

第13回FC-Cubicオープンシンポジウム

世界の水素貯蔵技術の開発動向

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

2024年3月21日

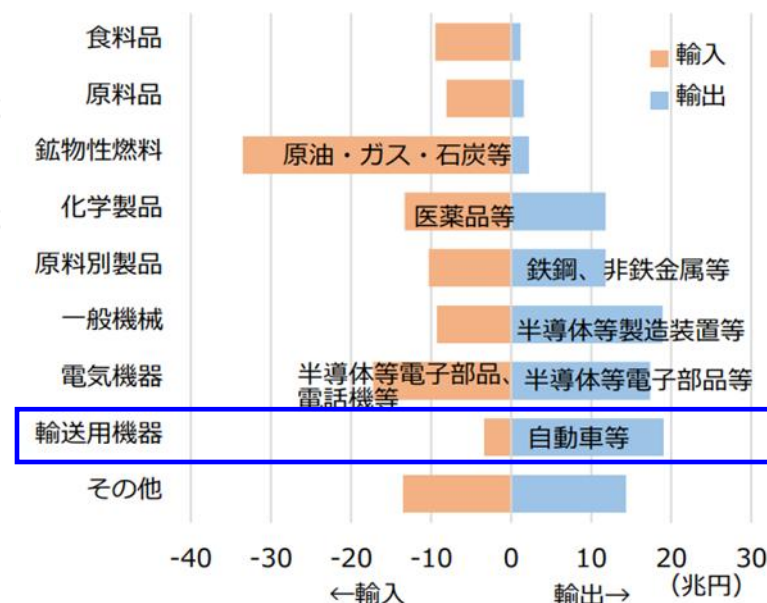
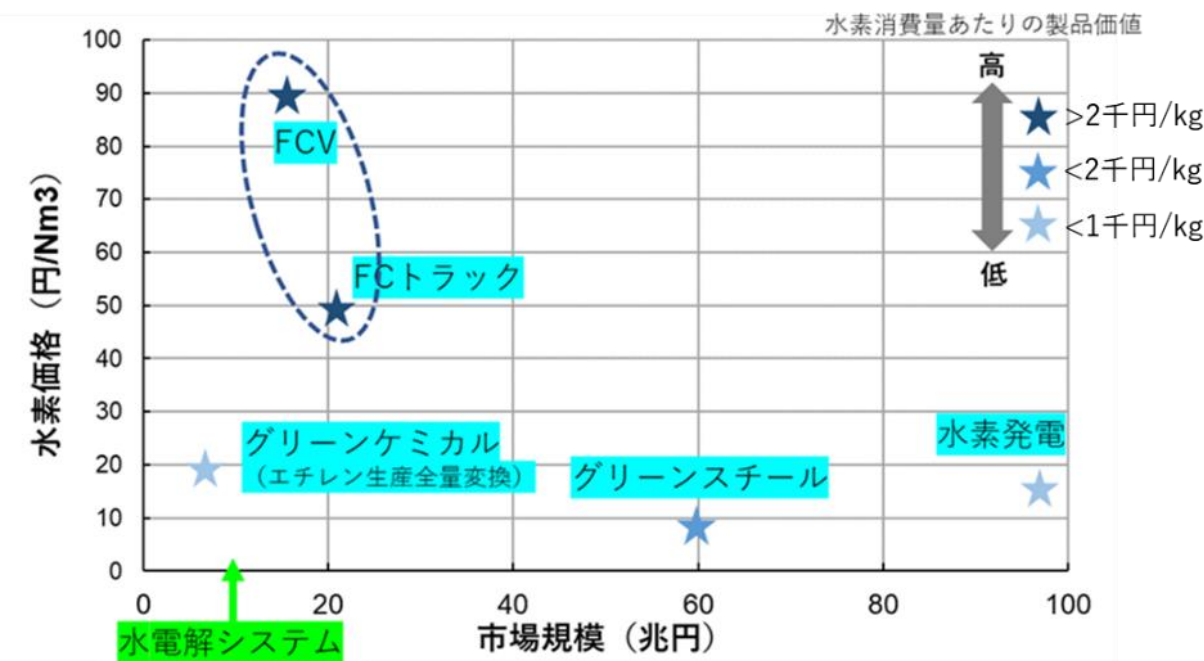
ともに挑む。ともに実る。



1. 移動体用水素貯蔵技術の概要

FCモビリティの成長産業としての重要性

- FCVとFCトラックの単位水素消費量あたりの製品価値は、発電、グリーンスチール、ケミカルと比べて高い
- FCVおよびFCトラックはパリティとなる水素価格※が他の水素利用産業と比べて市場へ受入れられやすく、大量に水素を消費する発電・産業向けと比べて市場の早期形成の可能性（※水素インフラ・貯蔵・輸送コストを含む）
- 我が国が海外からの燃料・原料輸入の依存率が高いなか、**自動車（輸送機器）は貿易黒字の最大の産業**であり、水素によるグリーン成長戦略において「イノベーション」で国際競争力を確保し、**国内のFC産業を強化することで国富の流出を防ぐ**



期間：2022年

注：輸入額は、マイナスの値で表現

【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（2024/3/8公開）

【出所】財務省データに基づきアセットマネジメントOne作成
「日本の構造問題を持続的な社会への転換の好機に」

- 水素産業のサプライチェーンにおいて、利用サイドの自動車用FC・水素貯蔵システムだけで**市場規模5.0兆円**のポテンシャル、自動車としての製品の市場規模は**約36兆円**（FCEV 400万円、FCトラック2,000万円を前提）
- そのなかで**水素貯蔵システムについては約1.5兆円**の市場規模（将来コスト2万円/kg-H₂、乗用車・小型商用車5kg、トラック60kg、バス20kg水素搭載を仮定を仮定）
- さらに様々な大型・商用モビリティへの多用途展開も期待（**液体水素は特に航空機、船舶**など）
- FC自動車は**水素1kg当たりの製品価値として他の産業と比べて圧倒的に高い**



将来の水素産業の発展、競争力確保に向けFC・貯蔵システムへの継続投資は重要

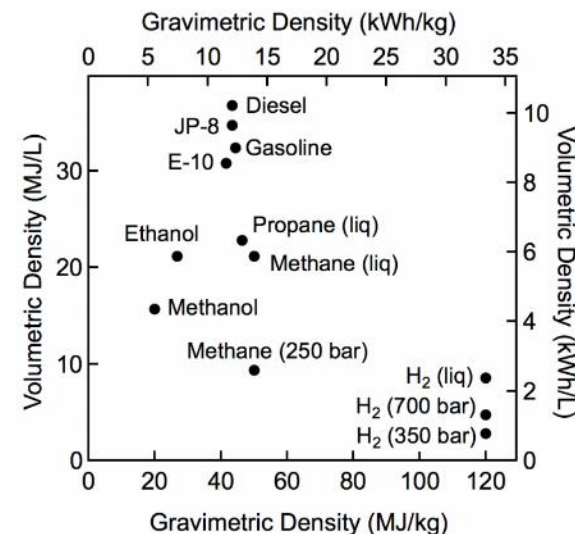
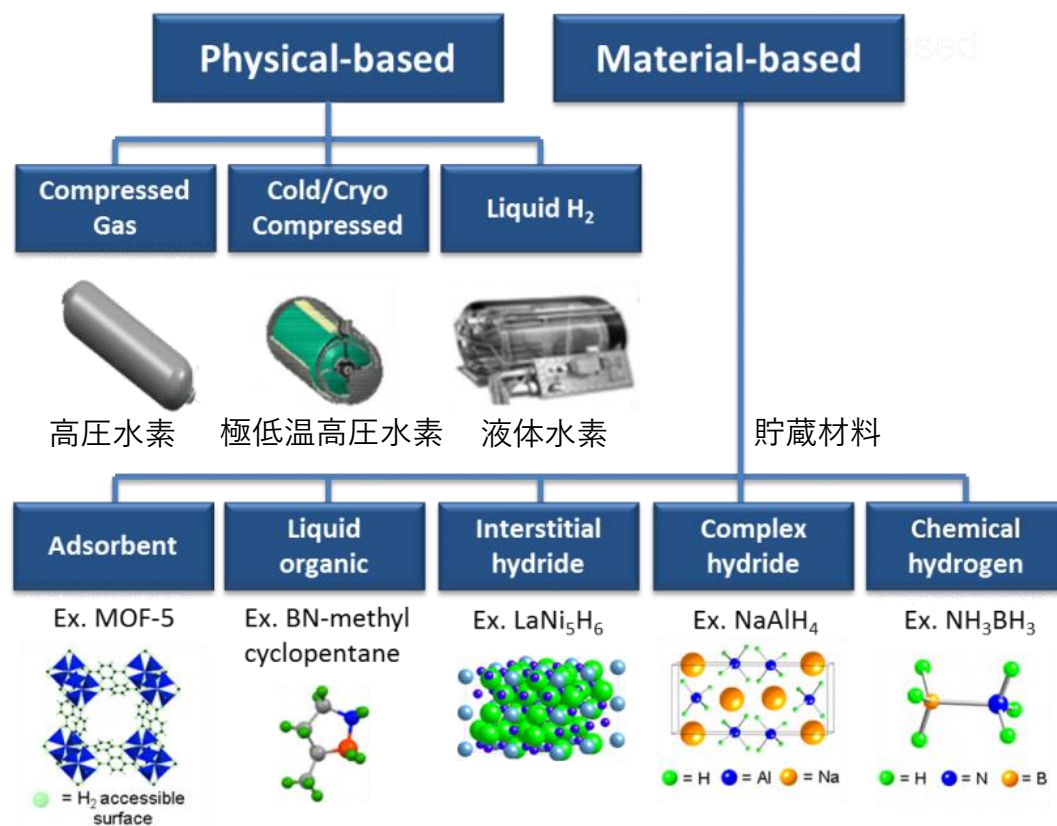
分野	市場	水素1kg当たりの製品価値	備考
燃料電池自動車 （FC・貯蔵システム）	36兆円 （5.0兆円）	4.9千円/kg	2050年でFCV（小型商用車含む）380万台/年、FCトラック約100万台/年（将来シェア by IEA [1]、NEDOコスト目標値より算出）
グリーンスチール	60兆円	1.3千円/kg	2050年で最大5億t/年 by IEA（取引単価 12万円/t、近年は価格が上振れ）
グリーンケミカル	6.6兆円	0.1千円/kg	2050年で最大5,700万t/年 by IEA（エチレン換算、取引単価140円/kg）
水素発電	97兆円	0.2千円/kg	2050年で1,850GW by IEA（稼働率50%、発電単価12円/kWh）
水電解システム	10兆円	—	水電解システム 200GW/年 by IEA（システム価格 5万円/kW）
輸送	5.5兆円	—	2050年1割が国際取引されると5,500万t/年（平均取引価格 100円/kg）

[1] IEA, “Net Zero Roadmap - A Global Pathway to Keep the 1.5°C Goal in Reach”
※NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップー（FCV・HDV 用燃料電池）解説書ー（2024/3/8公開）にも同内容を記載

移動体用水素貯蔵技術の概要

- 水素は、**物理的に気体または液体として貯蔵が可能**、水素を気体として貯蔵するには、移動体用としては高圧容器（350～700bar）が一般的であり、水素を液体として貯蔵するには、1気圧での水素の沸点が-253℃であるため、極低温とボイルオフガスへの対応が必要
- 一方、固体の表面（吸着）または固体内（吸収）に貯蔵することも可能（水素貯蔵材料）

How is hydrogen stored?



