

2050年カーボンニュートラルに向けた若手有識者研究会

水素関連プロジェクトの 今後の取組みに関する提言

2022年12月19日

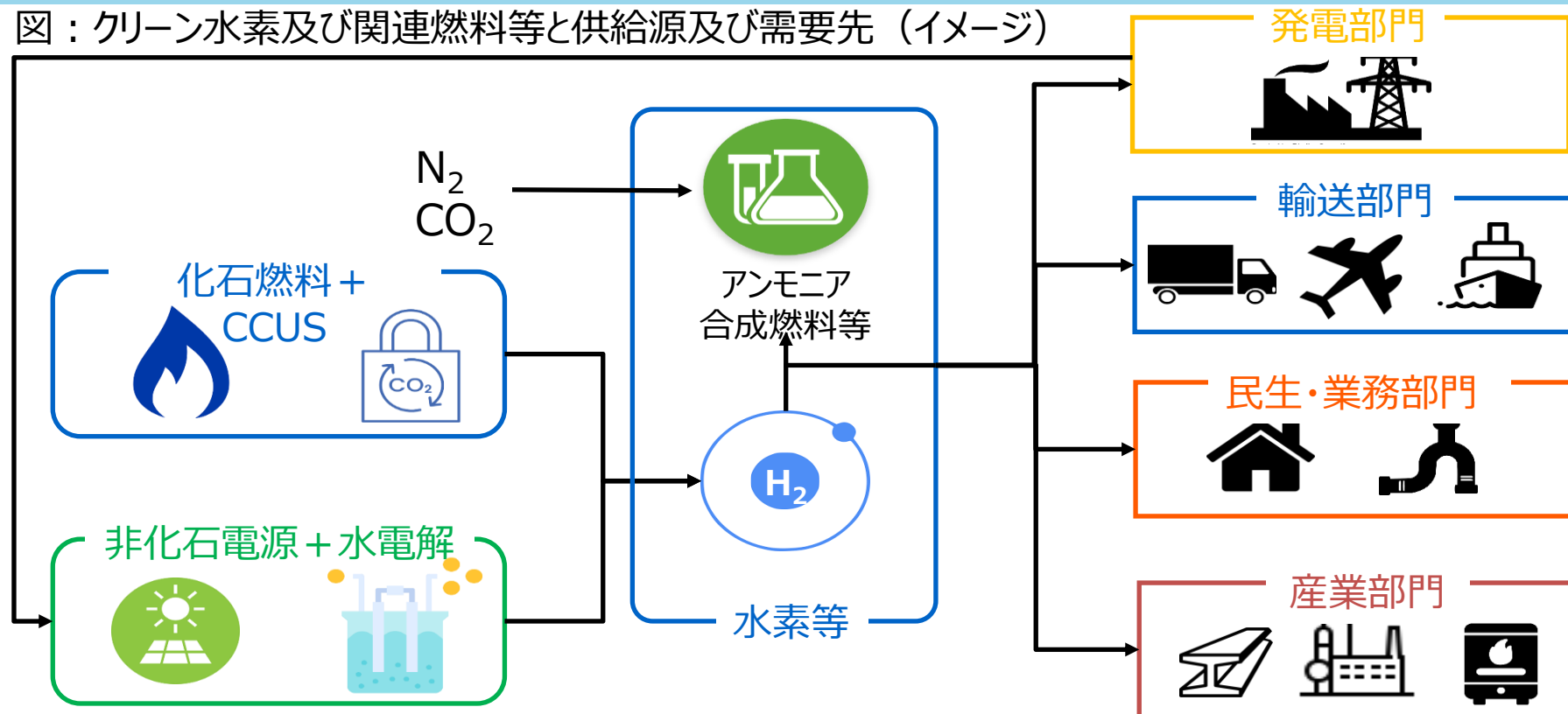
稲垣有弥	(山梨大学)
小笠原有香	(NEDO)
高橋佑太郎	(ENEOS)
武安光太郎	(筑波大学)
立川雄也	(九州大学)
中西健市郎	(千代田化工建設)
廣田駿介	(マッコーリー)

カーボンニュートラルに必要な不可欠な水素

(出所)「第2回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ」(2021年4月28日開催) 資料3

- 水素は直接的に電力分野の脱炭素化に貢献するだけでなく、余剰電力を水素に変換し、貯蔵・利用することで、再エネ等のゼロエミ電源のポテンシャルを最大限活用することも可能とする。
- 加えて、電化による脱炭素化が困難な産業部門(原料利用、熱需要)等の脱炭素化にも貢献。
- また、化石燃料をクリーンな型で有効活用することも可能する。
- なお、水素から製造されるアンモニアや合成燃料等も、その特性に合わせた活用が見込まれる。

図：クリーン水素及び関連燃料等と供給源及び需要先（イメージ）



カーボンニュートラル時代の水素輸入国

(出所)「第2回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ」(2021年4月28日開催) 資料3

- 日本は再エネ含む資源賦存量が国内需要に比べ小さく、**長期的にも海外水素を輸入することになる見込み**。そのため、エネルギー安全保障上の観点から、資源外交が引き続き不可欠。



(出典) Hydrogen Strategy for Canada

水素分野における戦略等の策定状況について

(出所)「第2回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ」(2021年4月28日開催) 資料3

- 日本は世界で初めての水素基本戦略を2017年12月に策定。近年は、水素を脱炭素化に必要な不可欠なエネルギー源と位置づけ、多くの国・地域が水素関連の取組を強化。日本がこの分野を今後もリードするためには、より一層取組を強化する必要。
- 昨年10月の菅総理のCN宣言を受け、昨年末策定したグリーン成長戦略でも重点分野の一つに位置づけ。需給一体での取組により、導入量の拡大と供給コストの低減を目指す。

国内外の情勢変化、戦略策定の状況

2017年12月
水素基本戦略策定

2019～2020年
各国水素戦略策定
及び、経済対策で
水素に注力

2020年10月
菅総理による
2050年CN宣言

2020年12月
グリーン成長戦略策定
(水素の位置付)

2021年～
次期エネ基、水素基本
戦略見直し等を見据
えた検討(継続中)

グリーン成長戦略における量及びコストの目標

□ **年間導入量***：発電・産業・運輸などの分野で幅広く利用

現在(約200万t) → 2030年(最大300万t) → 2050年(2000万t程度)

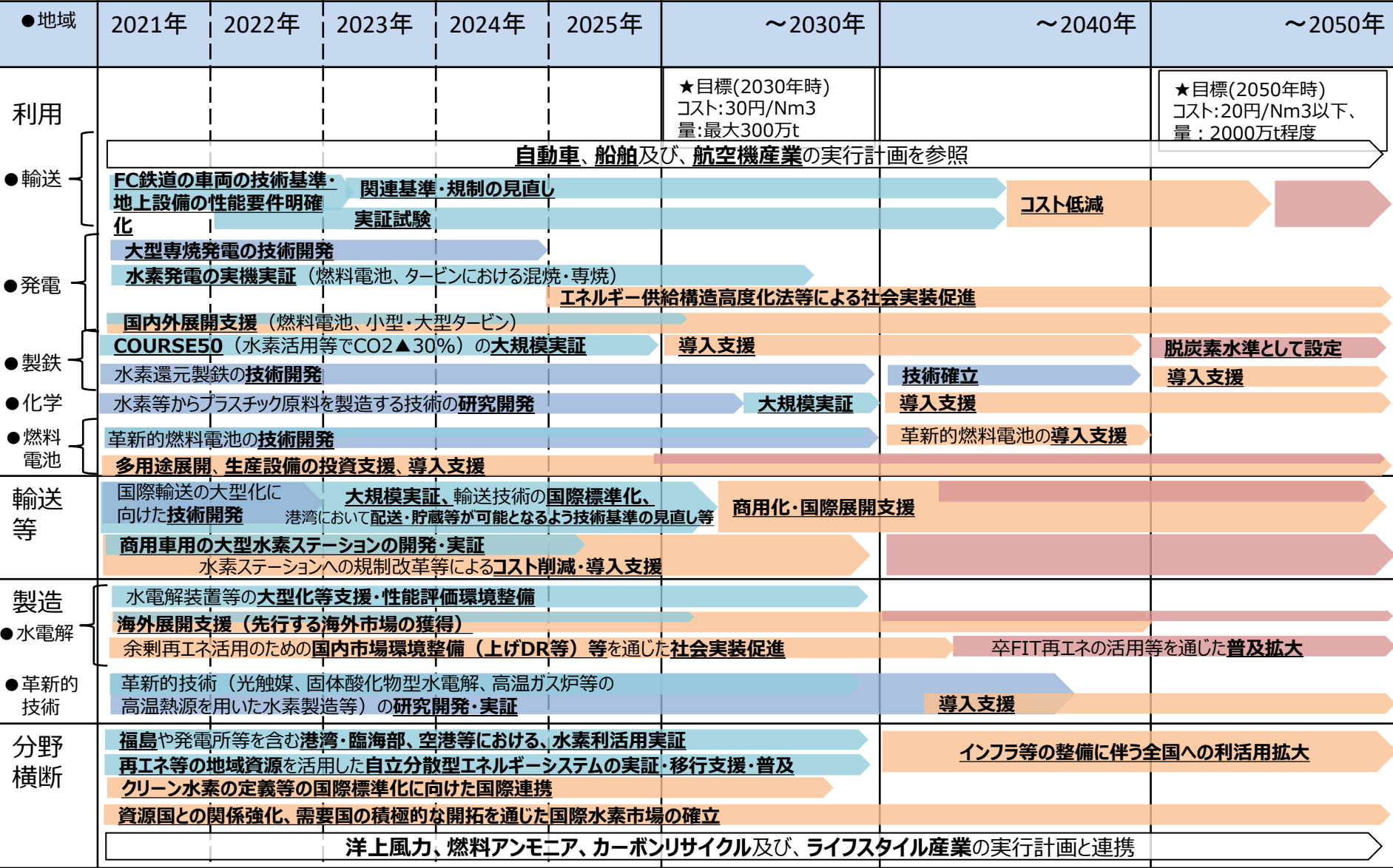
※水素以外にも直接燃焼を行うアンモニア等の導入量(水素換算)も含む数字。

□ **コスト**：長期的には化石燃料と同等程度の実現

現在(100円/Nm³) → 2030年(30円/Nm³) → 2050年(20円/Nm³以下)

水素産業の成長戦略「工程表」

(出所)「第2回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ」(2021年4月28日開催) 資料3



エネルギー安全保障も考慮した、脱炭素時代の水素供給の道筋

(出所)「第2回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ」(2021年4月28日開催) 資料3

- 水素は多様なエネルギー源から製造可能であるが、日本は国内の資源ポテンシャルが限定的であるため、大規模な社会実装に向けては、**価格競争力のある海外水素の活用が必要**。
- しかしながら、エネルギー安全保障向上の観点から、その調達源の多様化、調達先の多角化を推進するだけでなく、余剰再エネ等を活用した**国内水素製造基盤を有することも重要**。
- 更に、水素の大規模輸入が実現するまでは、**副生水素など、既存の水素供給源を最大限活用**することが必要不可欠。

