

第18回FC-Cubicオープンシンポジウム

燃料電池及び水電解の研究開発加速に向けたDX技術への期待と海外動向

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12月19日

ともに挑む。ともに実る。



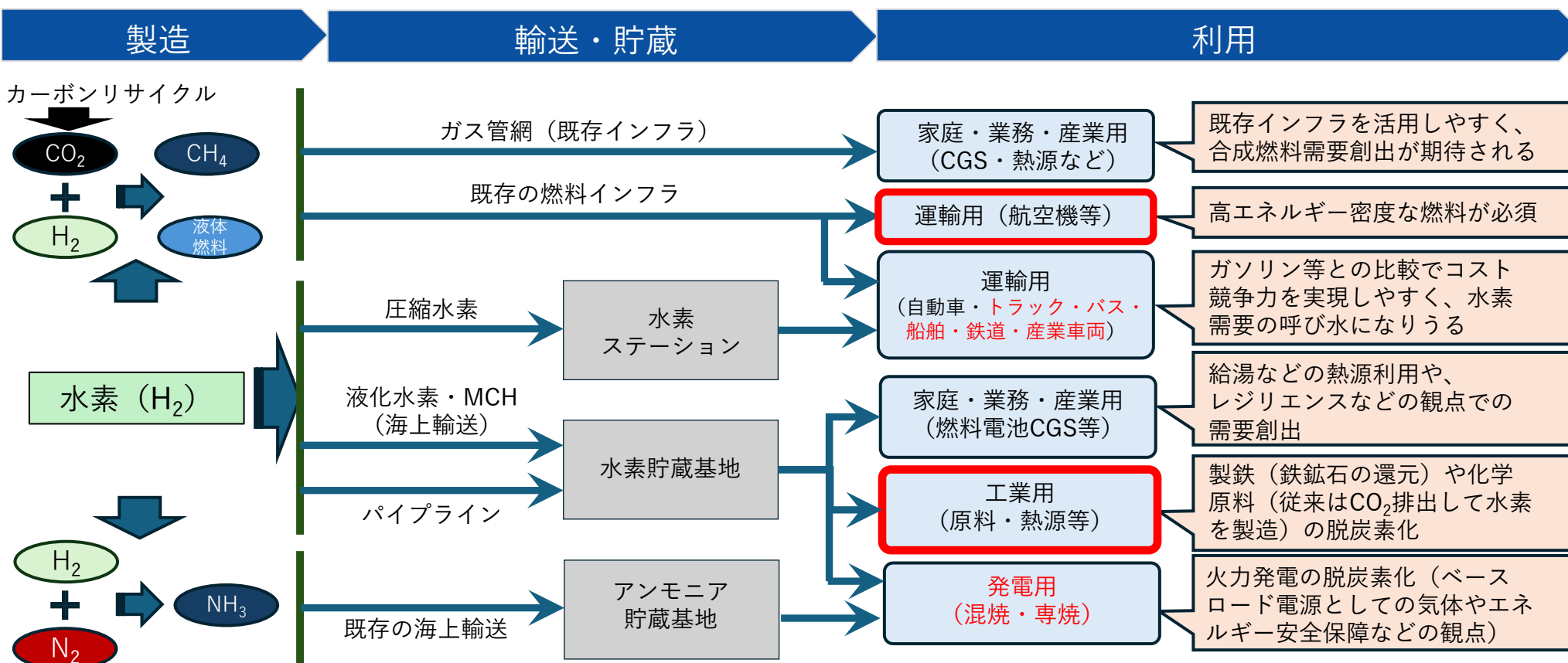
1. 燃料電池及び水電解の研究開発の位置づけと世界の動向
2. 日本の技術開発目標と研究開発加速のための方針
3. 自動自律実験および高度解析に関する動向

1. 燃料電池及び水電解の研究開発の位置づけと世界の動向

1. 水素の活用による脱炭素化の概要

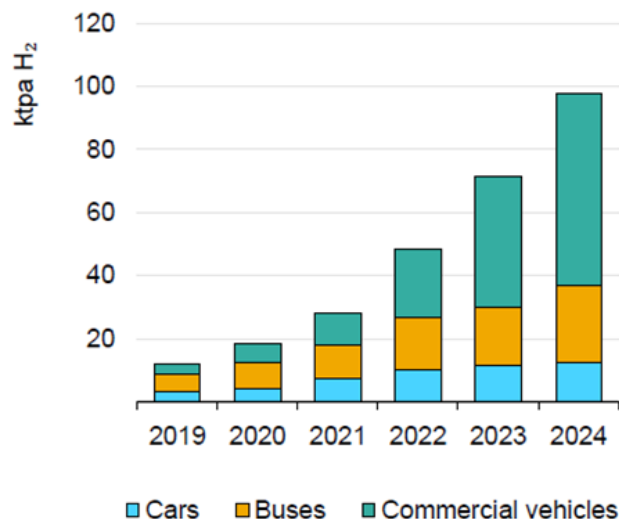
- 水素や水素を活用した合成燃料・アンモニアは、様々な産業分野（特に電化などの代替手段が技術的・経済的に難しいHard-to-abateな領域：下図の赤枠）での脱炭素化を実現する手段として注目されている。
- 一方、脱炭素化の達成は一朝一夕では難しく、技術的に進展しやすい・またはコスト有利が比較的達成しやすい車載用燃料電池など、他の分野の脱炭素手段として水素活用を進め、水素需要を創出して水素コスト低減や技術開発を進める狙いもある。

水素に関するサプライチェーンの概要



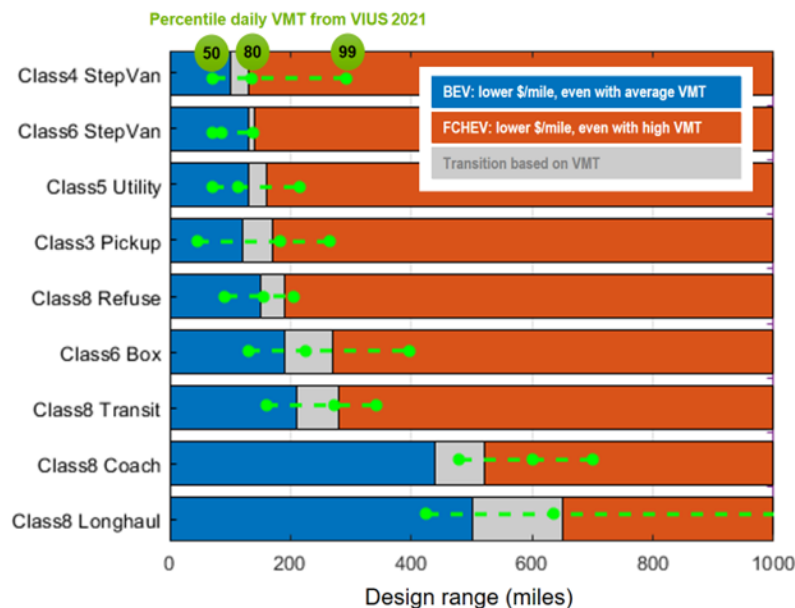
- 水素需要のうち、比較的パリティコストが高い（高価なクリーン水素でも既存燃料に対して有利になりやすい）運輸分野では、水素需要が拡大傾向を維持。特に商用車は1台当たりの水素需要が大きい。
- トラックなどの商用車は、長距離運転が可能であることや充填時間が短いことなどが利点となりうる。
 - ・ その他、建機やフォークリフト、鉄道、船舶などへの活用も検討が進む
- NEDOロードマップでは、市場創出や産業競争力の観点も重視。

燃料電池自動車の水素需要（種類別）



【出典】“Global Hydrogen Review 2025”

TCOによるBEVとFCVトラックの優位性比較



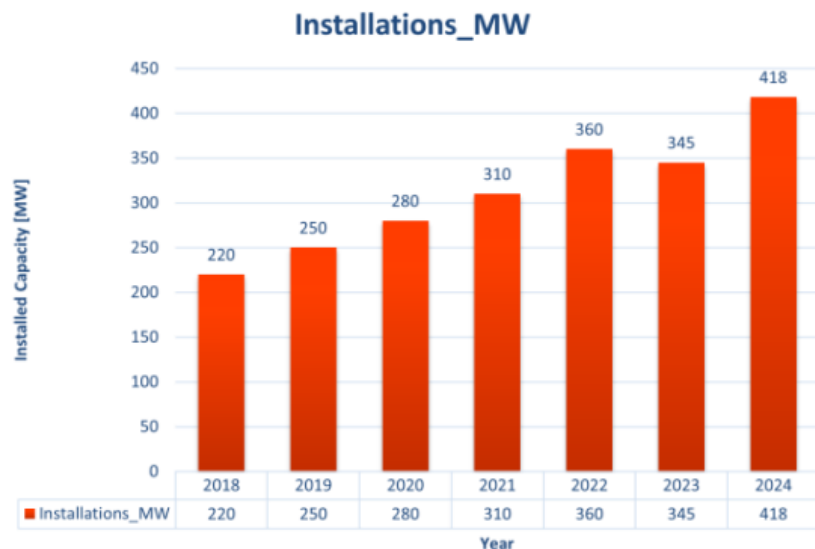
※ここでは水素価格の将来シナリオとして\$4/kgを仮定しており、FCVトラックの優位性はこの仮定に依存する部分が多い。

【出典】 Argonne National Laboratory, BEV vs FCHEV for Trucks (webサイト)
https://vms.taps.anl.gov/research-highlights/vehicle-technologies/lmdhdt_powertrains/

- ・ 燃料電池モビリティ水素需要喚起の観点のみでなく、水素利用産業としての重要性も高い
- ・ 燃料電池が優位となりうる領域での強みを十分に発揮できるような技術開発が必要
- ・ 産業競争力の観点でも技術開発が求められる。

