給(上流・中流)プロジェクトのオペレーターシップを確保していくことで、バリューチェーン各領域で**国際競争力ある技術を有する事業者が海外への技術輸出も含めて有利に働く**
- 技術領域としては、上流サイドではグリーン水素製造(水電解装置)やCO₂再利用におけるCO₂電解装置、下流サイドでは**燃料電池(車載用・定置用)に強み、ただし、欧米・中韓の技術投資加速によって競争力の優位性も揺らぎつつあり**

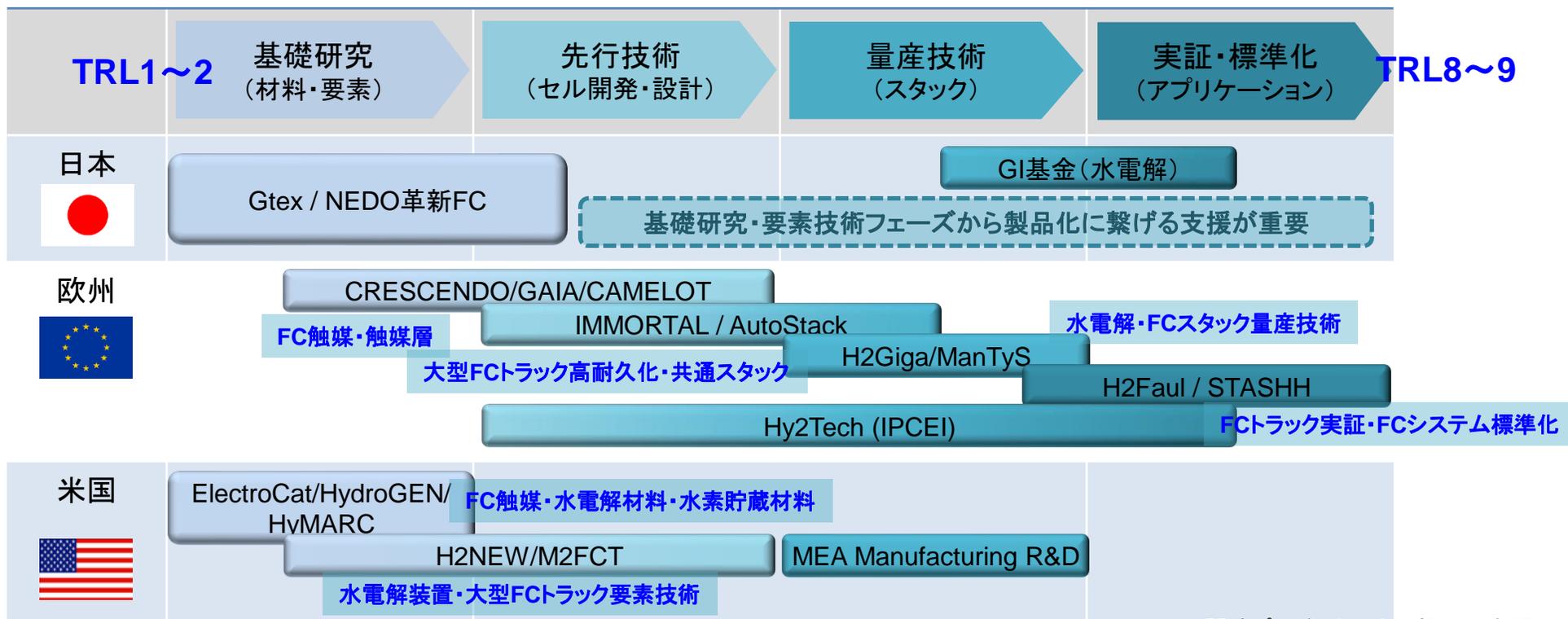


(出所)当社作成

2. 水素・燃料電池分野のR&D政策の動向

各国・地域の燃料電池・水電解の政府系R&D投資

- 燃料電池・水電解における研究開発への投資は材料等の基礎研究・基盤技術開発に比重が大きい一方、**欧州・米国では基礎研究から先行・量産技術、大量普及に向けた実証プロジェクトまで研究レベルから製品化までのシームレスな投資を推進**
- 2023年2月に公表されたNEDO技術開発ロードマップでもディーゼルパリティを目指した大型・商用燃料電池の本格普及に向けて「ゲームチェンジ」を要する基礎研究の重要性を提示、**研究開発成果を市場拡大へシームレスに繋げる持続的なR&D投資のスキームが重要に**

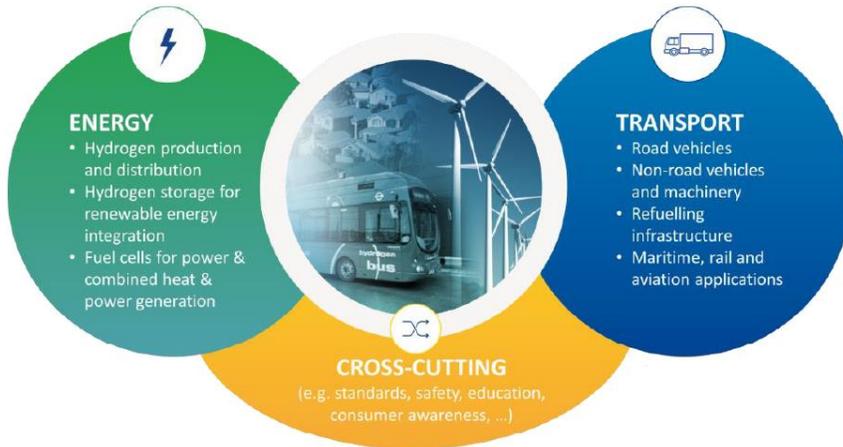


※関連プロジェクトは一部のみ表記



- 欧州の多年度研究開発プログラムの予算を用い、**CHJU(欧州クリーン水素パートナーシップ)**が**水素・燃料電池関連の研究・開発、実証を推進**、欧州委員会(European Commission)とHydrogen Council, Hydrogen Council Researchより構成される官民共同プロジェクト
- 前進のFCHJU(2014~2020年の第2フェーズFCH2JU)において**総額€13.3億(平均€1.9億)**を**水素製造・貯蔵・民生利用、および運輸部門での利用へ投資**、数多くの研究・技術開発から実証、商用化の成功事例を創出
- 水素製造に€1.8億(内、電解槽€1.5億)、運輸部門(FCモビリティ・HRS)に€4.4億、民生部門(定置用FC・EMS)に€2.6億

