

発表No.A-14

燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題
解決型産学官連携研究開発事業／
燃料電池技術開発ロードマップに関する検討

発表者名 米田雅一

団体名 みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社

発表日 2022年7月28日

連絡先：

みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社

サイエンスソリューション部 米田

E-mail : masakazu.yoneda@mizuho-rt.co.jp

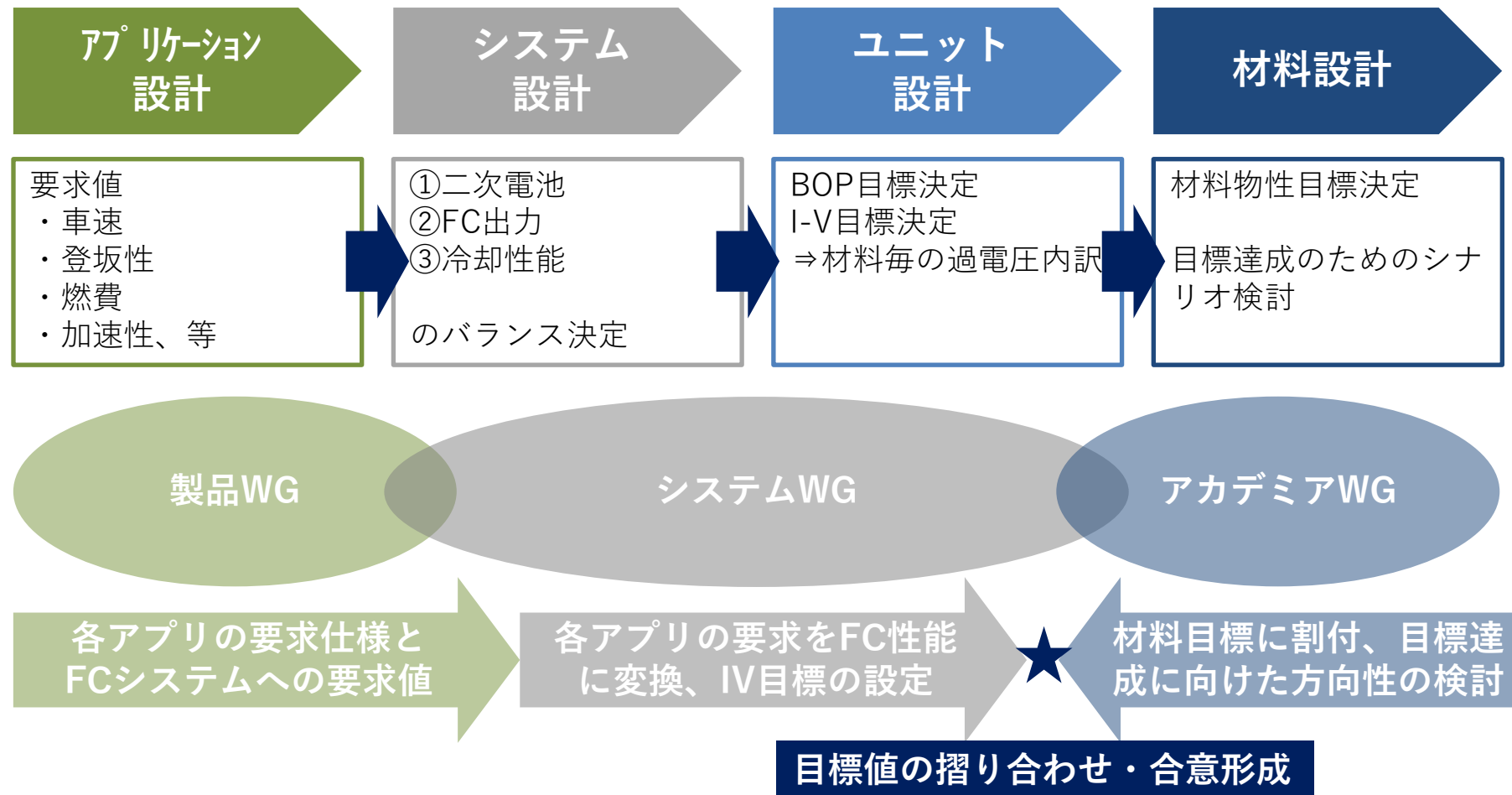
TEL : 03-5281-5422

1. 調査の背景・目的

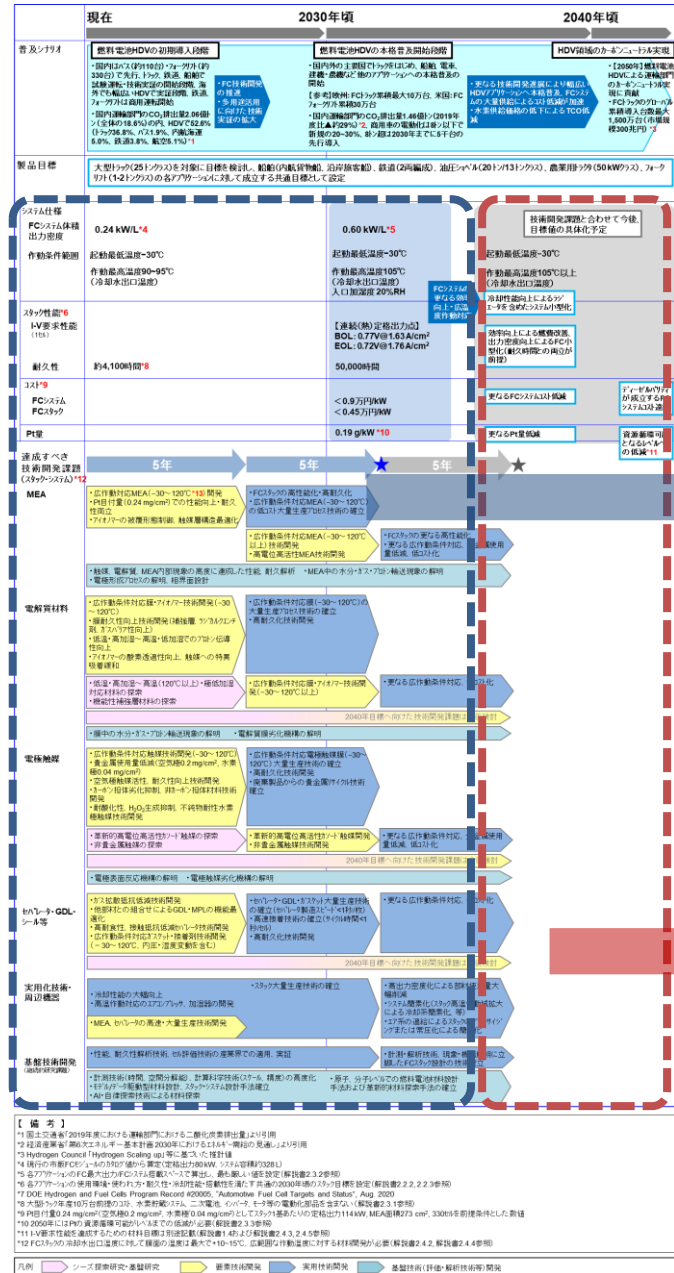
- 燃料電池の本格普及を具現化するために取り組むべき技術的課題を明確化するとともに時系列に整理した「NEDO燃料電池技術開発ロードマップ」は2017年に現行バージョンを公表してから5年が経過
- 近年、**世界的なSDGsの広がり、主要各国のカーボンニュートラル宣言をはじめとした社会環境の変化が急速に進む**なかで、移動体の変革がその重要な1つとなっており、2017年ロードマップに明示した乗用車に加え、変革すべき移動体のカテゴリーが急速に広範囲化
- 世界各国でHD（Heavy Duty）用のパワートレインとして燃料電池が注目され、その**代表的なカテゴリーがCO₂排出量が多いトラックへの適用**であり、さらに**鉄道、船舶、フォークリフト、重機、建機**といった用途への適用が注目されつつある状況
- 燃料電池の大型・商用アプリケーションへの適用において重要となる広作動温度への対応や耐久性向上に対し、産業界や大学・研究機関と議論を重ね、2030年頃の本格普及開始時に要求される**①HDVの各アプリケーションの製品目標、②それらの製品要求を満足する共通目標となるFC性能、③スタックを構成する材料目標と開発の方向性**へブレークダウンし、**新たにHDV用燃料電池ロードマップを策定**