- 水素は、あらゆる燃料の中で最も質量あたりのエネルギーが高いが、単位体積あたりのエネルギーが低く、より**高いエネルギー密度を実現できる高度な貯蔵方法の開発が重要**
- かつ**コスト、安全性、貯蔵密度の要件を満たしながら、長い航続距離（作動時間）を可能にする車載用水素貯蔵システムが求められる**

【出所】 <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>

- 液体水素は高圧水素に比べてエネルギー密度が高いため、**大型・長距離輸送向け液体水素貯蔵システムの開発が期待**
- 液体水素貯蔵システムがMedium/Heavy Duty用途の容量要件を満たし、**\$8/kWh (\$266/kg) 以下という貯蔵コスト目標を達成する可能性**が示されている

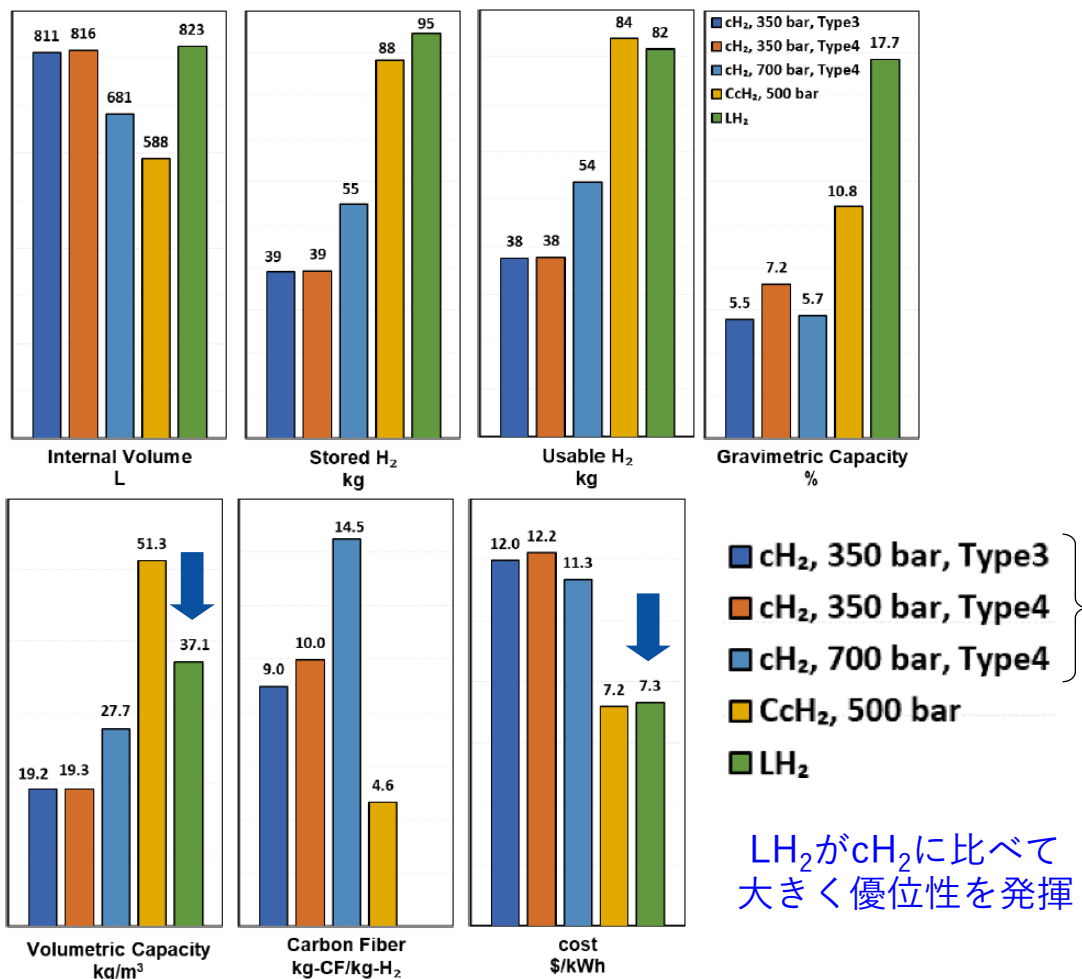
【液体水素への期待の背景】

- 高圧25MPaで18kg/m³、70MPaで40kg/m³に対し、液水は71kg/m³の重量貯蔵密度
 - ー 一定容積下での貯蔵密度向上
 - ー 航続距離の延長
 - ー 水素燃料の積載量の増大
 - ー 燃料補給速度の上昇の可能性
- 圧縮圧力の低下
 - ー タンク強度の緩和により、軽量化・低コスト化

【液体水素貯蔵システムの潜在的な用途】

- ー 大型トラック（特に長距離）
- ー 航空機
- ー 船舶

【出所】 DOE, EERE Funding opportunity exchange, Liquid Hydrogen Technologies Workshop Feb. 22-23 2022, Argonne “On-board Liquid Hydrogen Storage for Long Haul Trucks”



長距離輸送トラック向け水素貯蔵システムの比較（Auto Electric社）

タイプV（ライナーレス）の高圧水素貯蔵複合容器

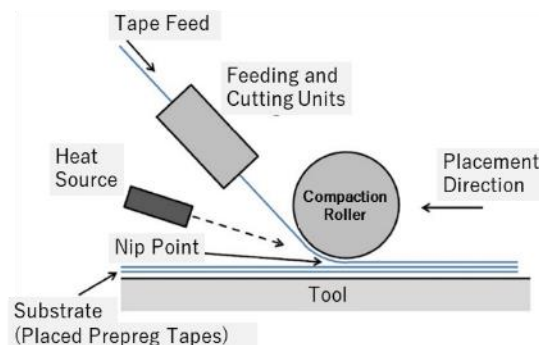
- タイプV（ライナーレス容器）は内部ライナーを持たないため、複合材料がガスバリアと荷重支持構造の両方として機能、ライナーがないため、ライナーと複合材の間の歪適合性の必要性がなくなり疲労性能が向上し、10~20%の重量減少を達成できる可能性があるが、可能な作動圧力はまだ完全には調査されていない
- 従来のフィラメントワインディング（FW）による製造は技術成熟度が高い一方、固有の制限があり、より高度な製造方法として主にロボット複合材料製造技術である自動繊維配置Automated Fibre Placement（AFP）といった改善策の提案もあり（AFPは従来のFW技術を進化）

高圧水素容器のタイプ別特徴

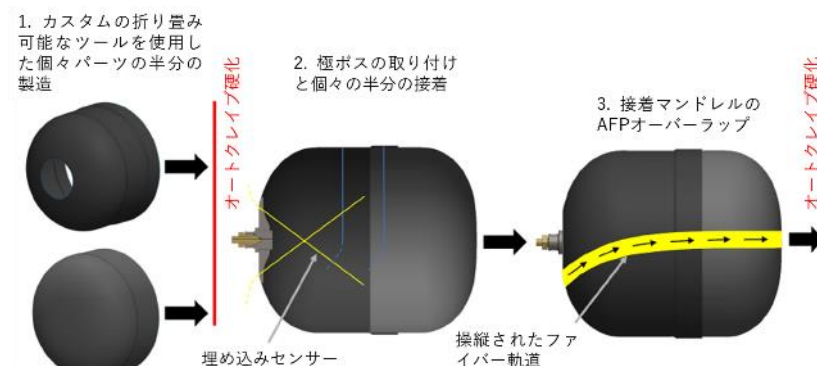
	Type-I	Type-II	Type-III	Type-IV	Type-V
Schematic					
Composition	All Metal	Metal Liner with Composites Layer	Metal Liner with Full Composites Overwrapped	Plastic Liner with Full Composites Overwrapped	Full Composites
Tank Price (\$/kg)	++ (83)	+ (86)	- (700)	- (633) → Target \$266/kg	-
Gravimetric Capacity	-	-	+	++	++
Composite Layers Load Sharing		45% Load Bearing	80% Load Bearing	100% Load Bearing	100% Load Bearing

【出所】 H. K. Shun and S. K. Ha, "A Review on the Cost Analysis of Hydrogen Gas Storage Tanks for Fuel Cell Vehicles", Energies 16, 5233(2023)

Automated Fibre Placement (AFP) の概要



Composite Cryotank Technologies and Demonstration (CCTD) プロジェクトにおけるΦ5.5mクライオタンクのAFP製造



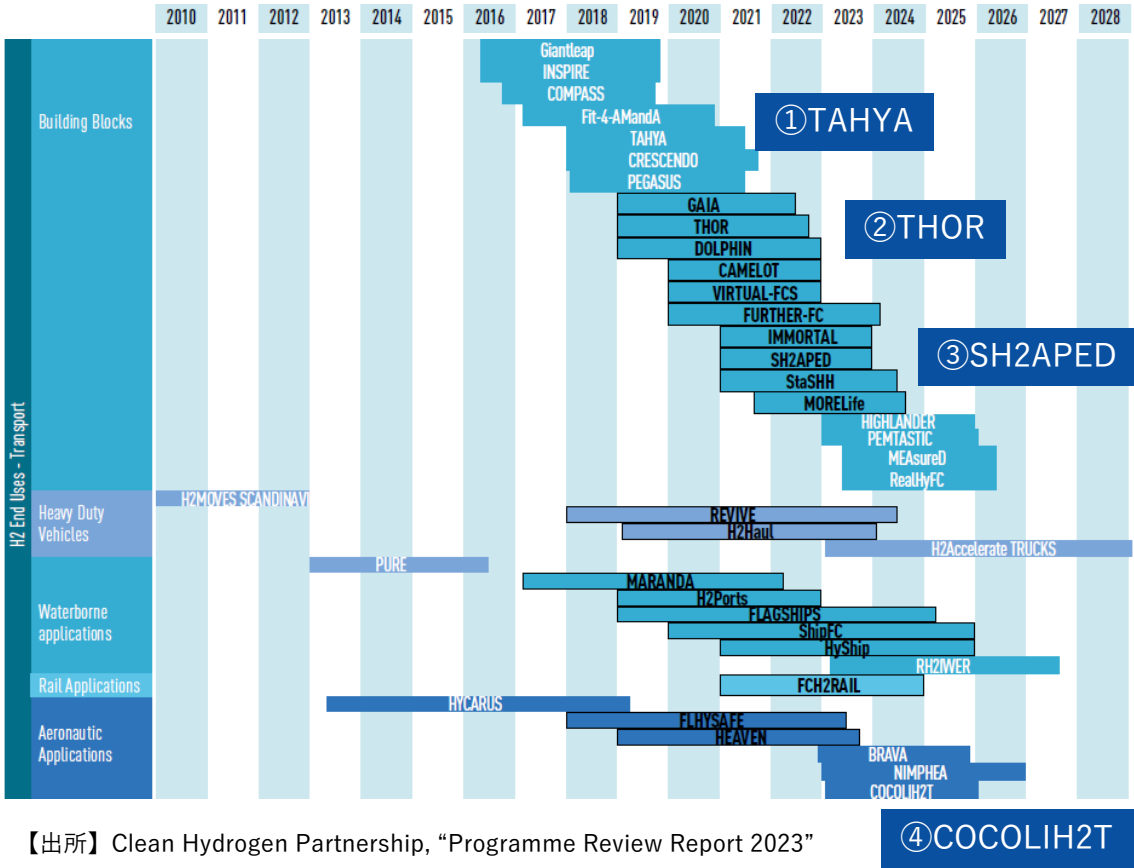
新しいAFPによるタイプV圧力容器の製造概念

【出所】 A. Air, M. Shamsuddoha and B. G. Prusty, "A review of Type V composite pressure vessels and automated fibre placement based manufacturing", Composites Part B 253 110573(2023)