	短期（～2025年頃）	中期（～2030年頃）	長期（～2050年）
実績・目標量	約200万トン	最大300万トン	2000万トン程度
既存供給源 (副生水素等)	主要な水素供給源として 最大限活用	供給源のグリーン化（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 水素サプライチェーンの構築	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	電解水素の規模拡大・ 新たな製造技術の台頭

カーボンニュートラルまでの水素需要先拡大の道筋

(出所)「第2回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ」(2021年4月28日開催) 資料3

- 現在、需要はFCVやFCバスなどの輸送部門と、原油の脱硫用途などの産業部門などに水素の直接利用は限定され、いずれもグレー水素が活用されている。
- 今後は、**FCトラックなどの商用車、水素船**などが順次市場投入され、2030年頃に国際水素サプライチェーンが商用化されるタイミングで、**発電部門（タービン混焼、専焼）**などで地域的に実装されることを見込む。
- また、技術的課題の解決に加え、サプライチェーンの大型化等を通じた水素供給コスト削減、インフラ整備に伴い、鉄鋼や化学、航空等の**脱炭素化が困難な分野(Hard-to-Abate Sector)**でも水素利用が拡大。
- なお、各地に分散する家庭・業務部門も含む熱需要については、**既存ガス管を含む供給インフラの脱炭素化**や、**水電解装置と再エネ導入の更なる進展、純水素燃料電池の導入**等により段階的に脱炭素化。

	短期（～2025年頃）	中期（～2030年頃）	長期（～2050年）
部門・目標量	約200万トン	最大300万トン	2000万トン程度
輸送部門	FCV、FCバスに加え、FCトラック等への拡大	船舶（FC船等）等の市場投入	航空機等への水素等（合成燃料等）の利用
発電部門	定置用燃料電池、小型タービンを中心に地域的に展開	大規模水素発電タービンの商用化（SCと一体）	電力の脱炭素化を支える調整力等として機能
産業部門（工業用原料）	原油の脱硫工程で利用する水素のグリーン化、製鉄、化学分野の製造プロセス実証等の実施		水素還元製鉄、グリーンケミカル（MTO等）等
産業・業務・家庭部門の熱需要	水電解装置の導入や、既存ガス管を含む供給インフラの脱炭素化等に伴い化石燃料を代替等する		インフラ整備や水素コスト低減を通じた供給拡大

水素キャリアの選定と今後の支援方針

(出所)「第2回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ」(2021年4月28日開催) 資料3

- 水素キャリアの選定は、水素社会の在り方を決める重要な論点であるが、それぞれ異なる課題を抱えており、**長期的にどれが総じて優位となるか現時点で見極めることは不可能**。
- 加えて、化学的な特性や既存インフラ等の活用可否により、用途等の棲み分けも長期的に行われると考えられるため、**現時点でキャリアを絞り込まず、競争を促しつつも各々の技術的課題克服等を支援**。
- また、キャリアの評価に当たっては、水素化、脱水素化のコストに加えて、輸送（国際輸送）、配送（国内配送）のコストなども加味し、**総合的に評価**することが重要。

キャリア	液化水素	MCH	アンモニア	メタネーション
体積(対常圧水素)	約1/800	約1/500	約1/1300	約1/600
液体となる条件、毒性	-253℃、常圧 毒性無	常温常圧 トルエンは毒性有	-33℃、常圧等 毒性、腐食性有	-162℃、常圧 毒性無
直接利用の可否	N.A.(化学特性変化無)	現状不可	可（石炭火力混焼等）	可（都市ガス代替）
高純度化のための追加設備	不要		必要（脱水素時）	
特性変化等のエネルギーロス	現在:25-35% 将来:18%	現在:35-40% 将来:25%	水素化:7-18% 脱水素:20%以下	現在：-32%
既存インフラ活用、活用可否	国際輸送は不可（要新設）。国内配送は可	可（ケミカルタンカー等）	可（ケミカルタンカー等）	可（LNGタンカー、都市ガス管等）
技術的課題等	大型海上輸送技術（大型液化器、運搬船等）の開発が必要	エネルギーロスの更なる削減が必要	直接利用先拡大のための技術開発、脱水素設備の技術開発が必要	製造地における競争的な再エネ由来水素、CO2供給が不可欠

全体の構成

1. 水素サプライチェーン構築に向けた支援の在り方に関する検討
2. 水電解による水素製造の社会実装・市場獲得に向けた検討
3. ファイナンス面からの水素社会実現に向けた検討
4. 今後の水素政策に対する提言

全体の構成

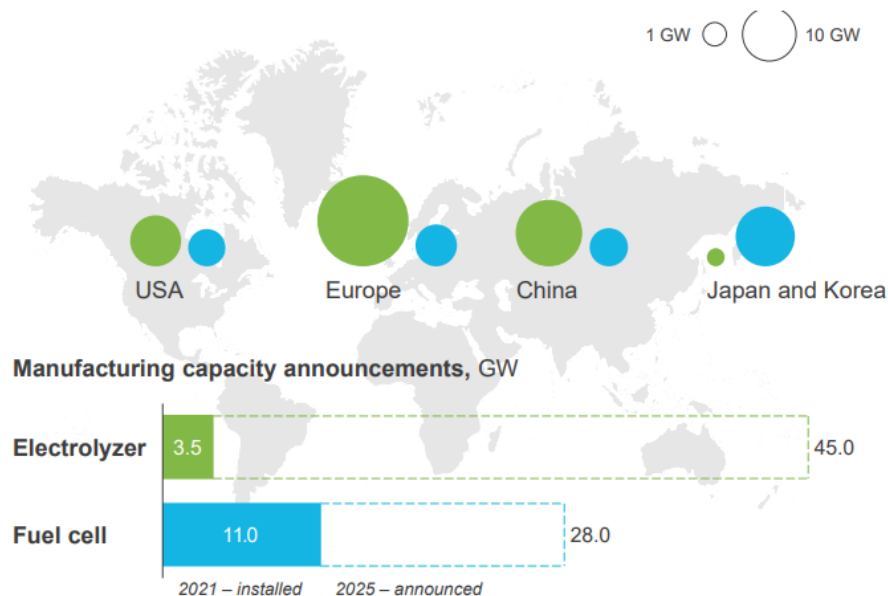
1. 水素サプライチェーン構築に向けた支援の在り方に関する検討
2. 水電解による水素製造の社会実装・市場獲得に向けた検討
3. ファイナンス面からの水素社会実現に向けた検討
4. 今後の水素政策に対する提言

世界の水素サプライチェーンにおける日本の位置付け

- グリーン水素を製造する水電解装置は、欧米の各種メーカーが製造能力の増強を公表。
一方、日本は車載用を中心に燃料電池の生産に重点が置かれている
- 長距離輸送される水素のうち、約半数がパイプライン輸送。海上輸送用キャリア（液化水素・有機ハイドライド）活用は、日本・韓国を中心としたアジア圏が大部分を占める

水電解装置・燃料電池の製造能力

- 水電解装置メーカーは2025年までに年間45GWまで製造能力を増強する公表し、欧州が全体の40%を占める
- 一方、燃料電池の製造能力は、自動車メーカーが本社を置く日本と韓国に集中



(出所) Hydrogen Council (水素協議会)「Hydrogen Insights 2022」
(2022年9月)

グローバルな水素の需給・輸送バランス

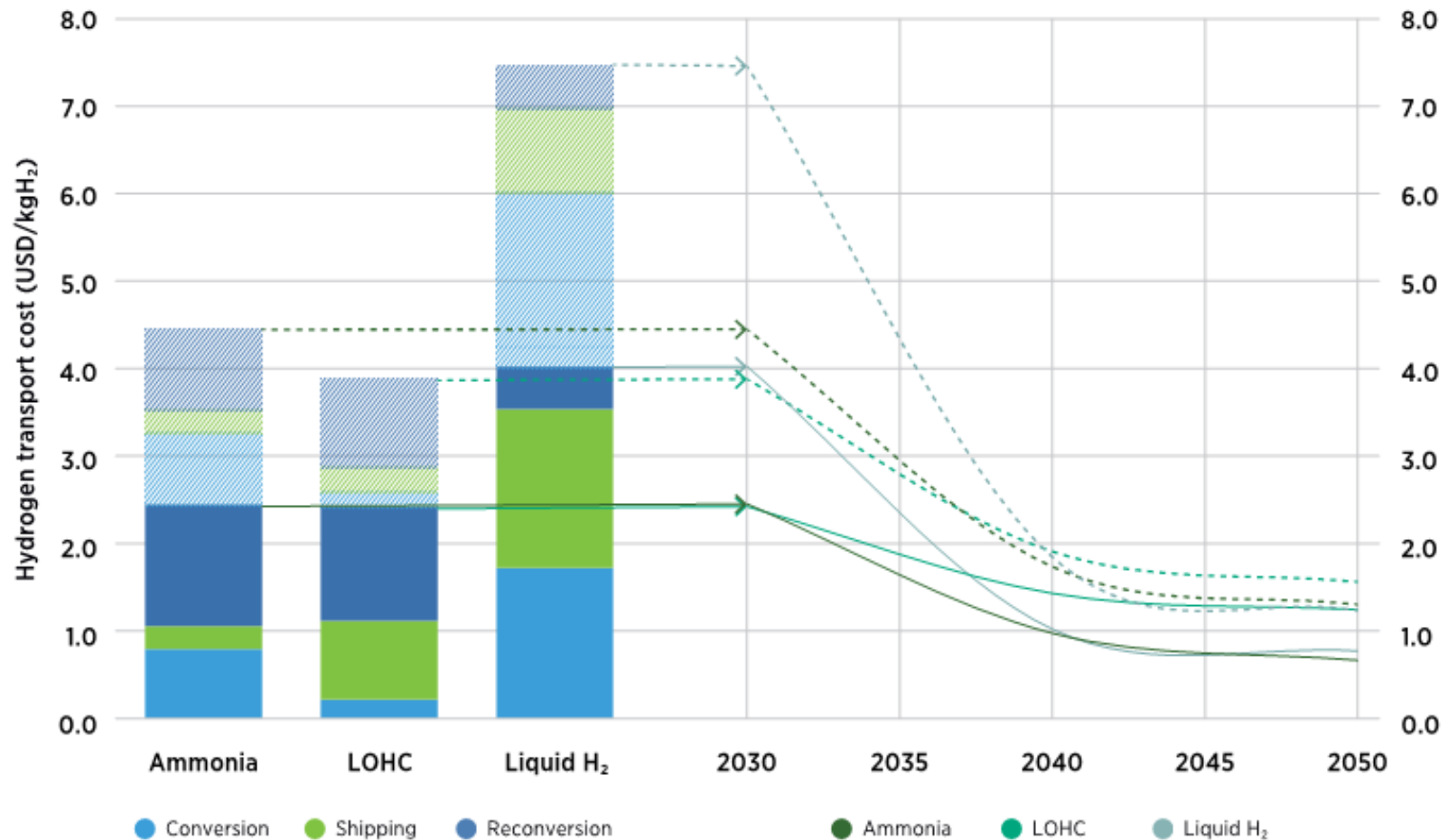
- 水素の長距離輸送（4億トン/年）のうち、日本市場は約5%
- 液化水素/有機ハイドライドによる海上輸送は6%で、その供給先はほぼアジア向け