2. 調査の内容・成果（調査方法：産学連携による目標検討）

- 今回、HDV燃料電池ロードマップを策定するために、**産業界（製品・システム）とアカデミアが糾合して議論を行うWGを組成**、WGや委員会を通じて技術開発の方向性を検討
- 2030年頃（現在から約10年後）の目標値と技術開発課題を具体化し、**ロードマップと目標の考え方、前提条件等を明示した「解説書」を2022/3/18に公開** (https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101524.html)



2. 調査の内容・成果 (調査成果：ロードマップおよび解説書)



【ロードマップ本体】

「普及シナリオ」 + 「製品目標」 + 「達成すべき技術開発課題」を時間軸に対して設定

【解説書 (目次)】

目次

1. HDV用燃料電池ロードマップの概要	1
1.1 ロードマップ策定の背景	1
1.2 製品目標	2
1.3 FCシステム目標	3
1.4 材料目標	5
2. 目標の考え方と達成のための技術課題	7
2.1 各HDアプリケーションの現状の課題と目標	7
2.1.1 各アプリケーションを取り巻く環境	7
2.1.2 使用環境	9
2.1.3 最大出力	9
2.1.4 耐久時間	10
2.1.5 搭載性	10
2.1.6 その他補足	11
2.2 要求I-V特性の検討	13
2.2.1 進め方	13
2.2.2 大型トラック	13
2.2.3 他のアプリケーションのシステム成立の検討	19
2.3 FCシステムとしての技術目標	32
2.3.1 コスト	32
2.3.2 FC体積出力密度	34
2.3.3 Pt量 (資源循環と将来目標@2050年)	36
2.3.4 CN対応に向けた水素FC以外の取り組み状況	38
2.4 材料目標	41
2.4.1 材料目標の考え方	41
2.4.2 要求I-V特性を満たすための材料初期物性の検討	41
2.4.3 主要材料の物性目標	48
2.4.4 現状の課題と目標達成に向けた開発の方向性	50
2.4.5 主要材料コストの目安	54
2.5 材料評価の考え方	57

【今年度の成果】

- 2030年頃のHDV燃料電池の目標・材料開発の方向性 (技術開発課題) ・評価方法の方針の策定
- ロードマップの目標とその根拠・前提条件、考え方を「解説書」を作成

【今後の計画】

- 2040年頃のHDV燃料電池およびFCVの目標・材料開発の方向性 (技術開発課題) の策定
- 水素貯蔵システム・生産技術の目標設定、開発の方向性 (技術開発課題) の策定

2. 調査の内容・成果（調査成果：製品要求仕様）

- 各アプリケーションでシステム最大出力、耐久時間、システムの搭載容積や温度・大気圧など使用環境が異なり、それらは燃料電池ユニットに求められる

アプリケーション	システム最大出力 [kW]	耐久時間 [h]※	体積 [L]	使用外気温 [°C]	使用高度 [m]	保管温度 [°C]
大型トラック 25トンクラス 44トンクラス	303 461	50,000	502	-30～50°C	0～5000 3,000～5,000は 出力減を許容し稼働	-30～50
内航貨物船	600	60,000	18,000	-25～50°C	0～20	-25～50
沿岸旅客船	480	30,000	7,000	-25～50°C	0～20	-25～50
鉄道 2両編成	400	50,000	1,300	-30～45°C	0～1,375	-10～40
油圧ショベル 20トンクラス 13トンクラス	120 70	10,000	1,300 400	-30～50°C	0～5,000 高地においては 出力減を許容し稼働	-30～50
フォークリフト 1-2トンクラス	30	20,000	339	-20～40°C	0～500	-30～80
農業用トラクタ 50kWクラス	51.5	10,000	125	-30～45°C	0～2,000	-30～45

※各アプリで耐久モードは異なる

2. 調査の内容・成果（調査成果：FCシステム目標）

- 前提：市場規模が最も大きく、かつFC出力変動が多く耐久が厳しいと想定される大型トラック（25トンクラス）を対象に目標を検討し、船舶、鉄道、油圧ショベル、農業用トラクタ、フォークリフト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

