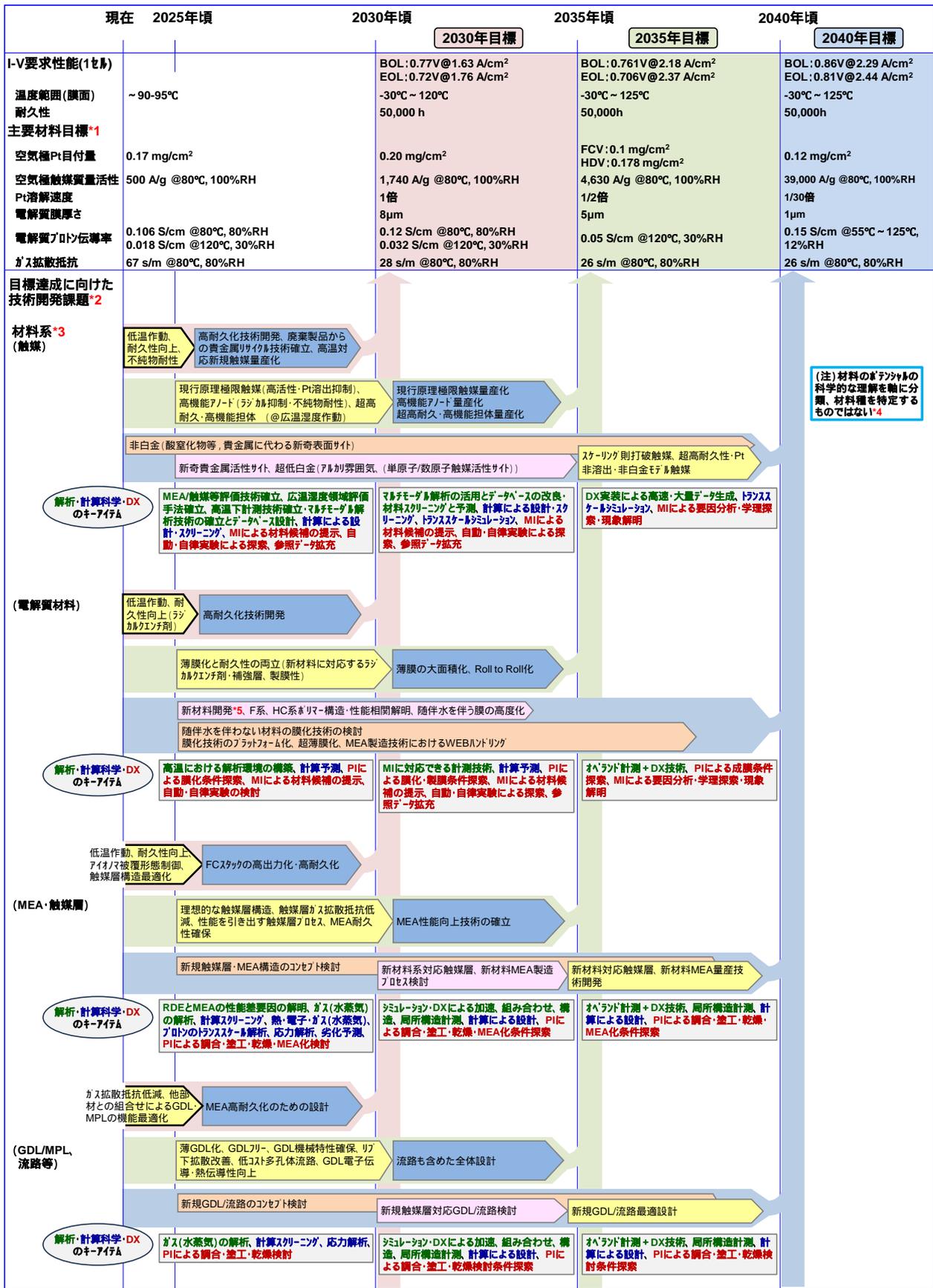


	現在	2030年頃	2035年頃	2040年頃
<b>市場規模*</b> <sup>1</sup>	2GW程度 (FC容量) 補助金支援も含めて緩やかに市場拡大、多用途展開で市場形成	60GW程度 FCV: 約23万台 FCトラック: 約17万台	160GW程度 FCV: 約60万台 FCトラック: 約45万台	420GW程度 FCV: 約150万台 FCトラック: 約120万台
<b>普及シナリオ (HDV)</b>	<b>燃料電池HDVの初期導入</b> ・国内はバス(約130台)・フォークリフト(約400台)で先行、トラック、鉄道、船舶で試験運転・技術実証の開始、海外でも幅広いHDVで実証試験、鉄道、フォークリフトは商用運転開始、航空用システム開発も本格化 ・国内運輸部門のCO <sub>2</sub> 排出量1.85億トンの内、HDVで56%(内、トラック40%) <sup>2</sup>	<b>燃料電池HDVの本格普及開始</b> ・技術開発の推進 (DX活用による開発競争力確保) ・多用途活用に向けた技術実証の拡大	<b>燃料電池HDVの普及加速 (2030~2040年)</b> ・国内外の主要国で大型トラックをはじめ、船舶、電車、建機・農機などのアプリケーションへの本格普及の開始 ・国内運輸部門のCO <sub>2</sub> 排出量低減に向け、FC商用車は小型トラック(総重量8トン以下)で累計1.2~2.2万台、大型トラック(総重量8トン以上)で累計5千台程度 <sup>3</sup>	<b>HDV領域のカーボンニュートラル実現</b> ・[2050年]燃料電池HDVによる運輸部門のカーボンニュートラル実現に貢献 ・商用車の25%以上はFC化の見通し <sup>4</sup>
<b>製品目標 (HDV)</b>	FCシステムは大型トラック(2030年頃:25トナクラスまで、2035年頃:44トナクラスまで)を対象に目標を検討し、船舶(内航貨物船、沿岸旅客船)、鉄道(2両編成)、油圧ショベル(20ト/13トクラス)、農業用トラクター(50 kWクラス)、フォークリフト(1-2トナクラス)の各アプリケーションに対して成立する共通目標として設定 水素貯蔵は大型トラック、船舶(内航貨物船、沿岸旅客船)、鉄道(2両編成)、油圧ショベル(20ト/13トクラス)、農業用トラクター(50 kWクラス)、フォークリフト(1-2トナクラス)の各アプリケーションを対象にした各々の製品目標の検討と、各貯蔵技術目標が網羅的に成立性を確認し目標として設定			
<b>FCシステム仕様</b> <sup>24</sup> FCシステム出力密度	0.24 kW/L <sup>5</sup>	0.60 kW/L <sup>6</sup>	0.75 kW/L <sup>6</sup>	0.80 kW/L <sup>6</sup>
<b>FCスタック性能</b> <sup>7</sup> I-V要求性能(1tR) <sup>8</sup>		BOL: 0.77V@1.63 A/cm <sup>2</sup> EOL: 0.72V@1.76 A/cm <sup>2</sup>	BOL: 0.76V@2.18 A/cm <sup>2</sup> EOL: 0.71V@2.37 A/cm <sup>2</sup>	BOL: 0.86V@2.29 A/cm <sup>2</sup> EOL: 0.81V@2.44 A/cm <sup>2</sup>
<b>作動温度範囲</b>	起動最低温度:-30°C 作動最高温度:90-95°C	起動最低温度:-30°C(外気) 作動最高温度:105°C (冷却水出口温度)	起動最低温度:-30°C(外気) 作動最高温度:120°C (冷却水出口温度)	起動最低温度:-30°C(外気) 作動最高温度:120°C (冷却水出口温度)
<b>入口湿度</b>		20%RH	12%RH	12%RH
<b>耐久性</b>	約4,100時間 <sup>9</sup>	50,000 h	50,000 h	50,000h
<b>コスト</b> FCシステム (内、FCスタック)		0.9 万円/kW <sup>10</sup> 0.45 万円/kW <sup>10</sup>	数値検討中 <sup>10</sup>	コバ <sup>11</sup> 相当(数値検討中) <sup>10</sup>
<b>質量</b>		0.19 g/kW <sup>11</sup>	0.13 g/kW <sup>12</sup>	0.07 g/kW <sup>13</sup> <sup>14</sup>
<b>水素貯蔵システム仕様</b>				
<b>高圧水素</b> <sup>16</sup> 質量密度 目録仕様: 高圧高効率仕様	6 wt% 体積密度 20 g-H <sub>2</sub> /L <sup>17</sup> コスト 14 万円/kg-H <sub>2</sub>	10 wt% 体積密度 28 g-H <sub>2</sub> /L <sup>17</sup> コスト 4 万円/kg-H <sub>2</sub>	- - -	15 wt% 体積密度 29 g-H <sub>2</sub> /L <sup>17</sup> <sup>18</sup> <sup>19</sup> コスト 2 万円/kg-H <sub>2</sub>