(出所) Hydrogen Council (水素協議会)「Global Hydrogen Flows」
(2022年10月)

水素キャリア別輸送コストの将来見通し

- 2030年時点では、アンモニア・有機ハイドライド輸送のコスト競争力が高い
- 液化水素は輸送の大規模化、極低温技術の確立により大幅なコスト低減の可能性有



注)

- 実線は、技術革新シナリオ。斜線（破線）部は、悲観的なシナリオ。
- 想定プロジェクト規模は、2030年に50万トンH₂/年、2050年に150万トンH₂/年、輸送距離は1万kmを想定。

日本国内の水素サプライチェーンの現状と課題

- 国内の水素サプライチェーンについて、水素ステーションにおける水素供給体制の構築は着実に進んでいるものの、立地が限定的であり、都市部中心になっている
- 国際間サプライチェーンと併せて、国内の隅々まで行き届く国内の水素サプライチェーンの構築により、沿岸部だけでなく内陸部における水素利用の拡大が可能となる
- 我が国の特徴である液化水素やMCHなどの水素キャリアを活かした国内輸送と国内の再エネ由来水素の地産地消によるサプライチェーンの最適な組み合わせが重要

現状の課題



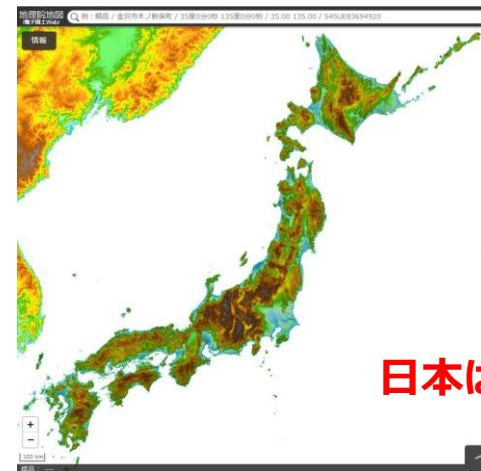
全国：開所154箇所（他12箇所整備中） ※R3年8月8日現在



開業店：62箇所

宮城県	つくし市①
栃木県	栃木市①
群馬県	高崎市
埼玉県	さいたま市②
千葉県	船橋市
	所沢市
	春日部市
	松戸市①
	戸田市
	川口市
千葉県	千葉市③
	松戸市②
	成田市
	野田地区
東京都	千代田区
	江戸区
	江東区④
	江川区⑤
	品川区⑥
	大田区①
	杉並区
	野田区
	板橋区
	中央区
	八王子市
	多摩市
	東久留米市
	川口市
神奈川県	川崎市①
	横浜市中区②
	相模原市①②
	藤沢市
	海老名市
	藤原市
山梨県	山梨市
長野県	長野市

※赤字は協賛
※数字は店舗数



日本は約7割が山間部

(出所) 経済産業省「第27回 水素・燃料電池戦略協議会」(2021年8月27日開催) 資料2

(出所) 国土地理院 地理院地図

- ・ ラストマイルでの水素の活用拡大
- ・ 地方でのプロパンガスとの置き換え

毛細血管的に全国の隅々まで供給を検討

日本国内の水素需要拡大の可能性

- 水素の活用先は自動車、バス、トラックだけでなく、ドローン、小型モビリティ、様々な定置用電源等と多用途展開に向けた開発が進む。
- 今後、国内における水素の供給体制・サプライチェーンが必要になる

国内における水素利活用の先行事例

山梨地域



TOYOTA Woven City（静岡）

水素がより生活の様々な場面で身近なエネルギーとして、モビリティや様々なアプリケーションなどに使用することを検討する

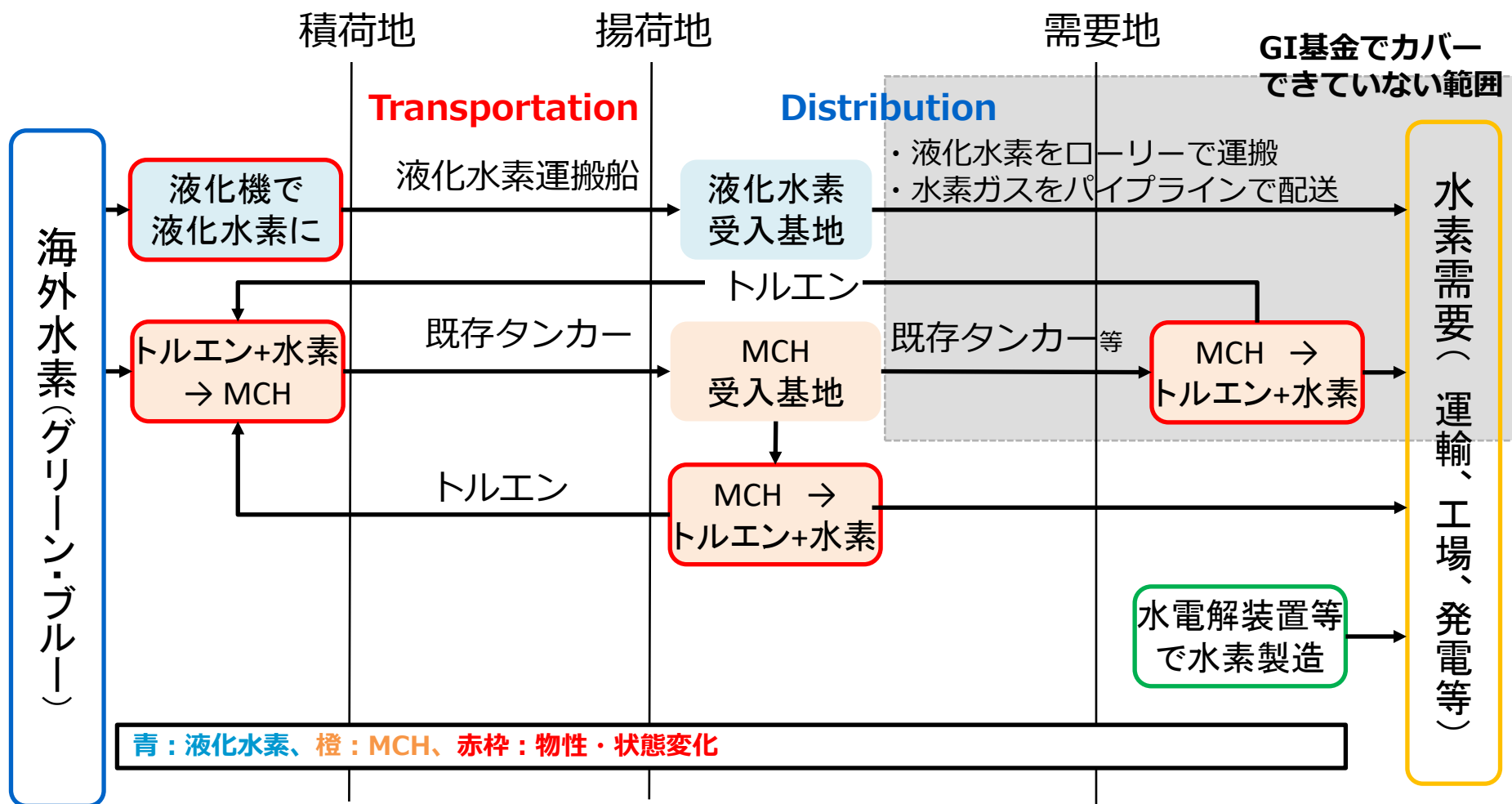


ポータブル水素カートリッジ；
トヨタ自動車、ウーブン・プラネットは、手軽に水素を持ち運びできる水素カートリッジのプロトタイプを開発中

国際輸送と国内配送を含めた水素サプライチェーンの全体像

(出所)「第2回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ」(2021年4月28日開催) 資料3を基に作成

- グリーンイノベーション基金事業にて、水素キャリア（液化水素・MCH）による大規模水素サプライチェーンの構築、水素発電技術の実機実証および再エネ等の電気由来による水電解による水素製造の大規模実証に関する開発が進行中



政策的な支援対象技術の評価指標：技術成熟度レベル（TRL）

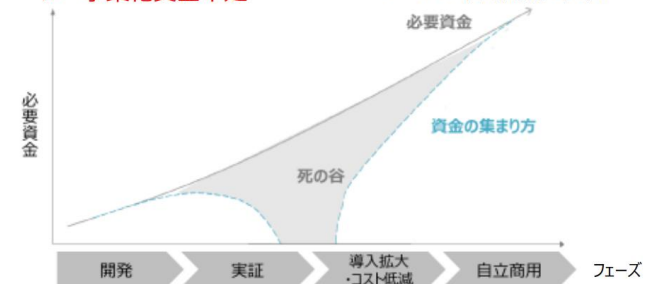
- TRLは技術開発がどの段階まで進捗したかを定量的に把握するための尺度であり、1980年代に米国NASAによって開発された手法。(GI基金事業等のモニタリング指標として活用されている)
- 水素キャリアは今後すみ分けがなされていくという前提のもと、大規模サプライチェーンの構築により水素供給コストを下げ、広く普及させることを目的として考えた場合、**重点的に支援すべき研究開発や実証における技術成熟度レベル(Technology readiness levels, TRL)**を再検討すべきではないか。

技術開発の相対的なレベル	TRL	TRLの定義
システムの運転段階	TRL 9	想定される全ての条件で運転された実システム
システムの試運転段階	TRL 8	試験と実証を通じて完成し性能確認された実システム
	TRL 7	フルスケールで、同様な（原型的な）システムを、現実的な環境において実証しているレベル
技術の実証段階	TRL 6	工学規模で、同様な（原型的な）システムを、現実的な環境において検証しているレベル
技術の開発段階	TRL 5	実験室規模で、同様なシステムを、現実的な環境において検証しているレベル
	TRL 4	実験室環境で、機器・サブシステムを検証しているレベル
実現可能性を示すための研究段階	TRL 3	解析や実験によって、概念の重要な機能・特性を証明しているレベル
	TRL 2	技術概念・その適用性を確認しているレベル
基礎技術の研究段階	TRL 1	基本原理を確認しているレベル

