

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（解説書） -

2025 年 2 月

はじめに

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」）では、1980 年の創立以来、水素・燃料電池に関する技術開発に取り組んできました。基盤技術開発から各種実証研究、基準・規格作りなどの総合的な取り組みの成果もあり、我が国は 2009 年に家庭用燃料電池「エネファーム」を、2014 年に燃料電池自動車を先駆けて市場に導入するなど、水素・燃料電池分野で世界をリードしてきました。

昨今世界各国でカーボンニュートラルの実現に向けた動きが加速する中、水素・燃料電池に対する期待が急速に高まっています。同時に、本分野の技術開発や事業展開が加速度的に進展し、競争が激しさを増しています。このような状況下、我が国が引き続き本分野をけん引し、カーボンニュートラルの実現に貢献していくためには、中長期的なビジョンを関係者間で共有し、戦略的かつ効率的に取り組むを進めていくことが必要不可欠です。

NEDO は 2005 年から、産学官が長期的視野を共有して技術開発に取り組むために、燃料電池・水素技術開発ロードマップを公開してきました。今回の改定において、FCV・HDV 用燃料電池ロードマップに関しては、2035 年頃に達成すべき大型・商用モビリティ（HDV）用および乗用車（FCV）用燃料電池の目標を新たに設定し、この目標を達成するために取り組むべき技術開発課題をとりまとめました。（2021 年度に 2030 年目標、2022 年度に 2040 年目標を策定、2023 年度に 2035 年 HDV 目標、2024 年度に 2035 年 FCV 目標を策定）

本ロードマップで示す目標は海外と比べても野心的なものとなっています。一昨年度、改定した 2040 年頃の目標は極めて挑戦的であり、この達成のためには非連続な革新的イノベーションが必要です。今回の 2035 年頃の目標はそれまでの中間目標として設定し、ディーゼル／ガソリンパリティの達成に繋げていくために、今後、取り組むべき新たな課題として整理しました。これまで以上に長期的な視点に基づく産学官一体となった取り組みが求められるとともに、材料化学や機械工学、情報科学などの多様な分野からの新規参入、若手の人材育成が重要となります。本ロードマップが今後の取り組みに向けた議論の基礎となり、また異分野、異業種、若手の技術者・研究者が関心を持つきっかけとなることを願っております。

最後に、本ロードマップの作成にあたり、企業や研究機関、大学など、非常に多くの機関の方々のご協力を賜りました。この場をお借りして、厚くお礼を申し上げます。

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）
水素・アンモニア部

目次

1. FCV・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 燃料電池自動車の産業としての重要性和普及シナリオ	2
1.2.1 産業としての重要性	2
1.2.2 将来のモビリティ社会像	4
1.2.3 将来の車載用 FC の市場規模と普及シナリオ	6
1.3 技術目標	9
1.3.1 製品目標	9
1.3.2 FC システム目標	11
(1) 要求 I-V 特性 (BOL/EOL)	11
(2) その他 FC システム/スタックとしての技術目標	13
1.3.3 FC 材料目標	13
1.3.4 FC 生産技術目標	16
1.3.5 水素貯蔵システム目標	17
1.3.6 DX 技術目標	18
2. 目標の考え方と達成のための技術課題	19
2.1 各アプリケーションの現状の課題と目標	19
2.1.1 各アプリケーションを取り巻く環境	19
(1) 2030 年頃の市場規模	19
(2) 各アプリケーションに対して海外を含む 2030 年頃に適用が予測される規制	20
2.1.2 使用環境	20
2.1.3 最大出力	21
2.1.4 耐久時間	21
2.1.5 FC システム搭載性	21
2.1.6 貯蔵システム搭載性	22
2.1.7 航続距離または連続運転時間	23
2.1.8 その他補足	23
(1) 特殊環境	23
(2) 氷点下起動要件	24
(3) 水素貯蔵方法を考慮した場合の航続距離または連続運転時間	24
2.2 要求 I-V 特性の検討	27
2.2.1 2030 年頃の目標設定の進め方	27
2.2.2 大型トラック	27
(1) 大型トラックの製品要件とシステム構成	27
(2) 要求 I-V 特性の導出	28
(3) 動力性能要件	29
(4) 計算手順	30

(5) 要求 I-V 特性	30
(6) 今後の課題	32
2.2.3 他のアプリケーションのシステム成立の検討	33
(1) 各アプリケーションのシステム構成	33
(2) 各アプリケーションの耐久条件	34
(3) 耐久成立性の検討結果	37
(4) 各アプリケーションの使われ方	37
2.2.4 2040 年目標	40
(1) 2040 年頃の目標設定の考え方	40
(2) 計算前提	40
(3) 計算方法	41
(4) ギャップ把握とケーススタディ	41
(5) 結果：2040 年頃の目標 I-V 特性	43
2.2.5 2035 年目標	45
(1) 2035 年の HDV 目標設定の考え方	45
(2) 計算前提	45
(3) 計算方法	46
(4) 結果：2035 年の目標 I-V 特性	46
2.2.6 2035 年 FCV 目標	49
(1) 目標設定の考え方	49
(2) 計算前提	49
(3) 計算方法	50
(4) 結果	50
2.3 FC システムとしての技術目標	51
2.3.1 コスト	51
2.3.2 FC 体積出力密度	58
2.3.3 Pt 量（資源循環と将来目標）	60
2.3.4 CN 対応に向けた水素 FC 以外の取り組み状況	62
(1) 水素エンジン	62
(2) e-Fuel	63
(3) 2 次電池（バッテリー）	63
2.4 水素貯蔵システムとしての技術目標	63
2.4.1 高圧水素貯蔵	63
2.4.2 液体水素貯蔵	66
2.4.3 水素貯蔵材料システム	73
2.5 FC 材料目標	77
2.5.1 材料目標の考え方	77
(1) 2030 年頃の目標	77
(2) 2035 年頃の目標	77

(3) 2040 年頃の目標.....	78
2.5.2 材料初期物性検討のためのシミュレーションモデル.....	78
(1) 電解質のプロトン伝導率.....	79
(2) 空気極流路/GDL ガス輸送特性.....	80
(3) 空気極触媒層ガス輸送特性.....	80
(4) 空気極触媒活性.....	81
2.5.3 材料物性目標の検討.....	81
(1) 2030 年頃の目標.....	81
(2) 2035 年頃の目標.....	88
(3) 2040 年頃の目標.....	94
2.5.4 主要材料コストの見通し.....	102
2.5.5 材料評価の考え方.....	103
(1) 性能耐久評価.....	105
(2) 電解質膜耐久評価.....	107
2.6 FC 材料開発の方向性.....	109
2.6.1 PFAS 規制.....	110
2.6.2 2030 年頃に向けた材料開発.....	111
(1) 電極触媒.....	111
(2) 電解質材料.....	112
(3) ガス拡散電極.....	113
(4) MEA.....	114
2.6.3 2035 年頃に向けた材料開発.....	114
(1) 電極触媒.....	114
(2) 電解質材料.....	115
(3) ガス拡散電極.....	117
(4) MEA.....	117
(5) シール材料.....	118
(6) セパレータ・表面処理.....	119
2.6.4 2040 年頃に向けた材料開発.....	119
(1) 材料開発の方向性の考え方.....	119
(2) 材料開発の加速手段や取り組み方法.....	120
(3) カソード触媒材料.....	121
(4) 電解質膜材料.....	124
(5) 他の材料・部材.....	126
2.6.5 評価・解析技術.....	129
(1) 材料・プロセス探索加速のための DX 技術.....	129
(2) 現象・機構解明（高度解析）.....	131
(3) 現象・機構解明（計算科学）.....	137
(4) ロードマップ目標に即した MEA 評価手法の整備.....	147

2.6.6 人材育成	147
2.7 FC 生産技術	151
2.7.1 生産能力の推移予測とライン原単位の考え方	151
2.7.2 生産速度の目標とタクトタイムの考え方	153
2.7.3 スタックコスト目標 材料コストと加工費	153
2.7.4 優先開発工程と工程進化・革新方針	156
2.7.5 生産技術課題	162
(1) 触媒調合塗工乾燥工程 MPL 調合塗工乾燥工程	162
(2) MEA 化・セル化工程	163
(3) バイポーラー流路形成工程	164
(4) 表面処理	165
(5) エージング	165
(6) 品質検査	166
2.8 水素貯蔵技術	168
2.8.1 技術開発課題 (高圧水素)	168
(1) コスト低減 + 質量貯蔵密度向上	168
(2) 低コスト仕様タンク	169
(3) 安全率・認証試験条件等適正化	170
(4) 環境負荷低減	173
(5) 利便性向上	174
(6) タンクパスポートへの将来対応	175
2.8.2 技術開発課題 (液体水素)	175
(1) 運用面の課題	176
(2) 応用面の課題	178
2.8.3 技術開発課題 (水素貯蔵材料システム)	180
2.9 DX 技術	181
2.9.1 目標設定について	182
2.9.2 DX 推進に向けた基盤	183
(1) データベース	183
(2) データプラットフォーム	184
(3) 自動・自律実験拠点	184
2.9.3 インフォマティクス	185
(1) MI (マテリアルズ・インフォマティクス)	185
(2) PI (プロセス・インフォマティクス)	187
(3) MEI (計測インフォマティクス)	190
2.9.4 自動・自律実験	191
2.9.5 計算技術・モデル化技術	192
2.9.6 自然言語処理 (NLP)	194

1. FCV・HDV 用燃料電池ロードマップの概要

1.1 ロードマップ策定の背景

近年の世界におけるカーボンニュートラル（CN）実現に向けた水素関連施策の強力な推進には目を見張るものがある。2020 年には EU が 7 月に水素戦略を公表、ドイツ、フランス等の欧州主要国においても独自の国家水素戦略を策定し、11 月には米国が水素プログラム計画を発表するなど、世界中で水素関連の技術開発および社会実装に向けた取組が進められようとしている。

さて、これら水素の利活用の最重要デバイスであり、高いエネルギー効率を有しつつ低炭素化に貢献できる燃料電池（Fuel Cell、以下 FC と称す）システムに対しては、世界的な地球温暖化問題の解決に向けたキーテクノロジーとして更なる普及拡大が期待されている。このため、水素・燃料電池戦略協議会において策定された「水素・燃料電池戦略ロードマップ（2014 年 6 月策定、2016 年 3 月改定、2019 年 3 月改定）」では、FC の普及拡大に向けた政府の骨太の方針や政策目標が示されるとともに、今後の市場規模の拡大を予想している。エネルギー・地球環境問題の解決、産業技術力の強化をミッションとする NEDO としては、これら政府目標等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・水素技術開発ロードマップ」（以後、「ロードマップ」という。）を 2005 年に策定し、過去に 4 度、最新の政策、市場及び技術動向等を反映させるために改定してきた。前回の改定は 2017 年であったが、その後は世界的な SDGs の広がり、主要各国の CN 宣言をはじめとした社会環境の変化が急速に進んでいる。そのなかで、運輸部門の CO₂ 排出量削減に向けて移動体の変革がその重要な役割の一つを担っており、2017 年ロードマップに明示した乗用車（FCV）に加え、変革すべき移動体のカテゴリーが急速に広範化している。特に FC の移動体への活用は、世界各国で大型・商用モビリティ（HDV：Heavy Duty Vehicle）への拡大が顕著で、その代表的なカテゴリーがトラックへの適用であり、加えて電車・船舶への拡大も進んでいる。また、産業界も電動化への動きが活発化しており、従来のフォークリフトに加えて、建機、農機への拡大が見込まれている。これらの移動体の電動化の検討が進むにつれ、バッテリーからの電力供給では、通常稼働に十分なエネルギー供給が困難なケースが多く実在し、これをカバーするためにカーボンニュートラル燃料の有力候補としての水素活用から FC への適用が検討されている。

このような背景のもと、FC の HDV 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 年頃の普及時に要求される HDV の各アプリケーションの製品目標とそれらの製品要求を満足する共通仕様となるスタック性能を検討した上で、スタックを構成する材料目標と開発の方向性へブレイクダウンし、新たに HDV 用燃料電池ロードマップを 2022 年 3 月に策定した。さらに、HDV 用燃料電池の 2040 年頃の目標や 2030 年頃および 2040 年頃に達成すべき水素貯蔵システムの目標を検討するとともに、2040 年頃の FC の目標達成に向けた材料開発のシナリオ検討、FCV および HDV の 2030 年頃の本格普及開始時期を前提とした FC の生産技術目標を策定するとともに、水素・FC の開発力の強化（開発期間の短縮）に結びつけていくためのデジタル・トランスフォーメーション（DX）技術の在り方を整理し、HDV 用燃料電池ロードマップを 2023 年 2 月に更新した。