<b>高圧水素</b> <sup>16</sup> 質量密度 目録仕様: 低コスト仕様	- - -	- - -	4 wt% 体積密度 28 g-H <sub>2</sub> /L コスト 2 万円/kg-H <sub>2</sub>	4 wt% 体積密度 29 g-H <sub>2</sub> /L (1 万円/kg-H <sub>2</sub> )
<b>液体水素</b> <sup>16</sup> 質量密度 目録仕様: 水素貯蔵システム	- - -	- - -	20-30 wt% <sup>20</sup> 体積密度 35 g-H <sub>2</sub> /L コスト 5 日以上 <sup>21</sup>	30-40 wt% <sup>20</sup> 体積密度 40 g-H <sub>2</sub> /L コスト 7 日以上 <sup>21</sup>
<b>貯蔵材料</b> システム <sup>16</sup>	- -	- -	- -	50年8 wt%以上: 70 g-H <sub>2</sub> /L以上@1 MPa以下 <sup>17</sup>
<b>LCA</b>				カーボンニュートラル達成レベル
<b>普及シナリオ (FCV)</b>	<b>車両導入支援</b> 各社単一車種 ・国内約8万台(累計) ・グローバル約5.5万台(累計)	<b>FCVの本格的な普及拡大(FCVの世界最速普及)</b> ・ユーロゾーン向けのFCVの投入 ・多数車種へ拡大 ・燃料電池スタック供給による適用範囲の拡大、低コスト化の加速 ・スタック、周辺機器の製造・供給プレーヤーの拡大		<b>スタック排熱大幅削減</b> 高出力密度化 低コスト化 高耐久化
<b>製品目標 (FCV)</b>	車種展開を想定し2030年の目標値から2035年以降はLarge SUVクラスまでを対象に目標検討、HDVの材料目標に対して低Pt目付したもので成立することを確認し目標として設定。			
<b>システム仕様</b> <sup>24</sup> 高圧水素 <sup>16</sup> 質量密度 目録仕様: 高圧高効率仕様	6 wt% 体積密度 20 g-H <sub>2</sub> /L <sup>17</sup> コスト 14 万円/kg-H <sub>2</sub>	10 wt% 体積密度 28 g-H <sub>2</sub> /L <sup>17</sup> コスト 4 万円/kg-H <sub>2</sub>	- - -	15 wt% 体積密度 29 g-H <sub>2</sub> /L <sup>17</sup> <sup>18</sup> <sup>19</sup> コスト 2 万円/kg-H <sub>2</sub>
<b>FCスタック性能</b>		BOL: 0.84V@0.2 A/cm <sup>2</sup> EOL: 0.66V@3.8 A/cm <sup>2</sup>	BOL: 0.77V@1.80 A/cm <sup>2</sup> EOL: 0.73V@1.92 A/cm <sup>2</sup>	効率向上による燃費改善と出力密度向上によるFC小型化
<b>I-V要求性能(1tR)</b>				起動最低温度:-30°C(外気) 作動最高温度:120°C (冷却水出口温度)
<b>作動温度範囲</b>	起動最低温度:-30°C 作動最高温度:90-95°C	起動最低温度:-30°C(外気) 作動最高温度:105°C (冷却水出口温度)	起動最低温度:-30°C(外気) 作動最高温度:120°C (冷却水出口温度)	未来社会に相応するレベル <sup>15</sup>
<b>入口湿度</b>				資源循環可能となるレベルへ更なるPt量低減 <sup>14</sup>
<b>耐久性</b>	無交換(15年以上)	無交換(15年以上)	10,000h 無交換(15年以上)相当	
<b>Pt量</b>		0.05-0.1g/kW <sup>22</sup>	0.1g/kW <sup>23</sup>	
<b>コスト</b> FCシステム (内、FCスタック)		0.4 万円/kW 0.2 万円/kW	数値検討中	コバ <sup>11</sup> 相当(数値検討中)
<b>水素貯蔵システム</b>	14 万円/kg-H <sub>2</sub>	4 万円/kg-H <sub>2</sub>		カーボンニュートラル達成レベル
<b>LCA</b>				
<b>人材育成</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・研究人材確保(若手研究者への重点投資、キャリアパス整備、雇用機会確保、海外連携・人材流動)</li> <li>・異分野融合のチーム型研究、俯瞰・統合研究プログラムの育成</li> <li>・産官学連携・人材流動による若手を中心とした研究者育成(リハビリ、社会人博士、産学連携インキュベーター)</li> </ul>			