- 省エネコジェネレーション機器としてCO2排出量低減、将来的には低炭素化に貢献。
- 地震・水害等の災害の多い地域では停電時の事業継続計画対応として、レジリエンス強化にも期待。
- 地域の資源を活用して域内で地産地消し、経済好循環、効率的なエネルギー利用やエネルギーセキュリティを確保。
- 分散化してエネルギーリソースを束ねて遠隔で発電所のように制御（VPP）、電力供給構造の変化に伴う系統混雑や電力品質の調整力として機能（電力需給の高度化）
- 近年ではデータセンター向け電源としての重要性も議論されている（比較的大容量・長期保存可能、低騒音・低排出・分散利用による都市利用への適正）

世界の定置用燃料電池導入量



【出典】 IEA, Advanced Fuel Cells Technology Collaboration Programme 2024

クリーンエネルギー保存手段の期間と規模の比較



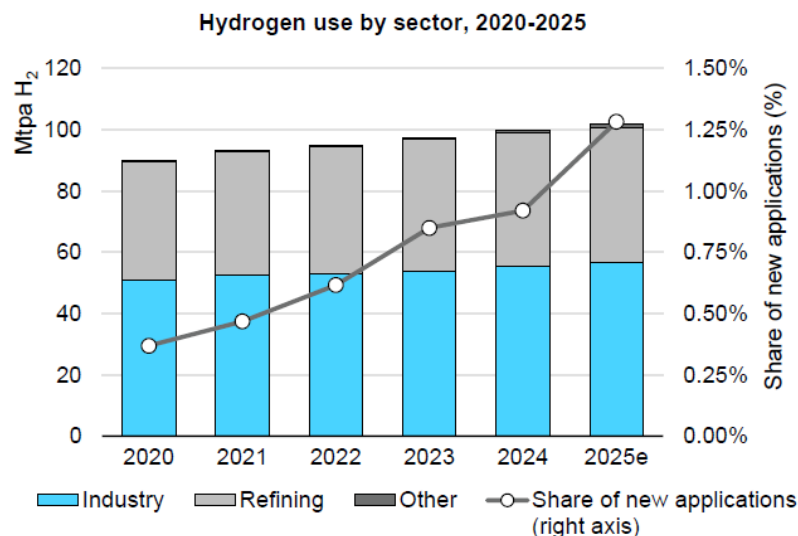
【出典】 Hydrogen Europe, Hydrogen-powered Data Centres: Securing Reliable and Sustainable Energy, 2025, および IEA, Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells, 2015に基づき当社作成

- ・ 定置用燃料電池も一層のコスト低減・耐久性向上が期待される

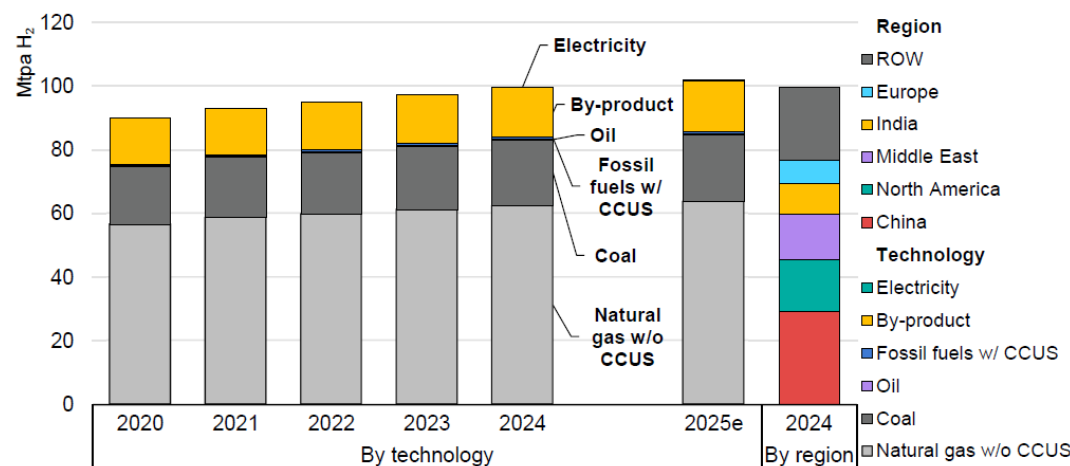
1. 水素の製造手段としての水電解

- 最新のレポートでは、世界の水素需要は堅調に増加し、2025年には100Mt/yrを超える見込み。
 - 2021年のNet ZEROシナリオの予測（130Mt/yr超）と比較すると、需要の増加は緩やか。産業用途（アンモニア・メタノール原料、製鉄）および石油精製での需要以外の「新たな需要」の増加が限定的。
 - 但し、水素需要に対する比率としては堅調に増加しており、1%を超える見込み。
- 水素製造の内訳は概ねCCUSを活用しない環境負荷の高い水素が占める。
 - 国別では中国が大きく、北米や中東、インドなどが続く。
 - 低排出水素の製造量は増加しており、2025年で需要量の約1%を見込む。（スライド4参照）
 - 低排出水素の増加は中国（水電解）およびCCUS活用（北米）がけん引。

2025年（見込み）までの水素需要量と新規需要の割合



2025年（見込み）までの水素製造量（技術別・国別）



IEA. CC BY 4.0.

- 低コストなクリーン水素実現に向けて、水電解の技術開発が加速

【出典】 いずれもIEA, “Global Hydrogen Review 2025”

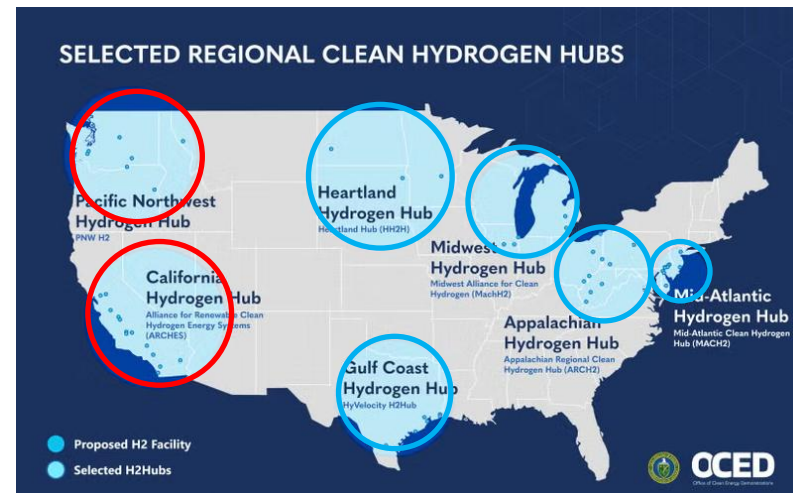
- トランプ政権下において、アメリカ政府の方針は大きく転換。
 - DOEの2026年度予算案では、水素・燃料電池関連のみならず、太陽光や風力などの再生可能エネルギー予算も含めてゼロにカットするリクエスト。（予算の確定は今後）
 - 発表済みの7か所の水素ハブのうち、再エネのみで水素を製造するARCHES (California), Pacific Northwestの2か所（合計予算22億USD）は2025年10月に取り消しが決定。他の水素ハブについても引き続き検討中。
 - ✓ ARCHESは州予算での継続を模索。
 - 2025年7月に成立したOne Big Beautiful Bill Act (OBBBA) において、グリーン水素製造税額控除（45V）は建設開始期限が2033/1/1から2028/1/1に改正（実質的に、税額控除は2027年末まで）
- 水素ハブについては適切な人員配置やリスクコントロールが行われていないとDOE内部監査が指摘（2025年6月）

DOE2026年度予算案から抜粋

	FY 2024 Enacted	FY 2026 Request
Vehicle Technologies	450,000	25,000
Bioenergy Technologies	275,000	70,000
Hydrogen and Fuel Cell Technologies	170,000	0
Subtotal, Sustainable Transportation & Fuels	895,000	95,000
Renewable Energy Grid Integration	22,000	0
Solar Energy	318,000	0
Wind Energy	137,000	0
Water Power	200,000	90,000
Geothermal Technologies	118,000	150,000
Subtotal, Renewable Energy	795,000	240,000

【出典】DOE FY 2026 Budget in Brief

選択済み水素ハブ（廃止を赤、検討中を青で強調）

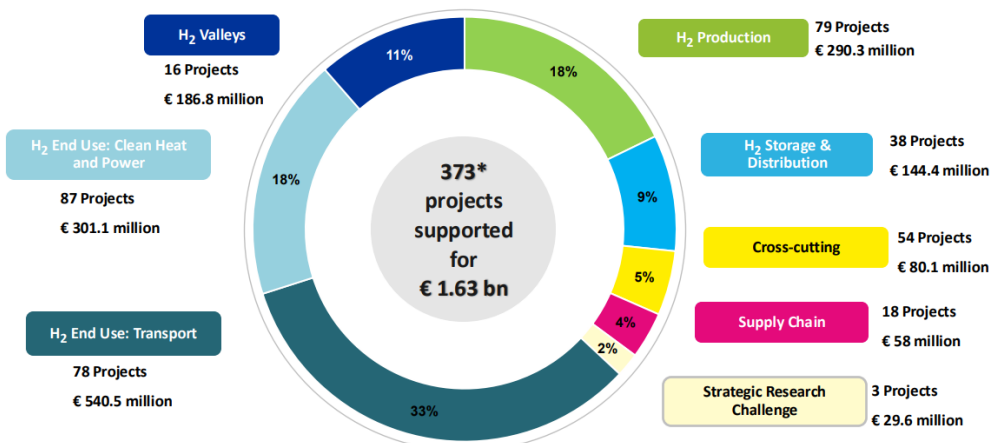


【出典】OCED, DOE Regional Clean Hydrogen Hubs for Award Negotiations

- アメリカ政府レベルではグリーン水素関連の研究開発や実証事業は大きく減速。

- 欧州ではClean Hydrogen Joint Undertaking (CHJU) や「欧州共通利益に適合する重要プロジェクト」IPCEIにおける水素関連プロジェクトなどを継続し、研究開発を進める方針。
- CHJUは水素・燃料電池関連の研究・開発、実証を推進。前身のFCHJUに対し、水素活用までスコープを拡張し、Hydrogen Valleysなどもスコープに加わる。
 - ・ 2021-2027年のEU拠出上限は10億ユーロ、産業・研究側で同額を現物や共同投資でマッチする。
- IPCEIはEU目標に沿った高い公益性を有する事業に対して国家補助を認める国家補助規制の特例措置で水素・FC関連ではHy2Tech：最大€55億、Hy2Use：最大€52億、Hy2Infra：最大€69億、Hy2Move：最大€14億（総額で最大€189億）の国家補助が承認済