2. 欧州における水素貯蔵技術の動向

■ 欧州Clean Hydrogen Partnershipでは輸送部門の研究開発として燃料電池の高性能化、高耐久化およびアプリケーションの実証と合わせて、高圧水素貯蔵技術の研究開発を推進

欧州Clean Hydrogen Partnershipにおける輸送部門のR&Dの変遷



【出所】 Clean Hydrogen Partnership, “Programme Review Report 2023”

	SoA	2024	2030
CAPEX*1 (高圧水素容器)	800	500	300
CAPEX*2 (液体水素容器)	—	320	245
質量貯蔵密度*3 (wt%、高圧水素)	5.0	6.0	7.0
質量貯蔵密度*4 (wt%、液体水素)	8.0	10.0	12.0
体積貯蔵密度*5 (g/L、液体水素)	35	38	45

*1 200,000ユニット/年の量産前提、エンドプラグ1つ、タンク内バルブ、インジェクタ、アセンブリを含む高圧タンクの総コスト

*2 200,000ユニット/年と量産前提、エンドプラグ1つ、タンク内バルブ、インジェクタ、アセンブリを含む液体水素タンクの総コスト

*3 貯蔵システムの質量（水素の質量を含む）に対する貯蔵水素質量の比率。特定の直方体空間において、タンクの内部容量は利用可能な設計スペースの約25%であるが、2030年には設計スペースの最大55%を使用することを目指す

*4 タンクシステムレベルでの、貯蔵システムの質量（水素の質量を含む）に対する貯蔵水素質量の比率。

*5 システムの外部容積あたりの貯蔵水素質量

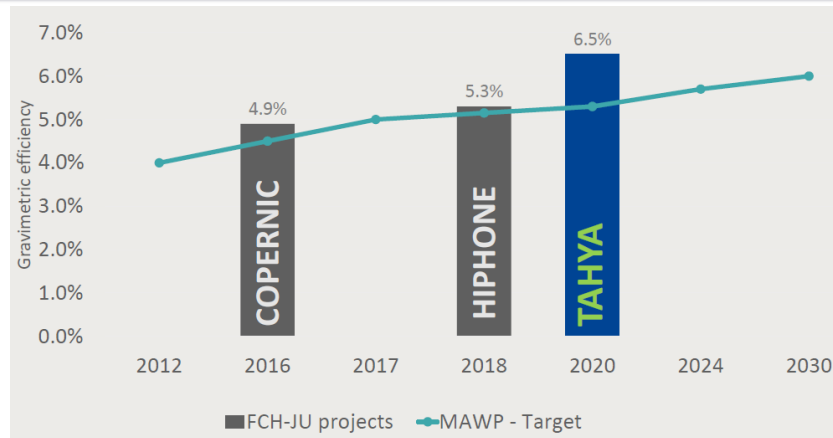
【出所】 Clean Hydrogen Partnership, “Strategic Research and Innovation Agenda 2021 2027”

■ 近年では車載用の高圧水素貯蔵技術から航空機用の液体水素貯蔵技術へ資金が移行

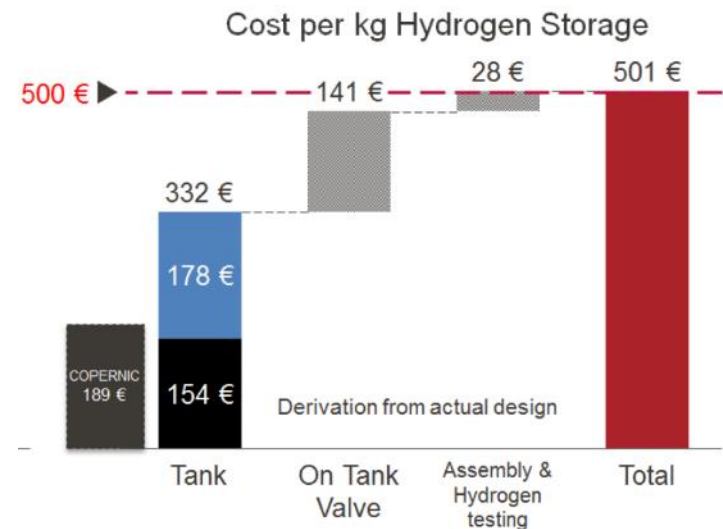
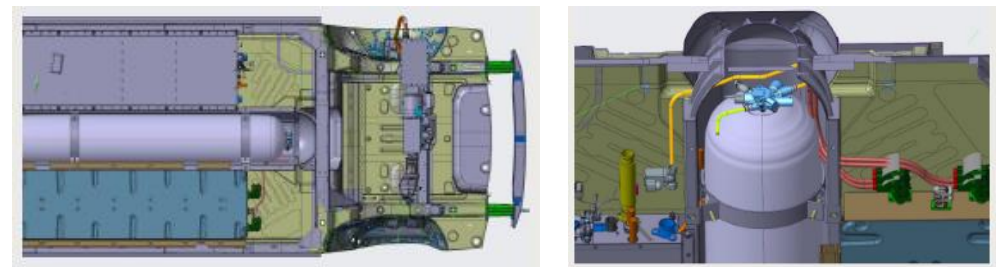
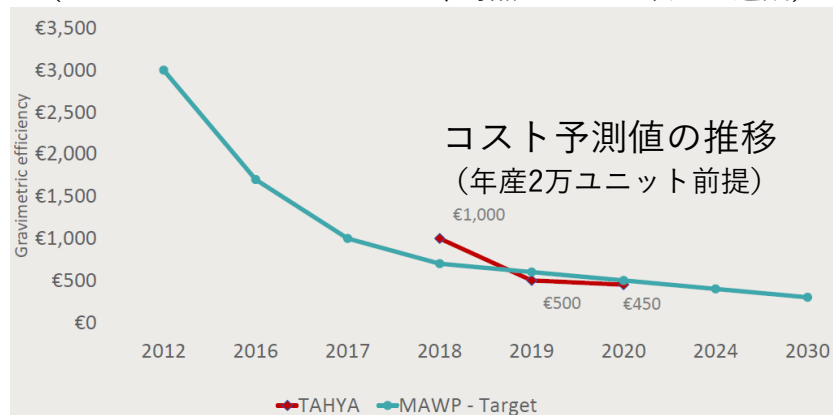
PJ名	概要	予算	期間
①TAnk HYdrogen Automotive (TAHYA)	・ OMNIUM社が主導、革新的な欧州の水素貯蔵システム（すべての機能を統合したオンタンクバルブ搭載シリンダー）の開発に注力 - OBJ#1: 高い性能、安全性、健康安全環境に対する責任を備えた互換性のある水素貯蔵システムを提供するための準備作業の実施 - OBJ#2: 大量生産が可能で、コスト競争力のある水素貯蔵システムを提供 - OBJ#3: プロジェクト期間中に得られた試験結果に基づき、GRT13とEC79の更新を提案	€ 3,996,943.75	2018/1/1-2021/6/30
②Thermoplastic Hydrogen tanks Optimised and Recyclable (THOR)	・ FAURECIA社が主導、自動車用水素貯蔵のための費用対効果の高い熱可塑性コンポジット圧力容器の開発 ⇒ 水素供給への適合性、および自動車市場の大量生産への対応という点で優位性あり ・ 熱可塑性材料、高度な数値モデリング技術、革新的な製造工程は、熱可塑性樹脂を使用することで性能、安全性の向上、タンク形状の最適化、軽量化（10%減）、量産コスト削減を狙う	€ 2,884,330.29	2019/1/1-2022/9/30
③STORAGE OF HYDROGEN: ALTERNATIVE PRESSURE ENCLOSURE DEVELOPMENT (SH2APED)	・ PLASTIC OMNIUM社が主導、安全性と性能を大幅に向上させ、価格を抑えた革新的な家庭用・車載用フラット筐体の水素貯蔵システムを開発、試験を実施 ・ 耐火性や機械的強度が飛躍的に向上し、最新のIV型タンクと比較して20%のコストダウンの見通し	€ 1,993,550	2021/1/1-2023/12/31
④CComposite COnformal LIquid H2 Tank (COCOLIH2T)	・ Collins Aerospace社が主導、航空部門向けの安全な複合材および真空断熱LH2タンクを開発、生産エネルギー消費量を60%以上削減し、生産時間を少なくとも50%削減 ・ コンフォーマル可変断面ボックス型タンクの構造を採用、マルチマテリアル熱可塑性複合材料の概念に基づいており、航空機の構造統合を促進し、システム全体を軽量化	€8,726,770	2023/2/1-2026/1/31

【出所】 各プロジェクトウェブサイト等
© 2024 Mizuho Research & Technologies, Ltd.

- 主な課題は、貯蔵システム全体の主なコスト要因である炭素繊維の可用性とコスト
- 今日、世界全体の炭素繊維の年間生産量は約80,000トンで利用可能な炭素繊維の約70%は風力タービンのブレードや航空宇宙/航空機の用途に使用
- 年間10万台のFCEVを生産するには約5,000トンが必要だが、適切なグレードの炭素繊維は主に欧州以外（日本、米国、韓国）で生産、サプライチェーン構築に向けた課題解決が必要



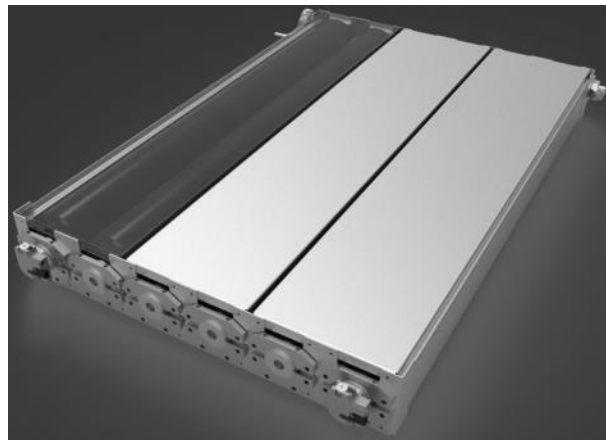
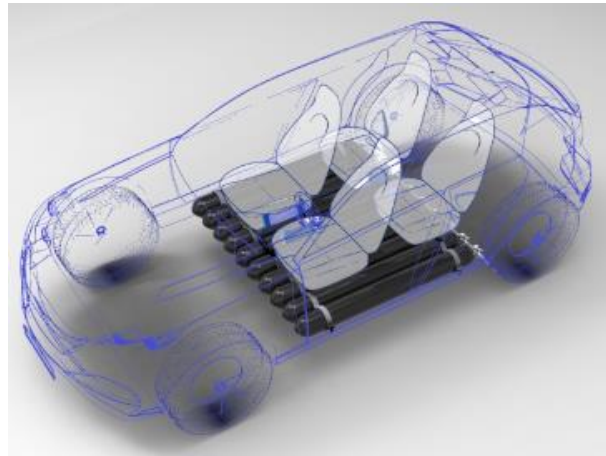
欧州プロジェクトでの重量貯蔵密度目標値の推移
(TAHYAプロジェクトは2019年時点で5.3wt%以上を達成)