【備考】

- \*1 乗用車は大型トラック、HDVは大型トラックを対象として、将来の自動運転・シェアリングの影響を含めた販売台数およびFCVの導入に関する将来見通しに基づき市場規模を試算(解説書1.2を参照)
- \*2 国土交通省「2021年度における運輸部門における二酸化炭素排出量」より引用
- \*3 経済産業省「エネルギー分野における水素の普及に向けた中間とりまとめ(2023/7)」より引用
- \*4 IEA, "Net Zero Roadmap - A Global Pathway to Keep the 1.5°C Goal in Reach"等の将来見通し等に基づいた推計値(解説書1.2を参照)
- \*5 現行の市販FCVの燃料の加わり値から算定(定格出力80 kW、システム容積約328 L)
- \*6 各アプリケーションのFC最大出力/FCシステム搭載ペースで算出し、最も厳しい値を設定(解説書2.3.2参照)
- \*7 各アプリケーションの使用環境・使われ方・耐久性・冷却性能・搭載性を満たす共通の2030年頃のスタック目標を設定(解説書2.2.2, 2.2.3参照)
- \*8 大型トラックの製品要件から導出された2030年頃、2040年頃の目標I-V特性上の熱定格動作点(解説書1.3参照)
- \*9 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record #20005, "Automotive Fuel Cell Targets and Status", Aug. 2020
- \*10 DOEのHDVの2030年中間目標を参考(為替レートは2021年時点の110円/ドル)としたトラック目標、水素貯蔵システム、二次電池、インバータ、モータ等の電動化部品を含まない(解説書2.3.1参照、解説書では2030年頃、2035年頃および2040年頃のFC性能目標を達成した場合の想定I-V(目標値)を試算)
- \*11 Pt目付量0.24 mg/cm<sup>2</sup>、空気極0.2 mg/cm<sup>2</sup>、水素極0.04 mg/cm<sup>2</sup>としてスタック1基あたりの定格出力114 kW, MEA面積273 cm<sup>2</sup>, 330tRを前提条件とした数値
- \*12 Pt目付量0.22 mg/cm<sup>2</sup>、空気極0.18 mg/cm<sup>2</sup>、水素極0.04 mg/cm<sup>2</sup>としてスタック1基あたりの定格出力186kW, MEA面積283 cm<sup>2</sup>, 396tRを前提条件とした数値
- \*13 Pt目付量0.14 mg/cm<sup>2</sup>、空気極0.12 mg/cm<sup>2</sup>、水素極0.02 mg/cm<sup>2</sup>としてスタック1基あたりの定格出力190 kW, MEA面積293 cm<sup>2</sup>, 330tRを前提条件とした数値
- \*14 2050年にはPtの資源循環可能なレベルまでの低減が必要(解説書2.3.3参照)
- \*15 シェアリング、自動運転等の社会の変化に相応する耐久性
- \*16 水素貯蔵システムの目標値は補機を含まない
- \*17 水素貯蔵密度はDOEの目標とする
- \*18 超高強度のFRP用増幅、IoT、DX技術を活用した検査技術とそれによる貯蔵容器的な安全率等規制緩和などもあわせて目指す想定
- \*19 HDV・FCV以外の産業用アプリケーションでは、運用現場への水素供給手段の整備課題への対応が前提となる
- \*20 液体水素貯蔵の質量密度目標値については、用途、仕様ごとに決定
- \*21 2044トナクラス向けトラック(水素必要量70-90kg)のシステムとして目指す目標値
- \*22 最大出力0.1(2017年公開の数値)
- \*23 Pt目付量0.14 mg/cm<sup>2</sup>、空気極0.10 mg/cm<sup>2</sup>、水素極0.04 mg/cm<sup>2</sup>としてスタック1基あたりの定格出力を前提条件とした数値
- \*24 BOP部品については消費電力低減と高温作動対応が必要



凡例

- 新規シリーズ・新学理探索 基礎構築・手法基礎研究
- 新学理に基づくコンセプト・技術シリーズ確立 評価・解析技術の高度化・機能拡張
- 要素技術開発 評価・解析技術の拡張・応用
- 実用化技術開発