今回はベンチマーク戦略や普及戦略について定期的に関係者と議論する体制を設け、社会・産業動向の変化や将来の市場見通し等に関して情報収集するとともに、2022 年度までに設定できな

かった液体水素貯蔵システムの目標を検討するとともに、2030 年と 2040 年の中間地点となる 2035 年頃の HDV 用燃料電池および高圧水素貯蔵システムの目標および FC の生産技術目標を設定した。

市場見通し等に関して情報収集するとともに、2022 年度までに設定できなかった液体水素貯蔵システムの目標を検討するとともに、2030 年と 2040 年の中間地点となる 2035 年頃の HDV 用燃料電池および高圧水素貯蔵システムの目標および FC の生産技術目標を設定した。

本解説書は、ロードマップにおける製品目標に対する考え方、FC システムおよび水素貯蔵システムの目標、FC システムの目標値の検討に活用したシミュレーションモデル等の前提条件と計算結果、FC の材料目標と開発の方向性および材料特性の評価方法の方針、FC の生産技術、水素貯蔵技術システム（高圧水素・液体水素）の目標と技術開発課題、これらの開発を加速・効率化するための DX に関する基盤技術についてまとめたものである。

なお、FCV の 2035 年および 2040 年頃の目標値は十分な調査・議論ができなかったため、今後も継続して進めるとともに、最新の動向も踏まえた HDV 用燃料電池および水素貯蔵システムの見直しの必要性、DX 技術の活用による材料開発への具体的なアプローチについて検討を進めていく方針である。

1.2 燃料電池自動車の産業としての重要性と普及シナリオ

1.2.1 産業としての重要性

前節でも記載したとおり、FC システムを搭載した乗用車（FCV）および大型・商用モビリティの普及が運輸部門の CO₂ 排出量削減に向けた重要な切り札の一つである。カーボンニュートラル実現を目指す 2050 年頃の将来の市場規模はグローバル全体で FCV 約 10 兆円、FC トラック約 24 兆円と試算され、大量の水素需要が見込まれる発電、グリーンスチールやケミカルの将来の市場規模と比較しても重要な水素利用産業となりうる（図 1.2.1-1、詳細は表 1.2.1-1 を参照）。

さらに、FC モビリティは水素利用産業のなかで、水素消費量あたりマーケットを生み出す「製品」としての価値（市場創出価値）は他の産業に比べて圧倒的に高い、すなわち、水素社会が普及したときの水素流通量に対する市場規模が高い製品ということであり、水素バリューチェーン構築によるグリーン成長戦略において、FC モビリティ分野で技術のイノベーションを起こし、サプライチェーン強化も含めた国際競争力を確保し、グローバル市場を獲得していくことが重要である。

【FC モビリティの成長産業としての重要性】

- FCV・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、グリーンケミカルと比べて非常に高い
- FCV および FC トラックは水素のパリティ価格 が他の水素利用産業と比べて市場へ受け入れられやすい水準であり、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が期待できる（ 水素インフラ・国内輸送コストの低減が前提）
- 我が国は海外からの燃料・原料輸入の依存率が高いなか、自動車は貿易黒字の最大の産業であり、国内の自動車産業を強化することで国富の流出を抑制

表 1.2.1-1 に水素の利用産業（燃料電池自動車、グリーンスチール、グリーンケミカルおよび水素発電）における市場規模、利用産業別の単位水素消費量あたりの製品価値を示す。燃料電池自動車の市場規模はFCVとFCトラックの合計で約39兆円、また、水素1kgあたりの製品価値については、表 1.2.1-2 の試算条件に基づき、グリーンスチールの3倍以上、水素発電の20倍以上、グリーンケミカルの40倍以上であり、他の産業と比べて高いことがわかる。

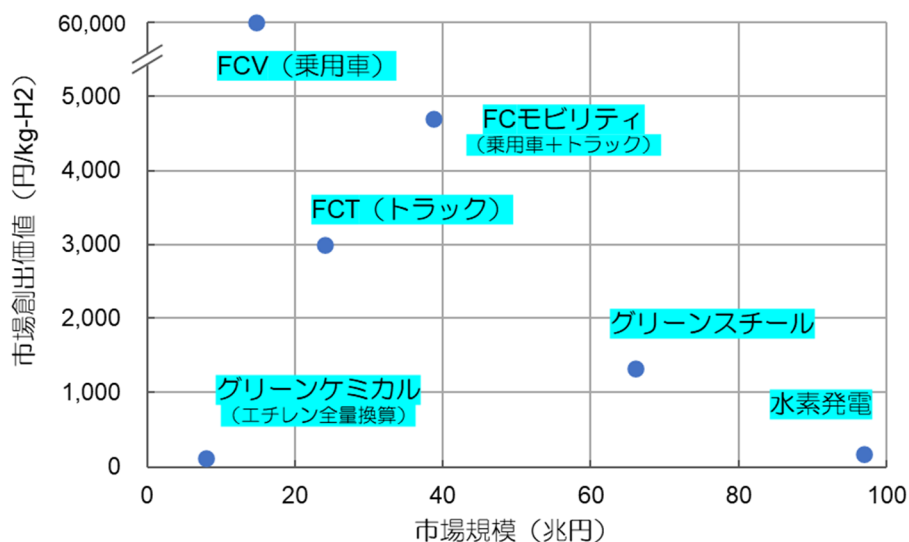


図 1.2.1-1 将来(2050年)の市場規模と水素価格

(各産業の市場規模は表 1.2.1-1、水素パリティ価格は文献[1]から引用)

表 1.2.1-1 産業別の市場見通しと水素消費量1kgあたりの製品価値

産業	市場	水素 1kg あたりの製品価値	算出条件
燃料電池自動車 (内、FC・水素貯蔵システム)	約 39 兆円 (約 6.0 兆円)	4.7 千円/kg	2050 年で FCV(小型商用車含む) 370 万台/年、FCトラック約 120 万台/年 1
グリーンスチール	約 60 兆円	1.3 千円/kg	2050 年で最大 5 億 t/年 2(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	約 6.6 兆円	0.1 千円/kg	2050 年で最大 5,700 万 t/年 2(エチレン換算、取引単価 140 円/kg)
水素発電	約 97 兆円	0.2 千円/kg	2050 年で 1,850GW 2(稼働率 50%、発電単価 12 円/kWh)

1 文献[2]による 2050 年の FCV(乗用車・バン)と FCトラックの市場シェア(予測値)および Marklines 社における 2021~2023 年の乗用車(約 70.7 百万台)および OICA(国際自動車工業連合会)における商用車(約 4 百万台)の販売台数の平均データをもとに算出(FCV: 400 万円/台、FCトラック: 2,000 万円/台を前提)
FCシステム: FCVシステムコスト 0.45 万円/kW(1 台あたり FCスタック 120kW を前提)、FCトラック 0.9 万円/kW(1 台あたり FCスタック 200kW を前提)として約 4.2 兆円の市場を創出
水素貯蔵システム: システムコスト 2 万円/kg(FCV 5kg、トラック 60kg の水素搭載を前提)として約 1.8 兆円

の市場を創出

2 文献[3]の NZE (Net Zero Emission) シナリオにおける情報をもとに算出

3 文献[4]の NZE シナリオにおける年間製造能力をもとに算出

表 1.2.1-2 主な水素利用産業における水素 1kg あたりの製品価値

産業別	試算条件
FC 自動車 (FCV とトラックで 試算)	年間売上高: 370 万台×400 万円/台 (乗用車) + 120 万台×2,000 万円/台 (トラック) = 388,000 億 円 年間水素量: 370 万台×10,000km÷150km/kg-H ₂ + 120 万台×100,000km÷15km/kg-H ₂ = 82.5 億 kg-H ₂ (816 万 t) (水素 1kg 当たりの製品価値) = 388,000 億円÷82.5 億 kg = 4,700 円/kg-H ₂
グリーンスチール	水素還元反応: $0.5 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 1.5 \text{ H}_2 + 48\text{kJ} \rightarrow \text{Fe} + 1.5 \text{ H}_2\text{O}$ 銑鉄 1t 製造に必要な水素量は、 還元: 601Nm ³ + 吸熱反応補完: 67Nm ³ + 1,600 までの溶銑昇熱: 85Nm ³ = 753Nm ³ /t →効率 75%として 1,004 Nm ³ /t (水素 1kg 当たりの製品価値) = 120,000 円/t (取引単価) ÷ 1,004 Nm ³ /t × 11.12 Nm ³ /kg-H ₂ = 1,330 円/kg-H ₂
グリーンケミカル (エチレン生産全 量変換)	$3\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ (メタノール製造), $\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 0.5\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O}$ (メタノール to エチレン) 水素 1mol からエチレン 1/6mol、エチレン収率 37%として、水素 1mol→エチレン 1/6×0.37 = 0.0617mol 水素 1g で製造できるエチレン量は、28.052g-C ₂ H ₄ /mol×0.0617÷2.016g-H ₂ /mol = 0.859g (水素 1kg 当たりの製品価値) = 0.859kg-C ₂ H ₄ /kg-H ₂ ×140 円/kg-C ₂ H ₄ (取引単価) = 120 円 /kg-H ₂
水素発電	大型火力発電所 100 万 kW に必要な水素調達量は約 30 万 t-H ₂ 火力発電の稼働率 50%、発電単価 12 円/kWh とすると、 (水素 1kg 当たりの製品価値) = 100 万 kW×8,760h×0.5×12 円/kWh ÷ (30 万×1,000)kg-H ₂ = 175 円/kg-H ₂

1.2.2 将来のモビリティ社会像

将来のモビリティ社会像については、特に CASE (Connected : 車両とインターネットとの接続、Autonomous/Automated : 自動運転、Shared : シェアリング、Electric : 電動化) という概念によって自動車産業・社会ニーズの在り方が大きく変化していくと考えられている。

自動運転については、図 1.2.2-1 のように、人間が運転の主体となるレベル 2 までと、システムが主体となるレベル 3 以上に分かれ、経済産業省、国土交通省を中心としてレベル 4 等の先進モビリティサービスの実現に向けた実証に取り組んでいる。まずは、利用条件を限定しやすい商用車 (トラック、バス、タクシー等) から先行して無人自動運転サービスの実証へ移行し、商用車の先行実装から自家用車 (乗用車) での量産開発にシフトするシナリオとなっている。2024 年の自動運転の乗用車の生産台数はレベル 2 が 4,513 万台、レベル 3 が 30 万台 (中国のみで先行) 2030 年頃でも法整備や責任所在の課題等によりレベル 3 が数%にとどまる一方、2040 年頃はレ

ベル3以上で40%程度に増加し、エコドライブの本格化、渋滞緩和など交通体系が大きく変化するタイミングと予測されている^[6]。商用車においては、今後圧倒的な人手不足が見込まれ、自動運転が解決策の一つである。バスやタクシーは営業費に占める運送人件費の比率が高いため、無人化の効果がより大きく、投資負担力が高いことから普及の早期化を見通すことが可能であり、トラックは旅客輸送よりも収益力が高いが、長距離のインフラ整備と連動して、2030年代から本格的に普及すると考えられる。

また、自動運転の普及により、運転モード、パワートレイン、車体等で自動車に対する付加価値の考え方が大きく変化すると想定される。

- 衝突の部位や角度が一定程度制御可能となれば衝突安全性に対する要求水準は低減し、自動車の構造設計、形状、使用素材がそれぞれ変化する可能性（例：車体強度よりも軽量性、低コスト化が重視される可能性）
- パワートレインも電動化が主流、バッテリー・燃料電池やモータ、パワー半導体に対するニーズが拡大、内燃機関に関連するエンジンやトランスミッション等の部品や関連素材の消費量は減少
- 情報通信端末の普及と高機能化に伴いコネクテッド化が進み、カーナビゲーションのように特定用途に特化した車載情報機器のニーズは縮退し、通信・セキュリティ技術の重要性はより一層高まる