FCJUからCHJU（2024年まで）の各分野への累積投資額



※2025年Work Programmeでは、クリーン水素製造に4000万ユーロ、水素貯蔵・輸送に1600万ユーロ、輸送分野への活動に1700万ユーロ

【出典】 CLEAN HYDROGEN PARTNERSHIP CONSOLIDATED ANNUAL ACTIVITY REPORT YEAR 2024

IPCEI Hydrogenの概要

Hy2Tech
(産業部門や運輸部門の水素バリューチェーンの技術革新)
15か国41プロジェクト

水素生産技術	燃料電池技術	貯蔵・輸送運搬技術	エンドユーザ側活用技術
--------	--------	-----------	-------------

Hy2Use
(インフラ整備や産業部門での活用に必要な技術革新)
13か国37プロジェクト

水素インフラ	産業における水素の活用
--------	-------------

Hy2Infra
(水素製造およびパイプライン、貯蔵等)
7か国33プロジェクト

電解	パイプライン	貯蔵	LOHCターミナル	WS間連携
----	--------	----	-----------	-------

Hy2Move
(輸送セクターでの水素活用)
7か国13プロジェクト

輸送での活用	燃料電池技術	移動体用水素貯蔵	水素製造技術
--------	--------	----------	--------

※水素関連のIPCEIについては、欧州委員会の四半期ごとのレポートで遅れが指摘されている状況。

【出典】 IPCEI Hydrogen ウェブサイトの情報より当社作成

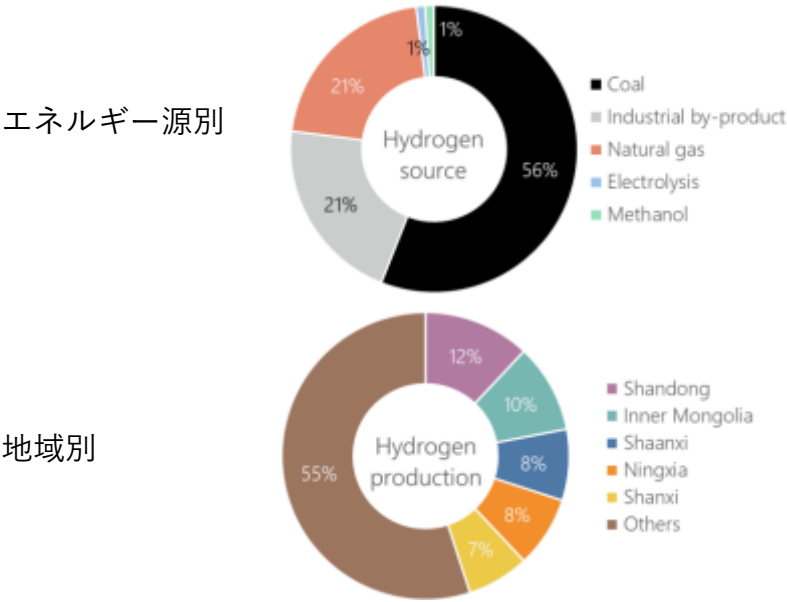
- ・ 欧州では実態に合わせて目標値を修正しつつ、研究開発および実証に向けた投資を維持して主導権を取る狙い



- 中国は中華人民共和国エネルギー法を2025年1月1日に施行し、引き続き水素エネルギー導入を進める姿勢。
- 中国水素エネルギー発展報告（2025年4月）によれば、2024年の水素製造能力は5,000万トン/年を超え、このうち再生可能エネルギーによる製造能力は12.5万トン/年と水素エネルギー産業中長期計画の2025年目標水準を達成。
- NEAによる実証プロジェクトなど、水素製造や貯蔵・輸送、エネルギーセクターでの水素利用、業界標準策定、鉱山・港湾・物流拠点・産業段階でのエネルギーシステム実証など、エネルギーとしての利用にフォーカス。

中国における水素製造（2024年）

- 水素製造能力>50百万トン/年（生産量36.5百万トン/年）
- 再エネによる製造能力12.5万トン/年



【出典】 China Energy Policy Newsletter June 2025


NEAによるエネルギーセクターでの実証プロジェクト

項目	内容
水素製造	再エネ・原子力による水素製造、アンモニア・メタノール・航空燃料・石油化学との統合、100MW以上の電解（負荷調整50～100%）、海上・砂漠でのオフグリッド水素生成（10MW以上）、CCS+化石燃料ベースの水素製造と高純度供給（精製能力5,000Nm³/h以上）
水素貯蔵・輸送	気体・液体水素のパイプライン・タンクローリー輸送（液化ユニット5トン/日以上、トラック輸送距離600km以上、パイプライン100km以上）、および高圧水素・LOHC・固体金属による高密度水素貯蔵（20,000Nm³以上）のパイロットプロジェクト
水素利用	製油・石炭由来プロセスでのグリーン水素代替（年間1,000トン以上）、石炭・ガス火力発電での水素・アンモニア混焼（石炭300MW以上で10%、ガスタービン10MW以上で15%）、電力-水素-電力変換による発電側での長時間エネルギー貯蔵（1MW以上、4時間以上発電）、建物・産業団地・遠隔地・データセンターでのCHP用途燃料電池応用（0.5MW以上）
その他	水素機器の運用検証・業界標準の策定、鉱山・港湾・物流拠点・産業団地でのゼロ炭素水素エネルギーシステム実証（各施設でエネルギー消費の80%以上をクリーンエネルギーで供給）

【出典】 China Energy Policy Newsletter August 2025、当社にて概要作成

- 中国は引き続き水素エネルギーの導入を積極的に進める姿勢を継続

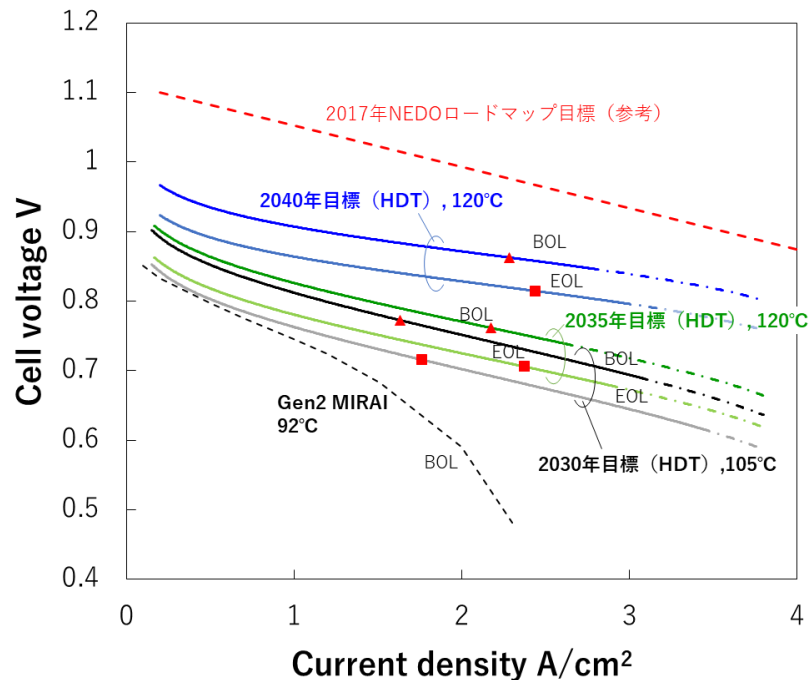
1. まとめ：燃料電池及び水電解の研究開発の位置づけと世界の動向

- 水素は様々な産業分野（特に電化などの代替手段が技術的・経済的に難しいHard-to-abateな領域）での脱炭素化を実現する手段として注目されている。
- 水素の利用手段としての燃料電池については、大部分の適用先はhard-to-abate領域ではないものの、以下のような有用性から研究開発が進められている。
 - ・ 移動体分野では、ディーゼルなど既存の燃料に対するパリティコストが比較的高く、水素価格が一定水準まで引き下げられれば水素需要を喚起できる可能性がある。創出しうる市場の価値や、産業競争力の観点も重要。
 - ・ 定置用途では、低炭素化に加えてレジリエンスやエネルギー地産地消、エネルギーセキュリティ、電力需給高度化、低騒音・分散利用などの利点が存在。
- 水電解はクリーン水素製造において重要な手段であり、供給量の拡大に向けて必須な技術。
- 一方で、諸外国の取り組みには差が生じつつある。
 - ・ 米国はトランプ政権での方針として水素や再生可能エネルギーなど広い範囲で研究開発を減速する見込み。
 - ・ 欧州はCHJUやIPCEI H2などの取り組みを継続し、研究開発を加速する姿勢。
 - ・ 中国も水素エネルギー活用に向けた取り組みを継続。
- 日本も研究開発の更なる加速のための取り組みが求められる。
 NEDOロードマップ等において、自動自律実験などのDX技術を活用する方針。

2. 日本の技術開発目標と研究開発加速のための方針

2. FCV・HDV技術開発ロードマップにおける目標設定の概要

- 日本は第7次エネルギー基本計画においても水素基本戦略や水素社会推進法を踏襲し、水素社会実現に向けた取り組みを継続する方針。
- 燃料電池に関しては2025年2月にFCV・HDV技術開発ロードマップを改訂。
 - ・ FCモビリティは運輸分野におけるカーボンニュートラル（CN）実現に重要である他、創出しうる市場規模（2050年CN実現シナリオでFCトラック24兆円）や産業競争力の観点も重視。
 - ・ FCスタック本体や冷却器などの搭載スペースなどの制約も加味し、EOLにおいて44トン級大型トラックに求められる性能が満足できる水準を想定し、シミュレーションモデルなども活用して目標性能を決定。
- コストや生産性も含め、高い技術開発目標を設定。



▼NEDO FCV・HDV技術開発ロードマップの目標の概要

項目	2035年目標（現在との比較）
システム	出力密度を約3倍、寿命を約12倍、120°C運転
触媒	Pt目付量を維持しつつ、質量活性を8倍、溶出速度を半減（耐久性を2倍）
電解質膜	厚さを40%低減、プロトン伝導度を2.8倍しつつ、耐久性を維持
GDL	酸素拡散性を10%向上
コスト	加工費・材料費をそれぞれ72%低減
生産性	国内34万台/年（セル1枚を0.4秒で製造）
技術開発の方向性	MI、PI、MEI、自動自律実験、LLCなどのDX技術を活用し、研究開発速度を20倍加速

※HDV向け固体高分子形燃料電池の場合

【出典】NEDO “FCV・HDVロードマップ” より抜粋

© 2025 Mizuho Research & Technologies, Ltd.