**【備考】**

\*1 現在は第二世代MIRAI(乗用車)の値、I-V要求性能を達成するための材料目標の詳細については別途記載(解説書1.4および解説書2.5.3を参照)

\*2 2030年および2035年頃までのFCスタックの生産技術開発課題は「FCV・HDV用燃料電池技術開発ロードマップ(FC生産技術)」を参照

\*3 FCスタックの冷却水出口温度に対して電解質膜面の温度は最大で+5~10°C、広範囲な作動温度に対する材料開発が必要(解説書2.5.3および解説書2.6.1~2.6.3を参照)

\*4 材料開発の方向性に関する詳細については解説書2.6.1~2.5.3を参照

\*5 55(高RH)~125°C(RH12%)でのプロトン伝導性確保が前提(解説書2.5.3を参照)



FCV・HDV用燃料電池技術開発ロードマップ (FC生産技術)

	現在	2030年頃	2035年頃	2040年頃
普及シナリオ (HDV)	【燃料電池HDVの初期導入段階】 ・国内バス、フォークリフト等数百台 ・トラック、鉄道、船舶で試験運転・技術実証	【HDV初期導入開始段階】 ・燃料電池HDVトラック、船舶等への本格普及開始 ・欧州10万台 国内数万台		【HDV領域のCN実現】 ・FC HDVトラックロード1 1,500万台*2
HDVコスト目標		FCシステム FCスタック 0.9万円/kW*1 0.45万円/kW	更なるコスト低減	コバ*相当 (数値検討中)
普及シナリオ (FCV)	【FCV初期導入開始段階】 ・国内7,500台程度	【FCV本格普及開始段階】 ・国内普及目標FCV80万台相当*3	・国内普及推定約FCV200万台相当*8	【FCV領域CN達成時期】 ・FCV 300-600万台*4
FCVコスト目標		FCシステム FCスタック 0.4万円/kW*1 0.2万円/kW	更なるコスト低減	コバ*相当 (数値検討中)
製造能力目標 HDV + FCV	3万台/年 (公表値)	→7万台/年→21万台/年 *FC HDVとFCV混流	21万台/年	→50万~120万台/年
ライン原単位 (想定規模)	2,500台/月/ライン	6,000台/月 1か所→3か所程度	6,000台/月 3か所程度	7,000台/月 4か所程度
生産速度 (カットタイム)	枚葉工程 1.3秒/セル*6 連続工程 6分/分*7	0.5秒/セル*6 15分/分*7	0.4秒/セル*6 19分/分*7	→0.33秒/セル*6 →25分/分*7
加工費低減目標	100%	70%*5	72%*5	74%*5
材料費低減目標	100%	70%	72%	74%
工場エネルギー効率	50%程度	80%		→100%達成
達成すべき生産技術課題 (FCスタック)		5年	5年	5年
触媒調合 触媒塗工乾燥 MPL塗工乾燥	計測・定量技術探索 (イオン分散状態、触媒イオン構造、イオンの動的・静的特性) 触媒イオンの塗工乾燥条件へのPI適用手法の確立*9 乾燥プロセス技術の探索	インク物性計測技術の確立 (インクイ) 連続インク製造技術の確立 触媒調合・新塗工技術へのPI適用手法の確立*9 乾燥プロセス技術の探索	触媒イオンの均一分散状態の見える化技術の確立 (高度解析・放射光) 触媒層ミクロ構造制御手法の確立 触媒調合・新塗工技術へのPI適用手法の確立*9 乾燥プロセス技術の確立	乾燥プロセス技術の高速化 極薄触媒層のPI搬送技術の高速化 新規触媒イオンの塗工技術の高速化
MEA化 セル化	界面接合の高速化と高接着性の高立技術の確立 新規セル材料の成形技術の確立 MEA化セルへのPI適用手法の確立*9 コアハンドリング技術の探索、コーティング技術の改良	新規セル材を活用したMEA化工程の高速化 位置決めの高速化、高精度化 コーティング技術の革新化 型レス切断技術の確立		
流路形成	プレス加工技術の高精度・高速化 微細パターン流路形成技術適用手法の探索	プレス連続成形技術の高精度化・高速化 微細パターン流路形成技術の確立 スライプ印刷等の高速化技術の確立 メタルカーボン等の高耐熱材料・表面処理後材料の加工技術の確立		微細パターン流路形成技術の高速化
表面処理	低真空表面処理技術の探索 抵抗・高バトリック基材の導電性・耐蝕性を確保する表面処理・改質技術の確立 表面エネルギー・親水性・制御技術の向上	低真空表面処理技術の確立 表面処理の高耐久・低抵抗化	ロード・高速表面処理技術の確立	
エージング	電解質湿潤過程の原理説明 コア成分の分析手法の探索 触媒コア成分の付着要因の特定	予備湿潤技術の確立 コア付着形態観測技術の確立 触媒コア成分の付着防止技術の確立	低コア材料を活用したエージング技術の確立 コア物質の付着防止技術の確立	ロードエージングプロセスの確立 低コア材料の活用 コア物質の付着防止 予備湿潤 触媒クリーニング
品質検査	異物金属検査方法の探索 リク検査技術の高速化 塗布膜厚測定技術、塗布欠陥検出技術の確立 表面欠陥検出技術の探索	高速異物金属検査技術の確立 塗布膜厚測定の高速化 塗布欠陥検出の高速化 表面処理のナノ欠陥検出技術の確立		表面処理のナノ欠陥検出技術の高速化

凡例

- 新規プロセス・新学理探索
- 新学理に基づくコンセプト・技術プロセス確立
- 要素技術開発
- 実用化技術開発

【備考】

\*1 NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ - FCV・HDV用燃料電池ロードマップより (DOE2030年目標値を参考として設定されている)