新技術の成熟度向上に加えて事業者がリスクを適切に管理できるような政府支援により、新技術の社会実装が加速する。

「死の谷」とは

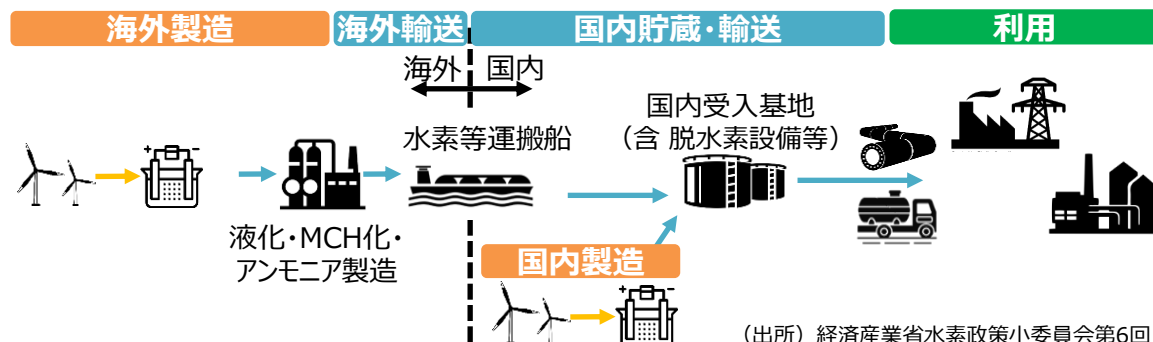
- 事業化できない事業者の声：
 - ターゲット市場の把握不足
 - 市場そのものの変化
 - **事業化資金不足**
- 投資できない投資家の声：
 - シード期に多額の投資をするのはハイリスク
 - ビジネス視点の欠如



(出所) 株式会社日本貿易保険(NEXI)「日本貿易保険(NEXI)の支援メニュー」(2022年11月)

【提案サマリー】水素サプライチェーン構築に向けた支援の在り方

- 2050年CNネットゼロ社会の実現を考えると、**水素のアンカーデマンドの創生**が必要となる。現実的には発電所や製鉄、化学産業などの産業部門への**水素浸透を政策的に企図**することが必要なのではないかと。まずは、基盤需要とみなされる**発電用途**、次いで、**製鉄**や**石油化学等の分野における水素の利活用**を見据えた施策はどうか。
- また、**早期の社会実装に資する技術への政策的な支援・サポート**を優先すべきではないか。従来エネルギー源と比べ高コストとなる水素の早期社会実装に繋げる為の仕組みとして、**TRL 6/7=>9に向けた取り組みを加速化すべく重点的に支援**するのはどうか。
- 水素キャリアについて、液化水素は分散型利用の為の水素ステーションがインフラとして整っているものの、**大規模導入には技術的な課題**があり、これに係る支援を厚くするべきではないか。他方、MCHは**早期の大規模サプライチェーン実現**のための継続的な支援、さらには水素利用末端までを含めたサプライチェーン全体を考えた際には**分散型利用に関わる支援**を厚くするなど、重み付けを行うのはどうか。



液化水素	● 高効率な水素液化設備の開発 ● 液水用の新造船の開発 ● 高効率な大型受入設備（タンク、ローディングアーム等）の開発によるボイルオフガスの大幅削減
MCH	● 商用化に伴うエネルギー効率の向上（MCH直接電解合成法、MCH直接燃料電池等） ● 分散型利用のインフラ整備（小型脱水素設備）

全体の構成

1. 水素サプライチェーン構築に向けた支援の在り方に関する検討
2. 水電解による水素製造の社会実装・市場獲得に向けた検討
3. ファイナンス面からの水素社会実現に向けた検討
4. 今後の水素政策に対する提言

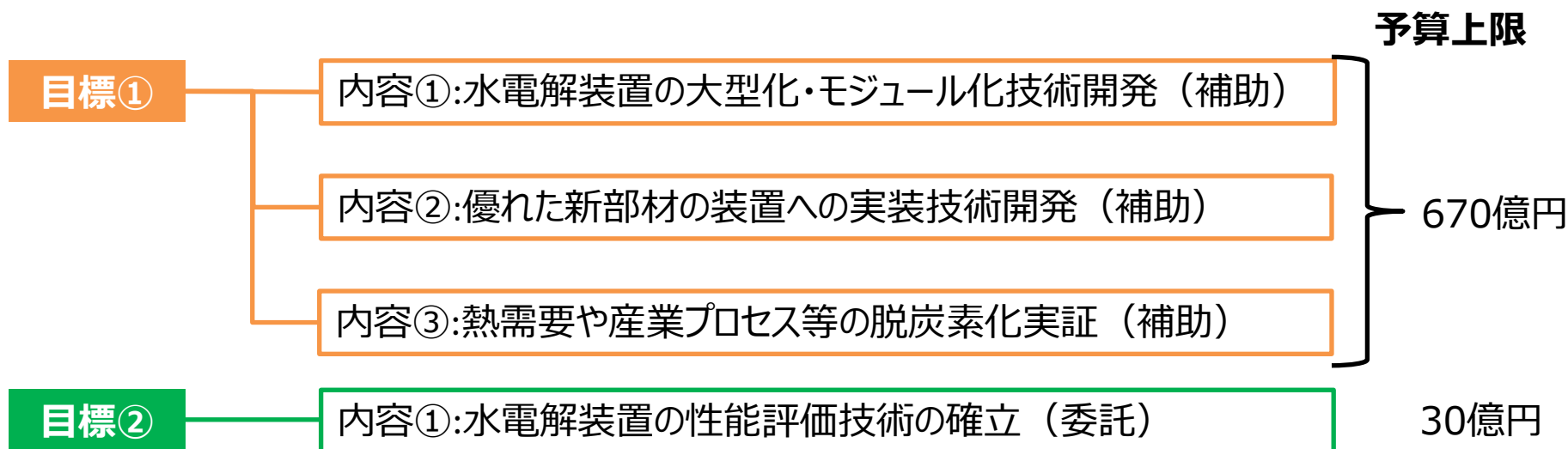
GI事業の目標等と関連する研究開発内容について

(出所)「第2回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ」(2021年4月28日開催) 資料3

- 本事業では水素製造装置の更なるコスト削減を通じた、その装置及び部素材の競争力を強化するとともに、海外市場への参入障壁を下げることを目的として以下の目標、研究開発内容を設定。
- 水電解装置の性能評価基盤の確立は協調領域であるため委託事業で実施することを想定。

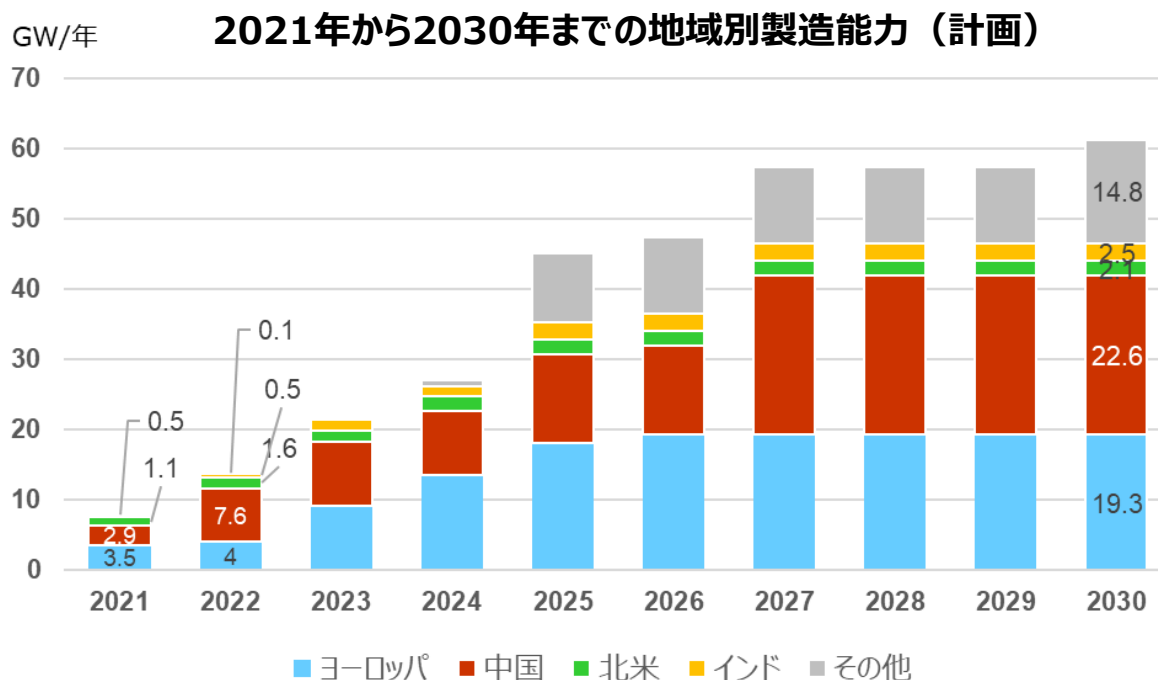
研究開発目標とその考え方等

- 目標①：アルカリ型の設備コスト**5.2万円/kW**、PEM型の設備コスト**6.5万円/kW**を見通せる技術の実現
→ 欧州公的機関 (FCH-JU) の目標を参考に設定した、海外と遜色無い数値目標
→ 現状はアルカリ型 (14.4万円/kW) 、PEM型 (37.9万円/kW)とも大きく上回っている状況
- 目標②：**2025年までに**欧州等と同じ環境で水電解装置の性能を評価する手法を整備
→ 国内で開発を行いつつ、先行する海外市場等への参入障壁を早期に下げる観点から年限を設定



世界的な水電解装置の製造能力の拡充

- IEAによると、世界の水電解装置の製造能力が、2021年には約8GWに達し、2020年度（約3GW）の2倍以上に増加。うち、ヨーロッパと中国が80%を占める。
- 主要企業は製造能力を拡充し始め、2030年までに年間60GW以上へ達する見通し。各国政府が発表した水電解装置の導入目標を積算すると、合計で145～190GWとなり（2021年時点の目標は74GW）、導入規模は更に拡大する可能性。
- なお、IEAが列挙する主要企業はThyssenkrupp（独）、Nel（那）、ITM（英）、McPhy（仏）、Cummins（米）などで、日系企業の名前はない。



水電解市場（アルカリ・PEM）における日系企業と海外企業の比較

- 海外では大型導入事例が先行。水電解装置の導入目標が定められ、水素需要もある。高圧化による低コスト化も可能。迅速な経営判断の可能な者が国プロに参加。

		日系企業	海外企業
アルカリ	装置企業	旭化成、川崎重工業、長州産業、トクヤマ、日立造船等	Thyssenkrupp (独)、Nel (那)、Baofeng Energy (中) 等
	EMS企業	東芝エネルギーシステムズ、IHI、大林組、日揮等	Shell (英)、Air Liquide (仏)、中国石油化工 (Sinopec)(中)等
	大規模PJ	福島FH2R (10MW) ※基金事業で40MW規模を設置予定	張家口Shell Phase1 (中)<20MW>、Baofeng Energy Phase2 (中)<150MW>、HySynergy phase1 (丁)<20MW@2022>、クチャ (中)<260MW@2023>、HYBRIT demo (典)<500MW@2025>、NEOM (サウジ)<2.2GW@2026> ※その他、20MW以上のFID案件：6件、検討中案件：26件
PEM	装置企業	日立造船、神鋼環境ソリューション、高砂熱学工業等	ITM (英)、Cummins (米、加Hydrogenics)、Nel (那、米Proton Onsite)、Siemens (独)、McPhy (仏、伊PIEL) 等
	EMS企業	東光高岳、清水建設、IHI、東電等	Shell (英)、Air Liquide (仏)、中国石油化工 (Sinopec)(中)等
	大規模PJ	山梨米倉山 (2.3MW) ※基金事業で16MW級を設置予定	Air Liquide (加)<20MW>、Puertollano I (西)<20MW>、Green Hydrogen for Scotland (蘇)<20MW@2023> ※その他、20MW以上のFID案件：5件、検討中案件：32件
自国をとりまく環境		・ インフラ整備途上 ・ 再エネコスト?? ・ 水素吐出圧力：1MPa未満が主流（高圧ガス保安法による） ・ 水素vs既存燃料	・ 大規模な水電解装置の導入目標が定められている ・ パイプラインがすでに整備、需要近 ・ 再エネコストの低減が見込まれる ・ 水素吐出圧力：2～3MPaが主流（高圧ガス保安法のような縛りがない） ・ エネルギー安全保障上の水素ニーズあり（脱ロシア）
国プロ参加者		・ 大企業の一部門を中心に担当	・ ベンチャー含め迅速な経営判断の可能な者が参加（大企業同士のジョイントベンチャーなどもある）