RD(研究開発)&D(実証)の投資対象



FCH2JU(FY2014~FY2020)における成果



材料開発、製造技術、電解槽・FCシステムと多様なアプリケーションへ応用

(出所)European Hydrogen Week Programme Review 2022, "Clean Hydrogen JU Programme Status"



- 2022年および最新の2023年の水電解・燃料電池分野の新規プロジェクト募集は以下のとおり、TRL2(研究の応用実証)～TRL6(技術成立性の実証)の範囲で**高圧対応水電解技術と量産・システムスケールアップ技術、HDアプリケーション用PEFCスタックや120°C以上のHT-PEFCの開発**に注力

FY	分野	テーマ	予算(M€)	主なKPIおよび技術成熟度(TRL)
2022	水電解	高圧・高温水蒸気電解(SOEC)の開発・検証	2.5	10kWスタックで2,000hの耐久性ラボ検証、圧力5bar～数100bar対応(オンサイトHRS向け)(TRL 2-4)
		高温水蒸気電解(PCEC)の開発・検証	2.5	プロトン伝導セラミック電解セルでのラボ検証(TRL 2-4)
		高圧・低温水電解の開発	5.0	アルカリ・PEM・AEM問わず2027年の実証フェーズに向けた高圧対応電解セル開発(TRL 2-5)
		電解槽の次世代スケールアップ生産技術開発	4.0	電解タイプ問わず€40/MWhのCAPEX目標を達成する生産技術(TRL 4-5)
		大型電解槽のスケールアップ技術開発	6.0	50-1,000MW大規模電解システム対応(TRL 3-5)
	燃料電池	HDV用液体水素容器の開発	4.0	貯蔵密度10wt%および40g/L、容器コスト€320/kgを目指したLH ₂ 容器の開発(TRL 4-6)
		HDV向け次世代PEFCスタックMEAの開発	6.0	出力密度1.2W/cm ² (0.3gPt/kW)、耐久2万時間を2024年に達成、2030年スタックコスト€75/kWを見通すMEA開発(TRL 2-4)
航空機向け革新的HT-PEFCスタックの開発		5.0	システム効率50%以上、耐久性3万時間を2030年に達成、最高温度120°C以上に対応するスタック部材開発(TRL 2-4)	
2023	水電解	革新的水電解セルの開発	6.0	セル抵抗大幅低減、高電流電解運転での安定性、PGM使用量低減(PEM: 1.25mg/W、AEL: 0.3mg/W)(TRL 2-4)
		次世代中温水蒸気電解(SOEC)の開発	3.0	550-700°Cで作動、高速起動・停止が可能なSOECの開発(TRL 2-4)
		アルカリ水電解技術の革新	2.5	4.3kWh/Nm ³ の高効率アルカリ水電解セルの開発、スタックコスト最終目標は€150/kW(TRL 3-5)
	燃料電池	船舶向け大型FCスタックの開発	7.5	システム出力10MW(スタック250-500kW)、耐久8万時間、システムコスト<€1,000/kWを2030年に見通せるFCシステムの開発(TRL 4-6)

(出所) "Clean Hydrogen JOINT UNDERTAKING (Clean Hydrogen JU) -Work Programme 2022/2023-"

欧州共通利益に適合する重要プロジェクト(IPCEI)での水素技術への投資



- IPCEI (Important Project of Common European Interest) はイノベーションの必要な**重点産業への複数の加盟国による共同支援を可能**とする、EU国家補助ルールの特例措置
- 2022年7月に初の水素関連プロジェクトとしてIPCEIからHy2Techが承認、①水素製造、②燃料電池技術、③貯蔵および輸送技術、④エンドユーザによる活用技術まで、**参加35社の41プロジェクトに対し、最大で総額€54億の公的助成が可能**
- 特に運輸部門など水素技術のバリューチェーンの幅広い部分をカバー、**新しい高効率電極材料、更なる高性能な燃料電池、革新的な輸送技術**など、重要な技術的ブレークスルーの開発に貢献することが期待

Hy2Techの支援による水素・燃料電池の技術開発の加速

主な企業	概要
Elcogen	高耐久rSOCに用いられる高価な原材料使用量低減、高耐久化研究開発
Nedstack	年産1GWの生産能力を持つ定置用・船舶用PEFCスタックの半自動生産システムの開発
Arkema	水素素貯蔵タンク用素材に完全リサイクル可能なバイオ原料を用いる技術開発
Symbio	2030年に20万ユニットのPEFCスタック量産体制の確立、1,000人の新規雇用創出
Daimler Truck	液体水素FCトラックの開発



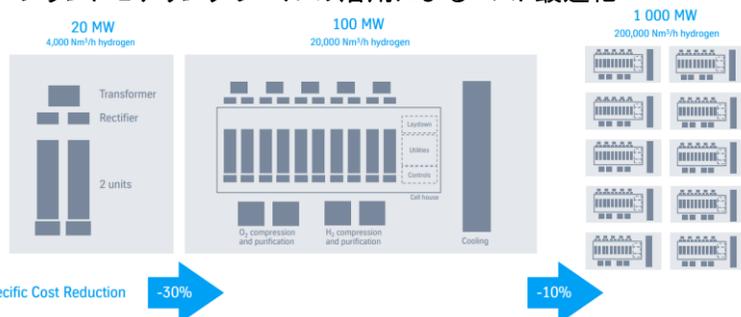
(出所) European Commissionウェブサイト他、関連公開資料より当社作成