項目	現在	2030年頃	2030年頃以降	
システム仕様	FCシステム 体積出力密度	0.24kW/L ^{※4}	0.60kW/L ^{※5}	—
	作動条件範囲	起動最低温度 - 30°C 作動最高温度 90~95°C (冷却水出口温度)	起動最低温度 - 30°C 作動最高温度 105°C (冷却水出口温度) 入口加湿度 20%RH	起動最低温度 - 30°C 作動最高温度 105°C以上 (冷却水出口温度)
スタック性能 ^{※6}	I-V要求性能	—	【連続（熱）定格出力点】 BOL：0.77V@1.63 A/cm ² EOL：0.72V@1.76 A/cm ²	冷却性能向上によるシステム小型化 効率向上による燃費改善、出力密度向上によるFC小型化（耐久時間との両立が前提）
	耐久性	約4,100時間 ^{※7}	50,000時間	
コスト ^{※8}	FCシステム	—	0.9万円/kW	更なるコスト低減⇒
	FCスタック	—	0.45万円/kW	ディーゼルパリティが成立するコスト達成
Pt量	—	0.19g/kW ^{※9}	更なるPt量低減⇒資源循環可能となるレベルへの低減 ^{※10}	

※4 現行の市販FCモジュールのカタログ値から算定（定格出力80 kW、システム容積約328 L）

※5 各アプリケーションのFC最大出力/FCシステム搭載スペースで算出し、最も厳しい値を設定（解説書2.3.2参照）

※6 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）

※7 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record #20005, "Automotive Fuel Cell Targets and Status", Aug. 2020

※8 大型トラック年産10万台前提のコスト、水素貯蔵システム、2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）






※9 Pt目付量0.24mg/cm²（空気極0.2mg/cm²、水素極0.04mg/cm²）としてスタック1基あたりの定格出力114 kW、MEA面積273cm²、330セルを前提条件

※10 2050年にはPtの資源循環が可能なレベルまでの低減が必要（解説書2.3.3参照）

具体的な目標設定が今後の課題

2. 調査の内容・成果（調査成果：欧米の目標との比較【参考】）

- 幅広いアプリケーションに対する共通目標として海外と比べて高い性能・耐久目標を設定

	NEDO (2030年頃) 	DOE※1 (2030) 	DOE※1 (Ultimate) 	M2FCT※2 (2025) 	IMMORTAL※3 
対象アプリケーション	大型トラック・船舶・鉄道・建機・農機・フォークリフト	大型トラック	大型トラック	大型トラック	大型トラック
冷却出口最高温度 °C	105	—	—	90	—
膜面最高温度 °C	～120	—	—	—	—
動作点I-V	(EOL)0.72V @1.77A/cm ²	0.769V @1.09A/cm ²	0.769V @1.09A/cm ²	(EOL)0.7V @1.07A/cm ²	(EOL)0.675V @1.2A/cm ²
Pt目付量 [mg/cm ²]	0.24	0.3	0.25	0.3	—
Pt量 [g/kW]	0.19	0.357	0.298	0.4	—
耐久時間 [hr]	50,000	25,000	30,000	25,000 (30,000@'30)	30,000

※1: DOE Program Record #19006, “Hydrogen Class 8 Long Haul Truck Targets”, Aug. 2019

※2: DOE Annual Merit Review 2021, “M2FCT: Million Mile Fuel Cell Truck Consortium” (Project ID: FC339)

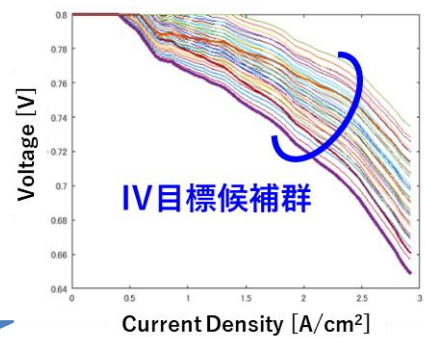
※3: IMMORTAL Website, https://immortal-fuelcell.eu/index.php/about-immortal/overview#_ftn3