タンクシステム概要とコスト構造

【出所】TAHYA, TAnk HYdrogen Automotive, FCHJU Programme Review Days 2019

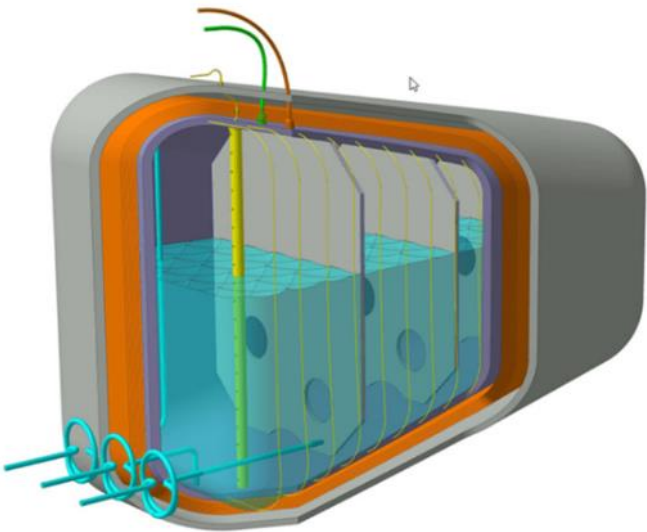
- 価格を抑えた革新的な**車載用フラット筐体の水素貯蔵システム**を開発、試験を実施
- 耐火性や機械的強度が飛躍的に向上し、**最新のIV型タンクと比較して20%のコストダウン**の見通し



	内容
概要	■ 前例のない安全性能を備えた、適合性があり費用効果の高い水素70MPa貯蔵システムを開発およびテスト検証 ■ 革新的なストレージシステムは、バッテリーパックスペースへ適用 ■ 1,800x1,300x140mmの設計スペースに収まる9本の円筒容器のアセンブリで構成、耐火性と機械的堅牢性が大幅に向上し、最新のタイプIV戦車と比較してコストが20%削減 ■ このアーキテクチャにより、小型車のアンダーボディのフラットスペースに適合するモジュラーシステム構成が可能 ■ SH2APEDコンソーシアムは、水素容器製造のPLASTIC OMNIUM、機械加工のMisal Srl、高圧複合シリンダーの安全評価機関BAM、水素安全研究のアルスター大学で構成 ■ ダイムラー、トヨタ、アウディ、吉利、FIA、GreenGTなどの自動車メーカーで構成される諮問委員会により、小型FCVへのSH2APEDシステム統合についてプロジェクトに助言プロジェクトの結果を検証
目的	①水素容量5.9kgの1,800x1,300x140mmの設計スペースに適合する9本の円筒容器のアセンブリに基づく、革新的な水素70 MPaタンクシステム（フルサイズのデモンストレータータンクシステム）の設計 ②容器、モジュラーシステムおよびフルサイズのデモンストレータータンクシステムレベルでの技術、安全性、およびパフォーマンスの検証 ③自動車産業の期待に沿った、水素1kgあたり400ユーロ未満のコストを目標とする工業用大量生産のコスト評価

【出所】 SH2APEDプロジェクトウェブサイト (<https://sh2aped.eu/>)

- 高強度かつ軽量の**熱可塑性複合材製の液体水素タンク開発プロジェクト**を実施中、2025年中にTRL4を達成し、26年1月までに2台の実証機の製作を計画
- 真空断熱低圧可変断面箱型LHの開発2航空機のエンペナージ内または乗客の床下に設置する可能性のあるタンクであり、実証機に向けた実験に成功



COCOLIH2T の破壊的なコンセプト
(画像提供：NLR)

目標	テーマ	概要
#1	材料の選択と熟成	タンク壁、多層断熱材（MLI）、透過バリアに適した材料をダウンセレクトして熟成させる
#2	破壊的な容器のコンセプトと設計	複合材共形LH2タンクの設計と開発（熱および圧力管理を含む）
#3	タンク製造	複合材および共形LH2タンクの製造
#4	サブシステム	システムが安全に機能するためのタンク給油、計量、ゲージ、漏れ検知システムの設計と開発
#5	タンクヘルスマニタリングシステム	タンクのライフサイクル全体で過酷な環境で作業できる軽量で堅牢なタンクヘルスマニタリングシステムと自動検査システムの設計と開発
#6	ストレージ・システムの統合とテスト	LH2タンクシステム全体の統合と実証
#7	タンクの安全性とLCA	タンク設計の決定によるライフサイクルと安全性への影響を把握した適切な検査方法を開発

【出所】 COCOLIH2Tプロジェクトウェブサイト（<https://www.cocolih2t.eu/>）

- 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
- IPCEIにおける水素プロジェクトHy2TechのTF3「貯蔵・輸送・流通技術の開発」では、水素貯蔵・流通に関する価値創造全体に焦点を当てている→水素の経済的な輸送と流通のためのインターフェースと同様に、固定式および移動式貯蔵システムに対する技術開発を支援

大型・商用車

開発コスト・期間短縮可能な標準化されたシステム設計 (Plug & Play)
スケーラブルなシステム設計



Truck
H₂ system



Bus
H₂ system

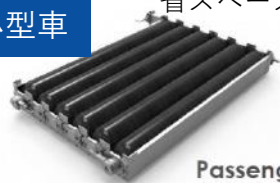


Train
H₂ system

Total H ₂ weight (kg)	39,8 / 66,6	34,1	91
System weight (kg)	1300 / 1700	800	2500
Vessel dim. (mm)	2000 x 400	2000 x 400	2000 x 400
Number of vessels	5 to 7	6	18
Pressure (bar)	350 / 700	350 / 700	350

乗用車・小型車

省スペース化、車体床下への統合



Passenger cars
H₂ system



Light duty
H₂ system

Total H ₂ weight (kg)	2.5 – 3.5	6
System weight (kg)	90	180
Vessel size (mm)	2000 x 200	2000 x 300
Number of vessels	5 - 7	3
Pressure (bar)	700	700



Plastic Omnium社の商用展開に向けた新規工場

CHG
(compressed)

H₂ Capacity
approx. 50 kg
Range
700-800 km

Pros and Cons

- ✓ Short term higher demand & commitment from infrastructure players
- ✗ Lower tank capacity

Technical Specifics

- Communication between tank and fuel station required to enable high flow refueling
- Tank layout: Plastic liner with carbon-fibre wrapping

sLH2
(liquefied)

H₂ Capacity
approx. 80 kg
Range
1.000-1.200 km

- ✗ Short term lower demand & commitment from infrastructure players
- ✓ Long term better economical and technological feasibility (lower infrastructure cost)
- ✓ Higher tank capacity

- H₂ hold time restricted - boil-off management system required
- Tank layout: Steel vessel with vacuum-insulated container

Daimler Truck社の大型トラック向け高圧水素・サブクール液体水素貯蔵システムの開発・実証

【出所】IPCEI, “Session3 Storage Transportation Distribution“, 2nd General Assembly, Berlin

3. 米国における水素貯蔵技術の動向

- システムモデリング等をベースにシステム、コスト目標を策定、材料開発者が車両システムレベルに対する評価支援が受けられる枠組みを構築、産学官のコミュニティ拡大へと繋げている
- 高圧水素貯蔵では低コスト化に向けた炭素繊維やプロセス、リユース・リサイクル技術の開発を重視

PJ名	概要	予算	期間
G-①：AutomotiveHydrogen Storage System Modeling: Public Access, Maintenance, and Enhancements	・材料開発者がDOE自動車レベル目標に対して材料を評価するのを支援するために貯蔵システムモデルを維持、更新、強化 ・既存のモデルを更新・強化し、より広い用途と使い勝手を実現 ・HyMARCで開発された水素貯蔵材料の性能評価ツールの開発 ・現在の水素貯蔵モデルの適用を、小型車だけでなく、中大型車、バルク貯蔵技術にも拡大	\$2,090,000	2015/10/1-2022/9/30
G-②：Hydrogen Storage Cost Analysis	・Design for Manufacture and Assembly（DFMA）を使用して、H2ストレージシステムの独立性、透明性の高いボトムアップの技術・コスト分析を実施 ・コスト要因を特定し、各テクノロジーの改善が必要な技術分野をDOEに提案 ・H2ストレージシステムの現在の状況と将来予測されるコストに関する参照可能なレポートをDOEと研究コミュニティに提供	\$999,946	2016/10/1-2021/9/30
G-③：Precursor Processing Development for Low Cost, HighStrength Carbon Fiber for Composite OverwrappedPressure Vessel Applications	・中空炭素繊維である、Hollow carbon fiber（HCF）の開発による、高圧水素タンクのコスト低減を目指す ・製造コストの減少、材料の軽量化により、炭素繊維のコストが11.97ドル/kgになることが示された	\$1,122,042	2017/9/1-2020/12/31
G-④：Novel Plasticized Melt Spinning Process of PAN Fibers Based on Task-Specific Ionic Liquids	・不揮発性のイオン液体（IL）に基づく、現在の溶液紡糸プロセスに代わる新しい可塑化溶融紡糸プロセスの開発、完全リサイクルが可能 ・PANとの可塑化相互作用を踏まえたILの分子構造の研究、ILの環化を制御するPANとの化学的相互作用の研究に続き、その成果を統合したIL溶融紡糸システムの開発	FY18-20 \$900,000	2017/10/1-2023/6/30

【出所】 <https://www.hydrogen.energy.gov/library/amr-presentation-database>

■ FY23実施中の高圧水素貯蔵技術についてはCFや製造プロセスの低コスト化から新規紡糸プロセスや前駆体の基礎研究、リユース・リサイクル検証など幅広く展開

PJ名	概要	予算	期間
G-⑤：Cost-Optimized Structural Carbon Fiber for Hydrogen Storage Tanks	・コストと性能の最適化に向け、従来と先進的な変換方法の両方を使用した、半商業的に生産された汎用PANベースの前駆体繊維のトランスレーショナル研究 ・精密な分子構造を有する新規合成PAN前駆体の加工性の向上、最適変換技術による高スループットな環化と構造・形態制御された高強度炭化繊維の形成を目的とした基礎研究	\$3,000,000	2021/4/1-2024/3/31
G-⑥：Carbon Composite Optimization Reducing Tank Cost	・15ドル/kg未満のコスト、700 ksiの引張強度、および35 Msiの引張弾性率を有する高強度CFを製造するための新しい最適化された技術の開発 ・生産能力とスループットの向上をもたらすCF技術の最適化、コンポジットの性能向上、容器設計とモデリングの強化、使用済み容器材料リサイクルを推進	\$3,325,000	2021/10/1-2023/9/30
G-⑦：Low-Cost, High-Strength Hollow Carbon Fiber for Compressed Gas Storage Tanks	・G-③の中空炭素繊維（HCF）技術の後継プロジェクト ・HCFのスピニングの進歩とスケールアップ、高強度に向けたHCF炭化プロファイリングと欠陥緩和の制御、HCF試作タンクの製造と使用後のリユース・リサイクル性について研究を加速	\$2,545,000	2021/10/1-2023/9/30
G-⑧：Low-Cost, High-Performance Carbon Fiber for Compressed Natural Gas Storage Tanks	・低コストで高性能な炭素繊維のスケラブルな生産方法の開発と検証 ・ANSI NGV2規格に適合する低コスト、軽量のタイプIV複合貯蔵タンク的设计 ・繊維強度、コンポジット強度も東レT700Sと同等以上、かつ1/2程度の製造コストが目標	\$7,809,744	2022/10/1-2027/9/30