- GWスケールアップとコスト低減に向けて、電解槽の標準化・モジュール化と大型プロジェクト「H2Giga」(予算:5億ユーロ)による量産技術開発に注力、**デジタル技術(DX)**や**自動化・ロボティクス技術**を駆使した技術開発を推進

①標準化・モジュール化

- 標準化された20MWモジュールを提供
- プラントモデリングツールの活用によるコスト最適化



(出所) Christoph Noeres (Thyssenkrupp) "Why the Industrial Sector is No1 Driver to Scale-up of Green Hydrogen Today"

②量産技術の開発

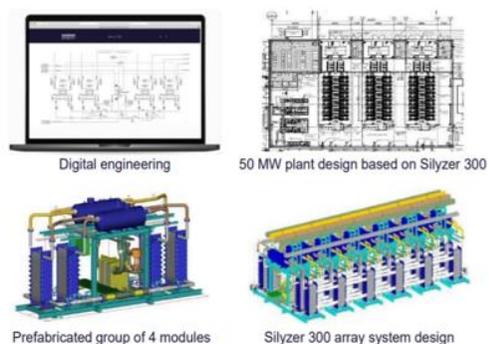
- ドイツ連邦教育・研究省の電解装置量産技術開発プロジェクト「H2Giga」に参画
- 次世代電解スタックを開発するとともに、**連続生産のための自動化・ロボティクス技術を開発**



(出所) Thyssenkrupp社プレスリリース

Thyssenkrupp

- プラント設計の標準化・モジュール化
- デジタルエンジニアリングツールの活用



(出所) Armin Schnettler (Siemens energy), "New Energy Business Large-scale PEM Electrolysis for Industrial Applications"

- ドイツ連邦教育・研究省の電解装置量産技術開発プロジェクト「H2Giga」に参画
- 数GWの生産規模への柔軟な拡張を見据えたギガファクトリー構築(自動化かつ高品質の実現)



SIEMENS



- DOEでは水素・燃料電池分野において**研究開発から技術統合・実証、普及と融資プログラムの一体運営**により推進
- プロジェクトを通じて、これまで**約1,200以上の特許**（内、アカデミア35%）、**30テーマの技術の商用化**（FC触媒、FCフォークリフト、電解槽、高圧水素タンク等、65テーマは今後3～5年以内に市場導入可能性）、**産業界主導による市場拡大**（FCフォークリフト5万台以上、等）の成果

研究開発

コンソ形式を中心とした基礎・応用研究（PDはDOE National Lab.）

コアチーム：
DOE傘下の国研

大学 産業界 国研

HydroGEN Advanced Water Splitting Materials H2NEW Hydrogen from Next-generation Electrolyzers of Water

ElectroCat Electrocatalysis Consortium MARC

MILLION MILE FUEL CELL TRUCK

- 成果創出加速に向けた基礎科学研究施設の活用、理論+モデリングの推進

技術統合・実証

技術導入のリスクを軽減するための実証とシステム統合

- 再生可能エネルギーおよび原子力による水素製造、輸送困難な15地域への供給
- FCトラック、データセンター、旅客フェリーの燃料供給、エネルギー貯蔵、製鉄プロセスでの水素利用

普及・ファイナンス

水素ハブ形成・融資保証プログラムおよび人材育成

Regional Clean-Hydrogen Hubs

Clean-H₂ Producers Clean-H₂ Infrastructure Clean-H₂ Consumers

- 水素ハブ形成：グリーン（再エネ電力由来）水素、ブルー水素、原子力、多様な水素利用（8億ドル）
- 熱分解と大規模水電解、水素エネルギー貯蔵と発電に関する新規融資保証プロジェクト（総額 15 億ドル）

（出所）DOE, "U.S. DOE Hydrogen and Fuel Cell Activities"をもとに当社作成



- ARPA-E (DOEエネルギー高等研究計画局)は、民間部門の投資には時期尚早である潜在的で将来への影響力が強いエネルギー分野(製造・貯蔵・利用)の先端技術開発のテーマを支援
- ARPA-Eプロジェクトのプログラムを通じて資金提供された技術の商業化計画を**Technology-to-Market (T2M)チームが支援、これらの計画立案と実行においてプロジェクトチームと緊密に連携**
 - **SCOPE**: 革新的で商業的に関連するプログラムを立案するために必要な戦略的な市場動向を提供
 - **MANAGE**: T2M 計画と共同で立案したマイルストーンを通じて、プロジェクトの取組状況を管理
 - **ADVISE**: 技術市場のニーズを管理するためのスキルと知見を有し、プロジェクトチームへ助言・サポート
 - **PARTNERSHIPS**: 市場に向けた技術開発の実用化をサポートするために、サードパーティの投資家やパートナーとの関係構築



SCOPE

Provide strategic market insights necessary to create innovative, commercially relevant programs

MANAGE

Manage project teams' T2M efforts through T2M plans and jointly developed milestones

ADVISE

Support project teams with skills & knowledge to align technology with market needs

PARTNERSHIPS

Engage third-party investors and partners to support technology development towards the market