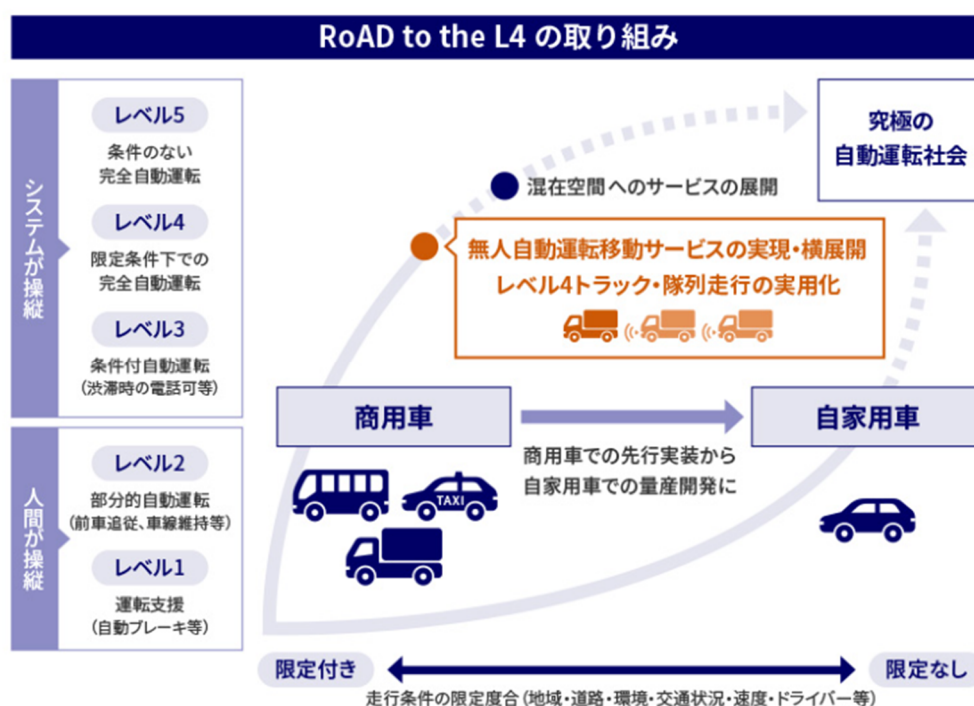


図 1.2.2-1 自動運転社会の実現に向けたシナリオ^[5]

さらに、表 1.2.2-1 に示すように、自動車がコネクテッド・自動運転機能を有することで、交通流の最適化の観点から、例として 平常走行時における高度なエコドライブ（走行性能改善）サグ部（下り坂から上り坂への変化点）・トンネルに起因する渋滞の解消、 事故に起因する渋滞の解消のユースケースが実現される。平常走行時における高度なエコドライブの効果として、国

内で 2030 年には 168.7 万 t-CO₂ を削減するポテンシャル（自動車全体の約 1%）、2050 年には自動運転・コネクテッド技術の社会実装を通じた事故・渋滞の緩和による交通流改善効果により、国内で 1,320 万 t-CO₂ を削減するポテンシャル（自動車全体の約 8%）が見込まれる^[7]。

表 1.2.2-1 自動運転・コネクテッドによる交通の最適化ユースケース	運転モードへの効果	CO ₂ 削減ポテンシャル
平常走行時における高度なエコドライブ	・周辺状況を踏まえ、システムが車両を最適制御 不必要なブレーキ操作防止により、少なくとも 7% の走行性能改善 ・トラックの高速道隊列走行(車間 2m)で最大 25% の燃費改善との試算	・2030 年以降、自動的に加減速の支援を行う機能が高速道路で稼働、2050 年には一般道での稼働も実現、全車に搭載された場合、不必要なブレーキ操作の軽減で、約 769 万 t-CO ₂ の削減が期待
サグ部・トンネルにおける渋滞の解消	・高速道での渋滞の 52% がサグ部・トンネルでの人間操作に起因 自動運転・コネクテッドによる渋滞解消	・高速道での渋滞原因の 52% を占めるサグ部・トンネルにおける渋滞解消により、約 418 万 t-CO ₂ の削減が期待
事故に起因する渋滞の解消	・高速道での渋滞の 16% が事故に起因、さらに一般道の死傷事故のうち 9% が渋滞を招く 自動運転・コネクテッドによる事故防止を通じて解消	・高速道での渋滞原因の 16% を占める事故や、一般道での渋滞原因の 9% を占める死傷事故による渋滞解消により、約 133 万 t-CO ₂ の削減が期待

以上から、自動運転・コネクテッド技術ではエコドライブの進化、渋滞の解消が期待され、車の走行パターンの緩和・空気抵抗低減、さらに CO₂ 排出量低減にも繋がる。将来の FCV の技術目標への要求緩和も期待されるが、本ロードマップで策定した技術目標達成により、将来の自動車社会のなかで、より商品性が向上することを鑑み、目標値は修正しない方針とする。

さらに、自動車、特に乗用車の市場規模の見通しという点ではシェアリングの普及も想定する必要がある。自動車の年間販売台数は人口増加に比例することを前提とすると、世界の人口は現在の 80 億人から 2030 年頃には 85 億人、2035 年頃には 89 億人、2040 年頃には 92 億人、2050 年頃には 97 億人に増加する推計（国連世界人口推計）から、2040 年頃は現在の 1.15 倍、2050 年頃は現在の 1.2 倍以上に増加する。現在の乗用車販売台数として 2021～2023 年の過去 3 カ年の四輪自動車の平均販売台数（約 7,070 万台）を前提とすると、2035 年頃には 7,870 万台、2040 年頃には 8,130 万台、2050 年頃には 8,570 万台と増加する。一方、2040 年頃に自動運転技術等の進化も踏まえ、カーシェアリング率が 2040 頃までに 18% まで成長するとの予測に基づく^[8]、シェアカー 1 台で乗用車 2 台減と仮定したケースでは、2035～2040 年頃で販売台数は約 7,400 万台でピークアウトする。

1.2.3 将来の車載用 FC の市場規模と普及シナリオ

次に、FCV および FC トラックに搭載される FC の市場規模（容量ベース）と想定される普及

シナリオについて表 1.2.3-1 に示す。市場規模については、FCV と FC トラックそれぞれについて 2030 年頃、2035 年頃および 2040 年頃を試算した。

FCV については図 1.2.3-1 の乗用車のセグメント別の 2021～2023 年の過去 3 年間におけるグローバルでの年間販売平均台数に対し、大型・長距離ユースのセグメント（E）以上（SUV 含む）とピックアップトラックが FCV の市場ポテンシャルと想定することに加え、FC・水素貯蔵システムの搭載スペース許容度も含めて FCV のポテンシャル（充填時間・航続距離等）を活用できる SUV の中型セグメント（D）のシェアを獲得する想定として試算した。なお、2030 年のセグメント別のシェアはセダン E セグメント以上、SUV の D セグメント以上、およびピックアップトラックを 1%のシェア占有率と想定した。また、2030 年から 2040 年に向けては年平均成長率（CAGR）を 20%と仮定した（BEV の 2020 年代の CAGR が 20%台、2030 年代は BEV と FCV の競争力が同等と仮定）。なお、2040 年以降は CAGR を 5%と仮定すると、2050 年頃の FCV 販売台数は表 1.2.1-1 に示した約 370 万台に到達する。図 1.2.3-3 に FCV の市場規模の将来見通しを示す。

FC トラックについては、主要市場の米国、欧州、中国における 2030 年、2035 年の FC トラック（FCT）および大型トラック（HDT）の文献^[9]における試算結果を前提とし、2030～2035 年の CAGR から 2040 年の販売台数の見通しを試算した。日本の FCT の市場は現在の普通トラック 14.7 万台（一定）に対し、主要 3 地域の平均シェアを仮定した。また、日本を含む主要 4 地域を除く ROW（Rest of World）の市場は、HDT 全体台数（将来の人口増加に比例して輸送量が増加、シェアリングは想定しない前提）から 4 地域の HDT を差し引いた台数に対し、主要 4 地域の 10 年遅れのシェアで算出した。図 1.2.3-3 に FC トラックの市場規模の将来見通しを示す。2040 年頃の約 120 万台の販売台数の見通しは、他の調査レポート^[10]における試算とほぼ同等である。最後に、FCV と FC トラックの販売台数規模から、FCV の FC スタックを 120kW、FC トラックを 200kW として車載用 FC の市場規模（FC 容量ベース）を算出した。

FC モビリティの普及に向けては、2030 年頃までは多用途展開、および DX 技術を活用した開発力を確保しつつ技術開発を推進、補助金支援等も含めて緩やかに市場が拡大していくと想定される。2030 年以降は水素供給が充足し始めるとともに、DX 技術の本格活用によって材料や生産技術の開発の加速・効率化が進み、FC・水素貯蔵システムの性能向上と原価が低減、水素価格も下がって燃料パリティに近づいていくフェーズとなり、FC モビリティの普及が加速すると想定される。

こうした将来の見通しにおいて、1.3 節以降にまとめた FC・水素貯蔵システムの目標と FC 生産技術目標、さらに、これらの達成に向けて DX 技術を積極的に活用することも前提として技術開発課題を産学官連携のもとで推進していくことが鍵となる。

表 1.2.3-1 将来の車載用 FC の市場規模と想定される普及シナリオ

		現在～	2030 年～	2035 年～	2040 年～
市場規模 (年間)	FC 容量ベース	2GW 程度 (2021～2023 年平均)	60GW 程度 (2030 年頃)	160GW 程度 (2030 年頃)	420GW 程度 (2040 年頃)
	FCV 台数	約 1.3 万台	約 23 万台	約 60 万台	約 150 万台
	FC トラック台数	約 0.2 万台	約 17 万台	約 45 万台	約 120 万台

想定される普及シナリオ	補助金支援も含めて緩やかに市場拡大	水素供給が充足、FC・水素貯蔵システム原価も下がり市場拡大	燃料パリティに近づき更に市場拡大	低価格なクリーン水素が流通、あらゆる産業で活用本格化
-------------	-------------------	-------------------------------	------------------	----------------------------

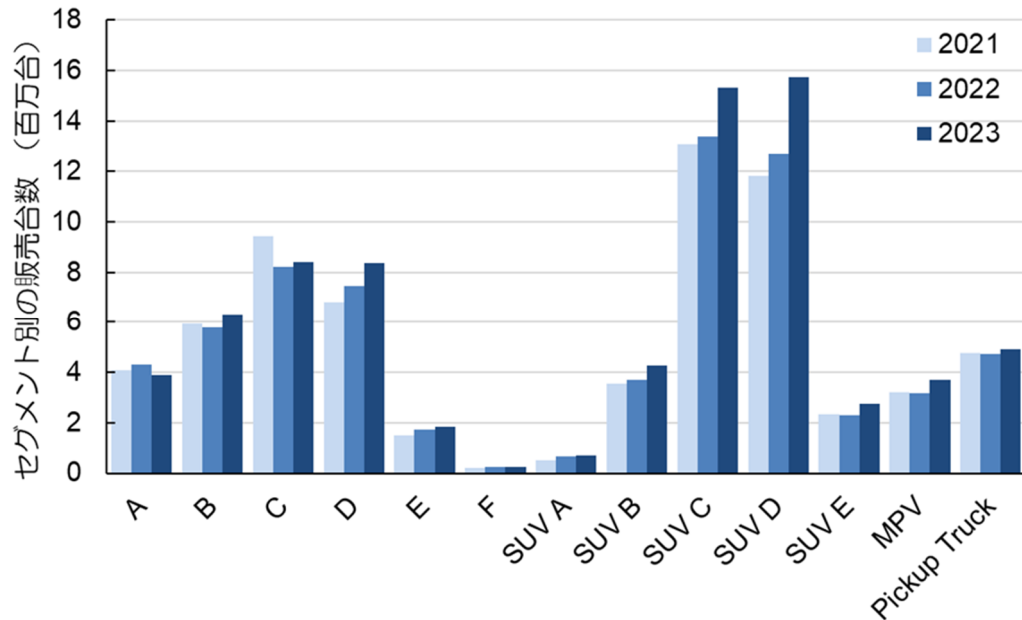


図 1.2.3-1 乗用車セグメント別の年間販売台数
(2021 年～2023 年の 3 カ年、Marklines 社のデータベースに基づく)