- 米国の目標値（2030年断面）と比較しても高い目標を定めている。
 - ・ 高い出力密度、特に高電流密度化を低いPt目付量で実現する。
 - ・ 抵抗を低減するためにPEM厚さを低減しつつ高い耐久性を実現する。
 - ・ 冷却器の制約により、将来的に120℃（出口温度・膜面温度はさらに10℃程度高いと推定）での運転を目指す。
 - ・ Pt目付量低減や高温化と耐久性を両立する。

	DOE 2030	CHJU(~2027)	NEDO 2030	NEDO 2035	NEDO 2040
FCシステム出力 (kWnet)	275(Class8, 34t)	--	200(25t)	325(44t)	350(44t)
スタック数（直列接続）	2	--	2	2	2
セル数/スタック	500	--	330	396	330
アクティブエリア面積 (cm ²)	343	>200	273	283	293
総アクティブエリア面積 (m ²)	17.15	--	9.01	11.21	9.67
EOL出力密度 (W/cm ²) (熱定格点)	0.953 (0.70V at 1.36A/cm ²)	1.2	1.267 (0.72V at 1.76A/cm ²)	1.683 (0.71V at 2.37A/cm ²)	1.976 (0.81V at 2.44A/cm ²)
スタック出口温度 (℃)	90	--	105	120	120
耐久時間 (hour)	25,000	30,000	50,000	50,000	50,000
Pt目付量 (mg/cm ²)	0.35	0.3	0.24	0.22	0.14
PEM厚 (μm)	15	--	8	5	1
GDL厚 (μm)	150	--	50	40	40
BPP（バイポーラプレート）	樹脂含浸グラファイト	--	金属プレート＋表面処理	金属プレート＋表面処理	金属プレート＋表面処理

【出典】NEDO “FCV・HDVロードマップ” より抜粋、CHJU Work Programme 2025の情報を追加
 ※CHJUはHORIZON-JU-CLEANH2-2025-03-02: Scalable innovative processes for the production of PEMFC MEAsからMEAに関するKPIのみ参照

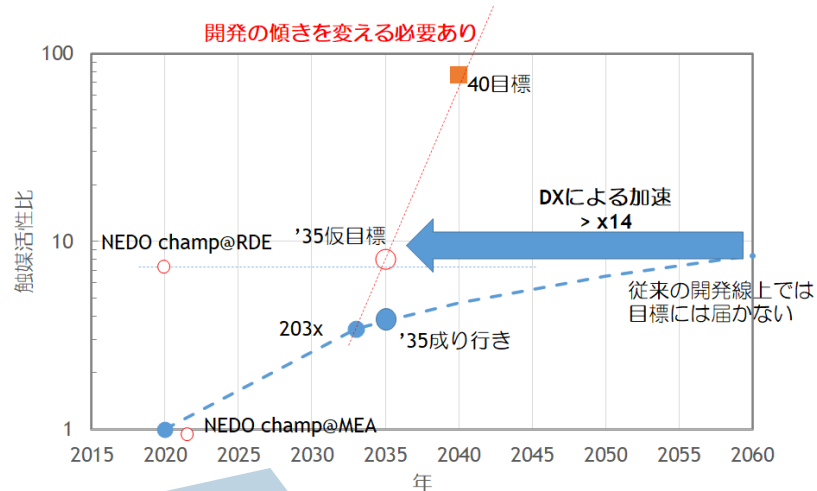
2. 水電解技術開発ロードマップにおける目標設定の概要

- NEDOは2025年2月に水電解技術開発ロードマップを策定。
- 2030年に向けて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」の構築）を行い、その後技術を蓄積したうえで競争力を強化する方針を強調。
- 十分に安価な再生可能エネルギーが利用できるとの前提のもと、系統電力併用による利用率の向上や量産効果によるコスト低減、高電流密度化や長寿命化、生産性向上や間接費の低減など、複数のアプローチを組み合わせ水素製造コスト目標18円/Nm³を満たすシナリオを検討し、高い技術開発目標を設定。

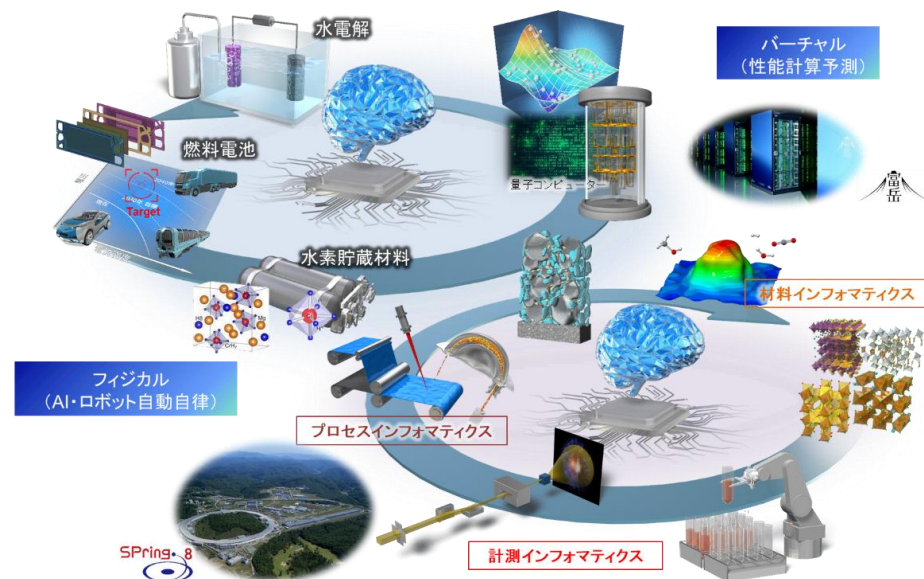
	現在	2030年頃	2040年頃
AWE	【現在値】 総資本コスト 37.0万円/kW エネルギー消費量 4.77 kWh/Nm ³ システム耐用年数 20年 スタック性能 1.8V@0.6A/cm ² 部品交換時間 60,000h(定常運転) 電荷移動過電圧 0.36V @0.6A/cm ² (0.39V @1.0A/cm ²) 物質移動過電圧 0.27V @0.6A/cm ² (0.45V @1.0A/cm ²) (物質移動抵抗) 0.45Ωcm ²	【変動電力への対応】 停止時の逆電流による電極触媒劣化、低負荷運転時のクロスオーバー、変動電力に対する電極・隔膜の劣化、付帯設備への影響などの緩和・対策 【耐久性向上・性能向上】 電荷移動過電圧・物質移動過電圧の低減、高電流密度化に伴う電極・隔膜の劣化対策、部材の機械的強度・耐久性、化学的耐久性の向上、加圧型電解槽でのシール対応・クロスオーバーの低減 【量産化・生産性向上・システムコスト低減】 ・スケールアップや量産化技術の開発・適用によるコスト低減 ・部品・セルスタックの製造・検査の自動化 ・付帯設備のコストや設置コスト・間接費の低減	【2040年目標値】 6.6万円/kW 4.51 kWh/Nm ³ 20年 1.70V@1.0A/cm ² 90,000h(変動運転) 0.27V @1.0A/cm ² — 0.26V @1.0A/cm ² — 0.26Ωcm ²
	【現在値】 総資本コスト 40.0万円/kW エネルギー消費量 4.68kWh/Nm ³ システム耐用年数 20年 スタック性能 1.82V @ 2.0A/cm ² スタック交換時間 40,000h(定常運転) Ir目付量(触媒層) 0.4mg/cm ² Pt目付量(触媒層) 0.4-1.0mg/cm ² Pt目付量(PTL) 1.0-2.0mg/cm ² 質量活性 1,350A/g @ 1.5V 抵抗 0.137Ωcm ² 運転温度 50℃ 運転圧力 ～0.8MPa	電力・利用形態を含めた水電解システムの技術仕様と量産仕様の確立 変動運転や高温化・加圧運転を考慮した性能評価・耐久評価プロトコルの策定、劣化メカニズム等 変動運転下での耐久性向上 Ir目付量低減と活性向上・耐久性向上の両立・Irリサイクル技術の開発 高効率化による高電流密度化と耐久性の両立 高温化・加圧運転と耐久性の両立	生産性向上、付帯設備、設置コスト等の低減 評価解析技術活用・改善による技術開発促進 水電解システムの実用化・市場獲得へ向けた研究開発の加速 【2040年目標値】 5.7万円/kW 4.62kWh/Nm ³ 20年 1.8V @ 4.0A/cm ² 90,000h(含. 変動運転) <0.10mg/cm ² <0.1mg/cm ² <0.1mg/cm ² 32,000A/g @ 1.5V 0.07Ωcm ² 80℃ 最大3MPa