【出所】 <https://www.hydrogen.energy.gov/library/amr-presentation-database>

■ H2@ScaleやHydrogen Shot目標達成に向けた資金提供の枠組みで液体水素貯蔵に関する複数テーマが新規採択

PJ名	概要	予算	期間
L-①：Cost Assessment and Evaluation of Liquid Hydrogen Storage for Medium and Heavy Duty Applications	・ 中型・大型トラック用液体H2（LH2）貯蔵システムの構想と分析 【前提条件】 - 水素容量60 kg以上 - 低圧LH2ポンプによる8-10 kg/minの給油速度 - Type-1断熱タンクで休止中の漏れに関する要件を満たす - 目標コスト8-9 \$/kWh、15 wt.%の重量密度と35 g/Lの体積密度を超える性能	\$500,000	2020/10/1-2021/9/30
L-②：First Demonstration of a Commercial Scale Liquid Hydrogen Storage Tank Design for International Trade Applications	・ 輸出入ターミナルに設置される国際貿易用途のための、世界初の手頃な価格の超大型液体水素（LH2）貯蔵タンクを開発 ・ このプロジェクトは、2-10万m³（1,400-7,100トン）の範囲で使用できる大規模なタンク設計を目指す - LHのBOR (boiloff rate) <0.1%/日 - CAPEXをLNG（液化天然ガス）貯蔵コストの150%以下（10万m³で目標コスト\$175M未満） - 規制機関による安全性と完全性の審査	\$6,000,000	2021/9/1-2024/8/31
L-③：Composite LH2 Tank for Heavy Duty Trucks and H2 Aircraft	・ 大型トラックおよび H2 航空機用の複合LH2タンクの開発	\$2,900,000	2023/9/21に発表
L-④：Conformable, Composite Tank for Liquid Hydrogen Storage in Heavy-Duty Ground Transportation	・ HD用陸上輸送における液体水素貯蔵用の適合性複合タンクの開発	\$3,800,000	2023/9/21に発表
L-⑤：High-Capacity Onboard Storage System for Off Road Mining and Construction Vehicles	・ オフロード鉱山および建設車両用の大容量オンボードストレージシステムの開発	\$5,000,000	2023/9/21に発表

【出所】 <https://www.hydrogen.energy.gov/library/amr-presentation-database>（L-①・②各プロジェクト資料）

【出所】 <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/selections-hydrogen-and-fuel-cell-technologies-office-funding-opportunity>（L-③～L-⑤）

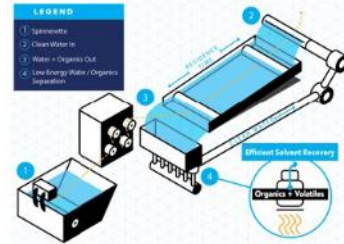
- OD（外径）が $50\mu\text{m}$ 未満、ID（内径）が $25\mu\text{m}$ 未満のスプールHollow Fiberの確立→さらに細いHFの開発
- 中空TechPAN前駆体繊維からの水最小化と低エネルギー溶媒回収の影響に関するコスト分析、HFの酸化速度が固体ファイバに比べて10倍以上速いことの実証を踏まえ、**高強度CF（T700S）と比較して低コスト化を達成見通し**

1) Proving of low cost, high-volume, high quality polyacrylonitrile (PAN)-based precursor terpolymer



- Special acrylic grade terpolymer, non-exclusive (TechPAN)
- Anticipated cost \$3/kg

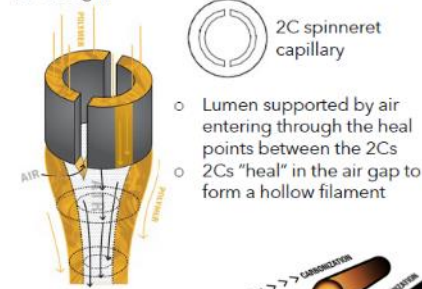
2) Water minimization and activated carbon solvent recovery



- Low energy adsorption de-watering to concentrate spinning solvents for recovery
- Use of activated carbon modules to capture solvent, followed by thermal regeneration of the activated carbon modules
- Potential to avoid energy-intensive distillation process of millions of gallons of wastewater

3) Development of hollow carbon fibers

Scalable segmented arc spinneret approach (2C design)



- Hollow fiber is then capable of oxidizing from the interior AND exterior - **FASTER OXIDATION**

【低コスト、高生産、高品質のポリアクリロニトリル（PAN）系前駆体ポリマーの開発】

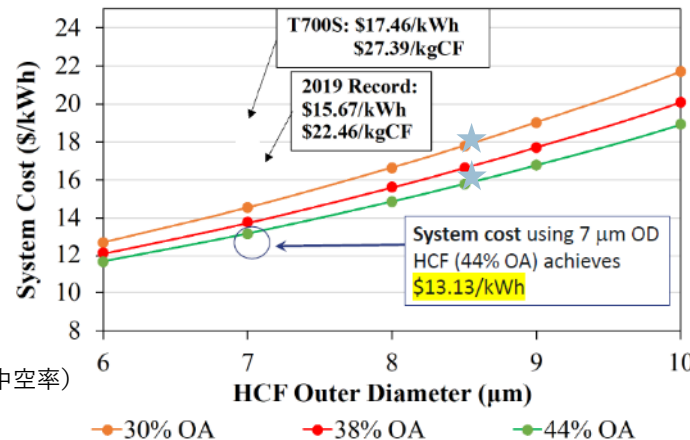
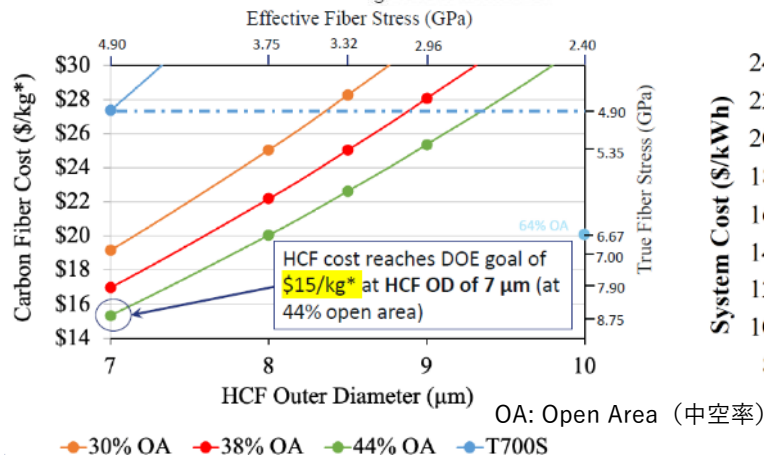
- ・ 予想コスト\$3/kg

【水量の低減と活性炭溶媒の回収】

- ・ 回収用の紡糸溶剤を濃縮するための低エネルギー吸着脱水
- ・ 活性炭モジュールを使用して溶媒を捕捉した後、活性炭モジュールを熱再生

【中空炭素繊維の開発】

- ・ スケーラブルなセグメント化アーク紡糸口金アプローチ（2C設計）
- ・ 中空糸は内部および外部から酸化することで酸化の高速化を達成



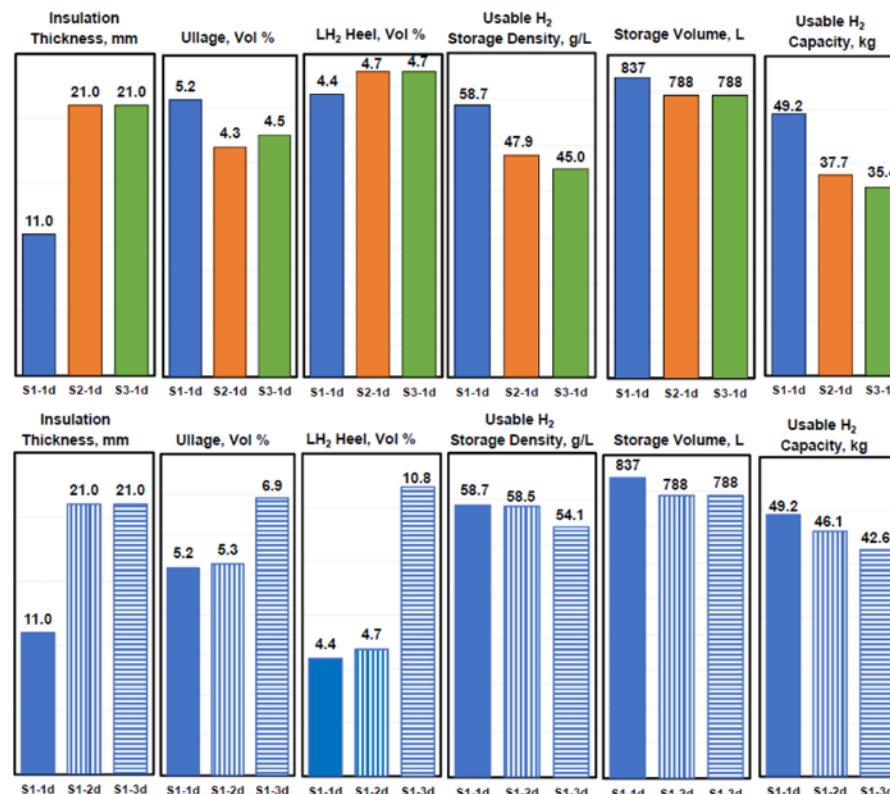
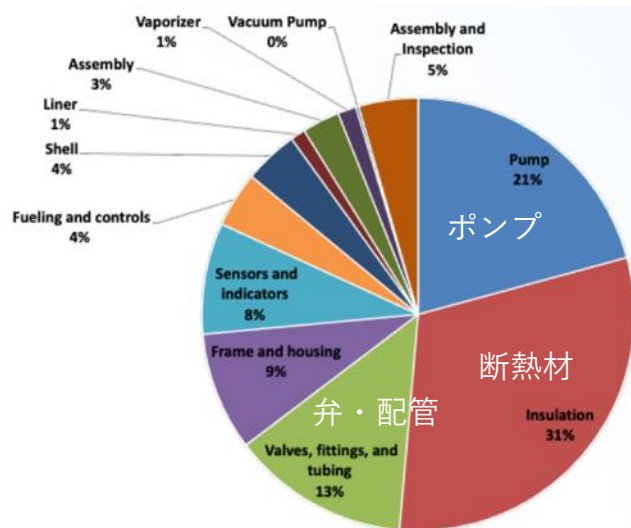
【出所】

https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review21/st231_weisenberger_2021_ppdf.pdf

https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review23/st238_weisenberger_2023_o-pdf.pdf

- 最終目標のコストは高圧水素と同じ <\$8/kWh (<\$266/kg-H₂)、ベースラインの110.4/kg-H₂のフレーム搭載二槽式液化水素貯蔵システムのボトムアップによる年産10万ユニットのコスト分析を実施
- BOPと断熱材のバランスがシステムコストを支配し、コスト感応度に最も大きな影響を与える
- 差圧ポンプの有無、休止時間による水素使用可能量を分析

Property	Value
Tank placement	Frame-mounted
Capacity	55.2 kgH ₂ /tank
Insulation	MLVI
Insulation thickness	21mm
Shell thickness	3.98 mm Al 2219-T78
Liner	1.57mm Al 2219-T78
MAWP	10 bar
Pump	Single on-board pump
Target cost	<\$8/kWh



- 水素搭載量55.2kg、S1（FC入力圧5atm・差圧ポンプ有）、S2（同8atm）、S3（FC入力圧5atm・差圧ポンプ無）のシステム条件で比較（休止時間：1日）
- 入力圧上昇により約23%のシステム性能が損失、使用可能な水素は49.2kgから37.2kgに減少
- 差圧ポンプ（ΔP=4atm）の有無によって使用可能な水素は49.2kgから35.4kgに減少