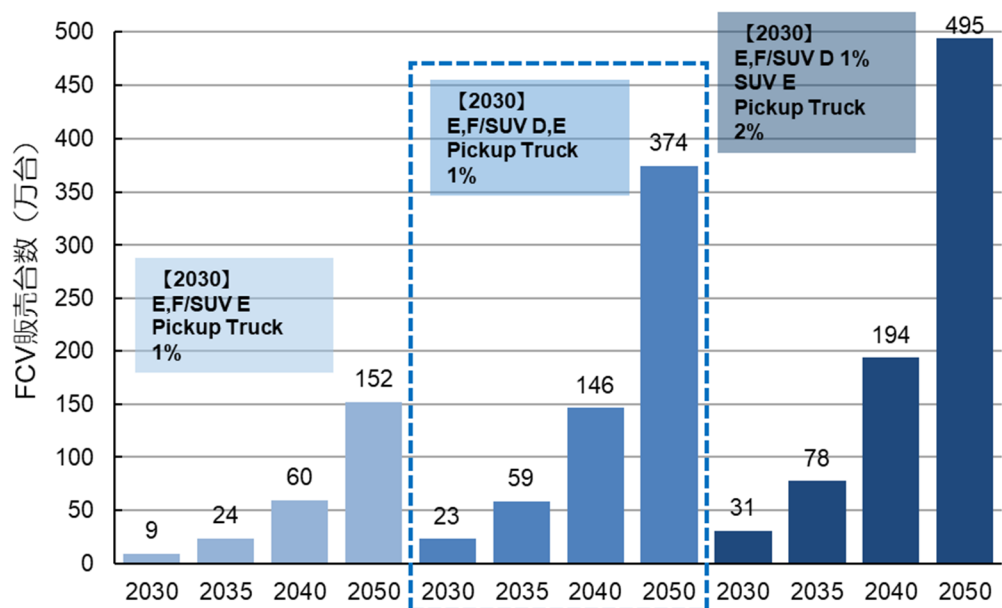


図 1.2.3-2 FCV の市場規模の将来見通し

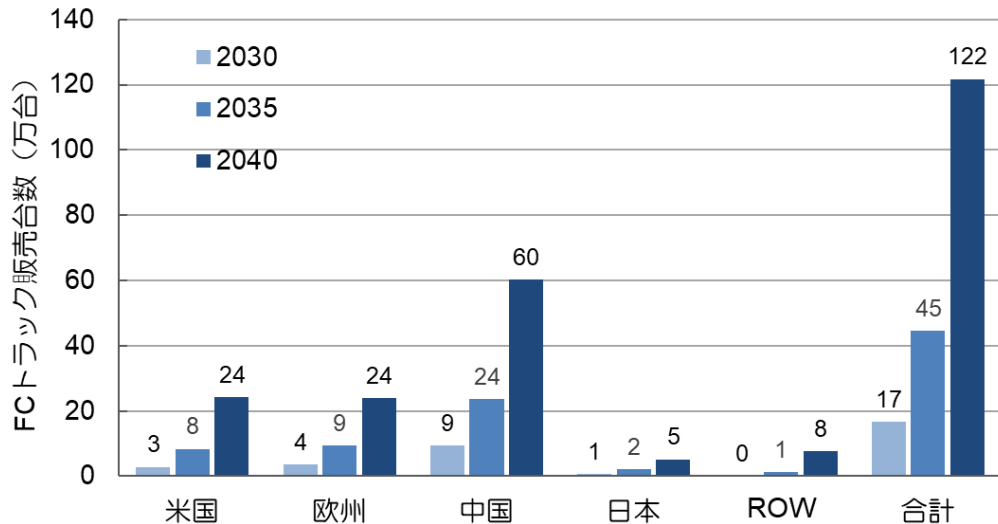


図 1.2.3-3 FCトラックの市場規模の将来見通し

(参考文献)

- [1] 経済産業省, “令和 4 年度エネルギー需給構造高度化対策に関する調査等事業 (国内外における水素・燃料電池に関する動向及び利活用可能性調査) 報告書”
- [2] IEA, “Net Zero Roadmap - A Global Pathway to Keep the 1.5 Goal in Reach ”
- [3] IEA, “Net Zero by 2050”
- [4] IEA, “Energy Technology Perspective 2023”
- [5] 経済産業省、国土交通省、「自動運転レベル 4 等先進モビリティサービス研究開発・社会実装プロジェクト」
- [6] 富士キメラ総研プレスリリース「2024 年 自動運転・AI カー市場の将来展望」
(<https://www.fcr.co.jp/pr/240705.htm>)
- [7] 経済産業省、「スマートモビリティ社会の構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装の方向性」
- [8] PwC, “自動車の将来動向：EV が今後の主流になりうるのか 第 4 章”(2019/3)
- [9] PwC Strategy&, “The Dawn of Electrified Trucking”(2022/10)
- [10] McKinsey & Company, “Preparing the world for zero-emission trucks – The mainstays of commercial road transport will soon benefit from cost-effective, zero-emission horsepower”(2022/9)

1.3 技術目標

1.3.1 製品目標

ここでは、前記カテゴリーに対応すべく、各製品の一般的な使用環境における要求仕様に基づき、これらを包含した目標を示す。ただし、世界全体を見渡した場合、製品によっては、そのカテゴリー独特の使用環境条件等の場合があるため、一部は検討を継続し今後追加する。

従来の乗用車（今回変更なし）に加えて、2030 年頃に FC システム活用が想定される移動体のカテゴリーとターゲットとすべきアプリケーションを示す。今回の移動体としてのカテゴリーは、トラック、鉄道、産業、建機、農機および船舶を包含した目標とすべく、以下に示すアプリケーションの仕様を想定して実施した。

- トラック：25 トン以下（市場規模と運行エリアから最も水素消費量が大きく期待される）
 - 船舶：内航貨物船、沿岸旅客船（長時間稼働を必要とする）
 - 鉄道：現有ディーゼル車両の代替え（電化が厳しい路線など）。将来的には一部電車にも適用を視野
 - 建機：現有ディーゼル機で搭載燃料が多い中大型車両
 - 工業（産業）：フォークリフト（長時間稼働を必要とする車両）
 - 農機：比較的大きな農地で連続的かつ長時間稼働を必要とする車両
- （＊）船舶における外航船は、水素ベースの燃料（合成燃料など）もしくはバイオフューエル等への適正も考慮して今回は対象から除外した。航空機については液体水素貯蔵について今後の活用・連携が期待されるが目標値の設定には至らず。

2030 年頃までは出力、耐久性の観点から 25 トンクラス大型トラックの要求値を達成できれば上記に記載のその他のアプリケーションの要求値も包含できたが、44 トンクラスの要求値まではカバーできなかった。そこで、2035 年頃以降に向けては大型トラック市場のほとんどをカバーできる 44 トンクラスの大型トラックまで含めた目標値の検討を追加した。

また、乗用車については高いエネルギー密度が要求される大型セグメントが乗用車（FCV）マーケットのポテンシャルと想定される。2035 年の目標検討では Large-SUV クラス（SUV E セグメント）の代表的な車両スペックを前提に目標値の検討を追加した。FC システムに要求される耐久時間は 1 万時間とした。

今回は、前記アプリケーションの一般的な使い方を FC システムの動かし方に落とし込み、これを FC システムへの要求として定義した。これにより、それぞれのアプリケーションの一般的な使い方に対応した FC システムの目標値として設定した。

表 1.3.1-1 要求仕様の定義

要求仕様の項目	定義
システム最大出力 [kW]	FC と 2 次電池合計の最大出力
FC システム定格出力 [kW]	FC システムの定格出力 (Net 出力)
使用外気温 [℃]	製品を使用する外気温
耐久時間 [万 hr]	製品に要求される耐久時間
冷却性能 [kW/℃]	冷却能力 = ラジエータの冷却能力 / (冷却水温度 - 外気温) ここでは冷却水温度は 105℃、外気温は 45℃ とした
高度 [千 m]	製品を使用する最大高度
FC システム許容搭載スペース [L]	製品に搭載可能な FC システム許容スペース
FC システム許容搭載重量 [kg]	製品に搭載可能な FC システム許容重量
水素貯蔵許容搭載スペース [L]	製品に搭載可能な水素貯蔵許容スペース
水素貯蔵許容搭載重量 [kg]	製品に搭載可能な水素貯蔵許容重量

表 1.3.1-2 各アプリケーションの 2030 年頃の主な要求仕様一覧

(44 トンクラス大型トラックのみ 2035,40 年頃の要求仕様)

アプリケーション	システム 最大出力 [kW]	FC システム 定格出力 [kW]	使用 外気温 [℃]	耐久時間 [万 hr]	冷却 性能 [kW/℃]	最高使用 高度 [千 m]	FC システム 許容搭載 スペース [L]	FC システム 許容搭載 重量 [kg]	水素貯蔵 許容搭載 スペース[L]	水素貯蔵 許容搭載 重量[kg]
25 トンクラス 大型トラック	300	200	-30~50	5	3.5	3 5 (性能減を許容)	502	230	2,500	1 400
44 トンクラス 大型トラック (2035 年)	425	325	-30~50	5	4.7	3 5 (性能減を許容)	502	460	2,500	1 400
44 トンクラス 大型トラック (2040 年)	450	350	-30~50	5	3.5	3 5 (性能減を許容)	502	460	2,500	1 400
内航貨物船	600	600	-25~50	6	100	0.02	18,000	11,000	72,000	2
沿岸旅客船	480	480	-25~50	3	100	0.02	7,000	4,000	24,000	3,000
鉄道 2 両編成	800	400	-30~45	5	6	1.3	1,300	1,000	5,086	2,000
油圧ショベル 20 トンクラス	120	120	-30~50	1	1.27	5 (出力を制限)	1,300	1,000	1,463	400
油圧ショベル 13 トンクラス	70	70	-30~50	1	1.0	5 (出力を制限)	400	500	1,280	400
フォークリフト 1-2 トンクラス	30	8	-20~40	2	1.0	0.5	339	500	84	80
農業用 トラクタ	50kW~	50kW~	-30~45	1	1.14	2	125	250	500	120

50kW クラスを想定

1 全長規制の緩和によるホイールベースの延長を前提に搭載スペースを確保した場合

2 内航貨物船は質量許容度があるため

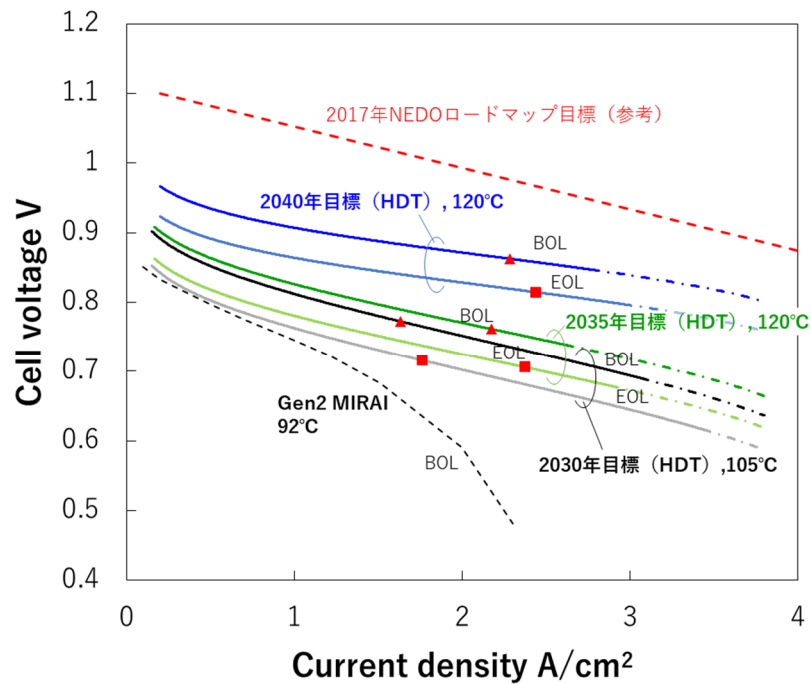
1.3.2 FC システム目標

前記の各アプリケーションの一般的な使い方から落とし込んだ要求仕様、さらに各アプリケーションの一般的な動作パターンを想定して、策定した 2030 年頃、2035 年頃、2040 年頃の性能目標 (I-V 特性、耐久時間、コスト、Pt 使用量、体積出力密度) を示す。この目標値は各アプリケーションの目標性能を包含したものである。

(1) 要求 I-V 特性 (BOL/EOL)