【出所】NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ解説書に基づき作成

- FCV・HDV技術開発ロードマップにおいて示された目標では、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、**2040年の目標達成には現行技術の延長線上にはない不連続な性能向上を必要とする。**
- 米国・欧州・中国などと比較して研究開発人口および投資額で下回る日本においては、現状技術の限界を打破するための基礎研究（新学理・革新コンセプトの創出）とそれを加速する**DX（デジタルトランスフォーメーション）技術の活用が重要。**（MI、PI、MEIやNLPなど）
- こうした研究開発DXの推進においては、以下の3点が必要であることが示されている。
 - ・ 研究開発の現場で生み出される様々なデータを蓄積し、広範囲・永続的に利用するための**データベース構築**。
 - ・ データの蓄積・変換、セキュリティ確保、インターフェース提供などを行う**データプラットフォーム構築**。
 - ・ 様々な資源を集約し効率的・効果的に実施するための**自動・自律実験拠点の形成**。
- **水電解技術開発ロードマップにおいても同様の取り組みが必要**であることが指摘されている。



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

- 以下の要素を組み合わせたclosed-loopにより、材料や化学プロセスの探索・最適化を加速する手法。
 - ・ ロボットや自動化装置によるサンプル調整・反応・合成
 - ・ ロボットや自動化装置による測定・評価とデータベースへの蓄積
 - ・ 機械学習やベイズ最適化などによる実験条件の予測・選択
- ロボティクスやAI・機械学習技術の成熟、データ駆動型科学の加速、材料や化学プロセス探索の加速に対するニーズの拡大などから注目されている。

自動自律実験による加速の事例

実施者	概要
東京大学 一杉グループ	反応性マグネトロンスパッタリングによるTiO2薄膜成長において、電気抵抗を最小化する酸素分圧を予測。手動で10日・12サイクルの実験を1日・12サイクルに加速（10倍）
北海道大学 長田グループ	円偏光選択反射特性を示すらせん高分子薄膜について、3種類のモノマーの共重合比と選択反射波長を予測し、最適反射波長が可視光領域全域となる共重合比を設定、自動合成ロボットによる合成を実施。精度の高い実験操作を手動の5倍から10倍程度に加速。
リヴァプール大学	ポリマー光触媒について、水の分解反応を最も促進する光触媒を探索。自律ロボットによる実験は手動の1000倍速いと報告。
トロント大学	ペロブスカイト太陽電池の有機正孔輸送材料の合成と評価を自動化、最適なホール移動度を与える条件を探索。1サンプル当たり約20分で合成及び評価。

海外の自動自律拠点の例

機関	概要
トロント大学	<ul style="list-style-type: none">・ 世界最大のコンソーシアムAcceleration Consortiumを運営。・ カナダ政府から2億CADの資金を得て設立(CFREF)。・ 30以上のSDL間で連携し、ポリマーや低炭素材料、医薬品など広範な領域での研究を加速。
リヴァプール大学	<ul style="list-style-type: none">・ Unileverとの共同プロジェクトとしてMaterials Innovation Factoryを運営。・ イギリス政府から8,100万GBPの資金を得て設立(UKRPIF)。・ 自動触媒探索や機能性材料探索、ナノ医薬品探索などを実施。
アルゴンヌ国立研究所	<ul style="list-style-type: none">・ "Polybot"による自動自律実験ラボを運用。・ 高導電性・低欠陥な電子ポリマー製造条件探索などの成果。・ 全固体LiB用の固体電解質や、レドックスフロー電池の電解液探索などへの活用も視野。

【出典】「燃料電池材料探索・プロセス検討に向けた自動自律実験装置の適用範囲と装置仕様に関する調査」成果報告書

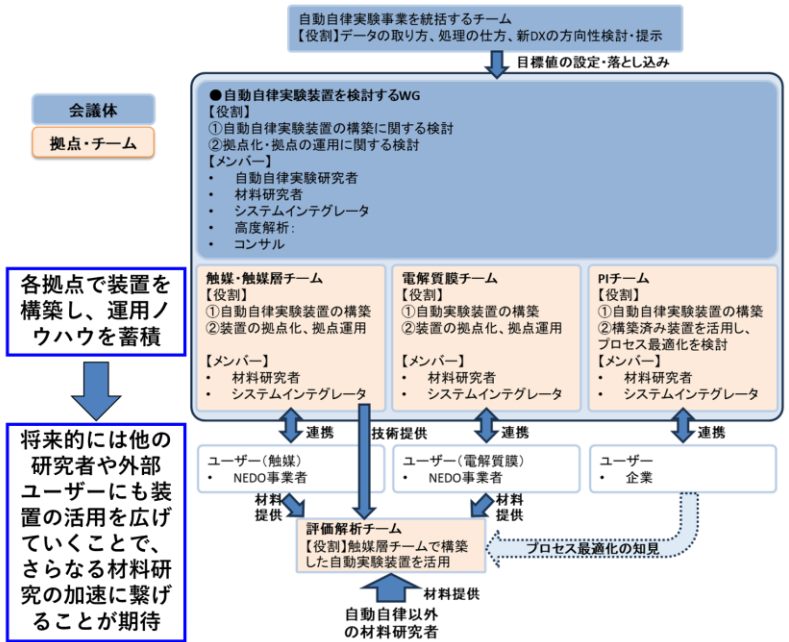
【出典】各機関webサイトやニュースなどから当社作成

- 「燃料電池材料探索・プロセス検討に向けた自動自律実験装置の適用範囲と装置仕様に関する調査」では、燃料電池の各種部材についてのヒアリングから、自動自律実験装置の適用対象として優先順位の高い候補を選定。
 - ▶ カソード触媒合成・触媒層作製 ▶ 電解質膜の成膜 ▶ 電解質膜の膜液合成（高分子） ▶ プロセス（生産技術）
 - ・ 2035年の高い目標の達成に向けて、自動自律実験による研究開発の加速が期待される。
- 自動自律実験の適用に向けて、データ・情報だけでなく、物理的な装置・資源を集約し、効率的かつ効果的に実施するため、自動自律実験拠点の形成が有効と指摘。
 - ・ 狙い：ノウハウの蓄積・共有、標準化による技術運用の難易度引き下げ、人材・企業の確保、継続的な活用
 - ・ 課題：研究者が必要とするタイミングで使用できない可能性や、距離によるアクセス

カソード触媒・触媒層および電解質膜の課題と自動・自律化への課題

部材	2035年材料目標に向けた課題	自動・自律化への期待
カソード触媒・触媒層	<ul style="list-style-type: none">・ 飛躍的な性能向上（質量活性等）が必要・ 現行から100倍以上の性能向上が求められるケースもあり、開発ハードルが大きい	サンプルハンドリング・合成・評価を一貫して自動化することで、10倍以上の効率化やデータの再現性向上が期待
電解質膜	<ul style="list-style-type: none">・ 膜厚を大幅に薄く（5μm以下）しつつ、高温低加湿条件でも高いプロトン伝導度を確保する必要がある・ 薄膜化と耐久性を両立するハードルが高い（補強層、クエンチ剤）	成膜や乾燥条件の探索を自動化すれば、検証スピードが向上

自動自律実験拠点形成に向けた取り組み



【出典】「燃料電池材料探索・プロセス検討に向けた自動自律実験装置の適用範囲と装置仕様に関する調査」成果報告会ポスター

2. 日本の技術開発目標と研究開発加速方針：まとめ

- FCV・HDV技術開発ロードマップでは、44トン級トラックの商品としての成立性を条件として、高い技術開発目標を設定。
 - ・ 2035年目標で、現在との比較で出力密度3倍、120℃運転を達成しつつ、寿命も50,000時間へ延長
 - ・ これを実現するために、Pt目付量を維持しつつ、質量活性8倍、溶出速度半減、電解質膜の厚さ40%低減など、部材についても高い性能向上・耐久性向上の両立が必要。
 - ・ コストや生産性についても高い目標を設定。
- 水電解技術開発ロードマップでは、2030年に向けて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」の構築）を行い、その後技術を蓄積したうえで競争力を強化する方針を強調
 - ・ 十分に安価な再生可能エネルギーが利用できるとの前提のもと、系統電力併用による利用率の向上や量産効果によるコスト低減、高電流密度化や長寿命化、生産性向上や間接費の低減など、複数のアプローチを組み合わせ、水素製造コスト目標18円/Nm³を満たすシナリオを検討し、高い技術開発目標を設定。
 - ・ このほか、AEMWE、SOECなどについても将来の在り方などが提示されている。（今回は数値目標に着目）
- NEDOロードマップでは、DX技術の活用による研究開発の加速に期待。
 - ・ 40年目標に到達するには、14倍以上の加速が必要。
- 「燃料電池材料探索・プロセス検討に向けた自動自律実験装置の適用範囲と装置仕様に関する調査」では自動自律実験拠点の形成を今後の取り組みとして提示。

3. 自動自律実験および高度解析に関する動向

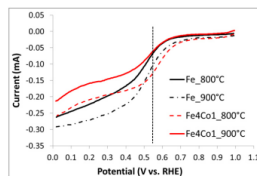
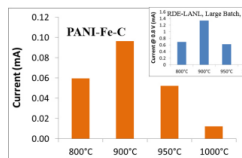
3. 燃料電池や水電解の分野での自動自律実験の海外事例