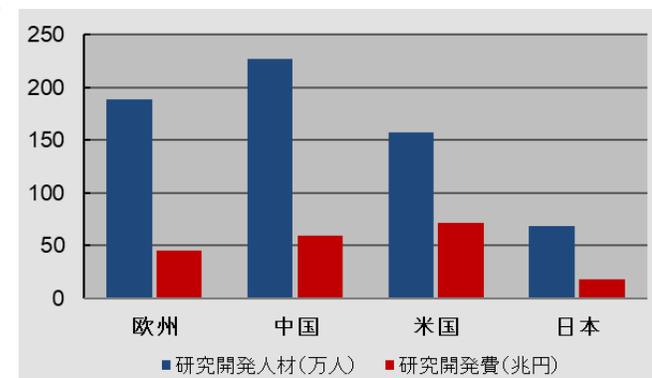
(出所)ARPA-Eウェブサイトをもとに当社作成

3. 水素・燃料電池分野の研究戦略における新たな潮流

日本における研究開発資源と水素・燃料電池分野でのR&D競争力の課題

研究開発リソースとの海外主要国・地域との比較

国・地域	研究開発人材※	研究開発費※	傾向・方向性など
欧州 	189万人(20年)	45兆円(20年)	グリーン・ディール政策、欧州による水素覇権、脱ロシア
中国 	227万人(20年)	59兆円(20年)	政府による統制、補助金政策、ハングリー
米国 	157万人(19年)	72兆円(20年)	研究大国
日本 	69万人(21年)	18兆円(20年)	危機意識の弱さ、時流に鈍感



(出所) 文部科学省 科学技術・学術政策研究所(NISTEP)、科学技術指標2022, 調査資料-318, 2022年8月

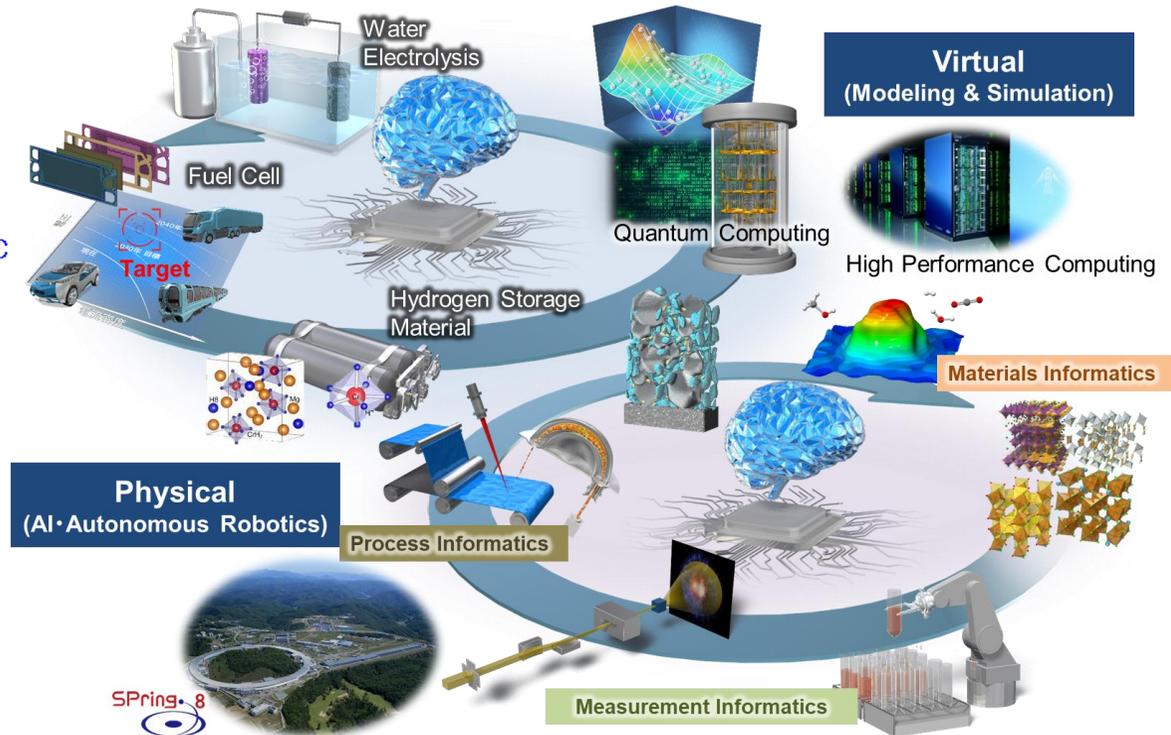
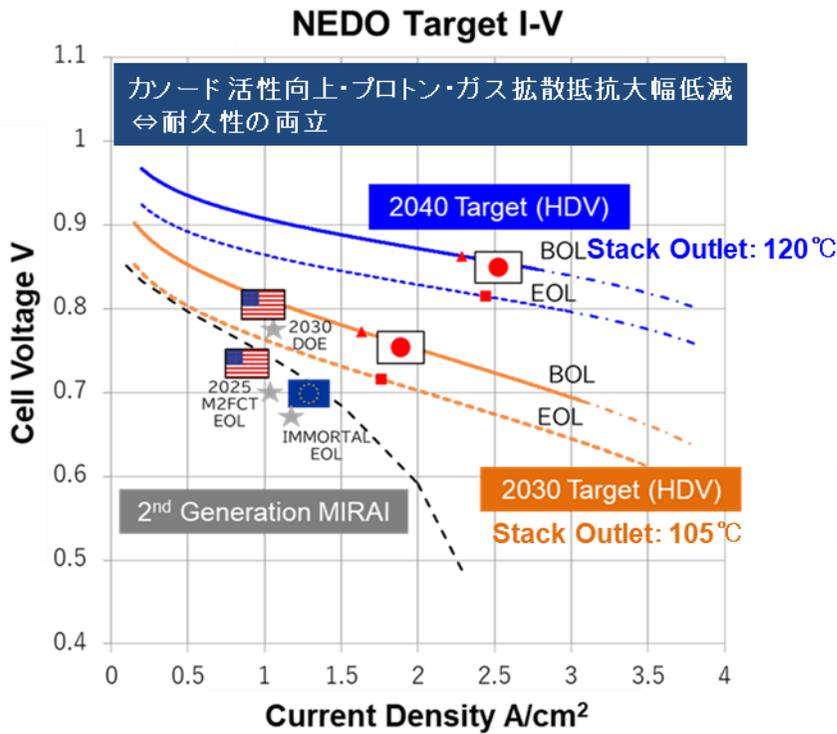