\*2 Hydrogen Council "Hydrogen Scaling up" 等に基づいた推計値

\*3 METI 水素・燃料電池戦略ロードマップ

\*4 FCCJ (燃料電池実用化推進協議会) が2015年公表のIEA "Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells" を参考に策定した目標台数 (2050年の目標である温室効果ガス排出量80%削減に貢献すべく設定した数値。大幅な技術進展を期待したシナリオでは600万台)

\*5 DOE Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications:2018 Update  
現在コストと2030年コスト予測値の比率、材料費と加工費とも同率で70%低減する前提、2050年までにDOE Ultimate targetを達成するための低減率として2035年以降の値を設定

\*6 試算の仮定 スタック仕様 125kW、300セル、電極面積250cm<sup>2</sup>、20日稼働、2直生産および生産数量 (台/月) よりカットタイムを試算

\*7 試算の仮定 電極面積250cm<sup>2</sup> 幅320×130で3稼働条件下で製造した場合、生産数量 (台/月) 短辺長より塗工速度を試算

\*8 IEA "Net Zero by 2050" における運輸部門の水素消費量の増加分から比率で推定した値

\*9 PIの適用先については、現時点で特定された生産技術のボトルネックから具体的に対応が想定される技術課題のみを記載

		2025年	2030年頃	2035年頃	2040年頃	
高圧水素*1 目録仕様2 高圧貯蔵率仕様	質量密度	6 wt%	10 wt%	-	15 wt%	
	体積密度	25 g-H <sub>2</sub> /L*2	28 g-H <sub>2</sub> /L*2	-	29 g-H <sub>2</sub> /L*2*3*4	
高圧水素*1 目録仕様2 低コスト仕様	コスト	14 万円/kg-H <sub>2</sub>	4 万円/kg-H <sub>2</sub>	-	2 万円/kg-H <sub>2</sub>	
	CFRP低減率 (2020年比)	-	15 wt%	35 wt%	-	
カク目録 炭素繊維強度*5	炭素繊維強度	-	5,900 MPa	-	7,100 MPa	
	材料物性目録 ライナ水素透過度	-	0.15 × 10 <sup>-10</sup> cm <sup>3</sup> ·cm/cm <sup>2</sup> /sec/cmHg @55°C・80.5MPa*6	(0.01 × 10 <sup>-10</sup> cm <sup>3</sup> ·cm/cm <sup>2</sup> /sec/cmHg @55°C・80.5MPa)*7	-	
液体水素 *1*8 (水素量≧70 kg)	質量密度	-	-	20~30 wt%*9	30~40 wt%*9	
貯蔵材料 システム*1	体積密度	-	-	35 g-H <sub>2</sub> /L	40 g-H <sub>2</sub> /L*10	
	コスト	2 日未満(現在)*11	-	5 日以上*11	7 日以上*11	
高圧水素貯蔵システム	高強度炭素繊維	低コスト + 高強度炭素繊維 (6 GPa級) の実用化技術開発	炭素系高強度繊維 (低コスト、かつ6~8 GPa級 &/or高弾性率) の実用化技術開発			
コスト削減 + 質量貯蔵密度向上 (目標仕様1)	革新材料	炭素繊維の高強度化 (6~8 GPa級 &/or高弾性率) やCNT等短繊維を活用した燃り系等の炭素系高強度繊維の研究	炭素系高強度繊維 (低コスト、かつ6~8 GPa級 &/or高弾性率) の実用化技術開発			
		高機能マトリックス材料 (エポキシ系)	炭素系高強度繊維の繊維強度発現率向上を可能とする、マトリックス樹脂物性および繊維⇄樹脂界面接着強度の最適設計の研究	繊維強度発現率の向上を実現する、マトリックス樹脂と高強度繊維との複合化による実用化技術開発		
革新カク構造・ 工法・材料	革新カク構造・ 工法・材料	炭素繊維使用量低減構造 → 新CFRP積層構造	カク径 (大型カク・コンフォーマルカク) に適したCFRP最低使用量設計をはじめとする積層構造最適化手法の確立			
		カク初期破壊強度のバラつき要因および疲労試験時の強度低下要因の特定とその抑制に繋がる構造・製造要件の解明				
		炭素繊維使用量低減構造 → 高効率成形方法	多給糸・フレイティング・ATP等による連続繊維積層技術の開発、熱可塑性樹脂を含む、新規マトリックス材の開発とセットで、	新規FRP積層方法および新規材料とセットでの実用化技術開発		
		非FW構造カク用高強度継手構造の開発	新コンセプト・分割成形・接合構造容器の開発	高圧容器の接合構造の実用化開発		
		型内樹脂充填、内圧成形技術、成形速度向上技術の開発		プレス成形や連続引抜成形など分割・接合構造容器にも対応可能な製造技術の開発、検査・保証の理論構築		
		ガスバリア構造 → 薄肉ライナー	薄肉ライナーを想定したガスバリア性に優れた高破断伸度材料の研究開発	薄肉ライナーカクの構造設計、生産技術開発および漏洩評価技術の確立		
		ライナー塗工成形向け、材料および生産技術開発 (現場重合・金属メッキなども含む)				
		ガスバリア構造 → ライナーレス	新樹脂開発と高負荷荷重を繰り返すFRP容器への適用に向けたガスバリア性の成立条件と原理立証研究 (新コンセプト立案)	CFRPのガスバリア理論の構築とCFRPの耐漏洩設計および、CFRP層のカク発生抑制機能を有するマトリックス樹脂の開発	ライナーレスカクのガス試験による実証	
		DX技術の活用	カク設計・製造時のDX技術開発 (シミュレーション・計測・PI連携)	カク設計・製造時のDX技術実証 (設計・製造のデジタル基盤の構築)		
		低コスト仕様カク (目標仕様2)	応力分担材の 低コスト化(炭素 繊維使用量の 大幅低減)	マルチマテリアル・マルチロードパス設計	金属材料と複合材の最適配置を前提としたマルチマテリアル構造およびマルチロードパスを活用した新規カク構造の研究	マルチロードパスを活用した新規カク構造の実証および安全基準の理論提案
カクシステム部品の最適化設計 (BOP: Balance of Plant 含む)	構造・材料・製造を考慮したカク搭載部品およびカクシステム部品の要素研究			BOPの設計構築確立およびそれに準ずる製造基本工に開く研究開発、リアルワールドを想定する検証実験		
実カクCFRP疲労現象観察技術	CFRP疲労現象の観察技術の確立					
規制等適正化 (目標仕様1,2共通)	耐久試験条件 等適正化に資 するカク損傷 のモデル化	検証試験 (シリーズ試験) の仮想試験技術の確立と残存寿命予測モデル	シリーズ試験の最適化 (パラレル化等) と実証仮想試験を活用したカク最適設計手法の実用化			
		シリーズ試験のモデル化と残存寿命予測モデルの確立	各種環境条件性能予測手法・仮想試験技術の確立			
		標準TP (テスト - 1) 試験法の確立		標準TP試験運用提案と普及化		
		ヘルモニタリング技術・運用と設計思想	カクの損傷状態や残存寿命判断を可能とするヘルモニタリング・検査データのデジタル連携技術の基本構築・フィードバック研究	実車カク (On/Offロード) を想定したSHM (Structural Health Monitoring) 技術確立および検査データをを用いたDX技術開発およびSHM利用を前提とした許容限界規定等適正化	カクの長期使用時のDX技術実証 (長期使用時のデジタル基盤構築)	
		カク強度のバラつきと破壊確率を考慮した最適安全率の定義	高圧容器のSHM技術を活用した、最適安全率の定義とそれを目指した理論体系の構築・許容損傷確率論を新たに導入	最適安全率の定義に関する国内外関係機関との合意および実運用時のハードウェア開発		
環境負荷低減	長寿命化	カクの長寿命化・利用限界判断	寿命・残留性能予測評価技術を活用した (FRP・循環素材) 高圧容器の長寿命化による環境負荷低減の実用化提案			
		タイプ4容器でのLBB (Leak Before Burst) 構造理論の構築と手法開発		LBB機能のタイプ4カクへの適用と標準化およびLBBが成立するカクに対する安全設定		
		修理・修復	修理・修復手法開発 (FRP・循環素材)	修理・修復技術を活用した長寿命カクの実用化提案		
長寿命化	自己修復・自動検知	カク用スマート材料 (自己修復・自動検知等) の基礎研究	カク利用環境下でのスマート材料 (自己修復・自動検知等) コンセプトの機能確認	スマート材料 (自己修復・自動検知等) のカク構造への適用		
		他用途展開	市場回収カクの他用途展開技術の導出	新規用途に耐え得るカク機能見極め技術の確立		