■ 燃料電池や水電解の分野については、**海外での自動自律実験の適用例は限定的。**

- 閉ループによる自動最適化を含まない高スループット実験の範囲では、非白金系触媒の高速合成とORR活性評価を行った事例などが10年以上前から存在。
- SDL関連の事例を示した複数のレビューにおいて、燃料電池や水電解に適用した海外事例は確認できない。
(A. V. Tobias et al., R. Soc. Open Sci. 12: 250646., N. Ishizuki et al., Science and Technology of Advanced Materials: Methods, 3:1, 2197519, E. Stach et al., Matter 4, 2702–2726, 等)
- 水電解分野では、近年の事例として、AWEやAEMWEのフローセル16個を同時に測定する自動プラットフォームを構築して高スループット実験を実現した事例などが存在。

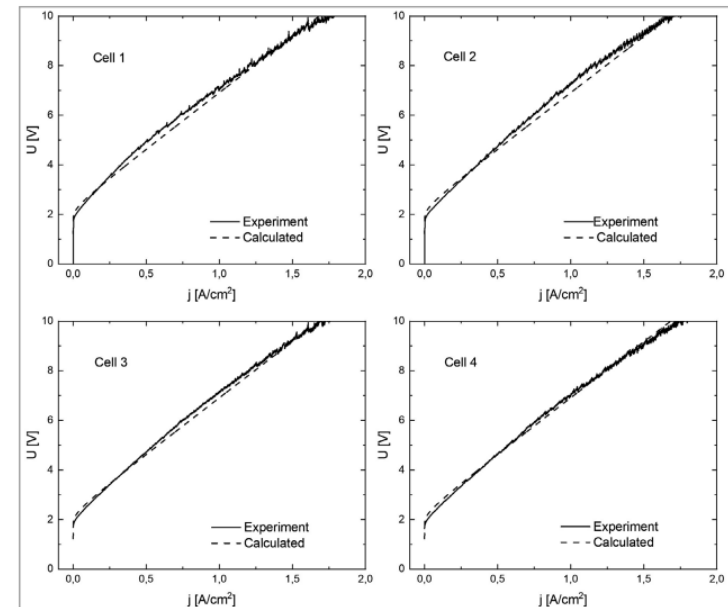
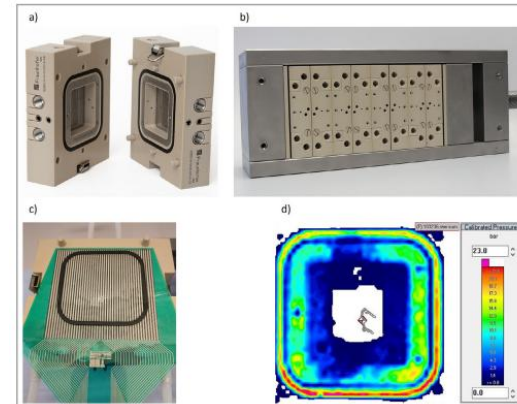
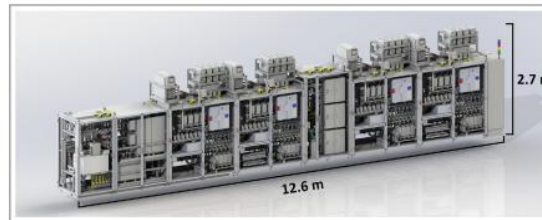
非白金系触媒のORR活性評価の事例

【出所】FY2015 DOE Annual Progress Report V.A.8



AWEおよびAEMWEのフローセルを用いた高スループット実験プラットフォーム（左上）、
フローセル概観および面圧分布測定（左下）、AWEの場合の分極測定の実現性（右）

【出所】I. Dessel et al., Chem. Ing. Tech. 2024, 96, No. 6, 774–780



3. 二次電池分野での自動自律実験の海外事例

■ 二次電池の分野では、欧州の研究開発イニシアティブBattery2030+での取り組みが大規模なプロジェクトとして挙げられる。

- Battery2030+は2020年から継続している広範囲な二次電池の研究開発を行うイニシアティブであり、1億5,000万EUR以上の累積資金がEUから投入。
- 自動自律実験を含む研究開発の加速を目指すプロジェクトとしては、BIG-MAP（2020-2024年、約2,000万EUR）および後継のFULL-MAP（2025-2029年、約2,000万EUR）が存在。
- 自動自律実験に加えてHPCによるシミュレーション・モデリングとの連携も含めた概念としてMaterials Acceleration Platforms (MAP)が提唱されており、これを二次電池の分野において実現することを狙う。

FULL-MAPの目的

モジュール化された自律型インフラを開発し、最小限の人間による介入で材料の合成、特性評価、試験を可能にする。

高度な計算モデルを実験データと統合し、材料や部品の逆設計を導く。

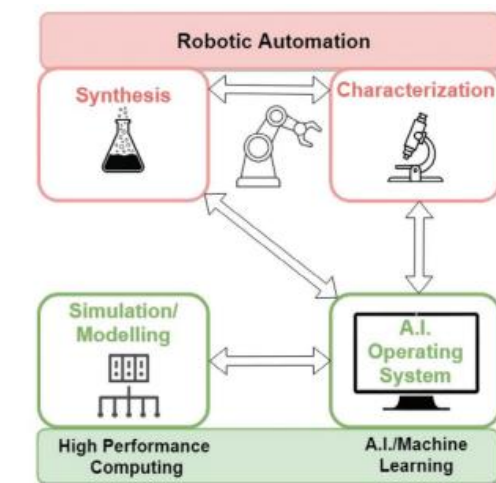
カソード-電解質界面（CEI）や固体電解質界面（SEI）などの重要な界面を、高度なハイスループット特性評価手法を用いて探索し、バッテリー性能と耐久性の向上に不可欠な知見を得る。

自動化されたデータ駆動型プロセスにより、開発期間を数年から数か月へと劇的に短縮する。

開発のあらゆる段階で環境的・経済的要因を考慮し、真に持続可能な技術を実現する。

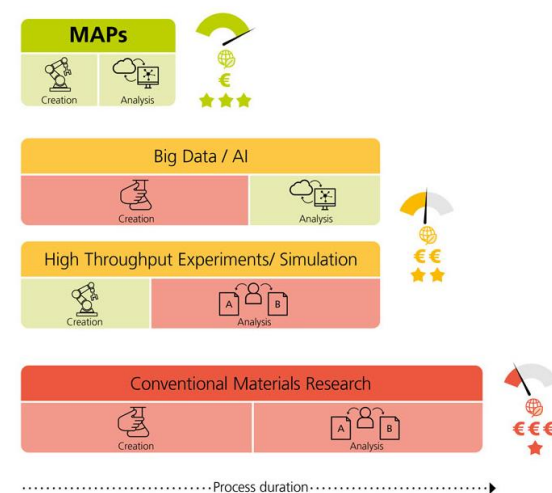
【出所】 FULL-MAP webサイトから当社作成

MAP概念図



【出所】 Stier, S.P. et al.,
Advanced Materials, 36(45), Article 2407791

MAPによる研究開発の加速



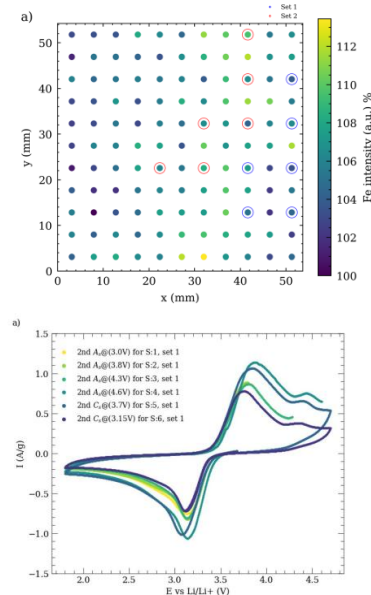
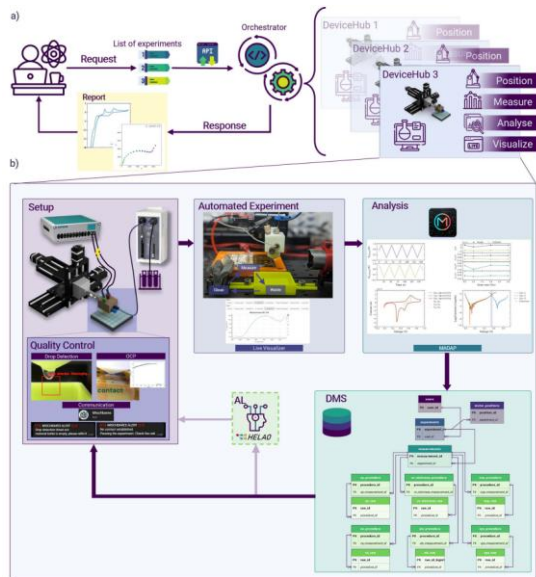
【出所】 Fraunhofer ISC webサイト
“Materials Acceleration Platforms (MAPs)”

- 二次電池分野では自動自律実験の活用に向けた研究開発が海外事例として確認できる

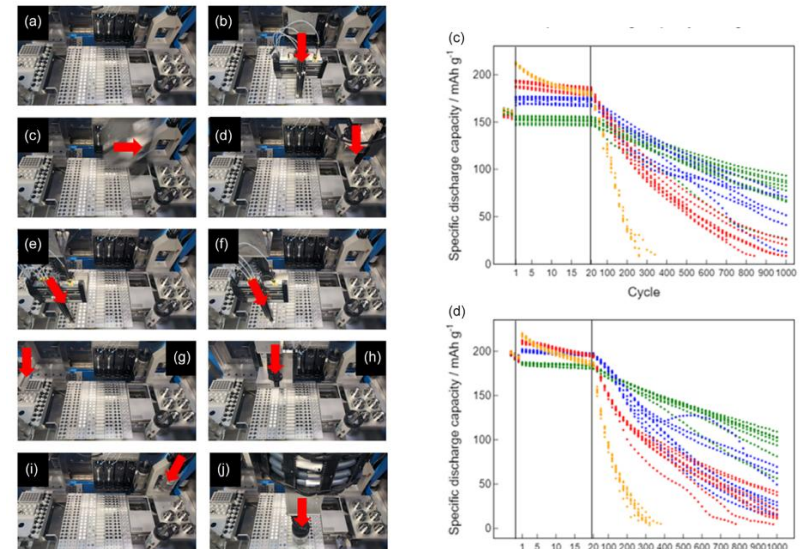
3. 二次電池分野での自動自律実験の海外事例

- BIG-MAP関連の論文発表では、**閉ループによる自動最適化を電池材料探索などに活用した事例は確認できない。**
- 自動自律実験につながる取り組みとして、以下の2つの事例を確認。
 - ・ ミリメートルスケールの電極アレイを自動合成し、**CVによる電気化学測定やXPSによる材料分析を行い、リアルタイムでのデータ処理・蓄積**を行った例（Auto-MISCHBARES）。電極アレイの性能の再現性などを評価。 [1] F. Rahmanian et al., Digital Discovery, 2024, 3, 883
 - ・ **電解液の精製・コインセルの自動合成と自動サイクル試験を行うプラットフォーム（Aurora）**を構築した事例。サイクル試験の再現性などを評価。 [2] E. Svaluto-Ferro, et al., Batteries & Supercaps 2025, 8, e202500155