【提案】水電解技術の市場獲得のために実施すべき取組

● 国内の市場形成

➡ 現行の開発支援等により、効率や費用対効果を改善しつつ非電力部門でのユースケース拡大・需要開拓、将来のS+3E・国内経済の循環を念頭に置いた政策支援・ルール形成等

● 海外市場の獲得（日系企業は運用性・信頼性に強み：再エネや水素利用技術との連携・予測や制御システム、膜など）

➡ 国内での経験・ユースケースの海外展開

➡ 海外現地での情報収集や経験（現地ニーズ、サプライチェーン・産業構造、エンジニアリング、人材教育等の必要性理解）

➡ 企業・国間の業務連携やM&Aを念頭に置いたプロジェクト推進

● 内外競争力を強化するための技術開発の推進

➡ より一層のコスト低減・高信頼化に向けた技術開発など
（水電解装置、大型化・モジュール化の2つの論点について、次ページ以降で説明）

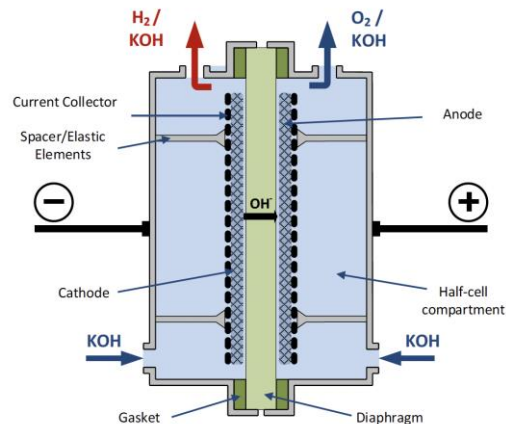
水電解の方式

- 水電解には、大きく分けて、アルカリ水電解、プロトン交換膜（PEM）型、アニオン交換膜（AEM）型、固体酸化物形の4方式がある。

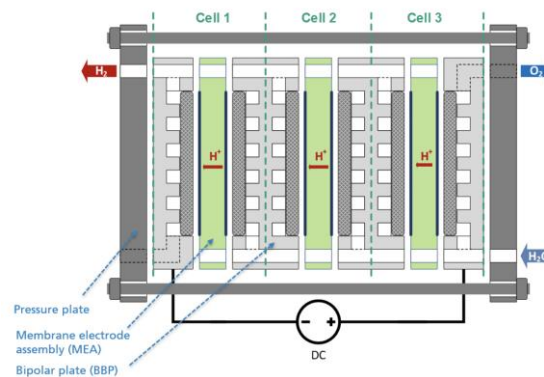
	アルカリ水電解	PEM型	AEM型	固体酸化物形
典型的な触媒 (HER / OER)	Ni / Ni, Co	PtC / IrO ₂	NiMo / NiCrMo	Ni-YSZ / LaSrMnO ₃
メリット	大規模化が容易	電圧変動応答が速い	電圧変動応答が速く、 触媒劣化も抑えやすい	高温動作するため、水 電解速度が大きい
デメリット	電圧変動応答が遅い	酸性電解質を用いるため触媒劣化が早い	アニオン移動が遅く、膜 の劣化も比較的早い	劣化が早い

各水電解スタックの模式図

アルカリ水電解

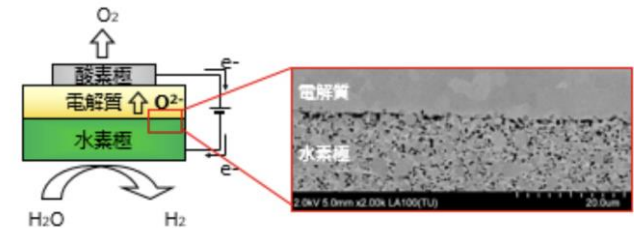


PEM型



AEM形では膜中をOH⁻等が移動

固体酸化物型



水是水蒸気として供給し、分解

(出所) 独 Fraunhofer ISE

水電解装置のコスト内訳

- アルカリ水電解装置では、電解質の入口圧力が1気圧では、スタック間で再加圧するためのスタック間コンプレッサーが必要になる。入口圧力を20-30気圧にすると、スタック間コンプレッサーが不要になり、30%程度のコスト削減が可能。
- スタック、補機の価格の報告値では幅が大きく、設計が重要になる。

1-5 MW級水電解装置のシステムコストの内訳報告値 （\$ /kW）

	アルカリ水電解 ^{a-c)}	PEM型 ^{b,d)}	AEM型 ^{b,c)}
システム全体	610-920	560-960	460
スタック	120-350	250-290	90
整流器	100-220	150-200	100-220
スタック間コンプレッサー	150-280		
その他の補機	160-580	160-650	130-320

（出所）

- a) 独 Fraunhofer ISE, "cost forecast for low temperature electrolysis – technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis systems"
- b) 米 Strategic Analysis, "Hydrogen Production Cost and Performance Analysis"
- c) 加 Ionomr Innovations, "White paper: "Hydrogen Production cost by AEM water electrolysis"
- d) NREL "Manufacturing Cost Analysis for Proton ÅbOExchange Membrane Water Electrolyzers"

水電解装置の寿命の報告値

- 水電解装置のスタック交換は、システムコストの20-40%に上るスタック費用が新たに必要になるうえに、水電解装置の長期停止が必要になる。そのため、スタック寿命の長期化は重要課題。
- 海外では、現行のアルカリ水電解、PEM型、AEM型の寿命は6.8-9.1年、4.5-8.0年、1.1-3.4年程度とされている。
- アルカリ水電解では、触媒劣化と電解槽腐食、PEM型では触媒劣化、AEM型ではイオン交換膜劣化が課題。
- 他国の水電解装置と差別化するためには、装置の信頼性が重要。耐久性は重要因子。
- 寿命の定量的な評価基準（プロトコル）の策定が必要。

	アルカリ水電解	PEM型	AEM型	固体酸化物形
2022年時の報告寿命（年）	6.8-9.1 ^{a)}	4.5-8.0 ^{a)}	1.1-3.4 ^{b)}	<1 ^{c)}

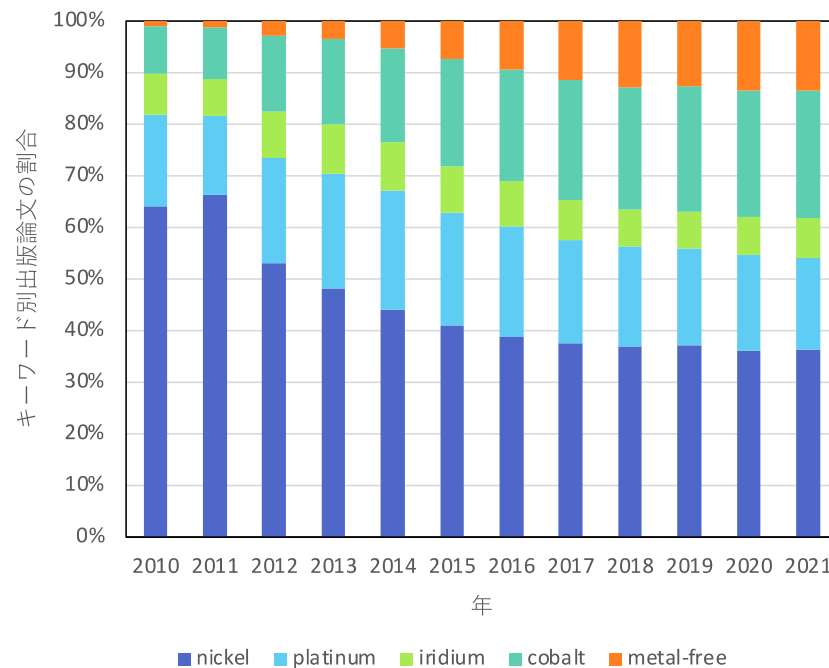
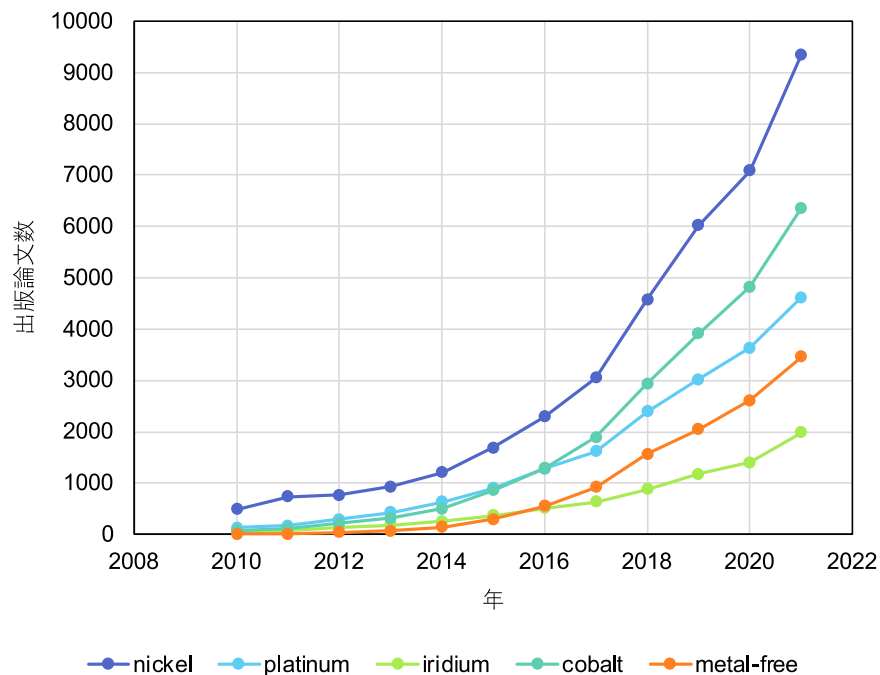
（出所）

- a) 独 Fraunhofer ISE, "cost forecast for low temperature electrolysis – technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis systems"
- b) 米 Strategic Analysis, "Hydrogen Production Cost and Performance Analysis"
- c) Int. J. Hydrogen Energy 42, 30470 (2017).