高い研究開発成果の創出力もある一方、リソース面では**客観的に劣勢、従来とは異なる戦略・勝ち筋を創り出す必要**

- 日本の水素・燃料電池技術開発がSDGs・カーボンニュートラル社会実現において日進月歩の領域で世界をリードするためには(世界のエネルギー変革に貢献・日本の産業創出に貢献)
 - **進化に敏感に魅力ある目標立案** : ① BMC(ベンチマーク) & 目標・戦略議論
 - **世界に先駆けて目標達成できる研究開発力** : ② **DX(デジタル・トランスフォーメーション) + 解析力**
 - : ③ 多様性の融合・結集
 - : ④ 人材育成 & オープンイノベーション・コンソーシアム

HDV燃料電池に要求される将来目標と達成に向けた研究アプローチ

- 2023/2に公表したNEDOロードマップにおいては、CN実現に向けたHDVのディーゼルパリティを目標とすると、現行技術の延長線では到達が容易ではなく、「**ゲームチェンジ**」を限られた**資源(人材・資金・時間)**で達成する必要
- 現在、DXによって社会的・技術的な変革が起こりつつあり、研究開発でも自動化を超えた自律化や高速計算などデジタル空間の有効利用も加速
- 水素・燃料電池でのブレークスルーを創出するために、**DX(MI・PI)**による**材料研究**、**DXを活用した高度解析(MEI)**、**DXをサポートする計算科学など**、**新しい研究開発の手段を有効活用**していくことが鍵

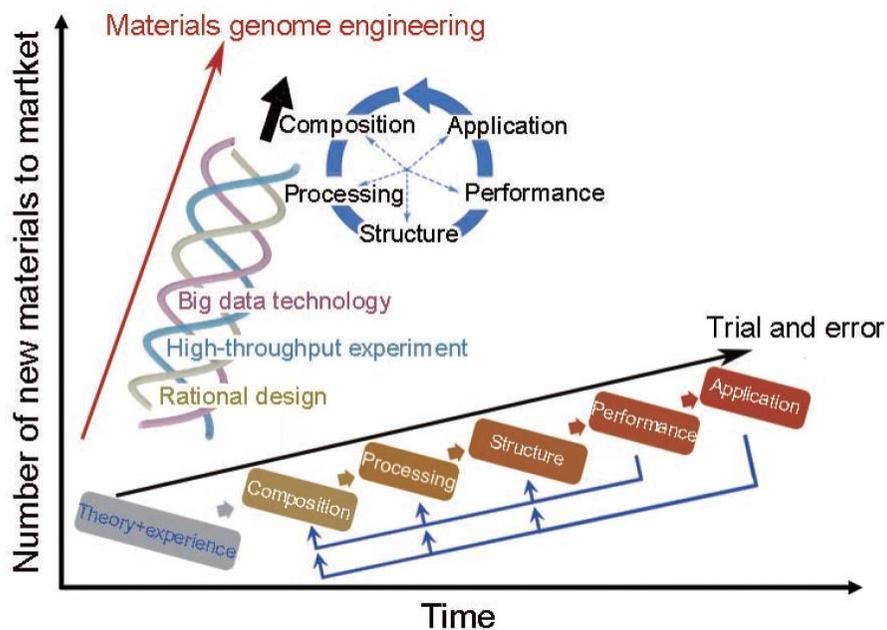


中国の材料研究開発戦略 (Materials Genome Engineering)

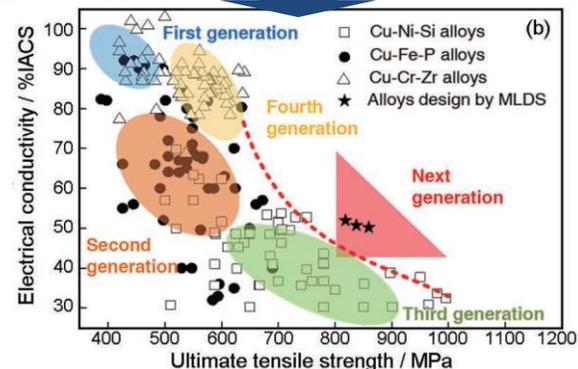
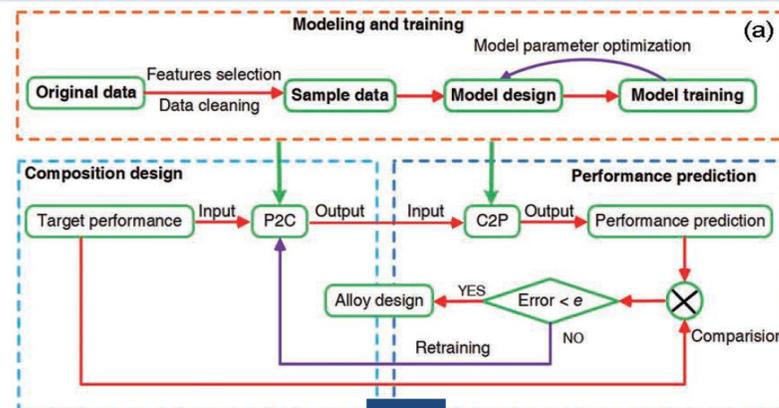


- 中国・科学技術部は2015年に重点特定項目「材料ゲノム※工学重点特別プロジェクト」を開始、基礎理論、キーテクノロジーと装備、データ検証・応用の研究を展開
※材料ゲノム (Genome)は周期表で使用可能な118元素の組み合わせ (生物ゲノムは4塩基の組み合わせ)
- 材料ゲノム・プロセス革新プラットフォームの構築、総合型革新人材の育成、産業界への応用をコアとし、「**デジタル試行錯誤型**」の研究開発モデルを通じて、**新材料産業の快速的な発展を促進**
- ペロブスカイト型PV材料、SEI形成メカニズム解明、LMO正極材料の不可逆変化抑制、燃料電池高活性ORR触媒の開発等、**エネルギー変換材料**にも成果が着実に蓄積