図 1.3.2-1 は、各種高負荷アプリケーションでの FC システム仕様を想定し、かつその耐久要件を含めた製品要件から求めた I-V 特性である。今回、2030 年頃、2040 年頃の I-V 特性目標値に加え、新たに 2035 年頃の目標値を示した。2030 年頃の目標値はその想定年代の各アプリケーションの中で最も厳しいと想定される 25 トンクラス大型トラックの製品要件から導出した。2035 年、2040 年頃は、44 トンクラスまでの全てのクラスに対して、既存のエンジンを、搭載条件を含めて FC システムで置き換え可能とすること (ディーゼルパリティ) を要件として導出した。なお、図中の I-V 特性上の は特性導出の基となった熱定格動作点を、 は BOL での熱定格相当出力の動作点を示す。また、一点鎖線は今回のアプリケーション毎のシミュレーションで使われなかった領域を表しているが、アプリケーションや制御設計によって異なることを付記しておく。I-V 特性の導出方法については 2.2 節で述べる。

図 1.3.2-2 には乗用車の製品要件から求めた 2035 年頃の I-V 特性目標値を示す。本 I-V 特性は、2035 年頃の大型トラックの I-V 特性目標値に比べて触媒目付量が低減されている分だけ低い特性となっているが、同一の物性目標値で実現可能な目標値となっている。



注 1 BOL (Beginning of Life: 初期性能)、EOL (End of Life: 耐久後性能)、耐久パターン: WHVC+始動停止(1 回/cycle)

注 2 2030 年頃目標 I-V 特性(Pt 量 0.19g/kW 前提): : 電流密度 1.63A/cm², 電圧 0.77V, : 電流密度 1.76A/cm², 電圧 0.72V

注 3 2035 年頃目標 I-V 特性(Pt 量 0.13g/kW 前提): : 電流密度 2.18A/cm², 電圧 0.76V, : 電流密度 2.37A/cm², 電圧 0.71V

注 4 2040 目標 I-V 特性(Pt 量 0.07g/kW 前提): : 電流密度 2.29A/cm², 電圧 0.86V, : 電流密度 2.44A/cm², 電圧 0.81V

注 5 温度はスタックの冷却水出口温度

図 1.3.2-1 大型トラックの製品要件から導出された
2030 年頃、2035 年頃、2040 年頃の目標 I-V 特性

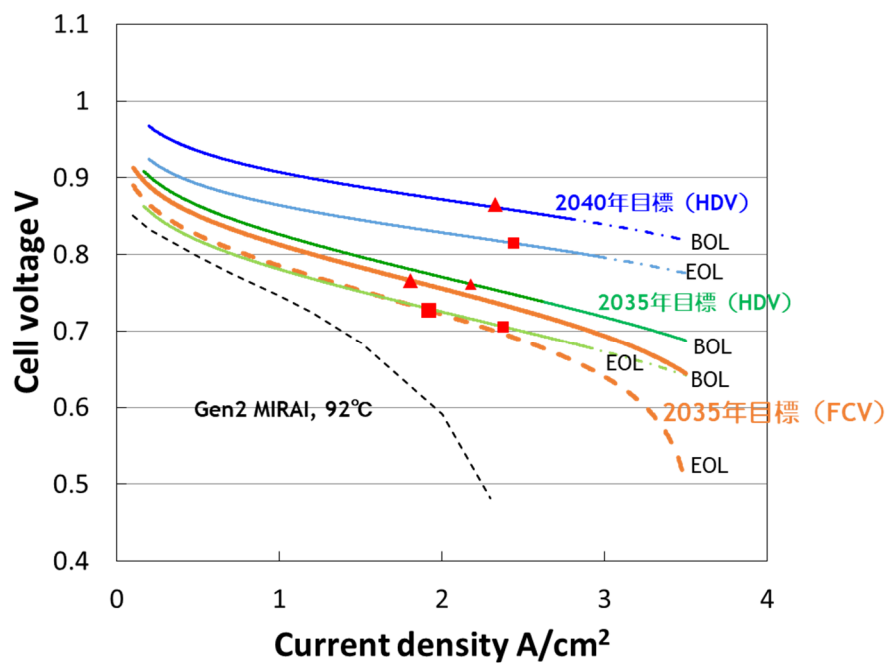


図 1.3.2-2 乗用車の製品要件から導出された 2035 年頃の目標 I-V 特性

(2) その他 FC システム/スタックとしての技術目標

I-V 特性以外の FC システム/スタックとして重要となる目標一覧を表 1.3.2-1、1.3.2-2 に示す。
 ブランクの部分に関しては検討を継続し今後追加する。

表 1.3.2-1 2030 年頃、2035 年頃、2040 年頃の HDV 向けの FC システム / スタック目標値

項目	2030 年頃の 目標値	2035 年頃の 目標値	2040 年頃の 目標値	備考
耐久時間 [h]	50,000	50,000	50,000	2.2.2 項参照
FC システムコスト[万円/kW]	0.9			2.3.1 項参照
FC スタックコスト[万円/kW]	0.45			2.3.1 項参照
Pt 目付量 [mg/cm ²]	0.24	0.22	0.14	2.3.3 項、2.5.1 項参照 Pt 使用量は大型トラックの熱定格参照
うちカソード触媒層の Pt 目付量[mg/cm ²]	0.20	0.18	0.12	
アノード触媒層の Pt 目付量[mg/cm ²]	0.04	0.04	0.02	
Pt 使用量 [g/kW]	0.19	0.13	0.07	
FC システム体積出力密度 [kW/L] 最大出力ベース	0.6	0.75	0.8	2.3.2 項大型トラック参照
FC スタック体積出力密度 [kW/L] 定格出力ベース	6.76	8.42	10.38	2.3.2 項参照

表 1.3.2-2 2035 年頃の FCV 向けの FC システム / スタック目標値

項目	2035 年頃の 目標値	備考
耐久時間 [h]	10,000	2.2.6 項参照
FC システムコスト[万円/kW]		
FC スタックコスト[万円/kW]		
Pt 目付量 [mg/cm ²]	0.14	2.2.6 項参照 Pt 使用量は Pt 目付量 0.14 mg/cm ² 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
うちカソード触媒層の Pt 目付量[mg/cm ²]	0.10	
アノード触媒層の Pt 目付量[mg/cm ²]	0.04	
Pt 使用量 [g/kW]	0.1g/kW	

1.3.3 FC 材料目標

図 1.3.2-1 で示した 2030 年頃の初期の目標 I-V 特性（黒線、冷却水出口温度 105 ）を満たすための物性パラメータを根拠に、2030 年頃の主要材料の物性目標の項目と目標値を表 1.3.3-1 のように定めた。さらに、図 1.3.2-1 で示した 2035 年頃および 2040 年の初期の目標 I-V 特性（緑線および青線、冷却水出口温度 120 ）を満たすための物性パラメータを根拠に、2035 年頃および 2040 年頃の主要材料の物性目標の項目と目標値を表 1.3.3-2 のように定めた。なお、電解質膜面の最高温度は冷却水出口温度に対して + 5 ~ 10 となるが、通常走行における大半の運転条件は 70 程度であり、材料も広範な作動条件に対応することが前提である。また、参考のため、その各項目の現行材料からなる膜電極複合体（MEA）での物性、特性値の実測値も併せ示した。

表 1.3.3-1 2030 年頃の主要材料の物性目標 は、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 8	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 9
		ECSA (m ² /g)		60		48	61	
		質量活性 (A/g) @0.9V	at100 、100%RH	1810		★	★	
			at80 、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 , 80%RH	10		9.1	18.1	
電 解 質	膜	膜厚 (μm)			8.0	8.5	25	Chemours Nafion™ NR211 9
		H ⁺ 伝導率 (S/cm) 1	at 120 , 30%RH	0.032		0.018	0.016	
			at 100 , 40%RH	0.041		0.027	0.024	
			at 80 , 80%RH	0.12		0.106	0.086	
			at -30 , 0%RH 2	今後設定		★	★	
		水素透過性	3	今後設定		★	★	
		酸素透過性	4	今後設定		★	★	
		機械強度 5	(暫定) 引張最大強度(MPa) at 23 , 50%RH	今後設定		50	30	
	(暫定) 引張破断伸び(%) at 23 , 50%RH		今後設定		★	250		
	アイオノマ	H ⁺ 伝導率 (S/cm)	at 120 , 30%RH	0.032		—	★	Chemours Nafion™ D2020 触媒層抵抗 9
			at 100 , 40%RH	0.041		—	★	
			at 80 , 80%RH	0.12		—	★	
		空気極触媒層抵抗(Ωcm ²)	at 120 , 30%RH		0.13	0.77	0.37	
			at 100 , 40%RH		0.10	0.41	0.24	
			at 80 , 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 10 分子拡散抵抗 9
流路・GDL (分子拡散抵抗) (s/m) 6		at 80 , 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 7		(暫定) 圧縮弾性率	今後設定		★			
	(暫定) 曲げ剛性 (N/mm)	今後設定		★	0.9 ~1.5			

1: 電解質膜の H⁺ 伝導率は、補強材込みの伝導率。クエンチャ添加など、耐久性を担保した状態での伝導率。

2: 低温起動性に影響する因子。スタックとしての要求仕様を集約したうえで設定。

3、 4: 耐久性、燃費に影響する因子。今後、設定。

5: セルの構造・仕様により必要な物性値が異なると考えられることから、当面、指標となる物性項目は仮置き。目標値とともに今後の議論とする。ここでは、現行材料の物性を参考値として示す。

6: GDL と流路の構造との組み合わせで決まる特性値。

7: セルの構造・仕様により必要な物性値が異なると考えられることから、当面、指標となる物性項目は仮置き。目標値とともに今後の議論とする。ここでは、現行材料の物性を参考値として示す。

8: 第二世代 MIRAI の MEA を用いた実測値、解析結果。(FC-Cubic 測定)

9: 触媒: 田中貴金属 TEC10V30E、カソード触媒担持量: 0.2mg-Pt/cm²、アノード触媒担持量: 0.1mg-Pt/cm²、アイオノマ: Chemours Nafion™ D2020、I/C:1.0、電解質膜: Chemours Nafion™ NR211、GDL: SGL-CARBON Sigracet® 22BB からなる MEA で測定した値。(FC-Cubic 測定)

10: メーカー公表値 <https://www.sglcarbon.com/en/markets-solutions/material/sigracet-fuel-cell-components/>

表 1.3.3-2 2040 年頃の主要材料の物性目標 は、今後測定

要素	物性	2040 年頃 の目標値	2035 年頃 の目標値	2030 年頃 の目標値	Gen2- MIRAI 4	一般材料	
空気極 触媒層	Pt 目付量 (mg cm ⁻²)	0.12	FCV:0.10 HDV:0.178	0.20	0.17	0.20	田中貴金属 Pt/C TEC10V30 E 4
	ECSA (m ² g ⁻¹)	200	60	60	48	61	
	質量活性@120 , 100%RH , O ₂ 分圧 100 kPa _{abs} , 0.9 V (A g ⁻¹)	42,500	4990	—	—	—	
	質量活性@80 , 100%RH , O ₂ 分圧 100 kPa _{abs} , 0.9 V (A g ⁻¹)	39,000	4630	1740	500	95	
	触媒層ガス拡散抵抗 (s m ⁻¹)	8	10@80 , 80%RH	10@80 , 80%RH	9.1@80 , 80%RH	18.1@80 , 80%RH	
	触媒層厚さ (μm)	3.6	6.0	6.0	9.1	7.4	
		アイオノマ H ⁺ 伝導率 @120 (S cm ⁻¹) 1	0.15@12% RH	0.05@30% RH	—	—	★
電解質 膜	膜厚 (μm)	1	5.0	8.0	8.5	25	Chemours Nafion™ NR211 5
	H ⁺ 伝導率@120 (S cm ⁻¹) 1	0.15 @12%RH	0.05 @30%RH	0.032 @30%RH	0.018 @30%RH	0.016 @30%RH	
GDL・ 流路・セ パレー タ	GDL 面積抵抗 (Ωcm ²)	0.0010	0.0010	0.0010	★	<0.01	SGL CARBON SIGRACE T® 22BB 6 分子拡散抵 抗 5
	流路・GDL(分子拡 散抵抗) (s/m) 2	16 3	16@80 , 80%RH	18@80 , 80%RH	58.3@80 , 80%RH (並行流路)	60.8@80 , 80%RH (並行流路)	
	GDL/セパ、セパ/セ パ等:接触抵抗合計 (Ωcm ²)	0.0004	0.0065 (劣化後)	0.0065	★	—	