- 水素搭載量55.2kg/システム、S1（FC入力圧5atm・差圧ポンプ有）のシステム条件で休止時間による影響を比較
- 休止時間が1日から2日に延びること、使用可能な水素は49.2kgから46.1kgに減少
- さらに休止時間が伸びると42.6kgに減少

差圧ポンプの有無、休止時間による水素使用可能量の分析

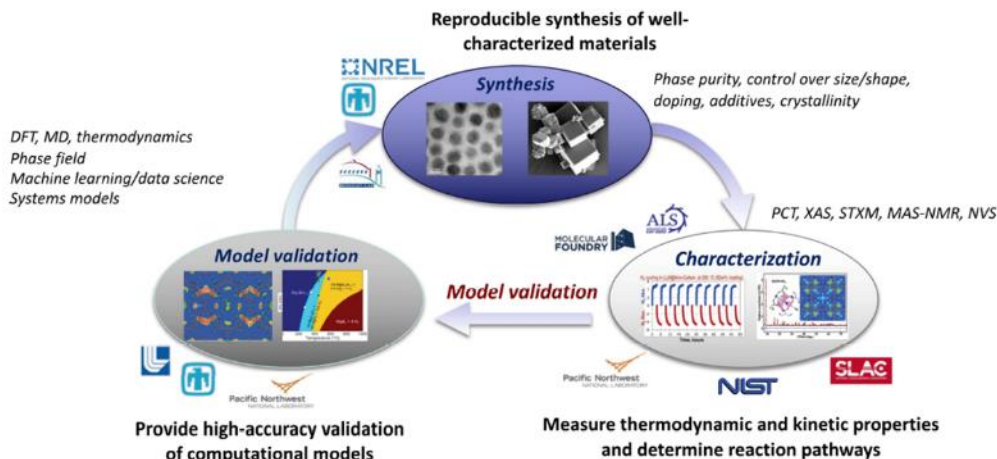
【出所】

https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review21/st100_james_2021_o-pdf.pdf

https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review21/st223_ahluwalia_2021_o-pdf.pdf

- 2015年から水素貯蔵材料の研究開発プロジェクト（HyMARC）を推進、現在はPhase3に移行
 - Phase1（2015/10/1-2018/9/30）→Phase2（2018/10/1-2022/9/30）→Phase3（2022/10/1-2026/9/30）
 - 近年のR&D予算は\$7.0M（FY22）、\$6.3M（FY23）
- 6つのDOE傘下の国立研究所が協同し、水素貯蔵材料開発に着手、シミュレーション技術も活用したモデリング⇄合成⇄特性評価を連携させた“co-design”による開発基盤を整備→2025年の貯蔵密度目標5.5wt%（貯蔵システムベース）を達成した材料はまだ発見されていないが、材料探索スピードの劇的な加速に成功（例：新規水素化合物）
- フェーズ3では、特定の貯蔵用途、特に輸送用途の材料を最適化するための効果的な共同設計イニシアティブ（数値モデリングと技術経済分析を組み合わせ）の確立に注力

Approach: We employ a “co-design” approach to identify and test new hydrogen storage material concepts



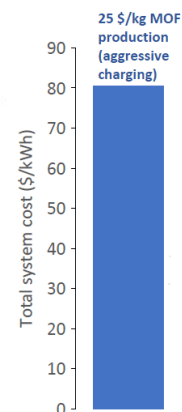
新規水素貯蔵材料創出のco-designシステム

【出所】

https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review21/st127_allendorf_2021_o-pdf.pdf

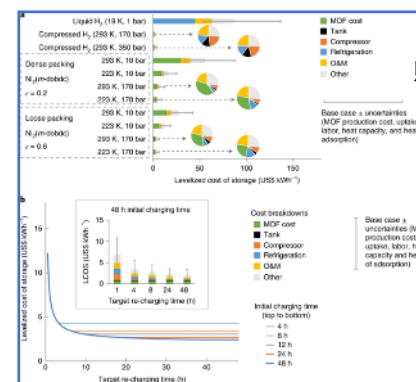
MIZUHO みずほリサーチ&テクノロジーズ

25\$/kg MOF

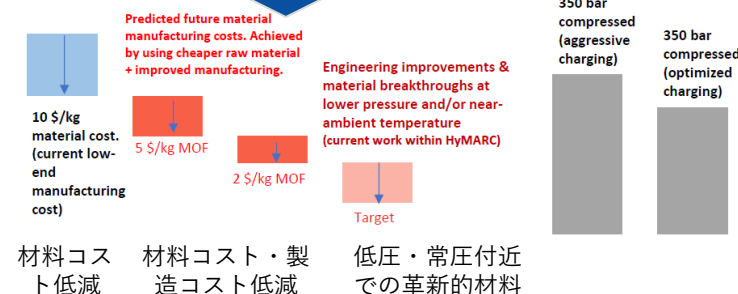


作動条件最適化

Optimized charging & operating conditions



貯蔵材料データベース
コスト評価ツール



材料コスト低減

材料コスト・製造コスト低減

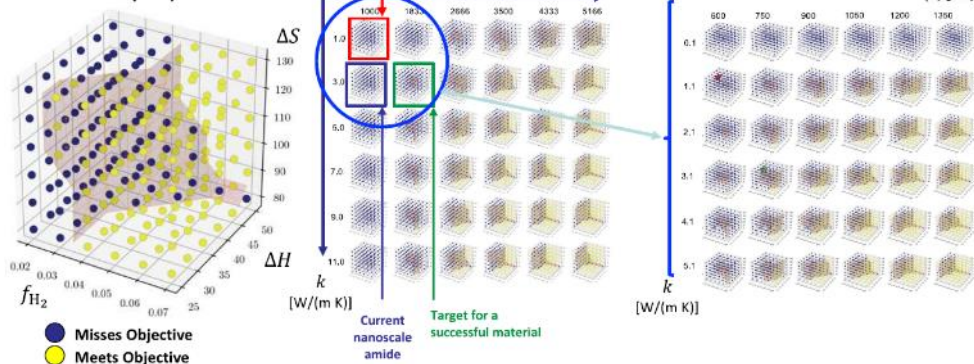
低圧・常圧付近での革新的材料

【出所】

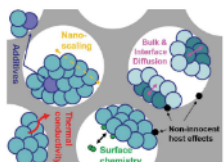
https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review23/st127_allendorf_2023_o-pdf.pdf

Example: $P_{max} = 100 \text{ bar H}_2$

6-D ($\Delta H, \Delta S, f_{H_2}, \rho, k, P_{max}$) sensitivity analysis



【金属水素化物】2025目標>60Vol%の水素化物材料の探索、広範なパラメータ空間に対し大量の計算（エンタルピー、エントロピー変化、水素分率、密度、熱伝導率、最大作動圧力）を自動実行するアルゴリズムを開発



Results:

- New synthesis routes using both porous carbon and rGO
- XRD analysis shows transformation of precursors to $\text{Mg}(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{LiNH}_2$
- 3X increase in thermal conductivity
- Theory: strong host-amide interaction key to reduced $\Delta H(\text{dehydrogenation})$

Solution infiltration

$\text{BuLi} + \text{Bu}_2\text{Mg}$

Δ, H_2

$\text{LiH} + \text{MgH}_2 + \text{C}_6\text{H}_{10}$

Δ, NH_3

$\text{LiNH}_2 + \text{Mg}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2$

Desorb under vacuum

$\text{Li}_2\text{Mg}(\text{NH})_2 + \text{NH}_3 + 2\text{H}_2$

In-situ reduction

Mg NPs from MgCl_2

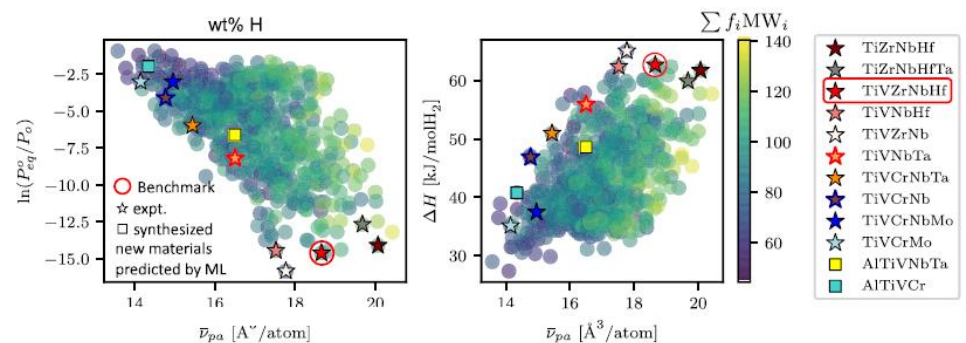
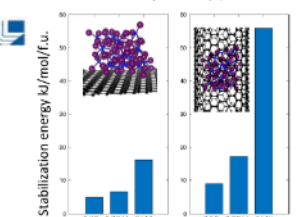
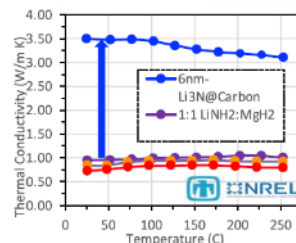
240 °C, 15 bar H_2

$\text{MgH}_2 @ \text{rGO}$

Ball milling

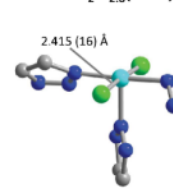
$\text{LiNH}_2, 120 \text{ min}$

Li-Mg Amides encapsulated by rGO

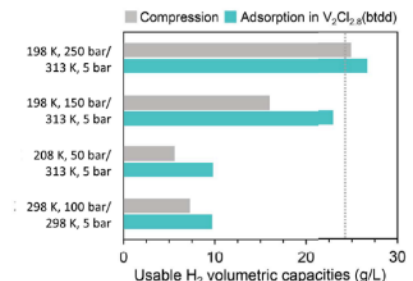
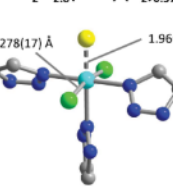


【金属水素化物】機械学習による不安定化高エントロピー合金（HEA）水素化物、672種類の新規金属水素化合物のモデリング、合成、特性評価を18か月未満で達成、コンソーシアム内連携により新規材料探索を加速

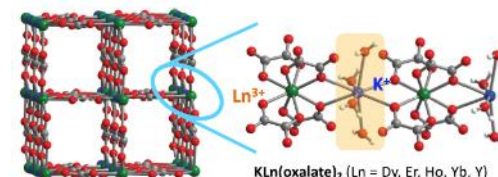
$\text{V}_2\text{Cl}_{2.8}(\text{btdd})$



$\text{V}_2\text{Cl}_{2.8}(\text{btdd}) \cdot (\text{D}_2\text{O})_{0.37}$



【MOF】常温での H_2 吸着を評価、 $\text{V}_2\text{-H}_2$ の相互作用の検証、 $\text{V}_2\text{Cl}_{2.8}(\text{btdd})$ 合成後還元および $\text{V}_2\text{Cl}_2(\text{btta})$ 合成（バナジウム密度4.6mmol/gおよび6.1mmol/g）、25°C,100barで従来の $\text{Ni}_2(\text{m-dobdc})$ に比べて取込量が向上



【金属水素化物】軽量のAl貯蔵容器の使用を可能にする、<200°Cで高速 H_2 脱離が可能な金属アミド/炭素複合材料、多孔質カーボンとrGO（還元型酸化グラフェン）を併用した新しい合成経路、熱伝導率が3倍に向上