2. 調査の内容・成果（調査成果：要求I-V目標）

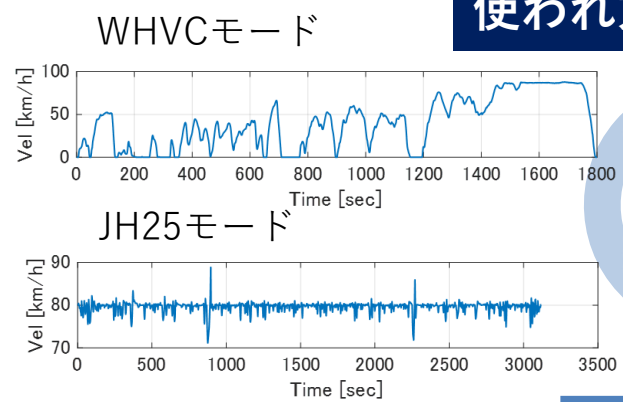
■ 多様なアプリケーションの要求を包括するため、①25トントラックを対象として以下のプロセスでI-V目標を仮設定、②トラックのI-V目標をもとに他アプリの耐久運転モードで検証

I-V目標の候補

材料目標への繋がりを考え、**活性指標、オーム抵抗、ガス拡散抵抗**のパラメータの組合せでIV候補を表現



使われ方に応じたFC劣化を予測

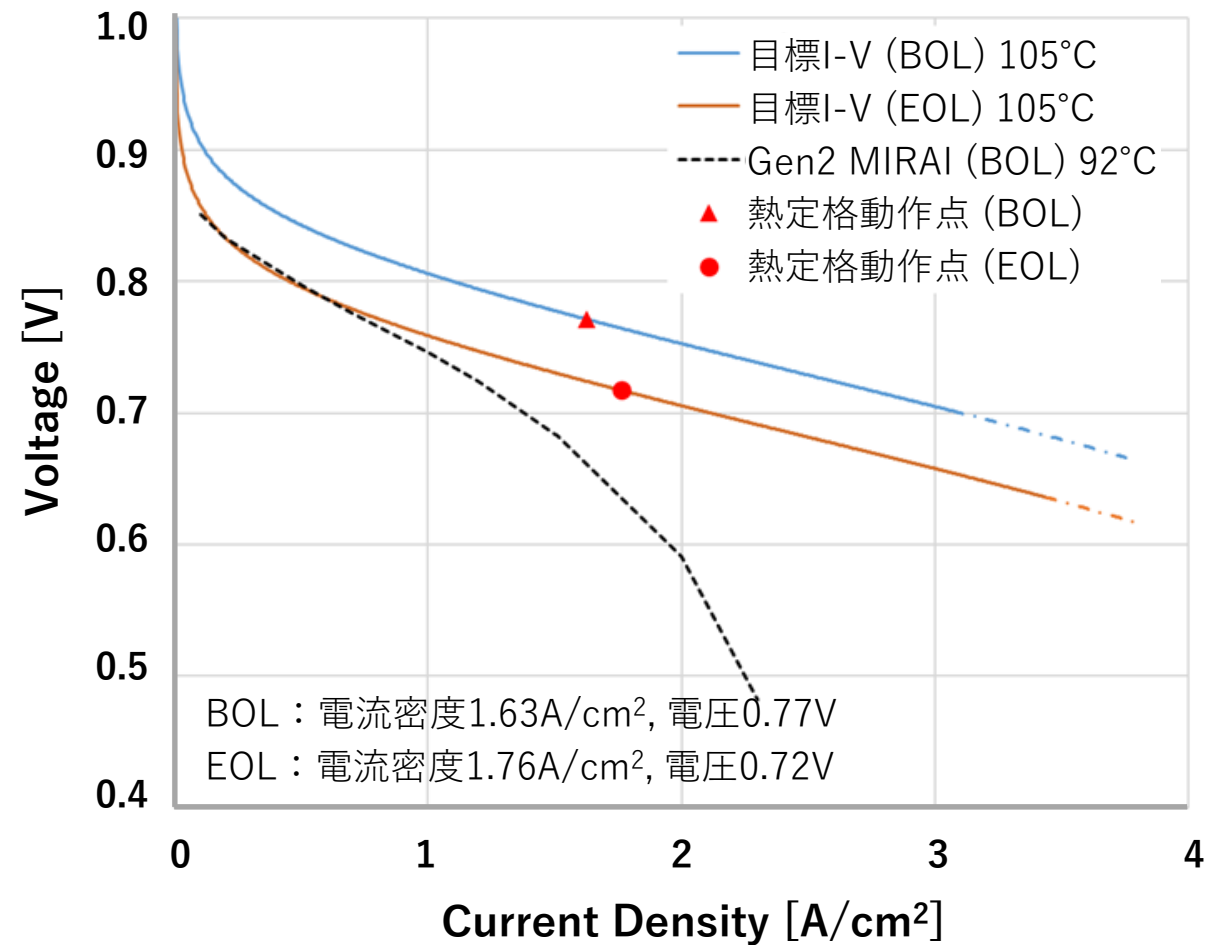


耐久時間 (5万時間) 繰り返し

FCシステムモデル

- ・性能
- ・劣化
- ・電力制御システム

耐久後の動力性能要件判定 (OK/NG)



2. 調査の内容・成果（調査成果：主要材料目標）

★：今後設定

★：今後測定

要素	項目		2030年頃の目標値		実測値			
			物性値	仕様・特性値	Gen2 MIRAI	一般材料		
空気極触媒 (層)	PGM目付量 (mg/cm ²)			0.20	0.17	0.20	田中貴金属 Pt/C TEC10V30E	
	ECSA (m ² /g)		60		48	61		
	質量活性 (A/g) @0.9V	at100°C、100%RH	1810		★	★		
		at80°C、100%RH	1740		500	95		
	触媒層厚さ(μm)			6.0	9.1	7.4		
触媒層ガス拡散抵抗 (s/m)		at 80°C, 80%RH	10		9.1	18.1		
電 解 質	膜	膜厚 (μm)			8.0	8.5	25	Chemours Nafion™ NR211