材料ゲノム工学による革新的な研究開発モデル



(出所) "Progress in Materials Genome Engineering in China" 2020/6



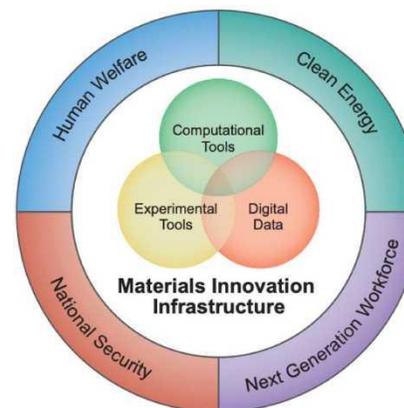
米国の材料研究開発戦略 (Materials Genome Initiative)



- 2011年に当時のオバマ大統領主導で開始、世界中でMI (Materials Informatics) による材料研究の先駆けとなったプロジェクト、実験と協調してデータと計算ツールの力を活用、少ないコストで新材料の発見、設計、開発、展開を加速することを目的
- 科学者、技術者、製造者の間で材料に関する知識を共有するための Materials Innovation Infrastructure (MII) を構築
- 発足10年後の2021年に戦略を見直し、次の5年で「MIIの統一」・「材料データのフル活用」・「材料研究・開発人員の教育」を3本柱としてエネルギー、医療・健康、防衛等の分野における新素材技術の革新において世界的なリーダーシップを維持

注力ポイント	概要
Material Innovation Infrastructureの統一	<ul style="list-style-type: none"> ● 計算(理論・モデリング・シミュレーション)ツール、実験(合成・特性化・加工)ツール、統合プラットフォーム、データインフラの整備加速 ● 参入障壁を大幅に下げ、中小企業やリソースの少ない学術機関へのアクセス、研究者・エンジニア、製品設計者の多様なプールからイノベーション喚起
材料データのフル活用	<ul style="list-style-type: none"> ● 自律ロボットシステムによるデータ蓄積、AIの高度応用による材料研究開発の加速、AI活用に伴うリスクと利益の見極め
材料研究・開発人員の教育・トレーニング	<ul style="list-style-type: none"> ● 材料研究者の主要スキルとしてデータ管理、計算、実験と定め、3分野すべての専門家である必要はないが、この領域の複数のトピックに精通し、理学・工学横断的なMGIの理念を実現する学生・大学院生を育成

Material Innovation Infrastructure (MII)の概念



D3EM: 材料科学、情報学、工学設計コースの融合、産学連携、産業技術へ貢献できる人材育成の学際的なカリキュラム (Texas A&M大学)

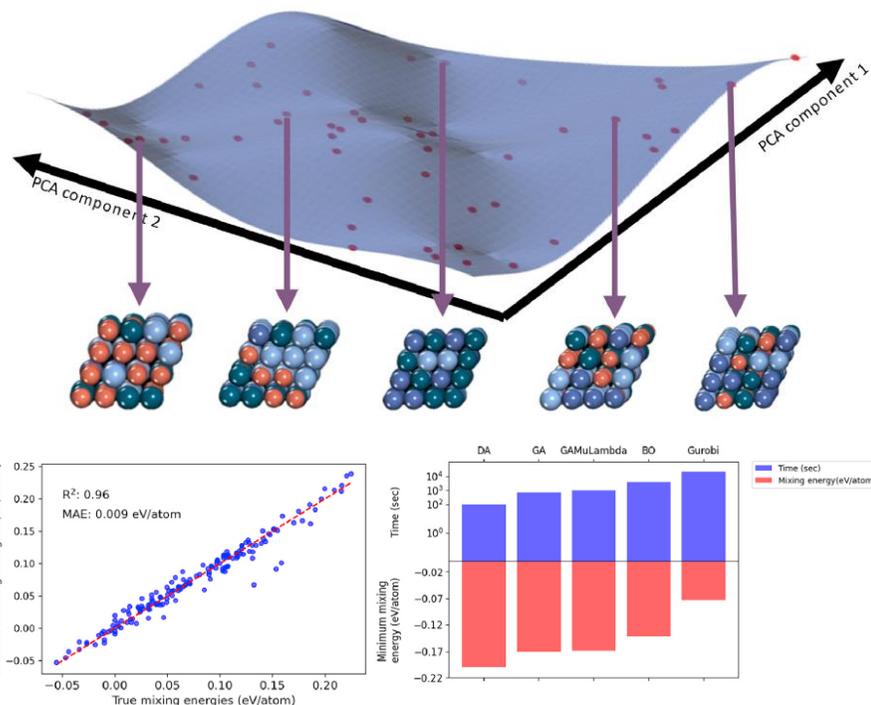
(出所) "Materials Genome Initiative Strategic Plan" (2021/11)をもとに当社作成

計算科学・モデル化技術の進展(DX推進ツールとしての活用)

- 研究開発に対するDX推進のツールとして、**計算科学によるシミュレーション**、**AI・機械学習**、**量子計算技術**が進展
- シミュレーションの特徴(均質なデータを大量に生成できる)、機械学習の特徴(高速な計算、データから変数間の関係性をモデル化)などを活用した支援
- 量子計算技術による**組合せ最適化(アニーラ)**、**絶大な演算能力の将来的利用(ゲート型)**にも期待