水電解用触媒の開発動向

- 高価格であるにもかかわらず、イリジウム酸化物系の触媒開発が増加。PEM型における耐酸化触媒を指向。
- メタルフリー触媒（カーボン系など）の開発が2010年代から加速。PEM型などを指向した高耐久性触媒の需要を反映。
- アルカリ水電解では、ニッケル系からコバルト系触媒への移行が進む。

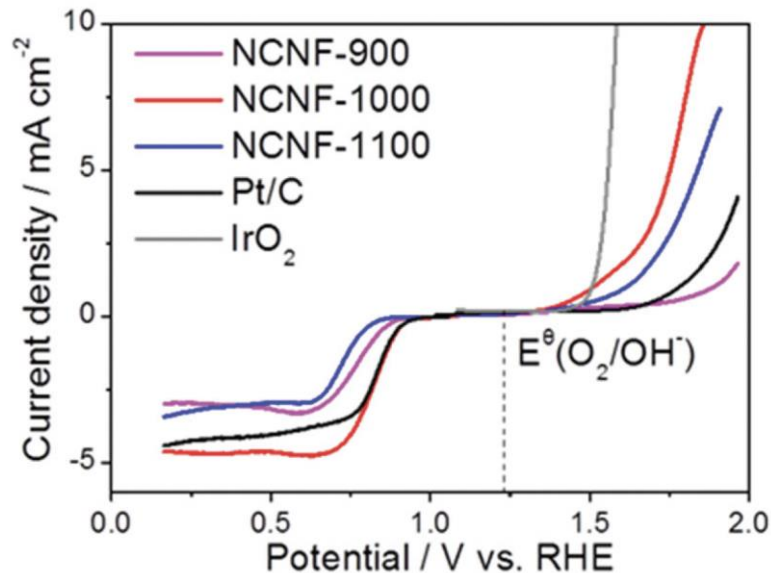
表) OER(酸素生成)における触媒種別発表論文数(google scholar)



水電解におけるメタルフリー触媒の活性と耐久性および課題

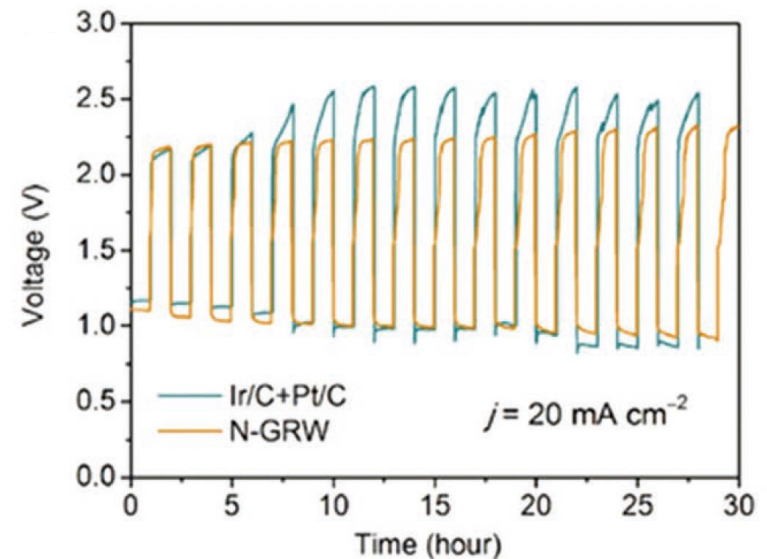
- アルカリ性環境では、水素発生、酸素発生に対して、白金系、イリジウム酸化物系と並ぶ活性を持つメタルフリー触媒（炭素やホウ素を主成分とし、窒素、硫黄などをドーピング）が開発されている。アルカリ水電解やAEM型の触媒として期待される。
- メタルフリー触媒は酸化還元の影響を受けにくいことから、高耐久性触媒として高いポテンシャルを有している。合成課程の簡素化が課題の一つ。
- もう一つの課題は、酸性環境における低活性化で、特に酸素発生の活性を向上させることができれば、PEM型水電解の触媒としても利用が期待される。

酸素発生および酸素還元におけるメタルフリー触媒（NCNF）と白金系（Pt/C）およびイリジウム酸化物触媒の活性の比較



(出所) Adv. Mater. 28, 3000 (2016).

メタルフリー触媒（N-GRW）と白金系、イリジウム酸化物触媒の酸素発生・還元サイクルにおける活性劣化の比較



(出所) Adv. Mater. 31, 1806403 (2019).

水電解装置の大型化・モジュール化技術開発

(出所)「第2回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ」(2021年4月28日開催) 資料3

- 先行する欧州等のプレイヤーは、複数のモジュール化されたスタックを並べ大型化するとともに、システムに必要な補機（整流器等）の数を増やさないことで、①組み立て工程の簡素化や、②単位容量当たりに必要な設備量の減少を通じて、装置コストを削減。
- 更に長期的には大量生産を通じ、更なる装置コストの低減が見込まれるため、量産効果を高める観点からも、今後の需要増大も見越し、日本の水電解装置メーカーの大型化・モジュール化の取組を支援することは重要。

装置の大型化・モジュール化（イメージ）

スタック — 補機
(整流器等)

スタック スタック スタック

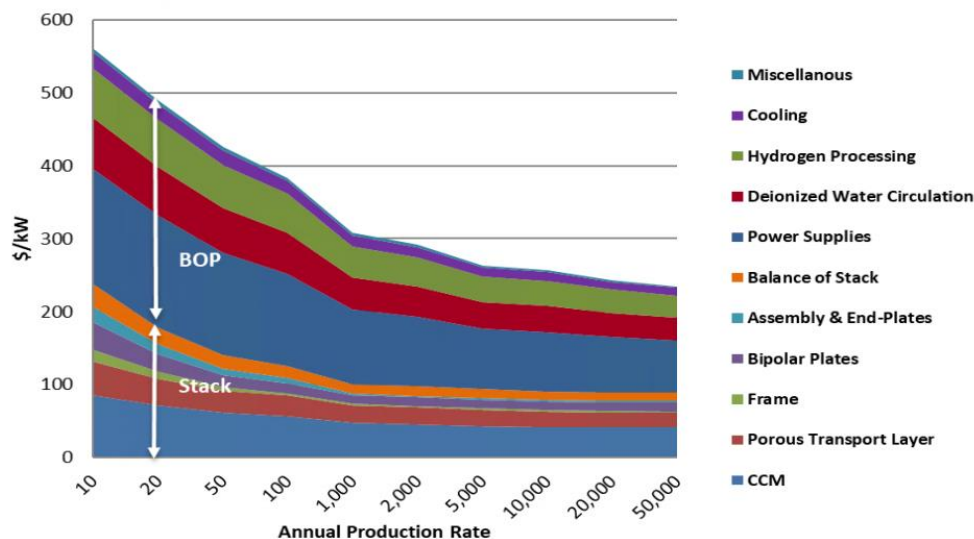
補機

補機の数は変わらず

モジュール化されたスタックを並べ、大型化

PEM型電解装置の生産量とシステムコストの関係

※ 1 MWのシステムのコストを仮定、BOP：補機、2015年USD換算



機器毎に量産効果の程度が異なる

(出典) NREL, Manufacturing Cost Analysis for Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers

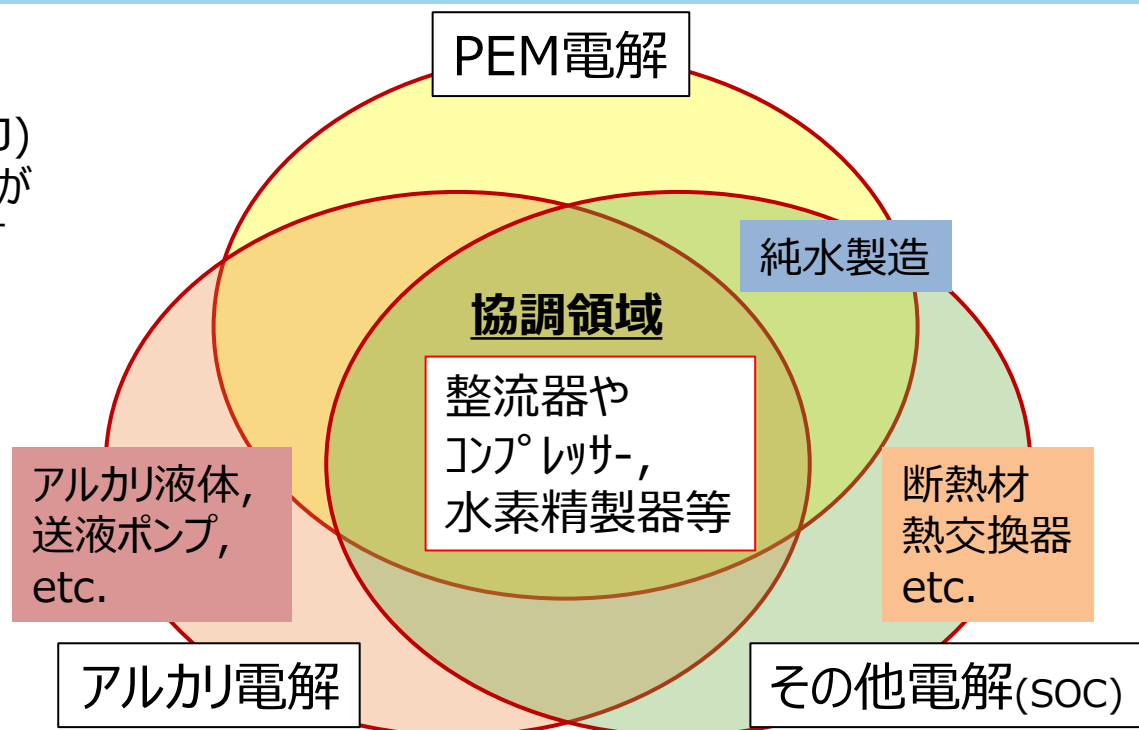
BoP等協調領域の共同開発による全タイプ電解システムの低コスト化

- 現状、水素製造装置の低コスト化を通じた競争力強化を各社が推進している状況であるが各種電解装置間で共通の部材を使用しており、その開発は協調領域と考えられる。
- 再エネ価格の国内外価格差を踏まえると水素製造装置の導入拡大は海外が先行するものと考えられ、国内メーカーが国際的競争を戦っていくためには、「エネファーム」導入時の共通補器開発プロジェクトのような仕組みを作成してはどうか。
- 国内外で広く導入を進める上で国内の開発競争能力強化とともに、海外展開を想定した規格や国内にとらわれない実施体制構築が重要。

エネファーム (ENE・FARM)
燃料電池実用化推進協議会 (FCCJ)
や燃料電池普及促進協会 (FCA) が
中心となってエネファーム普及を目指す
165団体・事業者が
エネファームパートナーズを構築