		H ⁺ 伝導率 (S/cm)	at 120°C, 30%RH	0.032		0.018	0.016	
			at 100°C, 40%RH	0.041		0.027	0.024	
			at 80°C, 80%RH	0.12		0.106	0.086	
			at -30°C, 0%RH	★		★	★	
		水素透過性			★	★	★	
	酸素透過性			★	★	★		
	機械強度		(暫定) 引張最大強度 (MPa) at 23°C, 50%RH		★		50	30
			(暫定) 引張破断伸び (%) at 23°C, 50%RH		★		★	250
	アイ オ ノ マ	H ⁺ 伝導率(S/cm)	at 120°C, 30%RH	0.032		—	★	Chemours Nafion™ D2020
at 100°C, 40%RH			0.041		—	★		
at 80°C, 80%RH			0.12		—	★		
空気極触媒層抵抗(Ωcm ²)		at 120°C, 30%RH		0.13	0.77	0.37		
		at 100°C, 40%RH		0.10	0.41	0.24		
		at 80°C, 80%RH		0.035	0.10	0.060		
GDL・流路・ セパレータ	GDL面積抵抗 (Ωcm ²)			0.0010	★	<0.01	SGL CARBON SIGRACET® 22BB	
	流路・GDL (分子拡散抵抗) (s/m) at 80°C, 80%RH			18	58.3 (並行流路)	60.8 (並行流路)		
	GDL/セパ、セパ/セパ等：接触抵抗合計 (Ωcm ²)			0.0065	★	—		
	GDL機械強度物性		(暫定) 圧縮弾性率		★	★		0.9~1.5
(暫定) 曲げ剛性 (N/mm)			★	★				