1 : 電解質膜の H⁺ 伝導率は、補強材込みの伝導率。クエンチャ添加など、耐久性を担保した状態での伝導率。表では 2030 年目標との対比から、120 での伝導率を示しているが、55~125 の範囲（湿度 12%RH 以上）で、この目標を満たすものとする。上限温度に関しては、動力性能要件において、電解質の温度が冷却水出口温度 120 よりも 3 程度上がるとの図 2.5.3-7 および図 2.5.3-10 に示すシミュレーション結果を加味し、シミュレーションの誤差を考慮して 2 のマージンを考慮して 125 と設定したものであり、下限温度に関しては、先述の通常走行時（冷却水出口温度 70 付近、図 2.2.3-4 参照）での燃費確保を念頭に、この条件での空気極入口温度を 55 と想定し、設定したものである。なおさらなる低温領域でのプロトン伝導率に関しては、今後の検討課題と考える。湿度に関しては、図 2.5.3-7 および図 2.5.3-10 の湿度分布から、湿度が空気極入口の 12 %を下回らないことに基づき設定した。

2 : GDL と流路の構造との組み合わせで決まる特性値。

3 : 現行の NEDO 事業の進捗と今後の改良の余地を鑑みて 2022 年度の解説書時点の値から更新した。

4 : 第二世代 MIRAI の MEA を用いた実測値、解析結果。(FC-Cubic 測定)

5 : 触媒 : 田中貴金属 TEC10V30E、カソード触媒担持量 : 0.2mg-Pt/cm²、アノード触媒担持量 : 0.1mg-Pt/cm²、アイオノマ : Chemours Nafion™ D2020、I/C:1.0、電解質膜 : Chemours Nafion™ NR211、GDL : SGL-CARBON SIGRACET® 22BB からなる MEA で測定した値。(FC-Cubic 測定)

6 : メーカー公表値 <https://www.sglcarbon.com/en/markets-solutions/material/sigracet-fuel-cell-components/>

1.3.4 FC 生産技術目標

今回、FC 生産技術上の目標を表 1.3.4-1 にまとめた。FCV の普及目標 80 万台@2030 年の達成を前提に、2030 年までの国内生産量規模を現状数万台/年から段階的に 20 万台/年まで生産規模を増やすシナリオを置いた。タクトタイム (TT) の目安は、枚葉工程 0.5 秒/セル、連続工程 15m/分とおいた。年産 7 万台規模の製造工場で 2 直体制の前提の計算値に近い値である。ドイツ、フランス、韓国、米国の FC 開発動向からも、年産 20 万台、タクトタイム 0.5 秒に計画している国が多い。

経済産業省 (METI) の水素・燃料電池戦略ロードマップの目標および DOE 試算を前提に FC システムコストおよび FC スタックコストの目標値を下表のように定めた。現状レベルから材料費、加工費ともに 70% 程度のコスト低減が必要である。また、CN の観点から、FC 生産工場のグリーンファクトリー化の目標を置いた。

表 1.3.4-1 FC 生産技術目標一覧

	現在	2025 年頃	2030 年頃	2035 年頃	2040 年頃
普及シナリオ (HDV)	国内 数百台		欧州 10 万台、国内数万台		グローバル 1500 万台 ²
HDV コスト目標			FC システム 0.9 万円/kW ¹ FC スタック 0.45 万円/kW	更なるコスト低減	コンベ相当 (数値検討中)
普及シナリオ (FCV)	国内 7,500 台		国内 80 万台相当 ³	国内 200 万台相当 (推定) ⁸	国内 300-600 万台 ⁴
FCV コスト目標			FC システム 0.4 万円/kW ¹ FC スタック 0.2 万円/kW	更なるコスト低減	コンベ相当 (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	21 万台/年	32 万台/年	50 万 ~ 120 万台/年
ライン原単位 (想定規模)	2,500 台/月	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	10,000 台/月 ×複数か所
生産速度 (タクトタイム)	枚葉工程 1 秒/セル ⁶ 連続工程 6m/分 ⁷		0.5 秒/セル ⁶ 15m/分 ⁷	0.4 秒/セル ⁶ 19m/分 ⁷	0.33 秒/セル ⁶ 25m/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%
工場の消費エネルギーグリーン化	50%程度		80%		100%達成

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 250cm²、20 日稼働、2 直生産および生産数量 (台/月) よりタクトタイムを試算

⁷ 試算の仮定 電極面積 250cm²、幅 320×130 で*3 稼働条件で製造した場合、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

1.3.5 水素貯蔵システム目標

貯蔵方式毎に整理した水素貯蔵目標を表 1.3.5-1 に、各国（北米、欧州、中国）とのロードマップ比較を図 1.3.5-1 に示す。

表 1.3.5-1 水素貯蔵システム目標

貯蔵方式	目標種別	2030 年頃	2035 年頃	2040 年頃	2050 年頃
高圧水素貯蔵	質量貯蔵密度 [wt%]	10		15	
高貯蔵効率仕様	体積貯蔵密度 [g-H ₂ /L]	28 2		29 2,3,4	
1	コスト [万円/kg-H ₂]	4		2	
高圧水素貯蔵	質量貯蔵密度 [wt%]		4 7	4 7	
低コスト仕様	体積貯蔵密度 [g-H ₂ /L]		28	29	
1	コスト [万円/kg-H ₂]		2	(1)	
液体水素貯蔵	質量貯蔵密度 [wt%]		20 30 5	30 40 5	
1	体積貯蔵密度 [g-H ₂ /L]		35	40	
水素貯蔵材料	質量貯蔵密度 [wt%]			8 以上 2,6	8 以上 2,6
1	体積貯蔵密度 [g-H ₂ /L]			70 以上 2,6	70 以上 2,6

質量貯蔵密度 = 搭載水素質量 (kg) / 貯蔵容器質量 (kg) × 100

体積貯蔵密度 = 搭載水素量 (g) / 貯蔵容器体積 (L)

- 1 水素貯蔵システムの目標値は補機を含まない
- 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る
- 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 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
- 6 貯蔵圧力は 1MPa 以下を目指す
- 7 目標値は Type3 タンクの技術進展を参考に、2024 年度に見直し予定

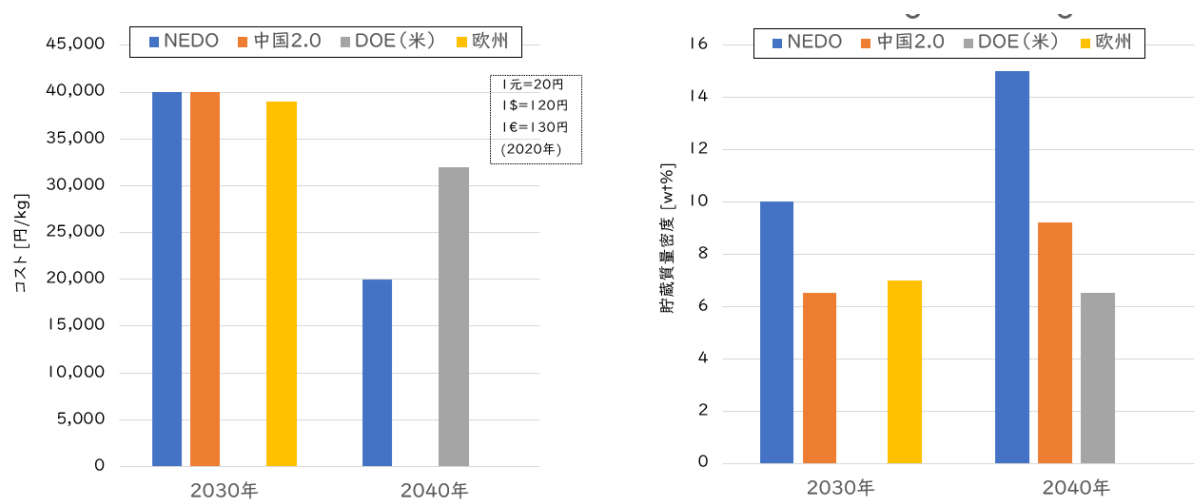


図 1.3.5-1 各国ロードマップとの比較

（参考文献）

- [1] DOE “DOE Technical Targets for Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Vehicles”, 2023
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-onboard-hydrogen-storage-light-duty-vehicles>
- [2] Clean Hydrogen Partnership “Clean Hydrogen JU - SRIA Key Performance Indicators (KPIs)”, 2022
https://www.clean-hydrogen.europa.eu/knowledge-management/strategy-map-and-key-performance-indicators/clean-hydrogen-ju-sria-key-performance-indicators-kpis_en
- [3] 中国 汽車 工程 学会 “TECHNOLOGY ROADMAP FOR ENERGY SAVING AND NEW ENERGY VEHICLES 2.0”, 2020

米国、欧州、中国各地域のロードマップと NEDO ロードマップに対し、高圧水素タンクの主な実力判断指標である、貯蔵質量密度およびコストを比較。コスト（2020 年為替レート換算）については、今回の NEDO 目標値が 2030 年時点では各国とほぼ同じ水準である一方、2040 年では他国に対して高い目標値を設定。貯蔵質量密度は、2030 年、2040 年ともに、戦略的な目標値が設定され、両項目において、海外との競争力が将来にわたり十分に維持できる水準である。但し、各国の目標設定時期は、本 NEDO 事業にて設定した時期に比べ古く、今後、チャレンジングな目標が設定される可能性があり、継続調査が必要である。

1.3.6 DX 技術目標

日本の水素・燃料電池の技術開発が、SDGs・CN において日進月歩の領域で世界をリードし、世界的な普及と自国の産業に貢献するためには、市場・技術進化に対応した適切な目標を設定し、その達成に向けた開発力の向上が重要である。

直近の技術開発を加速するためには、早期に DX の活用を推進し、開発力の強化（開発期間の短縮）に結びつけていくことが必要である。そのための DX 技術の目標を以下のように定めた。

- 燃料電池・水素産業分野の材料技術開発に、現時点の 20 倍以上の研究開発力をもたらす
- 35 年の製品・システム目標に向け、30 年時点で達成する

他の技術領域を対象とした DX の国の取組みと上手く連携しつつ、水素・燃料電池の技術開発で個別に取り扱う DX 技術として、基盤整備（データベース、データプラットフォーム、自動・自律実験拠点）技術開発課題であるインフォマティクス（MI、PI、MEI）自動・自律実験、計算技術・モデル化技術、自然言語処理を取り上げ、ロードマップに記載した。

また、図 1.3.2-1 に示した燃料電池の性能目標や表 1.3.5-1 に示した水素貯蔵目標のとおり、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）が重要となる。高度な解析、計算科学技術による現象・機構解明にもとづき材料やプロセス設計の指針を提示するとともに、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・効果的に材料・プロセスの探索を行うことができる。

2. 目標の考え方と達成のための技術課題

2.1 各アプリケーションの現状の課題と目標

2030 年頃、2035 年頃、2040 年頃に拡大が想定できるカテゴリーおよびその中心となることが想定される各アプリケーションの一般的な使い方を包含する目標を示したが、アプリケーション毎に考慮もしくは確認しておくべき状況や課題を示す。ここでは、大型トラック、船舶、鉄道、建機、フォークリフト、農機の 6 つのアプリケーションに関して整理した。特に、代表的な製品としてトラックからは 25 トンクラスと 44 トンクラス、船舶からは内航貨物船と沿岸旅客船、鉄道からは 2 両編成、建設機械では油圧ショベルの 20 トンクラスと 13 トンクラス、フォークリフトからは 1-2 トンクラス、農業用機械からは農業用トラクタ 50kW クラスを選定した。

2.1.1 各アプリケーションを取り巻く環境

(1) 2030 年頃の市場規模

各アプリケーションの代表的な製品の現状の（既存パワートレインと 2030 年に FC 製品として導入が予測される）市場規模（海外含む）について表 2.1.1-1 にまとめた。欧州では Hydrogen Europe の Strategic Research and Innovation Agenda では 2030 年頃までに累計 9.5 万台の FC トラックの普及、非電化区間における新規車両導入の 20%を FC 列車へ転換する[1]などの目標があり、米国では CA 州内で FC トラック導入 7 万台（2035 年頃）[2]、FC フォークリフトの累計販売台数 30 万台（2030 年頃）[3]などの目標がある。また、民間の市場レポート[4]においても 2030 年頃の FC トラック市場として累計 10 万台以上との試算も存在する。