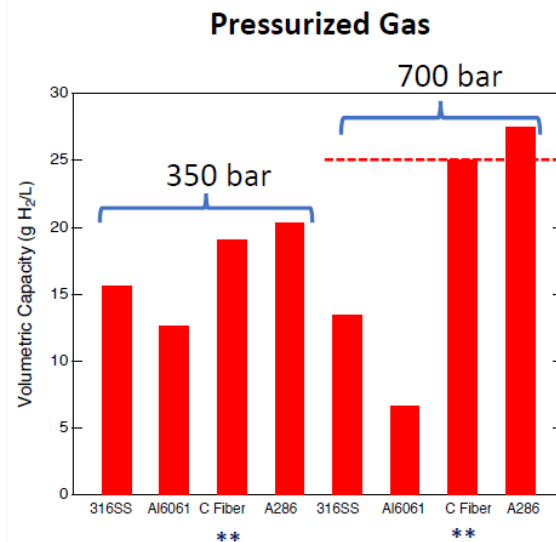
【シュウ酸塩架橋フレームワーク】金属イオンあたり最大4個の H_2 分子を吸着可能、有機リンカーと金属イオンの組み合わせを変えることによる広い同調性、吸着 H_2 の位置決定には高結晶性で空気安定な骨格が適している

【出所】https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review21/st127_allendorf_2021_o-pdf.pdf

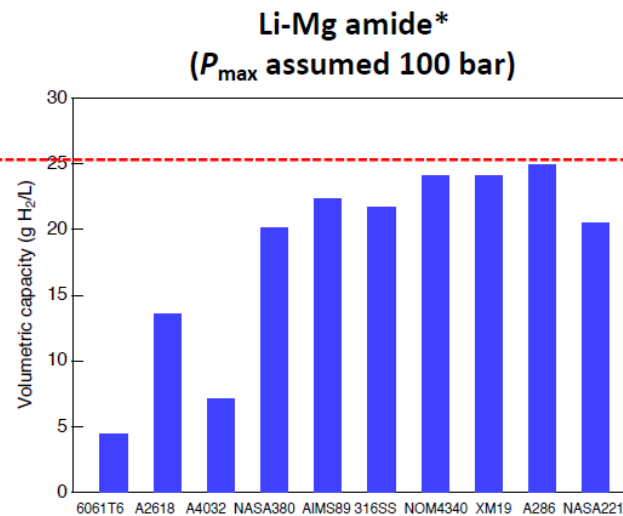
- 大型トラック向け700barの高圧水素の体積貯蔵密度に相当するLi-Mgアミド系水素化物の運転評価
- 軽量で高性能な合金で製造されたClass8トラックの水素貯蔵材料タンクは、高速水素脱着に必要な高温での運転が可能であり、最大100barの圧力で60kgの水素搭載、480マイルの航行可能

Accomplishment and Progress: Li-Mg amide volumetric capacity equivalent to 700 bar pressurized gas achieved for a heavy duty vehicle

Tanks for Class 8 trucks fabricated from light-weight, high-performance alloys would enable operation at elevated temperatures needed for fast hydrogen desorption



*1.0Mg(NH₂)₂-2.1LiH-0.1KH with 10wt% carbon nanoworms
 **Type III tank (aluminum liner with carbon fiber overwrap)



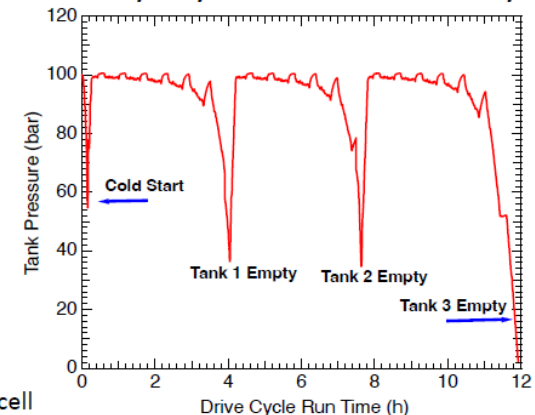
Example: predicted performance for A286 tank:

Usable H ₂	60 kg
Distance Traveled	480 miles
On board efficiency***	75 %

***Percent of usable hydrogen available to operate the fuel cell



CARB Heavy-Duty Diesel Truck Cruise Drive Cycle



【出所】 https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review23/st127_allendorf_2023_o-pdf.pdf

4. 日本の水素貯蔵技術に関する目標・研究開発

■ NEDO技術開発ロードマップの2040年FC目標（IV目標）に対する燃費に基づく必要水素量から、各アプリケーションから求められる質量貯蔵密度、体積貯蔵密度を算出

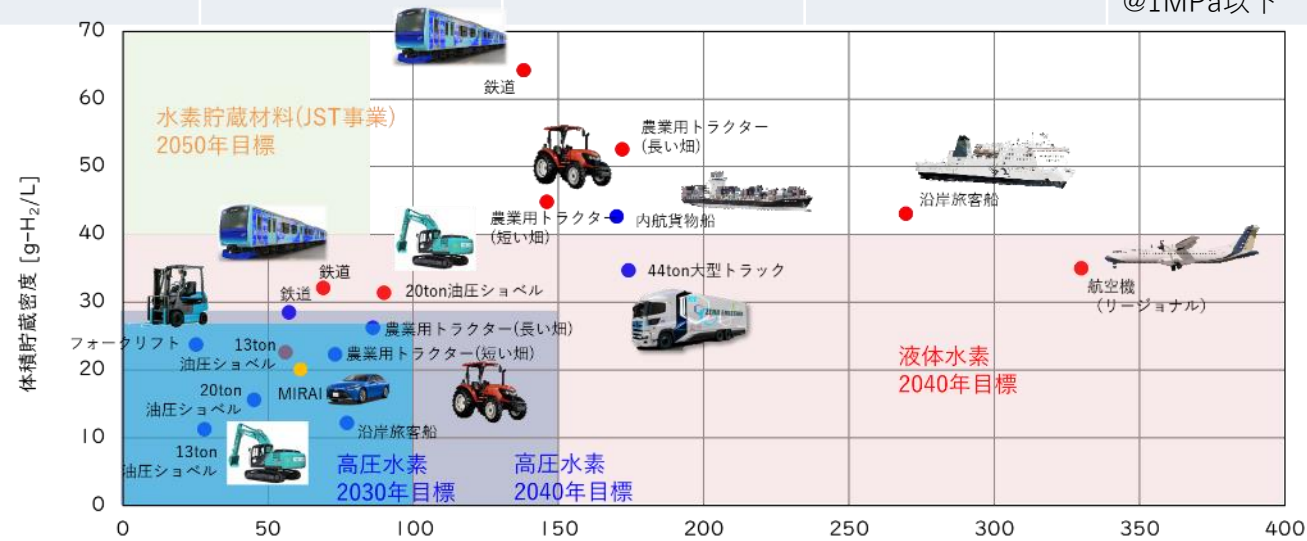
アプリケーション		航続距離/ 運転時間	燃費※1	必要水素量 [kg]	許容搭載質量 [kg]	許容搭載スペース （容器体積） [L]	質量貯蔵密度 [g-H ₂ /kg]	体積貯蔵密度 [g-H ₂ /L]
25トン/44トンクラス大型トラック		1,000 km	14.4 km/kg-H ₂	70	400	2,500（2,000）	174	34.8
内航貨物船		5日(120 hr)	0.05 hr/kg-H ₂	2,416	※2	72,000（56,520）	170 ※2	42.7
沿岸旅客船		2日(14 hr)	0.06 hr/kg-H ₂	231	3,000	24,000（18,840）	77	12.3
	要望値 ※4	—	—	—	—	—	270	43.1
鉄道 2両編成		414 km※3 （500 km）	3.6 km/kg-H ₂	114（138）	2,000	5,086（3,993）	57（69）	28.6（32.1）
	要望値 ※4	—	—	—	—	—	138	64.2
油圧ショベル 20トンクラス		4 hr	0.22 hr/kg-H ₂	18	400	1,463（1,148）	45	15.7
	要望値 ※4	—	—	—	—	—	90	31.4
油圧ショベル 13トンクラス			0.35 hr/kg-H ₂	11	400	1,280（1,005）	28	11.3
	要望値 ※4	—	—	—	—	—	56	22.6
フォークリフト		4.5 hr	—	2	80	（84）	25	23.8
農業用トラクタ 50kWクラス(短い畑)		4 hr	0.45 hr/kg-H ₂	9	120	500（393）	73	22.4
	要望値 ※4	—	—	—	—	—	146	44.8
農業用トラクタ 50kWクラス(長い畑)		4 hr	0.39 hr/kg-H ₂	10	120	500（393）	86	26.3
	要望値 ※4	—	—	—	—	—	172	52.6
航空機（リージョナル）		要望値 ※4	—	—	—	—	330	35

※1 2040年IVシミュレーションによる
※2 内航貨物船は質量許容度があるため、質量貯蔵密度は液体水素の2030年仮目標値を設定
※3 システム成立性検討のモードにて8時間走行の結果を示す。合わせて500kmを連続で走行するケースを（ ）内に示す
※4 水素充填頻度を考慮しない場合の要望値

【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

- FY22に高圧水素の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
- FY23では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	2030年頃	2035年頃	2040年頃
高圧水素 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 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 (水素量 ≧ 70 kg)	質量密度 体積密度 ホールドタイム	— — 2日未満 (現在)	— — —	20~30 wt% 35 g-H ₂ /L 5日以上	30~40wt% 40 g-H ₂ /L 7日以上
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

■ 次期研究開発課題および35年目標の達成、実用化に向けて低コスト仕様の開発（炭素繊維等の材料コスト・使用量低減、CFRP分割構造等を実現する新工法、低コスト独自構造、等）に加え、以下の2点の技術開発課題に注力

①安全率等適正化戦略：

- “Design by Test”→“Design by Analysis”への移行、シリーズ試験⇒パラレル試験化、加速倍率（温度、試験荷重）適正化など
- 安全率、試験条件等の適正化に向けた理論から実証までの戦略立案が必須（疲労理論、テストピース試験、ヘルスモニタリング、タンク解析技術の連携）

②環境負荷低減：

- タンクに適した資源循環設計（DX技術の活用）、マテリアル・ケミカルリサイクル達成の新規材料、等

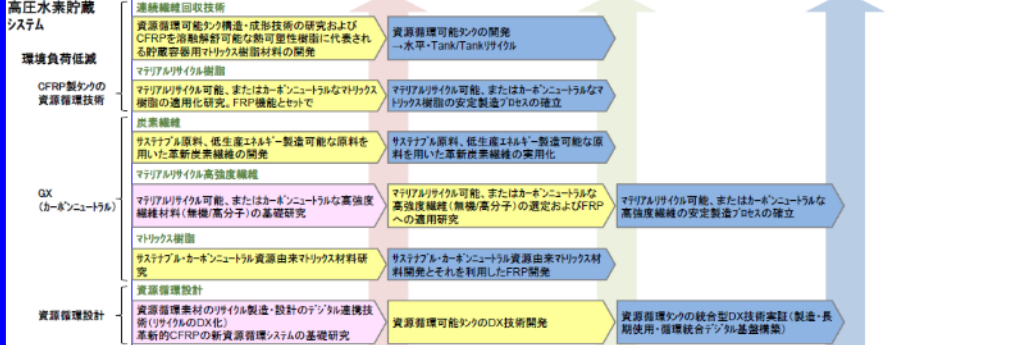
①安全性等適正化戦略

	2025年	2030年頃	2035年頃	2040年頃
高圧水素 ¹ 品質密度 目視仕様 ² 劣化試験仕様 ³ コスト	6 wt% 20 g-H ₂ /L ² 14 万円/kg-H ₂	10 wt% 28 g-H ₂ /L ² 4 万円/kg-H ₂	—	15 wt% 29 g-H ₂ /L ² 3 ³ 4 ⁴ 2 万円/kg-H ₂
高圧水素 ¹ 品質密度 目視仕様 ² 低コスト仕様 ³ コスト	—	—	4 wt% 28 g-H ₂ /L ² 2 万円/kg-H ₂	4 wt% 29 g-H ₂ /L ² (1 万円/kg-H ₂)
液体水素 ¹ 品質密度 目視仕様 ² ヘルスモニタリング ³ コスト	—	—	30~40 wt% ⁵ 40 g-H ₂ /L ² 5 日以上 ⁶	30~40 wt% ⁵ 40 g-H ₂ /L ² 7 日以上 ⁶
貯蔵材料 システム ¹	—	—	—	50年 8 wt%以上、 70 g-H ₂ /L以上@1 MPa以下 ²