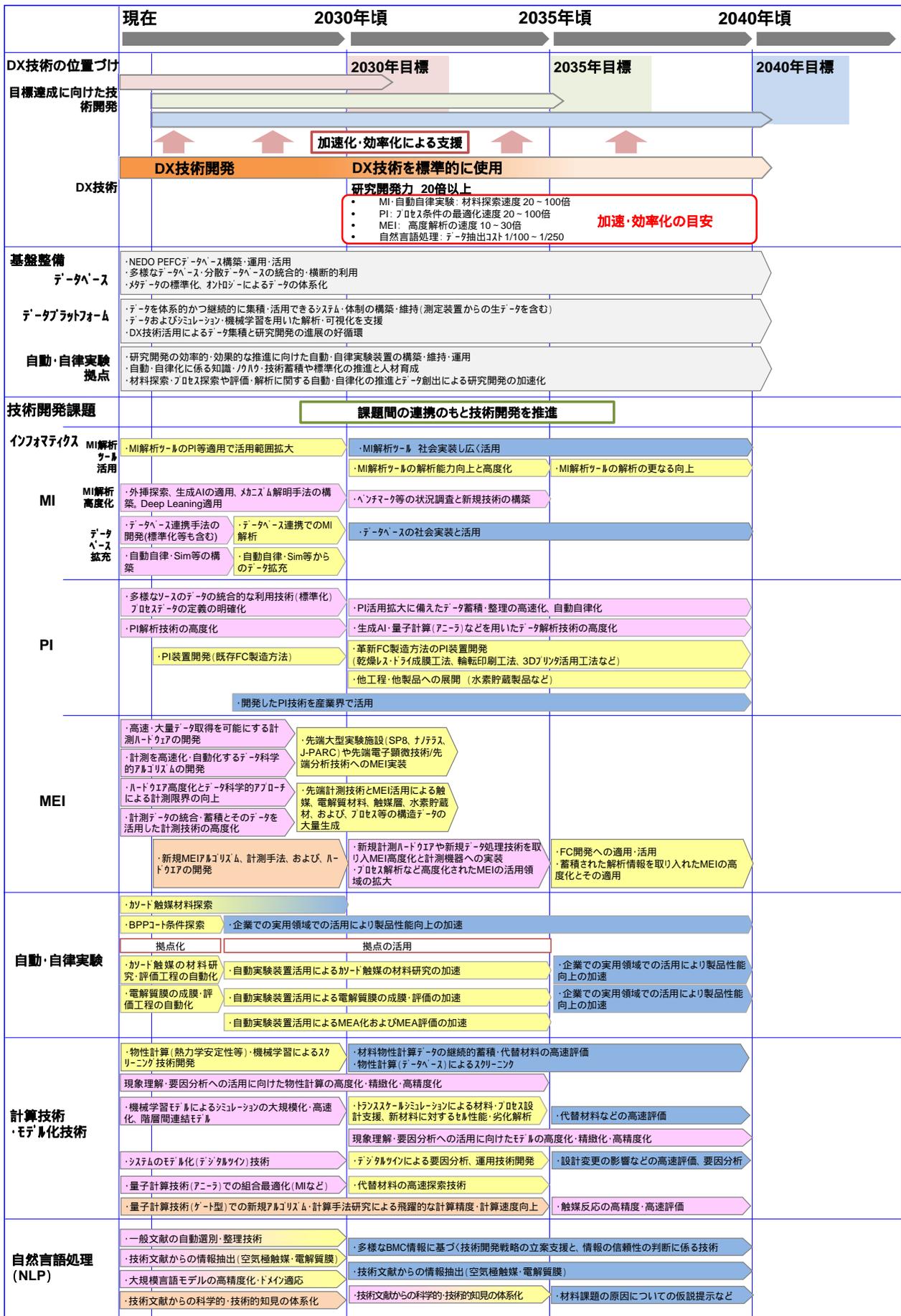
凡例 → 新規シーズ・新学理探索    → 新学理に基づくコンセプト・技術シーズ確立    → 要素技術開発    → 実用化技術開発