一方、こうした世界的な市場規模はデータのソースにより差があり、また、地域によりクラス別の区分けが異なるため、ここでの値は市場調査の結果等に基づいた予測を含む参考値とする。なお、2040 年以降の市場規模については検討を継続し今後追加する。

表 2.1.1-1 2030 年頃の市場規模(参考値)

アプリケーション	現状 [台/年] 既存のパワートレイン	30 年予想 [台/年] FC 導入予想
25 トンクラス大型トラック	1,300,000	数万台
44 トンクラス大型トラック	240,000	数千台
内航貨物船	数万台	数百台
沿岸旅客船	数千台	数百台
鉄道 2 両編成	250	50
油圧ショベル 20 トンクラス	200,000	200 ~ 20,000
油圧ショベル 13 トンクラス	100,000	100 ~ 10,000
フォークリフト 1-2 トンクラス	380,000	5,000
農業用トラクタ 50kW ~	数万台	-

(参考文献)

- [1] Hydrogen Europe and Hydrogen Europe Research, “Strategic Research and Innovation Agenda”, Oct. 2020
- [2] California Fuel Cell Partnership, “Fuel Cell Electric Trucks A Vision for Freight Movement in California and Beyond”, Jul. 2021
- [3] Fuel Cell & Hydrogen Energy Association, “Road Map to A US Hydrogen Economy”
- [4] Global Market for Hydrogen Fuel Cell Commercial Trucks, 2021

(2) 各アプリケーションに対して海外を含む 2030 年頃に適用が予測される規制

2030 年頃に各アプリケーションに対して海外を含めて施行されるゼロエミッションに関する規制について以下の表 2.1.1-2 のとおりにまとめた。

表 2.1.1-2 各アプリケーションに対する 2030 年頃に適用が予測される規制

アプリケーション	主な規制(予測含む)
大型トラック	日本:8トン以上の大型の車について 2020 年代に 5 千台(累計)の電動車両の先行導入を目指すとともに、水素や合成燃料等の価格低減に向けた技術開発・普及の取組の進捗も踏まえ、2030 年までに 2040 年の電動車の普及目標を設定(規制なし) 米国:(CA 州+15 州)2030 年 Class7-8 の 30%、Class7-8 トラックの 50%を ZEV 化することを義務付け、Class7-8 は 2045 年以降、コンテナ陸送用ドレージトラックは 2035 年以降、100%ZEV 化 欧州:新車トラックの CO ₂ 排出量を、2019 年に比べ 2025 年に 15%、2030 年には少なくとも 30%の削減を義務づけ タイ:(政府目標)2035 年までに新車販売 100%ZEV 化(BEV・FCV のみ) 内商用車:2025 年 3.1 万台、2030 年 15.6 万台、2035 年 45.8 万台
船舶	2030 年までにゼロエミッションを目標に掲げている地域や、ゼロエミッションに向けての取り組みを実施している地域がある 例)アムステルダム(オランダ)、ノルウェーのフィヨルド
鉄道	ヨーロッパの一部の国では既に新製又は大規模改修時に排ガス規制があるが、ゼロエミッションまでの規制の予定は無い
建設機械	ノルウェーの 7 都市(オスロ、ベルゲン、トロンヘイム、スタバンゲル、ドラメン、トロムセー、クリスティアンサン)で 2030 年までに建設現場のゼロエミッション化の方針、C40 に参加する「オスロ、ブダペスト、ロサンゼルス、メキシコシティ」の 4 都市が 2030 年までに都市の建設プロジェクトからの CO ₂ 排出量を半減させることを目指す”Clean Construction Declaration”を締結
フォークリフト	米国 CA 州 Clean Air Action Plan にて、LA 港、LB 港のフォークリフトを含む全ての荷役機器を 2030 年までにゼロエミッション化する計画が進行している
農業用機械	ディーゼル禁止規制 例)パリ(フランス)2024 年以降

2.1.2 使用環境

各アプリケーションが使用される外気温、高度、保管温度を以下の表に示す。2030 年頃を想定した場合、水素の輸送や貯蔵は、遠隔地もしくは特殊地域への適用に先駆けて、都市部やその近郊地域への導入～拡大が想定されるため、今回は使用外気温については 45 とし、特殊地域として高度と保管温度については未考慮とした(検討は継続し、今後反映を計画)。

(*)フォークリフトの保管温度最高値が 80 と突出しているのは船で赤道直下付近を輸送中にコンテナ内に保管された状態を想定

表 2.1.2-1 各アプリケーションの使用環境

アプリケーション	使用外気温	使用高度	保管温度
25 トンクラス大型トラック 44 トンクラス大型トラック	-30 ~ 50	0~5,000m 3,000 ~ 5,000m は出力減を許容し稼働	-30 ~ 50
内航貨物船	-25 ~ 50	0~20m	-25 ~ 50
沿岸旅客船	-25 ~ 50	0~20m	-25 ~ 50
鉄道 2 両編成	-30 ~ 45	0~1,375m	-10 ~ 40
油圧ショベル 20 トンクラス 油圧ショベル 13 トンクラス	-30 ~ 50	0~5,000m 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	-20 ~ 40	0~500m	-30 ~ 80
農業用トラクタ 50kW クラス	-30 ~ 45	0~2,000m	-30 ~ 45

2.1.3 最大出力

各アプリケーションにおける FC システムとして要求される最大出力を示す。ここでの最大出力は、一般的な使い方を想定した中で、時間制限なども含めた一時的にでも必要とされる出力を示す。ただし、最大出力は FC と 2 次電池のバランスや制御方法により変化する。(その他の出力には連続使用可能な最大出力としての連続定格、冷却能力によって影響される熱定格が存在)

表 2.1.3-1 各アプリケーションの FC システム最大出力

アプリケーション	FC システム最大出力 [kW]
25 トンクラス大型トラック	303
44 トンクラス大型トラック	350 ~ 400
内航貨物船	600
沿岸旅客船	480
鉄道 2 両編成	400
油圧ショベル 20 トンクラス	120
油圧ショベル 13 トンクラス	70
フォークリフト 1-2 トンクラス	30
農業用トラクタ 50kW クラス	51.5

2.1.4 耐久時間

要求耐久時間は、基本的には通常の使い方において劣化による性能低下によって、それぞれのアプリケーションの一般的な使い方に支障をきたさないことを前提に定めたものとした。

(先に示した目標 I-V 特性における、EOL の I-V 特性においても各アプリケーションの一般的な使い方に支障をきたさないための必要な稼働時間を示したもの)

表 2.1.4-1 各アプリケーションの要求耐久時間

アプリケーション	耐久時間 [hr]	耐久の定義 (劣化後に必要な動力要件)
25 トンクラス大型トラック 44 トンクラス大型トラック	50,000	1%勾配を 90km/h で連続走行可 熱定格動作点で連続走行可
内航貨物船	60,000	600kW で 72 時間、200kW で 24 時間、 100kW で 24 時間の繰り返し出力可
沿岸旅客船	30,000	480kW で 30 分間、60kW で 15 分間 のパターンを 10 サイクル/日出力可
鉄道 2 両編成	50,000	勾配線区を想定し、400kW 連続運転可
油圧ショベル 20 トンクラス 油圧ショベル 13 トンクラス	10,000	連続掘削 4 時間継続、20 分の走行可
フォークリフト 1-2 トンクラス	20,000	既定の作業サイクルパターン連続走行可能
農業用トラクタ 50kW クラス	10,000	50kW 連続運転可

2.1.5 FC システム搭載性

アプリケーション毎に搭載可能なスペースが異なる。従来のパワートレーンシステムの跡地、電動化によって変化する各種部品を勘案し、FC システムの搭載スペースと重量を示す。この許容可能なスペース内に FC システムを搭載し、要求性能を満足することが必要となる。ただし、ここで示す許容可能と想定される容積と重量には、モータ、インバータ、2 次電池等の電動化転換に必要なとなる部品は含まれていない。

表 2.1.5-1 各アプリケーションに搭載可能な FC システム許容スペースと重量

アプリケーション	体積 [L]	重量 [kg]
25 トンクラス大型トラック	502	230
44 トンクラス大型トラック	502	460
内航貨物船	18,000	11,000
沿岸旅客船	7,000	4,000
鉄道 2 両編成 ^{1,2}	1,300	1,000
油圧ショベル 20 トンクラス	1,300	1,000
油圧ショベル 13 トンクラス	400	500
フォークリフト 1-2 トンクラス	339	500
農業用トラクタ 50kW クラス	125	250

1 : https://www.jreast.co.jp/press/2020/20201006_4_ho.pdf

2 : <https://global.toyota/jp/newsroom/corporate/34799387.html>

2.1.6 貯蔵システム搭載性

アプリケーション毎に水素貯蔵システムの搭載スペースと重量を示す。この許容可能なスペース内に水素貯蔵システムに要望されている水素量を搭載することが必要となる。ただし、ここで示す許容可能と想定される容積と重量には、配管、減圧弁、車体への搭載部品は含まれていない。

表 2.1.6-1 各アプリケーションに搭載可能な水素貯蔵システム許容スペースと重量

	L [mm]	W [mm]	H [mm]	体積 [L] () 内包容器体積	重量[kg]
25 トンクラス大型トラック 44 トンクラス大型トラック				2,500 1 2,000	400
内航貨物船	12,000	2,400	2,500	72,000 2 (56,520)	3
沿岸旅客船	6,000	2,000	2,000	24,000 (18,840)	3,000
鉄道 2 両編成 (上段/下段: 床下/屋上)	1,400 -	3,000 -	700 -	5,086: 床下 2,940+屋上 2,146 (3,993: 床下 2,308+屋上 1,685)	2,000
油圧ショベル 20 トンクラス	2,600	750	750	1,463 (1,148)	400 (カウンターウェイト を兼ねる場合 2,000)
油圧ショベル 13 トンクラス	2,000	800	800	1,280 (1,005)	
フォークリフト 1-2 トンクラス	760	D375		84	80
農業用トラクタ 50kW クラス				500	120

1 全長規制の緩和によるホイールベースの延長を前提に搭載スペースを確保した場合

2 40 フィートコンテナ相当

3 内航貨物船は質量許容度あり

2.1.7 航続距離または連続運転時間

各アプリケーションに要求される航続距離または連続運転時間を表 2.1.7-1 に示す。

表 2.1.7-1 各アプリケーションの航続距離または連続運転時間

アプリケーション	1 水素充填あたりの航続距離または連続運転時間または給油サイクル
25 トンクラス大型トラック 44 トンクラス大型トラック	将来的には1 充填当たり航続距離は 1,000km 程度を目指したい
内航貨物船	100m ³ の重油を約 9 日間に一回給油
沿岸旅客船	少なくとも 1 水素充填あたり 8 時間の連続運転を目指したい
鉄道 2 両編成	航続距離: 500km / 日 (燃費: 5km/kg 電車 2 両編成当たり) 給油サイクル 1 回 / 日 現状: 軽油 250L / 両・回程度 将来的には1 充填当たり航続距離は 1,000km 程度を目指したい
油圧ショベル 20 トンクラス 油圧ショベル 13 トンクラス	8 ~ 20 時間 ディーゼル E/G の場合、 給油サイクル 約 300L を 2 ~ 3 日に 1 回給油
フォークリフト 1-2 トンクラス	連続運転時間 約 4 時間 30 分 稼働率 55%として工場 1 直稼働可能
農業用トラクタ 50kW クラス	8 時間以上の連続運転

化石燃料と水素の貯蔵エネルギーの差により、潜在的な航続距離、連続運転時間をそのまま満足することは難しいため、燃料電池を許容するための条件を個別に調査し、2.1.8 項「その他補足（3）水素貯蔵方法を考慮した場合の航続距離または連続運転時間」に整理した。

2.1.8 その他補足

（1）特殊環境

FC システムの用途拡大に伴い、それぞれのアプリケーションの特徴に応じた、特殊環境（稀にさらされる過酷な環境など）が必要となってくる。本格的な全面展開（燃料の輸送、貯蔵、供給体制が特殊地域への適用を済ませた状態）時に考慮が必要とされる特殊環境についても表 2.1.8-1 に明示する。

ただし、今回提示の目標は、各アプリケーションの共有とするコアの部分（大部分を占める一般的な使い方）と都市およびその近郊での稼働前提としたため、特殊環境は未考慮である。これらを考慮した場合の目標の在り方などは、アプリケーション毎に議論を継続し、必要に応じて展開を予定する。