Auto-MISCHBARESの概念図（左）、XRFによる電極アレイのFe分布（右上）、CV測定の結果例（右下） 【出所】本スライド文献[1]



Auroraプラットフォームの画像（左）、サイクル試験の例（右上：NMC622||graphiteセル、右下：NMC811||graphiteセル） 【出典】本スライド文献[2]

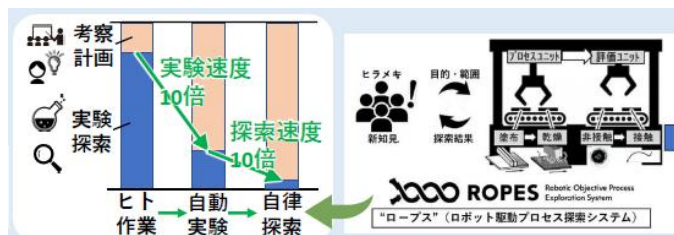


- ・ 二次電池分野では自動自律実験の活用に向けた研究開発が海外事例として確認できる

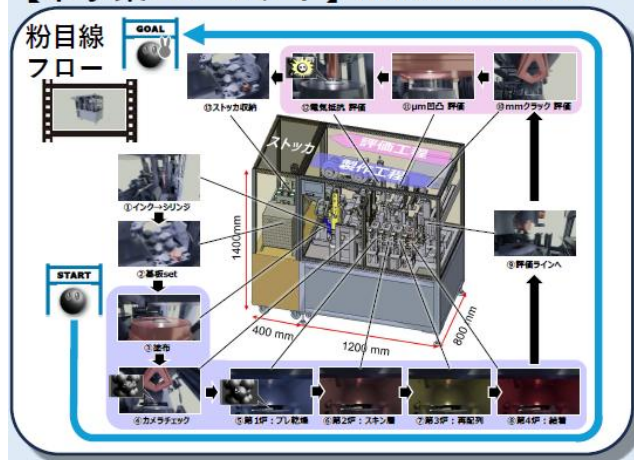
3. NEDOプロジェクトにおける取組

■ 日本では複数のNEDOプロジェクトで燃料電池に関する自動自律実験の取り組みを推進。

- 東京大学長藤先生：燃料電池触媒層インクの乾燥条件を最適化するプロセスインフォマティクス（PI）を実施（実験速度10倍、探索速度10倍を目標）
- NIMS冨中先生：ORR触媒の自動合成・自動評価により均質なデータの大規模創出を実施（実験加速20倍を達成、実験に高電子分光を含む）

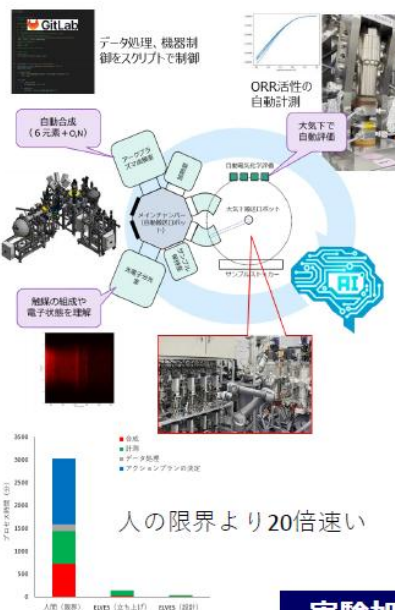


【本事業コンセプト】NEDO2023-2024

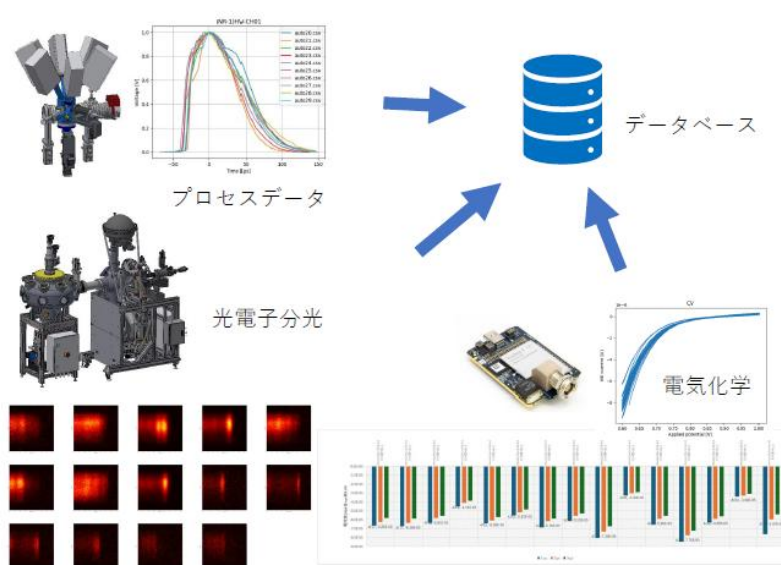


【出典】「燃料電池のプロセスインフォマティクス 共通基盤の構築」成果報告会ポスター

■ ELVESシステム構築



■ 均質なデータの大規模創出



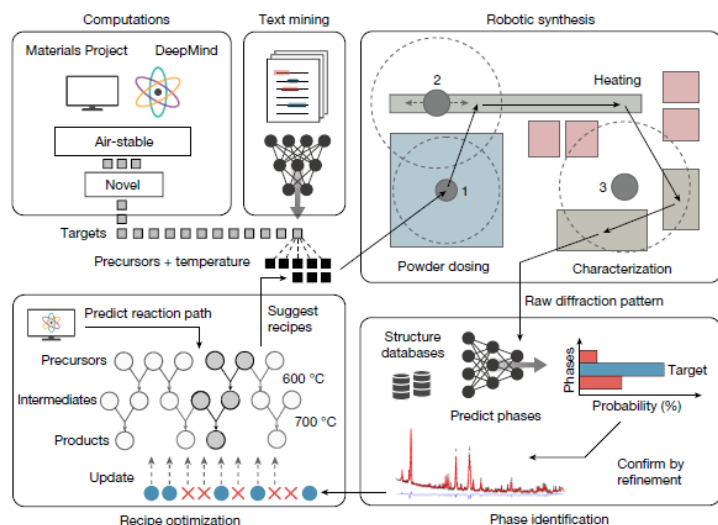
実験加速20倍達成 均質なデータを大規模創出中

【出典】「マテリアルズ・インフォマティクスによる 燃料電池材料の研究開発」成果報告会ポスター

- 日本でも燃料電池分野において自動自律実験の取り組みを進めており、先行する事例と言える

3. 自動自律実験と高度解析

- 実験室レベルでの高度解析を自動自律実験に組み込んだ事例も存在。
 - ・ 但し、燃料電池や水電解での事例は確認できず、二次電池まで拡張しても同様
- 近年では、二次電池や水電解などの分野で、自律的でない高スループット実験や、マルチモーダルなデータベース作成などの事例が確認できる
 - ・ 高スループット実験やバッチ合成などで大量に合成したサンプルに対して高度解析を行う事例は2000年代から存在するが、自動合成やオンラインでの解析、大規模データベース作成などの取り組みが顕著。



A-Labの例。ロボットによる合成（原料の秤量・混合・焼成）とXRD測定、次の条件の設定を自動化。実証実験として、58の既知の無機結晶の結晶構造を与え、うち41通りについて自動合成を実現。
Szymanski, N.J., et.al., Nature 624, 86-91 (2023)

高スループット実験やデータベース作成などに高度解析を活用した例

研究機関・文献	概要
ヘルムホルツ研究所、カールスルーエ大学など[1]	LFP正極について、mmスケールの電極アレイを自動合成し、CVによる電気化学測定やXPSによる材料分析を自動的に実施してデータを蓄積（Auto-MISCHBARES）
DOE[2]	AWEのOER触媒について、Niに添加する様々な金属の組み合わせを電気化学測定による自動探索で最適化し、XPSによる解析を実施。（FastCat）
Imperial Collage Londonなど[3]	Battery Imaging Library: Liイオン電池を含む様々な二次電池材料について、XRD-CTを含む9種のマルチモーダルな解析データをデータベース化。

- [1] F. Rahmanian et al., Digital Discovery, 2024, 3, 883
- [2] N. F.-Bodker et al., Advanced Intelligent Discovery, 2025; e2020500138
- [3] R. Docherty et al., ChemRxiv 2025 preprint, DOI: 10.26434/chemrxiv-2025-sbp73

- ・ 二次電池分野では自動自律実験の活用に向けた研究開発が海外事例として確認できる

3. 放射光施設とDX技術活用

■ 放射光施設の活用についてもDX技術活用が進む

- ロボットによる試料ローディングの加速や、機械学習モデルを用いたXRDのビームライン最適化
- 複数の解析手法によるデータを組み合わせたマルチモーダルな材料データベース構築
- オペランド試験などを含めた自動自律実験は難しいが、データ自動収集や機械学習モデルによるモニタリングと装置制御を組み合わせた事例なども存在