【備考】  
 \*1 水素貯蔵システムの目標値は、高圧水素貯蔵システムおよび水素貯蔵材料システムでは、補機を含まないものと定義し、液体水素貯蔵システムでは用途、仕様毎に定義する  
 \*2 水素貯蔵密度はL/D=5の容器の目標とする  
 \*3 超高強度のFRP用繊維、IoT、DX技術を活用した検査技術とそれによる貯蔵容器の安全率等規制緩和などもあわせて目指す想定  
 \*4 HDV・FCV以外の産業用アプリケーションでは、運用現場への水素供給手段の整備課題への対応が前提となる  
 \*5 8k以上の炭素繊維束としての強度、コスト10kgとの両立が狙い  
 \*6 試算前提条件 (ライナー): 長さ1,500mm、内径85mm、膜厚0.5mm  
 \*7 ライナー膜厚: ≤0.05mmを仮に設定  
 \*8 軽量化、小型化、利便性向上の共通技術として設定。航空機については解説書に検討結果を記載  
 \*9 質量貯蔵密度目標の検討においてはカク本体以外に断熱材、配管類、熱交換器、バルブ類の質量を考慮した (解説書参照)。それ以外の補機は含まず  
 \*10 船舶等の水素搭載量が300kg以上のアプリケーションについては45 g-H<sub>2</sub>/L  
 \*11 44トンのカク (70~90 kg-H<sub>2</sub>) の目標値。トラック用の目標は質量貯蔵密度よりバルブを優先、航空機用のバルブは未定。航空機用には高軽量性と両立する。経済・安全性を考慮した断熱構造が必要