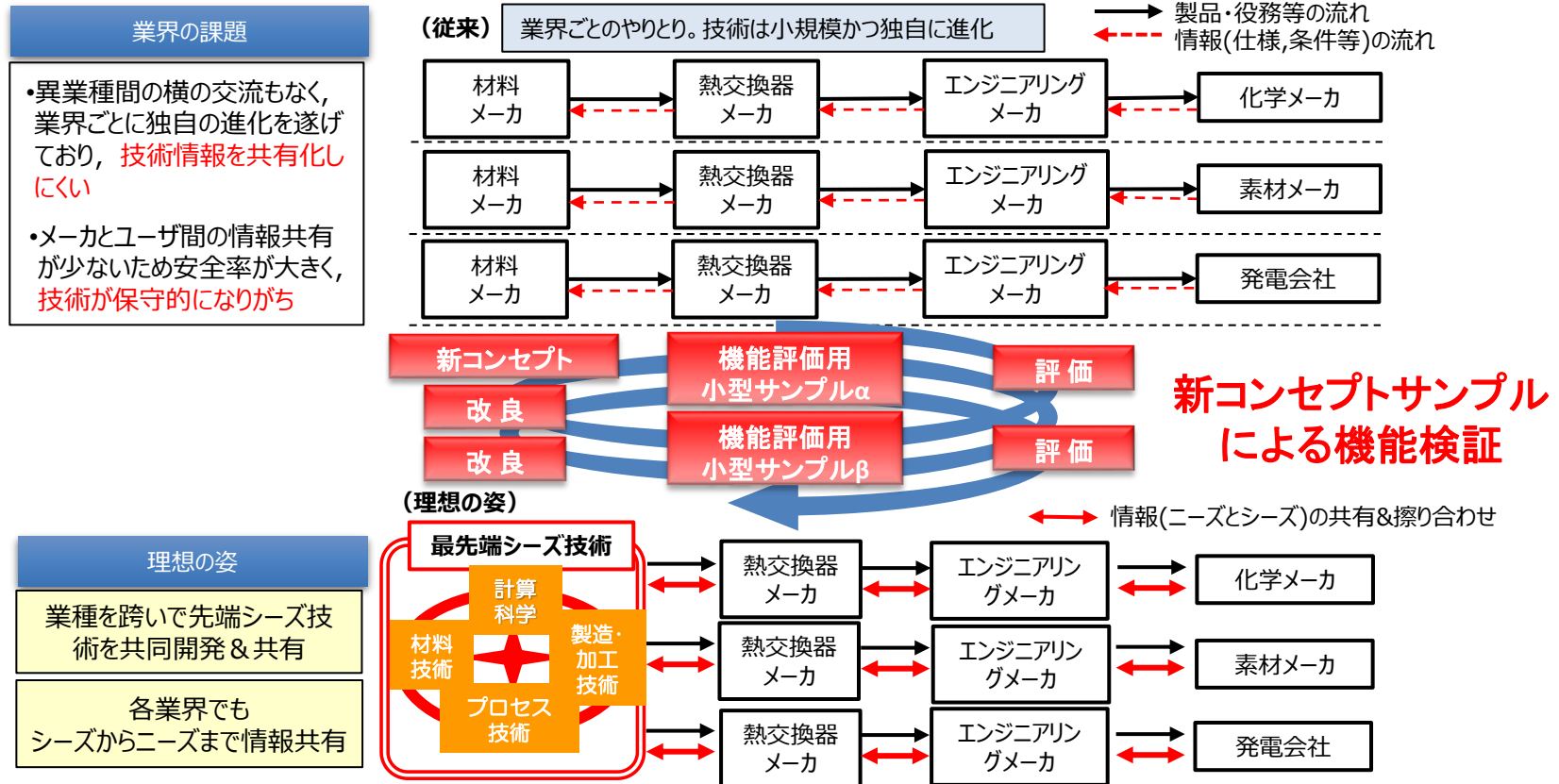
➡ 電解スタックの他、インバータ、
貯湯槽、改質器等を共同開発



設備共通化により各装置の特長を活かしたアルカリ(長期安定)+PEM(変動吸収)の並列運用なども実現可能

水素サプライチェーン全体でのBoPの共有によるイノベーション創出

- 水電解技術を含め水素サプライチェーン全体で使われる技術のうち、例えば従前の熱交換技術は大型化・高コスト化を招き導入普及の課題となりうる。
- 熱技術は、基本的に業界ごとに縦割り＆ユーザとメーカの間も分断。
⇒新たなシミュレーション・材料技術等で横断的な取組を⇒知見・情報共有化
⇒業界・熱交換技術を革新＆水素サプライチェーン・エンジニアリングのニーズに対応



【提案サマリー】水電解による水素製造の社会実装・市場獲得に向けた取組

● 国内の市場形成

➡ 現行の開発支援等により、効率や費用対効果を改善しつつ非電力部門でのユースケース拡大・需要開拓、将来のS+3E・国内経済の循環を念頭に置いた政策支援・ルール形成等

● 海外市場の獲得（日系企業は運用性・信頼性に強み：再エネや水素利用技術との連携・予測や制御システム、膜など）

➡ 国内での経験・ユースケースの海外展開

➡ 海外現地での情報収集や経験（現地ニーズ、サプライチェーン・産業構造、エンジニアリング、人材教育等の必要性理解）

➡ 企業・国間の業務連携やM&Aを念頭に置いたプロジェクト推進

● 内外競争力を強化するための技術開発の推進

➡ コンプレッサーの高圧化、メタルフリー触媒などによる高信頼化

➡ 海外展開も想定した補機の共通化・規格化（共通仕様化）・実施体制構築

➡ これらは現地のエンジニアリングがしやすくなる要素にもなり得る

全体の構成

1. 水素サプライチェーン構築に向けた支援の在り方に関する検討
2. 水電解による水素製造の社会実装・市場獲得に向けた検討
3. ファイナンス面からの水素社会実現に向けた検討
4. 今後の水素政策に対する提言

ファイナンス面からの水素社会実現に向けた課題

- 水素事業投資チャレンジマップ：ビジネスチェーン全体における事業投資・金融的観点からの課題を抽出

資金調達		CAPEX	OPEX	収入
製造		全体費用 - 高い製造コスト（設備費） > 大規模化、技術革新 - 大規模な投資額（e.g. 港湾） > <u>民間金融市場から調達</u> - 高い製造コスト（設備費） > 大規模化、技術革新	- 高い製造コスト（電力） > 余剰電力の利用 (#of hr) > <u>電力直接買付制度</u> - 高い運搬費用 - 追加の安全対策費用 > 対策方法の確立と成熟 - 高い運搬費用 > 安価な運搬技術の確立 - 追加発生する温室効果ガス - 高い水素調達費用 - 高い水素調達費用	- 不安定で低い買取価格 > 固定価格買取 (e.g. CfD) - 少ない売先の選択肢 > プレイヤー数の増加 > 水素市場の設立 - 低い配送収入・収益 > 事業全体の収益性向上 - 変動するインフラ設備利用料 > <u>政府保証による収益固定</u> - 低い配送収入・収益 > 事業全体の収益性向上
輸送	パイプライン	- 規制された低い配送収入 > 規制緩和		
	キャリア	- 長期的に不明な技術優位性 > 水素事業の成熟		
利用	原料転換	- 長期固定収入の欠如 - 投資設備と既存設備が一体 - 限定的な産業需要(e.g. 鉄鋼)	- 高い切り替えコスト > 切替可能な設備の導入	
	熱電供給	- 長期固定収入の欠如 > 複数収入による安定化 - 低い収益性 > 多様な収入源の合算		全体収入 - 既存燃料に劣後する価格 > 低炭素への付加価値 - ガス網への注入に係る規制 > 規制緩和 - 低い売電・売熱価格 > 季節シフトの価値化 - 限定的な売熱可能エリア > 売熱先の拡充

水素事業投資チャレンジマップの説明

- 縦軸に水素事業のステージとカテゴリ、横軸に事業投資・金融的な重要項目を記載し、各カテゴリにおける各項目の課題をそれぞれ記載
- チャレンジマップの左上から右下にかけて、水素製造から最終的な利用に至るまでのビジネスチェーンを辿り、各カテゴリ・項目における課題を抽出
- 左側2列（資金調達・CAPEX）において、事業実施者の投資決定時における資金の需要と供給の問題点を整理
- 右側2列（OPEX・収入）において、運転中の水素事業における問題点を整理
- 横1列において、特定の水素事業における事業投資・金融的観点からの問題点を整理
- 枠で囲った「全体費用」および「全体収入」の箇所が、ビジネスチェーン全体における費用要因と収益要因として整理
- 各項目内の矢印（">"）以下にて、想定される課題解決に向けた方向性および一部解決案を記載

補助金で低減すべき事業リスクとその対応

- 成熟途上である水素関連産業には多大な事業リスクがあるため、民間企業の投資決定を促進すべく、水素産業が成熟するまで補助金等によって事業リスクを低減させる必要がある
- 補助金の中でも、事業投資段階ではCAPEX補助型や債務保証型というリスクマネーの供給ではなく、収入補助型のような長期間の収益リスクを低減させることに焦点を当てる補助金が効果が大きい

現状・問題点

- 政府系機関が一部のCAPEXや債務保証を補助する補助金を導入済み（検討中）
- 民間の融資性資金を活用できておらず、政府支出に対する民間資金の融資調達額が限定的
- 公的資金の活用方法がリスクマネーの拠出に留まり、事業収益の変動リスクに対する効果的な補助の欠如

目的

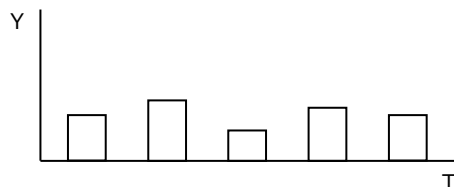
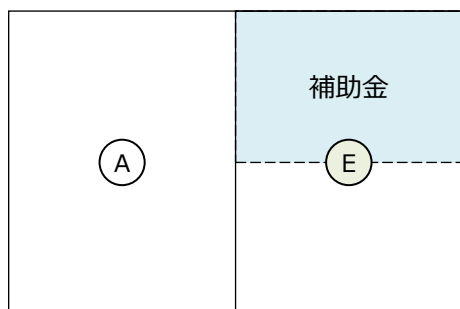
- 公的資金の効率的な利活用
- 補助金無しの事業モデルへの円滑な移行
- 調達コストが低い融資性資金の調達を促進する補助

方針

- 現在検討中の水素CfDや長期固定の容量市場のような収入補助型を軸とする効果的な補助金の創設

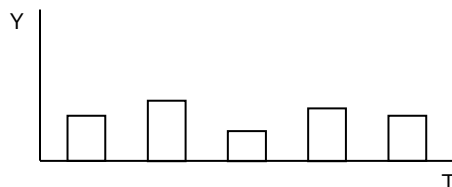
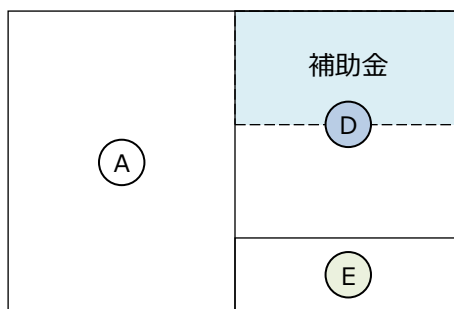
CAPEX補助型