2. 調査の内容・成果（調査成果：製品目標達成に向けた技術開発課題の整理①）

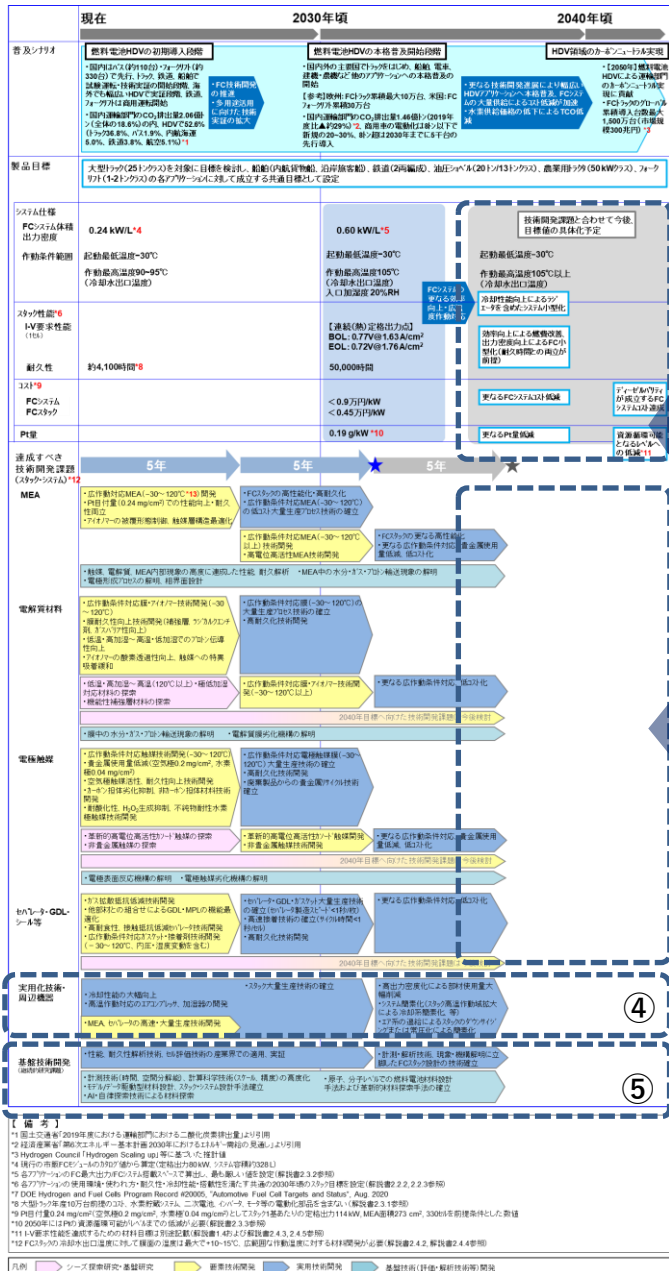
- 2030年頃の製品目標達成に向けた技術開発課題（スタック構成部材・実用化技術）を整理
- 表現方法は従来のロードマップから変更、製品目標の2030年頃の達成時期および2030頃以降の方向性に合わせて、「シーズ探索・基盤研究（桃色）」から「要素技術開発（黄色）」、「実用技術開発（青色）」に時系列的に繋がっていることを明確化する表現

部材・部品	直近5年間	2030年頃	2030年以降
MEA	<ul style="list-style-type: none"> ・広作動対応MEA（-30～120°C）開発 ・Pt目付量（0.24 mg/cm²）での性能向上・耐久性両立 ・アイオノマーの被覆形態制御、触媒層構造最適化 	<ul style="list-style-type: none"> ・FCスタックの高性能化・高耐久化 ・広作動条件対応MEA（-30～120°C）の低コスト大量生産プロセス技術の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・FCスタックの更なる高性能化 ・更なる広作動条件対応、貴金属使用量低減、低コスト化
		<ul style="list-style-type: none"> ・広作動条件対応MEA（-30～120°C以上）技術開発 ・高電位高活性MEA技術開発 	
	<ul style="list-style-type: none"> ・触媒、電解質、MEA内部現象の高度に連成した性能、耐久解析 ・電極形成プロセスの解明、相界面設計 		
電解質材料	<ul style="list-style-type: none"> ・広作動条件対応膜・アイオノマー技術開発（-30～120°C） ・膜耐久性向上技術開発（補強層、レジカルエントラップ剤、ガスバリア性向上） ・低温・高加湿～高温・低加湿でのプロトン伝導性向上 ・アイオノマーの酸素透過性向上、触媒への特異吸着緩和 	<ul style="list-style-type: none"> ・広作動条件対応膜（-30～120°C）の大量生産プロセス技術の確立 ・高耐久化技術開発 	<div style="border: 2px solid red; padding: 5px;"> 40年目標に向けた各部材の技術開発課題の具体化、マイルストーンについては今後の検討課題 </div>
	<ul style="list-style-type: none"> ・低温・高加湿～高温（120°C以上）・極低加湿対応材料の探索 ・機能性補強層材料の探索 	<ul style="list-style-type: none"> ・広作動条件対応膜・アイオノマー技術開発（-30～120°C以上） 	
	2040年目標へ向けた技術開発課題は今後検討		
	<ul style="list-style-type: none"> ・膜中の水分・ガス・プロトン輸送現象の解明 		<ul style="list-style-type: none"> ・電解質膜劣化機構の解明