②環境負荷低減

	2025年	2030年頃	2035年頃	2040年頃
高圧水素 ¹ 品質密度 目視仕様 ² 劣化試験仕様 ³ コスト	6 wt% 20 g-H ₂ /L ² 14 万円/kg-H ₂	10 wt% 28 g-H ₂ /L ² 4 万円/kg-H ₂	—	15 wt% 29 g-H ₂ /L ² 3 ³ 4 ⁴ 2 万円/kg-H ₂
高圧水素 ¹ 品質密度 目視仕様 ² 低コスト仕様 ³ コスト	—	—	4 wt% 28 g-H ₂ /L ² 2 万円/kg-H ₂	4 wt% 29 g-H ₂ /L ² (1 万円/kg-H ₂)
液体水素 ¹ 品質密度 目視仕様 ² ヘルスモニタリング ³ コスト	—	—	30~40 wt% ⁵ 40 g-H ₂ /L ² 5 日以上 ⁶	30~40 wt% ⁵ 40 g-H ₂ /L ² 7 日以上 ⁶
貯蔵材料 システム ¹	—	—	—	50年 8 wt%以上、 70 g-H ₂ /L以上@1 MPa以下 ²



【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）本体・解説書

■ 液体水素貯蔵システムの観点で以下の2点を中心に技術開発課題を整理

①貯蔵性向上

- 軽量CFRP材料の極低温設計、軽量化・自由度向上（構造・工法）→貯蔵密度向上・容器構造最適化

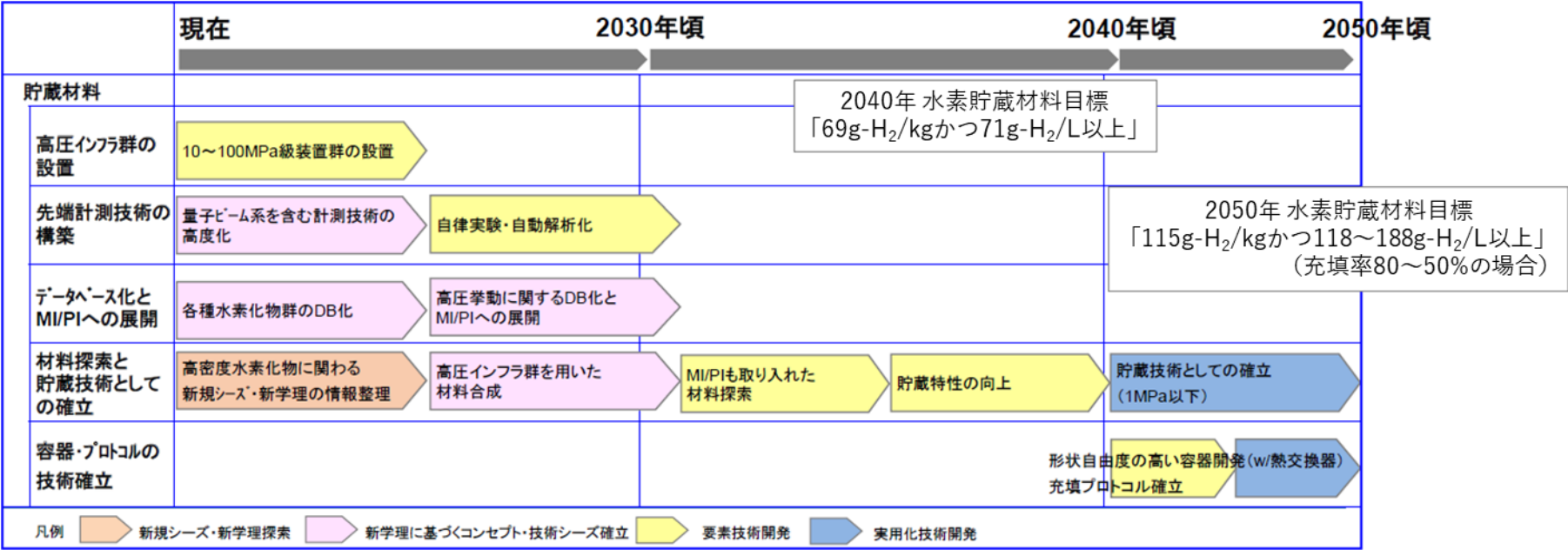
②運用性向上

- 内部流体の挙動、センシング、予測、制御、断熱性向上、蒸発損失低減運用に係る共通基盤整備

	2025年	2030年頃	2035年頃	2040年頃
高圧水素 ^{*1}	質量密度 目標仕様 ¹ 高貯蔵効率仕様 コスト	6 wt% 20 g-H ₂ /L ^{*2} 14 万円/kg-H ₂	10 wt% 28 g-H ₂ /L ^{*2} 4 万円/kg-H ₂	15 wt% 29 g-H ₂ /L ^{*2,3,4} 2 万円/kg-H ₂
高圧水素 ^{*1}	質量密度 目標仕様 ² 低コスト仕様 コスト	— — —	4 wt% 28 g-H ₂ /L 2 万円/kg-H ₂	4 wt% 29 g-H ₂ /L (1 万円/kg-H ₂)
液体水素 ^{*1}	質量密度 目標仕様 ¹ 体積密度 ホールドタイム	— — 2 日未満(現在) ^{*6}	20~30 wt% ^{*5} 35 g-H ₂ /L 5 日以上 ^{*6}	30~40 wt% ^{*5} 40 g-H ₂ /L 7 日以上 ^{*6}
貯蔵材料	質量密度 システム ^{*1} 体積密度	— —	— —	50年 8 wt%以上、 70 g-H ₂ /L以上@1 MPa以下 ^{*2}
液体水素貯蔵システム	貯蔵性向上	CFRP材料極低温耐久性評価 極低温CFRP材料および評価法の開発	強度解析・寿命推定モデルの開発・実証	容器試作、耐久評価
軽量CFRP材料の極低温設計	真空断熱(二重)構造の軽量化 ピンホールスライナー・接合構造の真空度評価と軽量化	外槽の軽量化(アルミ)⇒25 wt% 内槽の軽量化(Type2タンク)⇒30 wt%	CFRPを最大限活用したさらなる内槽の軽量化(Type3タンク)⇒40 wt%	
軽量化・搭載自由度向上(構造・工法)	タンクのフラット構造化 車載に適した容器構造の研究(扁平化)	肉厚設計基準(軽量化、コスト削減) 材料の極低温強度保証および寿命保証に関する研究	安全率最適化に関する研究	
運用性向上	高精度液面計(質量系)・ポンプ・バルブ等 液面レベル制御・満充検知等の技術開発 容器・配管内流体モデル(気液2相流モデル) 基本CFDモデル開発 蒸発・凝縮のメカニズム解明 真空断熱層熱流解析 移動型タンクの熱流体マネジメントの開発	高精度化・精度検証方法確立・実証 実機モデル、縮退モデル開発に向けた物性・共通基盤データ取得 輻射熱シールド冷却・蓄冷 革新的高断熱構造、材料の開発 磁気冷凍機等をトボン時の伝熱パス・効率の研究	流体制御技術確立(ポンプ・バルブ等) 実機モデル、縮退モデル開発 小型・軽量タンクの実証	
断熱性能向上・蒸発損失低減	過冷却水素による蓄冷を活用した蒸発損失低減 非平衡・気液2相流充填の研究開発(モデル化等)	低蒸発損失充填技術の実証		
運用に係る共通基盤整備	実装・制度設計に向けた安全性データ取得等 各種アプリケーションの使用環境等の調査・研究・データ取得	高強度材料、革新容器構造、タンクシステムの安全性評価法の研究開発	液体水素貯蔵技術での国際競争力確保につながる車載システムの安全性評価法の適正化	

【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）本体・解説書

- 従来の金属系の水素貯蔵材料（水素吸蔵合金）は、材料単体としては比較的高い体積貯蔵密度を示すことが知られているが、質量貯蔵密度は10～30g-H₂/kg程度
- 2050年の仮目標の実現には最新の水素科学に基づくブレイクスルーが求められ、中長期的な研究開発ステップが必要
 1. 水素圧力を拡張（～100MPa）した材料探索や高精度での材料特性評価のための共同利用設備の設置、および分野融合や若手育成を目指した研究者ネットワークの拡充
 2. 自律実験・自動解析も含む大型研究施設と連携した先端計測技術の構築
 3. 系統的なデータベースの構築とそれに基づく MI・PI への展開
 4. 研究者ネットワークに基づく確実かつ迅速な材料探索と水素貯蔵技術としての高度化
 5. 社会実装を目指した充填プロトコルや貯蔵材料・形状自由度の高い容器（w/ 熱交換器）の量産技術の確立



【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）本体・解説書

5. まとめ

■ 水素貯蔵システムの市場・技術概観

- FCモビリティの水素消費量に対する製品価値は高く、そのなかでCNに向けては将来1.5兆円の市場が期待
- FCの大型・商用アプリケーションへの多様化のなかで、大型トラック、航空機、船舶では貯蔵密度が高い液体水素への注目が高まる
- 高圧水素複合容器ではフルコンポジット・ライナーレスのタイプVの開発に期待

■ 欧州の水素貯蔵技術の開発動向

- 欧州Clean Hydrogen Partnershipでは輸送部門の研究開発としてPEFCの高性能化、高耐久化およびアプリケーションの実証と合わせて、高圧水素貯蔵技術の研究開発を推進
- 耐火性や機械的強度が向上したフラット筐体の水素貯蔵システム、最近では航空機用の熱可塑性複合材液体水素タンクの開発にも着手
- IPCEIプロジェクトにおいて企業への生産・技術実証への資金支援も加速

■ 米国の水素貯蔵技術の開発動向

- システムモデリング等をベースにシステム、コスト目標を策定、材料開発者が車両システムレベルに対する評価支援が受けられる枠組みを構築
- 高圧水素貯蔵では、低コスト化に向けた炭素繊維やプロセス、リユース・リサイクル技術の開発を重視、2023年9月にトラック、航空機や建機などへの液体水素貯蔵技術の開発も開始
- 水素貯蔵材料はHyMARCプロジェクトにおいて10年以上の研究成果を蓄積、モデリング・合成・特性評価を連携させた“co-design”による開発基盤で材料探索を推進、輸送用途の材料を最適化するための効果的な共同設計イニシアティブの確立

■ 日本の水素貯蔵技術に関する目標・達成シナリオ

- 高圧水素・液体水素および水素貯蔵材料の短期～中長期目標と技術開発のシナリオをロードマップとして策定
- 高圧水素については低コスト仕様もスコープにいれつつ、産学官連携で推進する技術開発課題を整理

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。