DX推進のツールとしての計算・モデル化技術の特徴と活用方法

分類	特徴	活用方法
計算科学によるシミュレーション	<ul style="list-style-type: none"> ● 実験ではコスト・資源制約により実現できない大規模・広範囲な評価を代替 	<ul style="list-style-type: none"> ● 触媒材料(バルク)の熱力学的安定性を第一原理計算で評価、スクリーニング
機械学習・AI	<ul style="list-style-type: none"> ● データに基づいて対象物の特性・特徴を表現するモデル構築が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ● 異なる時空間スケール階層の物理現象間の橋渡し ● 装置全体モデル(デジタルツイン)の構築
量子計算技術	<ul style="list-style-type: none"> ● 高精度な計算科学シミュレーションと比べて高速なシミュレーションが可能 	<ul style="list-style-type: none"> ● 第一原理計算に基づく様々な材料状態(表面、粒子)のエネルギーを計算して比較
	<ul style="list-style-type: none"> ● (アニーラ) 組合せ最適化を高速に解くことが可能 	<ul style="list-style-type: none"> ● 触媒探索などのMIへの利用
	<ul style="list-style-type: none"> ● (ゲート型) 様々な計算処理に対処できる可能性、誤り耐性が実現すると極めて大きなインパクト 	<ul style="list-style-type: none"> ● 励起状態の精密なエネルギーを計算することで触媒反応などの詳細な検討

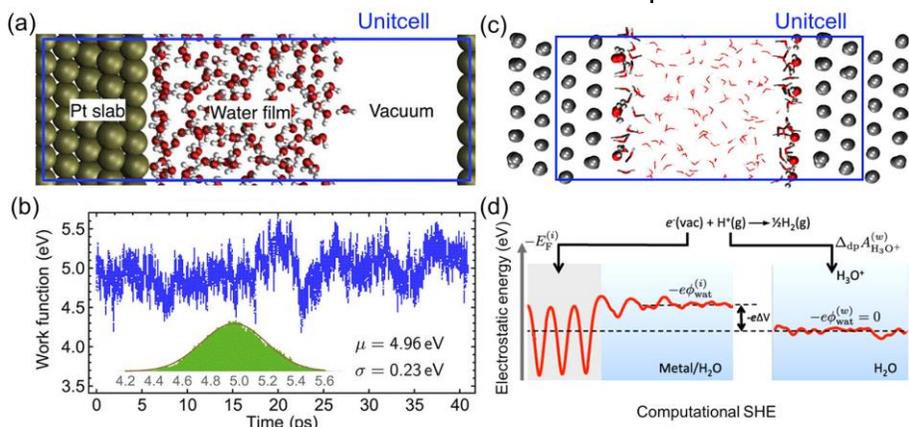
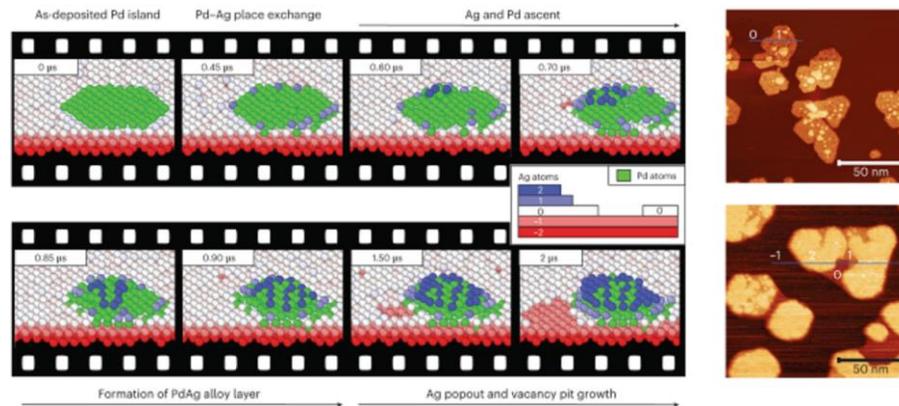
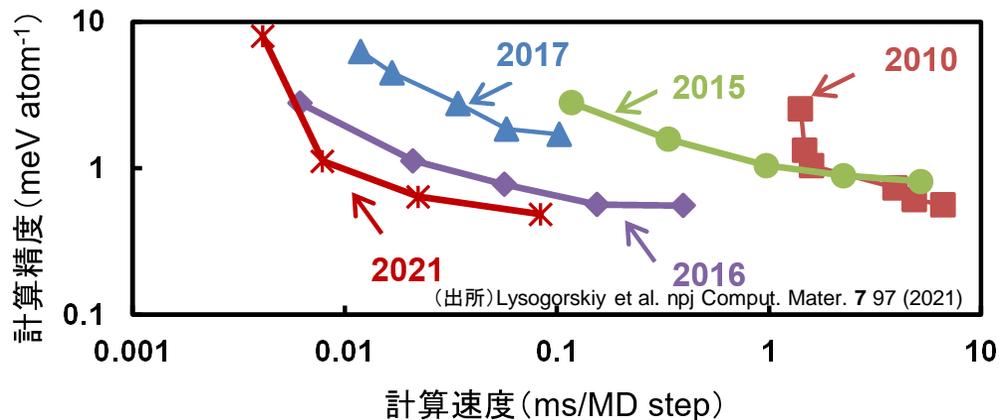


組合せ最適化による触媒材料の探索例

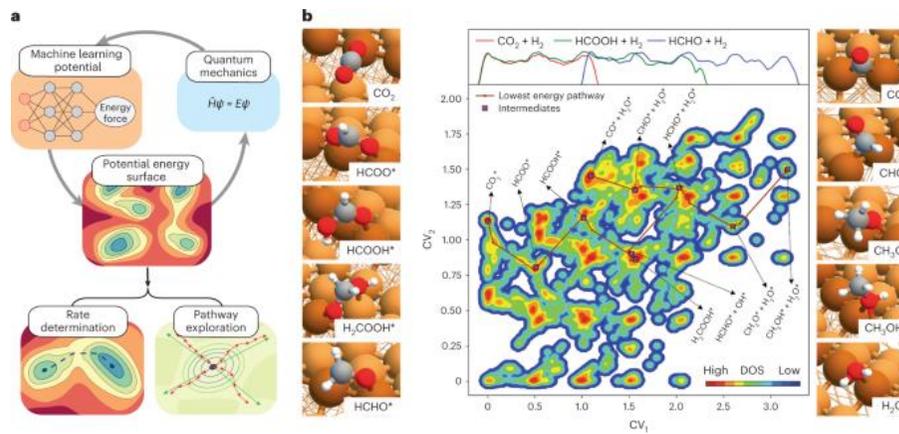
(出所) Choubisa, Hitarth, et al. "Accelerated chemical space search using a quantum-inspired cluster expansion approach." Matter (2022).