2. 調査の内容・成果（調査成果：製品目標達成に向けた技術開発課題の整理②）

部材・部品	直近5年間	2030年頃	2030年以降
電極触媒	<ul style="list-style-type: none"> ・広作動条件対応触媒開発（-30～120℃） ・貴金属使用量低減（空気極0.2 mg/cm², 水素極0.04 mg/cm²） ・空気極触媒活性、耐久性向上技術開発 ・カーボン担体劣化抑制、非カーボン担体材料技術開発 ・耐酸化性、H₂O₂生成抑制、不純物耐性水素極触媒技術開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・広作動条件対応電極触媒膜（-30～120℃）大量生産技術の確立 ・高耐久化技術開発 ・廃棄製品からの貴金属リサイクル技術確立 	
	<ul style="list-style-type: none"> ・革新的高電位高活性カーボ触媒の探索 ・非貴金属触媒の探索 	<ul style="list-style-type: none"> ・革新的高電位高活性カーボ触媒開発 ・非貴金属触媒技術開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・更なる広作動条件対応、貴金属使用量低減、低コスト化
	2040年目標に向けた技術開発課題は今後検討		
	<ul style="list-style-type: none"> ・電極表面反応機構の解明 ・電極触媒劣化機構の解明 		
セパレータ・GDL・シール等	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス拡散抵抗低減技術開発 ・他部材との組合せによるGDL・MPLの機能最適化 ・高耐食性、接触抵抗低減セパレータ技術開発 ・広作動条件対応ガスケット・接着剤技術開発（-30～120℃、内圧・湿度変動を含む） 	<ul style="list-style-type: none"> ・セパレータ・GDL・ガスケット大量生産技術の確立（セパレータ製造スピード<1秒/枚） ・高速接着技術の確立（サイクル時間<1秒/セル） ・高耐久化技術開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・更なる広作動条件対応、低コスト化
	2040年目標に向けた技術開発課題は今後検討		
実用化技術・周辺機器	<ul style="list-style-type: none"> ・冷却性能の大幅向上 ・高温作動対応のエアコンプレッサ、加湿器の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・スタック大量生産技術の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・高出力密度化による部材使用量大幅削減 ・システム簡素化（スタック高温作動域拡大による冷却系簡素化、等） ・I7系の過給によるスタックのダウンサイジングまたは常圧化による簡素化
基盤技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・性能、耐久性解析技術、セパレータ評価技術の産業界での適用、実証 		<ul style="list-style-type: none"> ・計測・解析技術、現象・機構解明に立脚したFCスタック設計の技術確立
	<ul style="list-style-type: none"> ・計測技術（時間、空間分解能）、計算科学技術（スケール、精度）の高度化 ・モデル/データ駆動型材料設計、スタック・システム設計手法確立 ・AI・自律探索技術による材料探索 		<ul style="list-style-type: none"> ・原子、分子レベルでの燃料電池材料設計手法および革新的材料探索手法の確立

3. 今後の見通しについて



- 運輸部門のCN実現に向けて、HDV用燃料電池の40年目標の具体化（**ディーゼルパリティ想定等**）と技術開発課題（**従来技術の延長上でない達成シナリオ**）、水素貯蔵技術（**貯蔵密度向上**）、生産技術（**大量生産対応・低コスト化**）に向けたロードマップアップデートを実施
- FCVについても**2017年公表版から2040年目標の見直しを中心にアップデート**

①2040年頃のFCシステム目標

②2030年・2040年頃の水素貯蔵システム目標（追加）

③2040年目標の達成に向けたFC技術開発課題の具体化、材料目標の設定

④製造速度目標・生産技術課題（追加）

⑤基盤技術開発（DX技術、分析・解析、評価方法）

⑥水素貯蔵技術（高圧水素、液体水素、水素貯蔵材料）の開発課題の具体化（追加）