放射光施設活用に関連したDX技術活用の取り組み例

放射光施設	概要
SLAC [1]	XRDに対するロボットによる自動の粉末試料ローディングと完全遠隔での運用を実現、試料を郵送しての解析を可能に
NSLS-II [2]	ベイズ最適化を用いたビームライン最適化のアルゴリズムを開発
NSLS-II [3]	Bluesky経由で複数ビームラインによるマルチモーダル測定を自動化、リアルタイムでのデータ収集やクラスタリングなどを実施。
ESRF [4]	薄膜合成の制御と、機械学習モデルによるオペランドXPSの結果判定を接続（同期・非同期双方を想定）、オペランドXRRの自動自律実験組み込みのコンセプトを実証。

- [1] K. H. Stone et al., J. Appl. Cryst. (2023). 56, 1480-1484
 [2] T. W. Morris et al., J. Synchrotron Rad. (2024). 31, 1446-1456
 [3] A. A. Corrao et al. arXiv:2509.22959 [physics.app-ph], 2025
 [4] L. Pithan et al., J. Synchrotron Rad. (2023). 30, 1064-1075

関連する日本の取り組み例

放射光施設	概要
SPring-8 [5]	試料調製→実験→解析: 各プロセス内の自動化 & プロセス間の自動化、ビームラインの自動調整、自動化されたシステムの外部制御など、自動化・遠隔化システムを整備
NanoTerasu [6]	タンパク質構造解析エンドステーション（以下、MX-ES）において、メールインによる完全自動測定とスーパーコンピュータAOBAとのシームレスなデータ統合連携により、膨大な数の立体構造を原子レベルで迅速に決定。
あいちSR [7]	測定対象元素や付帯条件のリストによる計画書から、ビームライン設定を含めて自動的にXAFS測定が進行するシステムを開発。

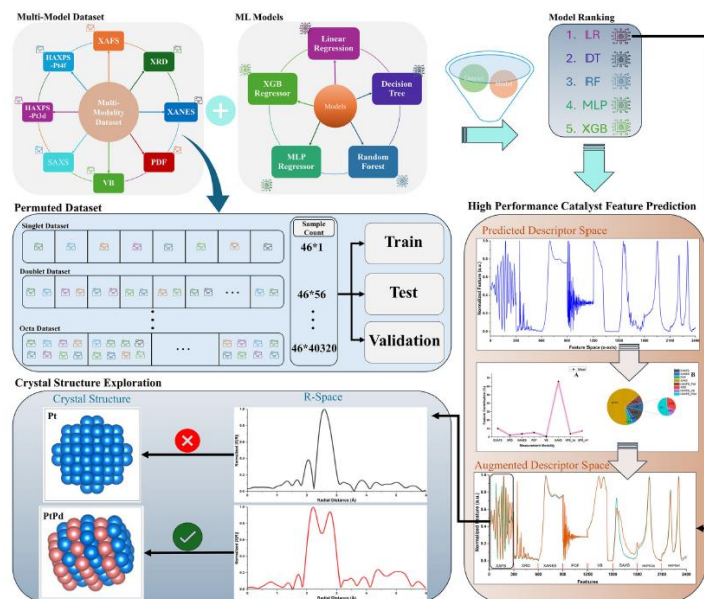
- [5] 矢橋 牧名, SPring-8における 自動化・遠隔化等のDXの取組
 [6] プレスリリース「NanoTerasuのビームラインでたんぱく質決勝立体構造解析を開始-全自動測定とスパコンAOBAによる即時データ解析によりライフサイエンスを加速」
 [7] プレスリリース C6-3_ビームライン自動制御技術の確立

- 放射光施設に関してもDX技術活用による自動化やデータベース構築などが進む

3. 放射光施設とDX技術活用に関する日本の事例

- 日本ではSPring-8を用いた先進事例が存在（いずれもNEDO事業）
 - ・ マルチモーダルな測定データに基づく機械学習モデルの構築
 - ・ FC-BENTENデータベースの構築（マルチモーダルなデータ収集を行うためのプロトコル策定）

マルチモーダルな測定データに基づく機械学習モデルの概要



SPring-8で取得した8種類のマルチモーダルシンクロトン計測データ（XANES、EXAFS、XRD、SAXS、PDF、HAXPES: Pt3d、Pt4f、VB）と性能指標を用いて、構造-性能予測の機械学習モデルを構築。Modalityを統合した高次元スペクトル記述子により、予測精度と汎化性能を大幅に向上。性能ターゲットからスペクトル特徴を逆推論、理論解析を通じて触媒構造候補提示するフレームワークを検討。

【出典】 A. Baliyan et al., Communications Chemistry (2025) 8:376

FC-BENTENの概要図

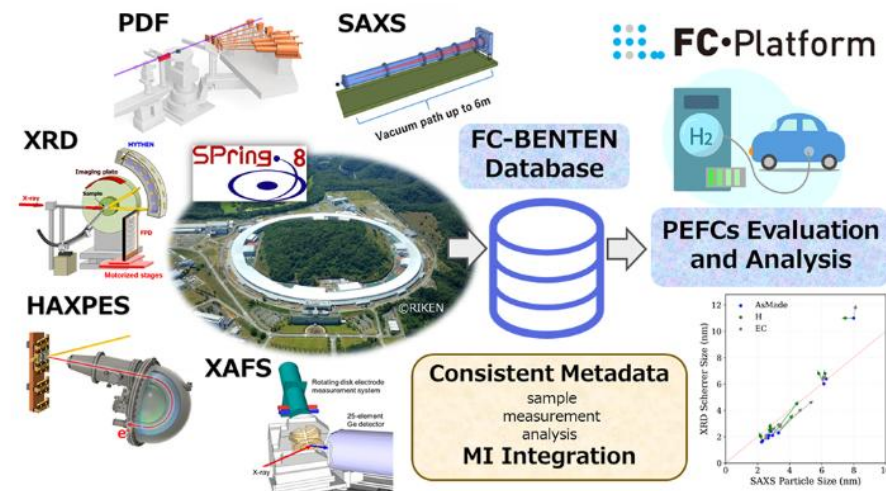


図1 燃料電池材料研究を支援する放射光実験とデータ基盤の概要図。

燃料電池に関する放射光実験データベース「FC-BENTEN」を構築。XAFS、HAXPES、XRD、PDF、SAXSなど多様な放射光測定手法に対応し、メタデータの体系化と自動化された登録ツールにより、高品質なデータを効率的に管理・共有。

【出典】 T. Matsumoto et al., Appl. Sci. 2025, 15, 3931

http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2025/250515/

- ・ 放射光実験に関するDX技術の活用の観点でも、日本は燃料電池分野で先行する実績を挙げている

3. 自動自律実験および高度解析に関する動向：まとめ

- 燃料電池・水電解などの分野においては、自動自律実験の適用事例は限定的であり、高スループット実験などの範囲にとどまる。
 - ・ 国内ではNEDO事業等において複数の取り組みが進行。
- 燃料電池・水電解に先行すると思われる二次電池分野においては、例えば欧州Battery2030+におけるプロジェクトBIG-MAPやFULL-MAPなどが主要な取り組みとして挙げられる。
 - ・ 自動自律実験でセルを構成して自動計測・最適化を行う場合、流体の取り扱いを含む燃料電池・水電解は二次電池よりも難しい課題であると推測される。
 - ・ さらに、燃料電池の場合は気相をシールするためにより難しい設計や自動実験装置が求められる。
- 高度解析とDX技術の関連について、海外での最近の研究事例を調査。
 - ・ 材料科学の他分野では、実験室レベルの高度解析を自動自律実験に組み込む研究事例も存在。
 - ・ 二次電池や水電解においても、自動合成と組み合わせた高スループット実験やマルチモーダルなデータベース生成など、自動自律実験に近い領域で高度解析を活用した研究事例が現れている。
 - ・ 放射光施設についても、DX技術を活用した自動化やマルチモーダルなデータベース生成、実験制御のコンセプト実証などを海外の最近の文献から確認。
- 日本国内ではSPRING-8を活用した取り組みがあり、先進的な事例と考えられる。

4. まとめ

- 水素は様々な産業分野（特に電化などの代替手段が技術的・経済的に難しいHard-to-abateな領域）での脱炭素化を実現する手段として注目されている。
 - 水素の利用手段としての燃料電池については、大部分の適用先はhard-to-abate領域ではないものの、以下のような有用性から研究開発が進められている。
 - ✓ 移動体分野：パリティコストが比較的高く、水素需要の喚起につながる可能性／重量や充填時間（稼働率確保）、寒冷地への適性などの優位性／水素重量当たりの市場への貢献価値や、産業競争力
 - ✓ 定置用途分野：低炭素化／レジリエンス／エネルギー地産地消／エネルギーセキュリティ／電力需給高度化／低騒音・分散利用など。
 - 水電解はクリーン水素製造において重要な手段であり、供給量の拡大に向けて必須な技術。
- 海外での研究開発は、米国が研究開発費削減により減速する見込みである一方、欧州や中国は引き続き研究開発への取り組みを継続。
- 日本は燃料電池・水電解の双方で高い目標値を掲げ、技術開発を推進する方針。
- 技術開発の加速手段としてDX技術の活用が期待される。
 - 海外事例を見ると、燃料電池や水電解、さらには二次電池まで広げて、自動自律実験の適用事例として文献に現れている成果は限定的だが、将来に向けた取り組みが進む。
 - 高度解析もDX技術と組み合わせた活用が進み、自動自律実験への取り込みなども進められている。
 - 放射光施設のDX技術による高度化やデータベース構築などの事例も確認。
- 燃料電池分野では日本が複数の取り組みを行っており、先進的な成果を挙げている。

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。