		2025年	2030年頃	2035年頃	2040年頃	
高圧水素*1	質量密度	6 wt%	10 wt%	-	15 wt%	
	体積密度	25 g-H <sub>2</sub> /L*2	28 g-H <sub>2</sub> /L*2	-	29 g-H <sub>2</sub> /L*2*3*4	
	コスト	14 万円/kg-H <sub>2</sub>	4 万円/kg-H <sub>2</sub>	-	2 万円/kg-H <sub>2</sub>	
高圧水素*1	質量密度	-	-	4 wt%	4 wt%	
	体積密度	-	-	28 g-H <sub>2</sub> /L	29 g-H <sub>2</sub> /L	
	コスト	-	-	2 万円/kg-H <sub>2</sub>	(1 万円/kg-H <sub>2</sub> )	
タック目標	CFRP低減率(2025年比)	-	15 wt%	35 wt%	-	
材料物性目標	炭素繊維強度*5	-	5,900 MPa	-	7,100 MPa	
	タック水素透過度	-	0.15 × 10 <sup>-10</sup> cm <sup>3</sup> ·cm/cm <sup>2</sup> /sec/cmHg @55°C・80.5MPa*6	(0.01 × 10 <sup>-10</sup> cm <sup>3</sup> ·cm/cm <sup>2</sup> /sec/cmHg @55°C・80.5MPa)*7	-	
液体水素	質量密度	-	-	20~30 wt%*9	30~40 wt%*9	
	体積密度	-	-	35 g-H <sub>2</sub> /L	40 g-H <sub>2</sub> /L*10	
	コスト	2 日未満(現在)*11	-	5 日以上*11	7 日以上*11	
貯蔵材料システム*1	質量密度	-	-	-	50年 8 wt%以上	
	体積密度	-	-	-	70 g-H <sub>2</sub> /L以上@1 MPa以下*2	
高圧水素貯蔵システム	環境負荷低減	タンクからの連続炭素繊維回収技術	資源循環可能タンク構造・成形技術の研究およびCFRPを溶融溶解可能な熱可塑性樹脂に代表される貯蔵容器用マトリクス樹脂材料の開発	炭素繊維	資源循環可能タンクの開発 →水平・Tank/Tankリサイクル	
		CFRP製タックの資源循環技術	リステナール原料、低生産エネルギー・製造可能な原料を用いた革新炭素繊維の開発	マトリクス樹脂	リステナール原料、低生産エネルギー・製造可能な原料を用いた革新炭素繊維の実用化	
		GX(カーボンニュートラル)	マトリアルリサイクル可能、またはカーボンニュートラルなマトリクス樹脂の適用化研究、FRP機能発現とセットで	マトリアルリサイクル高強度繊維	マトリアルリサイクル可能、またはカーボンニュートラルなマトリクス樹脂の安定製造プロセスの確立	
	資源循環設計	資源循環設計	資源循環素材のリサイクル製造・設計のデジタル連携技術(リサイクルのDX化) 革新的CFRPの新資源循環システムの基礎研究	資源循環を可能とするタックDX技術開発	資源循環タックの統合型DX技術利用の実証(製造・長期使用・循環統合デジタル基盤構築)	
		ケミカルリサイクル可能、またはカーボンニュートラルな高強度繊維材料(無機/高分子)の基礎研究	ケミカルリサイクル可能、またはカーボンニュートラルな高強度繊維およびFRP向けマトリクス樹脂の開発およびFRPへの適用研究	ケミカルリサイクル可能、またはカーボンニュートラルな高強度繊維およびFRP向けマトリクス樹脂の実用化検証およびFRP複合材の安定製造プロセスの確立		
		水素充填時熱マネジメント	タンク内の蓄熱・放熱機能を実現する材料およびシステム部品の開発	タックシステムとしての、高速充填時タック内昇温抑制機構およびフレール温度低減機構の実用化開発・タック実証		
	利便性向上	水素St. コストの低減	タンク内の蓄熱・放熱機能を実現する材料およびシステム部品の開発	タンクシステムとしての、高速充填時タック内昇温抑制機構およびフレール温度低減機構の実用化開発・タック実証		
	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	タック試作、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	真空断熱(二重)構造の軽量化	CFRPを最大限活用したさらなる軽量化(Type5タックなど) > 40 wt%
		革新設計(構造・工法)搭載自由度向上	タンク構造⇔搭載側の優先要件整理	各種バリエーションの搭載に適した容器構造の研究	強度設計基準(軽量化、コスト削減)	安全率最適化に関する研究
真空断熱層熱流束解析			移動型タックの熱流体マネジメントの開発	輻射熱シールド冷却・蓄冷	材料の極低温強度・寿命保証に基づく革新構造・工法の研究	
断熱		支配的熱流束の定量解析、影響因子明確化	磁気冷凍機等をアトムの伝熱ハス・効率の研究	低熱伝導率の保持構造の開発	低入熱タックの開発	
		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		
熱マネジメント		蒸発抑制	液温成層化制御モデル 減圧沸騰、管内沸騰流、スロッシング制御モデル	気液2相混在・遷移状態での熱移動解析モデルの開発及び実験検証手法の研究	モデルオプティミズ化のための能動的熱制御手法の研究	モデルオプティミズ化の開発
		運用性	水素オイルワットの処理	無害化(海外連携も模索) / 一時貯蔵 / 電力への変換	モデルオプティミズ化の安全な処理技術の標準化(GTR, UNR)	
内部流体の挙動センシング・予測・制御		高精度液面計・液量計・流量計・ポンプ・バルブ等	液面レベル制御・満充填検知等の技術開発	高精度化・精度検証方法確立・実証	流体制御技術確立(ポンプ・バルブ等)	
		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	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	実機モデル、縮退モデル開発	
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、タックシステムの安全性評価法の研究開発	安全基準整備・液体水素貯蔵システム全体の標準化		
	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、タッ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	宇宙・航空・自動車連携による規制の合理化		
水素貯蔵材料システム*12	高圧インフラ群の設置	10~100 MPa級装置群の設置				
先端計測技術の構築	量子ビーム系を含む計測技術の高度化	自律実験・自動解析化				
データベース化とM/PIへの展開	各種水素化物物群のDB化	高圧挙動に関するDB化とM/PIへの展開				
材料探索と貯蔵技術としての確立	高密度水素化物物群に関する新規メカニズム・新学理の情報整理	高圧インフラ群を用いた材料合成	M/PIも取り入れた材料探索	貯蔵技術としての確立(貯蔵圧力1 MPa以下)		
容器・プロセスの技術確立				形状自由度の高い容器開発(炉熱交換器) 充填プロセス確立		

凡例: 新規メカニズム・新学理探索 (青矢) 新学理に基づくコンセプト・技術メカニズム確立 (黄矢) 要素技術開発 (緑矢) 実用化技術開発 (赤矢)

【備考】  
 \*1 水素貯蔵システムの目標値は、高圧水素貯蔵システムおよび水素貯蔵材料システムでは、補機を含まないものと定義し、液体水素貯蔵システムでは用途、仕様毎に定義する  
 \*2 水素貯蔵密度はL/D=5の容器の目標とする  
 \*3 超高強度のFRP用繊維、IoT、DX技術を活用した検査技術とそれによる貯蔵容器の安全率等規制緩和などもあわせて目指す想定  
 \*4 HDV・FCV以外の産業用アプリケーションでは、運用現場への水素供給手段の整備課題への対応が前提となる  
 \*5 8k以上の炭素繊維束としての強度、コスト10kg/kgとの両立が狙い  
 \*6 試算前提条件(タイプ-)：長さ1,500mm、内径85mm、膜厚0.5mm  
 \*7 ライナー膜厚：≤0.05mmを仮値に設定  
 \*8 軽量化、小型化、利便性向上の共通技術として設定。航空機については解説書に検討結果を記載  
 \*9 質量貯蔵密度目標の検討においてはタック本体以外に断熱材、配管類、熱交換器、バルブ類の質量を考慮した(解説書参照)、それ以外の補機は含まず  
 \*10 船舶等の水素搭載量が300 kg以上のアプリケーションについては45 g-H<sub>2</sub>/L  
 \*11 44トントック用タック(70~90 kg-H<sub>2</sub>)の目標値、トック用の目標は質量貯蔵密度よりエネルギー密度を優先、航空機用のエネルギー密度目標は未定、航空機用には高軽量性と両立する、経済・安全性を考慮した断熱構造が必要  
 \*12 2022年度FCV・HDV用燃料電池技術開発ロードマップ「水素貯蔵材料」情報



凡例 DX技術の新規シナジー・基礎的技術の研究開発 DX技術のシナジー開発 要素技術開発でのDX技術の開発・応用 実用化技術開発でのDX技術の開発・応用

【備考】