- 融資無し



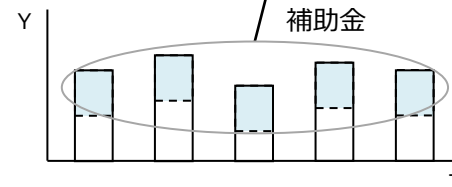
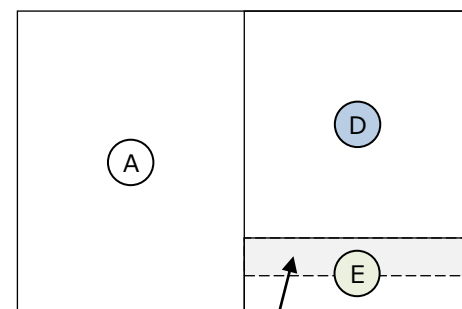
債務保証型

- 出資者の与信に頼る融資



収入補助型

- プロジェクトファイナンス



ファイナンス面からの水素社会実現に向けた提案 1

- 水素製造用電力の直接買付制度

2050年カーボンニュートラルに向けた
若手有識者研究会第1回提言資料
(2022年12月19日)

事業の内容

事業目的・背景

- 国内水素製造費用の低減を目指し、変動費用の中で大部分を占める電力価格の低減を図る。電力価格の内、託送料金の削減と、限界費用が低い再エネ電源の活用を目指す
- 限界費用が低廉であるものの発電電力量が変動する再生可能エネルギー由来の電力（“VRE”）、変動する電力供給に対応して需要の変動が可能な水素製造の特性に着目
- 自社保有電源の活用は経産省内でも検討中*だが、自社保有電源の開発・資金拠出・リスクターンを考えると、水素製造を目的とした再エネ電源の自社開発・保有はハードルが高い
- 以上より、再エネ電源にとってはFIT/FIPに代わる新たな売電スキームの提供、水素製造にとっては安価な電力調達を可能にする、系統を介さないVREの入札制度を新たに提案

(*) 経産省（2021）「水素関連プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性」参照

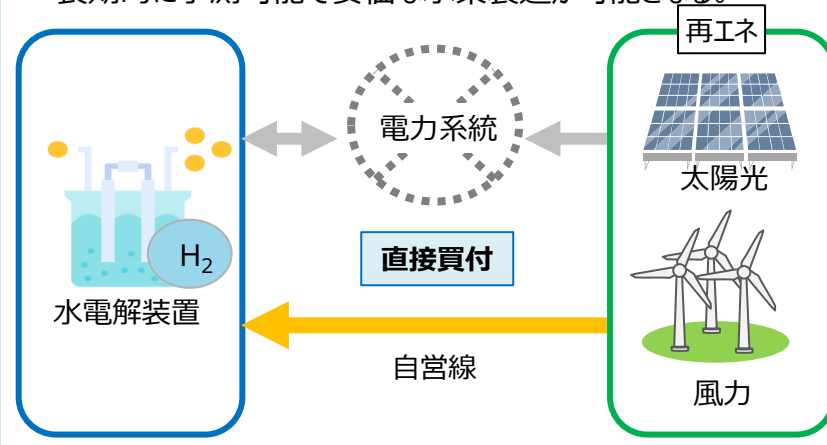
懸念点と解決案

- 再エネ電力の取引価格が水素製造コスト低減目標に見合うか
→ 適宜、取引金額に補助金の追加（e.g. +1円/kWh）
- 長期売電契約を締結する両者の与信がBankableか否か
→ 入札時スクリーニングの実施・両者への政府保証の提供
- 国内再エネ設備近郊での水電解装置の設置および自営線の敷設を念頭に置いており、水素製造設備の立地に制約あり
→ 国内サプライチェーン網の拡充・セントラル方式の採用。
電力系統を介する場合には、託送料金の減免等が必要。

事業概要・イメージ

水素製造用電力の直接買付による調達費用の低減

- 水素製造事業者は、ザラ場方式での入札等を通じて、系統を介さない変動する再エネを長期的に固定価格で調達する。長期的に予測可能で安価な水素製造が可能となる。



成果目標

- 第6次エネルギー基本計画で設定された2030年の水素・アンモニア導入目標1.0%の達成および、2050年のカーボンニュートラルに向けた野心的な水素導入量の達成に貢献

期待される効果

- 水素製造費用の約6-7割を占める電力価格の低減に貢献
- 系統に流れ込むVREの低減により、系統安定化に貢献
- FIT/FIPに加えた新たな長期固定の再エネ売電に貢献

ファイナンス面からの水素社会実現に向けた提案 2

- 民間水素インフラ投資のための固定収益スキーム

2050年カーボンニュートラルに向けた
若手有識者研究会第1回提言資料
(2022年12月19日)

事業の内容

事業目的・背景

- 電力・ガスに次ぐ新エネルギー源である水素の導入に際し、大規模な水素インフラの整備が必要。その資金需要は大きく、効率的な公的資金利用の観点で民間資金の活用が不可欠
- 現在の水素需要は限定的であるため、既存需要のみを収益源とする事業は収益性が低く、現時点での水素インフラへの投資判断は困難。水素インフラへの投資判断には、水素事業から十分な収益が確度高く得られる必要があるが、長期的な事業モデルの成熟を待たず先回りでのインフラ整備も必要。
- 第三セクター投資・入札が募集された場合、公的インフラへの投資であることから期待リターンが低い傾向にあり、安定収益志向の金融機関等（e.g. 年金、保険）の資金の活用が重要
- 以上より、民間投資家に固定収益を保証するスキームを提案

懸念点と解決案

- 水素事業の収益性が低いため、水素インフラ利用者が支払い可能な利用料も低く、投資家が得る利益が小さい可能性
→ 投資家向けの収益固定化により低リターンの資金を確保
- 変動収益が大きく上昇した際のアップサイド分配の公平性
→ 固定収益分以上については国庫返納も含めて幅広く検討

対象インフラ設備

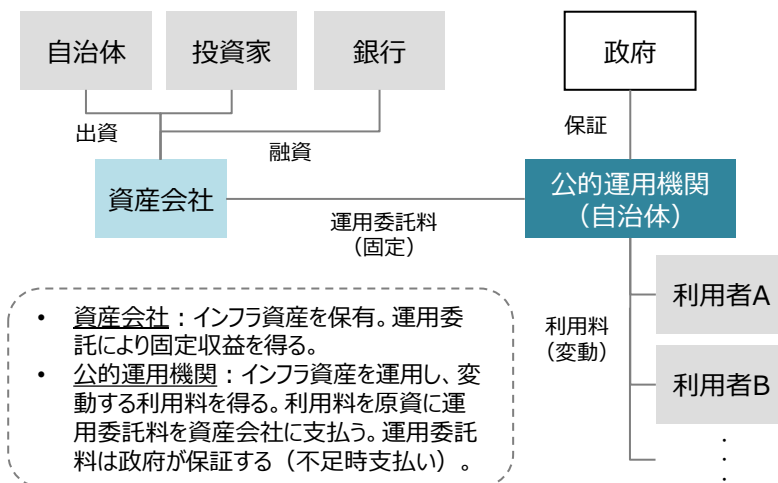
受入・貯蔵		輸送	
・ 港湾設備	・ 国家備蓄設備	・ パイプライン	・ ローリー
・ 貯蔵施設		・ 輸送基地	・ 輸送船

(*) 経産省（2022）「水素・アンモニアサプライチェーン投資促進・需要拡大策について」参照、一部修正

事業概要・イメージ

公的運用機関による民間資金向け収益の固定

- 政府は保証差入により民間資金向けの収益の変動を抑える機能を提供することで、過大な政府支出無しに民間資金を呼び込み、大規模水素インフラの整備が可能となる。



成果目標

- 第6次エネルギー基本計画で設定された2030年の水素・アンモニア導入目標1.0%の達成および、2050年のカーボンニュートラルに向けた野心的な水素導入量の達成に貢献

期待される効果

- 現時点で既存需要が限定的な水素インフラ投資において、公的資金を呼び水とする民間資金の活用に貢献

【提案サマリー】水素社会実現に向けたファイナンスの活用

1. 水素事業投資チャレンジマップ

- 水素事業への投資を促進すべく、解決すべき課題を列举
- 現行制度では未対応の領域があり、全体像を踏まえた網羅的な支援が必要
- ビジネスチェーン全体における「全体費用」の低減と「全体収入」の増加が重要

2. 事業リスクと補助金

- 現行のリスクマネーを供給する補助金から、変動する収益リスクを低減させる補助金がより重要
- 複数年に亘る収益補助型の補助金で融資性資金を確保し、補助金無しの事業モデルへの円滑な移行を達成

3. 水素製造用電力の直接買付制度

- 水素製造費用の大きな割合を占める電力調達コストの低減が重要
- 託送料金の削減および限界費用の低い電源の有効活用により達成可能

4. 民間水素インフラ投資のための固定収益スキーム

- 多大な金額を必要とする水素インフラ投資において、水素需要の立ち上がりに先行し、民間からの資金調達が必要
- 政府保証を活用した収益スキームにより、インフラ投資に即した属性の民間資金の調達が可能

全体の構成

1. 水素サプライチェーン構築に向けた支援の在り方に関する検討
2. 水電解による水素製造の社会実装・市場獲得に向けた検討
3. ファイナンス面からの水素社会実現に向けた検討
4. 今後の水素政策に対する提言

今後の水素政策に対する提言

1. グローバルからローカルまでの水素サプライチェーンの社会実装に向けた支援

- 早期の社会実装に資する技術への優先的な政策支援・サポート
- 発電用途、産業部門への水素浸透
- 大規模導入のための水素キャリアの技術課題や普及に対する重点的支援
- 水素利用を末端まで含めたサプライチェーン全体を考えた分散型利用に関わる支援

2. 水電解による水素製造の社会実装・市場獲得に向けた取組

- 現行の開発支援等による非電力部門でのユースケース拡大・需要開拓、将来のS+3E・国内経済の循環を念頭に置いた政策支援・ルール形成等
- 国内での経験を糧に、海外現地での情報収集や経験、企業・国間の業務連携やM&Aを念頭に置いたプロジェクト推進
- コンプレッサーの高圧化、メタルフリー触媒などによる高信頼化、海外展開も想定した補機の共通化・規格化（共通仕様化）・実施体制構築

3. 水素社会実現に向けたファイナンスの活用

- 水素事業投資チャレンジマップとして作成した現行制度で未対応の領域において、ビジネスチェーン全体像を踏まえた網羅的な支援
- 水素製造用電力の直接買付制度や民間水素インフラ投資のための固定収益スキームの導入