計算科学・モデル化技術の進展(機械学習ポテンシャルの活用)

- 近年、機械学習ポテンシャルを用いた分子動力学計算が大きな注目を集めており、材料の動的特性を予測するための**計算速度と計算精度が進化(トランススケール化)**
- 広い適用範囲が期待され、燃料電池・電解に関連する**電気化学界面**、エネルギー変換・化学品製造等、さまざまな産業プロセスを支える**不均一触媒のシミュレーションへの応用**が進展



(出所) Y. Zhou et al., J. Phys. Chem. Lett. 14,9 2308 (2023)

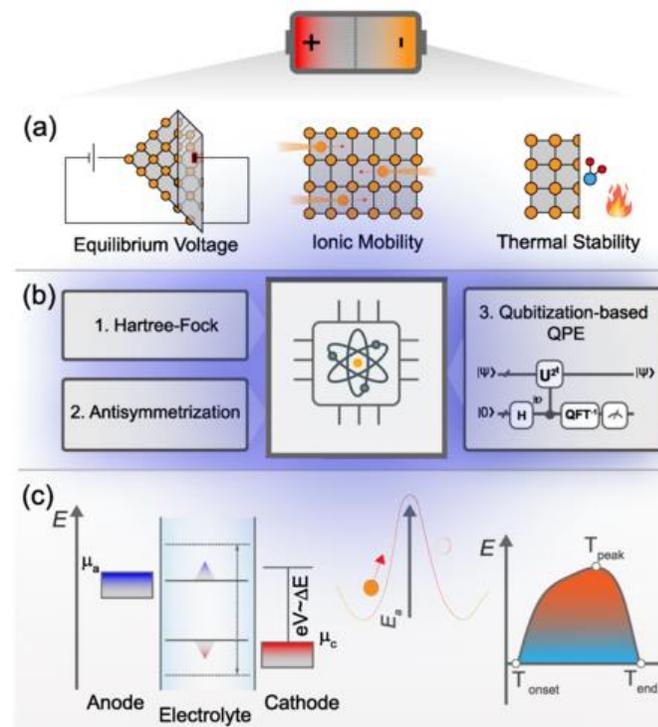


(出所) T. Mou et al, Nature Catalysis, 6, 122-136 (2023)

計算科学・モデル化の進展(量子コンピュータ活用研究への産業界の期待)

- 2022年から燃料電池・バッテリー材料、水電解触媒など次世代自動車・水素製造に関連する分野への量子コンピューティングの将来的な活用に期待感が膨らみ、欧州・韓国の自動車メーカーも量子コンピュータハードウェア開発、アルゴリズム開発の専門会社との共同研究を開始

企業	主な取組
Fujitsu	トロント大学と共同研究でデジタルアニーラを用いたRu, Cr, Mn, Sb, O ₂ から構成される電解触媒の探索(他の研究例がない候補の発見) 材料科学者はより効率的な触媒を探し、計算科学者はより効率的なアルゴリズムを設計、双方は分離されてきたが、融合したときに迅速かつ有望な解決策を創出
Bosch GmbH	燃料電池、バッテリー、センサー技術に関連する触媒・機能性材料についてIBMと連携、当該産業アプリケーション向けに堅牢で強力な量子アルゴリズムを共同開発開始
BMW	英Quantinuum社と連携、カソード触媒探索への活用研究を開始、白金クラスター(Pt5)で発生するORR反応工程の最小モデルを構築
Daimler	Google, IBMと連携、車両生産計画の最適化に加え、電池材料の化学的性質を正確に予測する方法、経年劣化プロセスと性能限界に関する予測に期待
Volkswagen	カナダXanadu社と連携、電池材料構造・物性するための量子アルゴリズム開発と高精度化に向けた研究プログラムを開始
Hyundai	イオントラップ型を開発する米IonQと連携、量子機械学習による自動運転車の3D物体検出技術で成果、燃料電池触媒の加速の取り組みを次フェーズで開始



Xanadu社の電池設計向け量子アルゴリズム開発

(出所) <https://www.greencarcongress.com/2022/10/20221019-xanadu.html>

4. まとめ

本日の世界動向のまとめ

- 欧州・米国・アジアをはじめ再エネ資源国(豪州・中東等)も定量目標を設定した具体的な水素戦略を打ち出し、**水素普及に向けた投資も増加**。グリーン水素生産の水電解装置市場も130GW以上に急成長する見通しもあり、産業・運輸・電力部門での需要に期待感
- 国内ではCNへ向けた道筋が提示、国内の水素製造の可能性も検討しつつ、長期的に輸入水素の調達が必須である一方、技術競争力を有する燃料電池・水電解装置も**海外の投資加速により優位性が揺らぎつつあり**
- 欧米では研究開発から先行開発・量産技術、社会実装に向けた実証まで横断的なR&D投資を実施、特に**生産技術、研究開発成果の商用化計画のスキーム**などに加え、特に**欧州では共同支援による多額の産業界への投資も開始**
- 日本は研究リソースで客観的に劣勢、従来とは異なる戦略・勝ち筋を創り出すために**DX活用による効率的なR&D推進が鍵を握る**。革新的な材料開発に向けたMIはデータ・知識共有、人材育成が重要、DX活用ツールである計算科学もAI・機械学習活用による高度化が進むとともに、パラダイムシフトの可能性を有する**量子コンピューティングも産業界が期待を寄せ、中長期的な研究に着手**



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。