表 2.1.8-1 各アプリケーション特有な環境

アプリケーション	特有な環境
25 トンクラス大型トラック 44 トンクラス大型トラック	地域によっては路面凍結防止剤による塩害 冠水路走行の必要な地域での渡渉
内航貨物船、沿岸旅客船	大気中の海塩粒子、船体の動揺、エンジン起因の振動
鉄道 2 両編成	狭小トンネル走行時の安全性確認 (吸気側圧力変動、温度変化、吸排気の短絡現象(温度、酸素濃度)、異常時の水素タンク緊急放出弁 (PRD) 着火時の火災の状況)
油圧ショベル 20 トンクラス 油圧ショベル 13 トンクラス	湿地、粉塵、傾斜地(30 度程度)、振動衝撃
フォークリフト 1-2 トンクラス	冷蔵庫、冷凍庫内使用あり
農業用トラクタ	泥・埃環境

(2) 氷点下起動要件

各アプリケーション共に氷点下環境でも使用されることになるため、氷点下起動に関する要件を表 2.1.8-2 にまとめた。いずれのアプリケーションに対しても数分以上の暖気運転が許容される。

表 2.1.8-2 各アプリケーションの氷点下起動要件

アプリケーション	氷点下起動要件
25 トンクラス大型トラック 44 トンクラス大型トラック	氷点下でも速やかな起動が求められる -30 以下となる厳寒環境では窓ガラスの視界確保、室内温度上昇のため 20 分程度は暖機する -10 程度の環境では起動後すぐ走行開始、走行と暖機を兼ねるのが一般的
内航貨物船、沿岸旅客船	ある程度の暖機は許容
鉄道 2 両編成	暖気する時間は若干(10 分程度)であれば許容される 極寒地を走行する現状のディーゼルカーも若干暖気を行って起動する例から判断 極寒地での対応としては FC の凍結により壊れないことも重要
油圧ショベル 20 トンクラス 油圧ショベル 13 トンクラス	数分から数十分の暖機運転を行う
フォークリフト 1-2 トンクラス	ある程度の暖機は許容
農業用トラクタ 50kW クラス	1～2 分程度の暖機の後作業ができれば特に問題にはならない

(3) 水素貯蔵方法を考慮した場合の航続距離または連続運転時間

化石燃料に対してエネルギー密度が小さい水素を貯蔵するために、どのような条件が整えばどのような運転が実現できるか、個別にヒアリングした結果を表 2.1.8-3 に示す。

表 2.1.8-3 各アプリケーションの運転時間 / 距離の緩和条件

アプリケーション	航続距離/ 連続運転時間	燃料補給	備考
25 トンクラス大型トラック 44 トンクラス大型トラック	1,000km	水素 ST	国内規格は海外より一回り小さい。搭載スペース増加のため規制緩和 1 も必要。
内航貨物船	5 日	水素 ST	内航貨物船は質量許容
沿岸旅客船	2 日(将来 7 日)	移動充填車 水素充填船	沿岸客船は 2～3 日運用を稼働率考慮し選定 将来貯蔵密度向上で小型化期待
鉄道 2 両編成	500km	基地 ST	屋根上搭載検討し高圧貯蔵で 500km 走行を目標。運用で充填回数増やせる。1,000km は電車置換想定
油圧ショベル 20 トンクラス 油圧ショベル 13 トンクラス	4hr	移動充填車	20t は搭載量増加見直し。 移動充填車などがあれば半日運用可
フォークリフト	4.5hr	水素 ST(自前)	LiB 車に対応し、従来比 2 倍
農業用トラクタ 50kW クラス	4hr	移動充填車	泥濘地での沈み込みのため質量増加はネック。 移動充填車などがあれば半日運用可

1 全長+2m(トラクター)、+1m(単車)、質量+2t を涉外中

移動式充填機などの、運用現場での簡易な水素充填手段が整備された場合、従来の化石燃料で

の運用に対して大幅に短い時間での運用も許容される可能性が各ユーザーから示唆されている。しかしながら、従来並みの運用に改善する潜在的ニーズが存在し、その実現には高い水素貯蔵密度が要望されていることを認識する必要がある。

図 2.1.8-1 と図 2.1.8-2 に建機及び船舶の給油と将来望まれる水素充填手段のイメージを示す。建機その他農機も含め、作業現場で充填可能な手段の開発・整備が進んだ場合、水素・燃料電池適用の敷居が下がることが期待される。



図 2.1.8-1 建機の給油・水素充填のイメージ

図 2.1.8-2 船舶の給油・水素充填のイメージ

上記の条件において 2040 年 FC の燃費から算出した必要水素量から、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し、表 2.1.8-4 ならびに図 2.1.8-3 に示す。

表 2.1.8-4 各アプリケーションの水素貯蔵諸元

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 トンクラス大型トラック 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	2416	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)	2000	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

2.2 要求 I-V 特性の検討

2.2.1 2030 年頃の目標設定の進め方

提示する要求 I-V 特性は将来想定される各アプリケーションの製品要求を満足する共通仕様でなければならない。共通的な目標とする I-V 特性を導出するため、各アプリケーションでの FC スタックの使われ方が包含されると考えられる大型トラックを対象に目標値を算出し、その目標値が他のアプリケーションの製品要件を満たし得ることを確認（システム成立性検証）して共通目標 I-V 特性とすることにした。

2.2.2 大型トラック

（１）大型トラックの製品要件とシステム構成

表 2.2.2-1 に大型トラックの製品要件を示し、表 2.2.2-2 に大型トラックのシステム構成を示す。これらは I-V 特性目標を算出するための前提条件となる。表 2.2.2-1 に示されるように大型トラックは耐久時間が 5 万時間と長く、かつ耐久走行後において高速坂路による高負荷走行条件での走破性が要求される。また、システムの搭載要件が厳しく、限られたスペースに搭載可能な FC スタックと 2 次電池、冷却系で製品要求を満たす必要があり、他のアプリケーションと比較しても厳しい要求となっている。

FC スタック数は、車両クラス毎に搭載スペースへのスタック搭載可能性の目安値として設定した。セル面積・枚数に関しては既存の FC スタックの値を用いている。2 次電池は、走行負荷に対し FC と 2 次電池で発電分担することで、FC の高温化や劣化を回避しながら高負荷走行の走破性を確保し、更に制動時のエネルギー回生を行いながらシステム効率を向上させるために用いられる。今回の計算前提となるシステム構成では、システム出力と FC 熱定格出力の差分の 100kW で 2 次電池の 40%のエネルギーを用いて約 20 分間アシスト可能な容量設定とした。また、冷却系に関しては、各車両クラスでの搭載性と動作環境での冷却必要量を考慮した冷却能力要求値の設定とした。

以上から大型トラックの代表的な 25 トンクラスと最大の 44 トンクラスを想定した場合、搭載制約と必要出力からスタック当たりの熱定格出力目標が 44 トンクラスでは 75kW であるのに対し、25 トンクラスでは 100kW とより大きな FC 出力密度が要求される。このような理由から 25 トンクラスにまず着目し I-V 特性の目標値を導出する。44 トンクラスについては、導出された I-V 特性目標値と表 2.2.2-2 のシステム構成で製品要求が満たされるか確認する。

表 2.2.2-1 大型トラックの製品要件（計算前提）

車種	システム出力 FC 熱定格出力	耐久走行パターン	動力性能要件	耐久要求時間
25 トンクラス	300kW 200kW	WHVC, JH25	耐久要求時間走行後、高速坂路による高負荷走行条件で連続走行可能	5 万時間
44 トンクラス	400kW 300kW			

表 2.2.2-2 大型トラックのシステム構成（計算前提）

車種	セル面積・枚数	FC スタック数	2 次電池容量	冷却系能力
25 トンクラス	273cm ² ・330 枚/スタック	2 基	90kWh	3.5kW/ 以内
44 トンクラス	↑	4 基	↑	7kW/ 以内

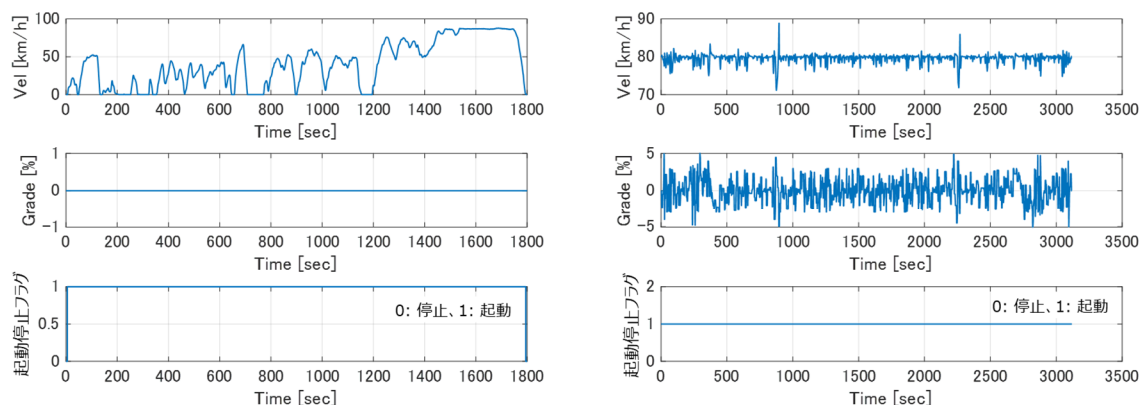


図 2.2.2-1 大型トラックの耐久走行パターン（左：WHVC / 右：JH25）

（２）要求 I-V 特性の導出

要求 I-V 特性の算出は、BOL I-V 特性の候補を複数仮定し耐久走行シミュレーションにより各 I-V 特性に対し性能低下を見積もり、性能低下後の EOL I-V 特性で動力性能要件を満たすものを抽出することによって行う。耐久走行シミュレーションでは、耐久走行パターンを耐久要求時間繰り返し走行した場合の触媒劣化による I-V 特性低下を予測する。動力性能要件は、EOL I-V 特性と所定の冷却能力で高速登坂条件（90km/h、1%勾配）を連続走行の可否により判定する。

耐久走行パターンは大型トラックの走行パターンである WHVC と JH25 を用いる。WHVC は市街地走行、JH25 は高速走行を想定しており、これらで標準的な走行パターンを一通り模擬すると考えられる。しかし、この他に山岳路や長距離輸送パターンなど、より高負荷・高温条件で使われるケースも考えられる。よってこれらの高負荷走行パターンを耐久パターンとして考慮することは今後検討の余地がある。

一方、電解質膜の耐久性に関しては、電解質膜が暴露される劣化ストレス条件から耐久性要求値を目標値として提示する。このため、耐久走行パターンの他、より高温条件となる高負荷走行パターンも含めてシミュレーションし、スタック電流・セル電圧・冷却水温度・空気極側湿度を劣化ストレス条件として提示する。

I-V 特性は、(1)式を用いて既存のベース I-V 特性に対し、活性・ガス拡散抵抗・オーム抵抗（以下ではこれらをまとめて MEGA 物性値と呼ぶ。）の各変化量を与え、I-V 特性の候補（サンプル）を複数設定する。各サンプルに対し EOL I-V 特性を算出し、動力性能要件を判定する。要件を満たす I-V 性能候補の集合の中から活性が最も低いサンプル、ガス拡散抵抗が最も高いサンプル、等を提示し目的に応じ取捨選択する。

$$V = V_{OCV} - R_{\Omega}I - \frac{RT_{cl}^{out}}{\alpha F} \log\left(\frac{I}{i_0}\right) - \frac{RT_{cl}^{out}}{\alpha F} \log\left(\frac{C_{ref}}{C_{O_2} - R_{gas} \frac{I}{4F}}\right) \quad (1)$$

ここで、 I は電流密度、 V はセル電圧である。活性を表す指標の交換電流密度を i_0 、ガス拡散抵抗を

R_{gas} 、オーム抵抗を R_{Ω} とおいた。その他の記号は表 2.2.2-3 にまとめた。このように生成した I-V 特性候補の例を図 2.2.2-2 に示す。

表 2.2.2-3 式(1)中の記号

記号	定数名
V_{ocv}	開回路電圧
R	気体定数
T_{cl}^{out}	冷却水出口温度
α	バトラーボルマー式の移動定数
F	ファラデー定数
C_{ref}	基準酸素濃度
C_{O_2}	セル面内代表酸素濃度

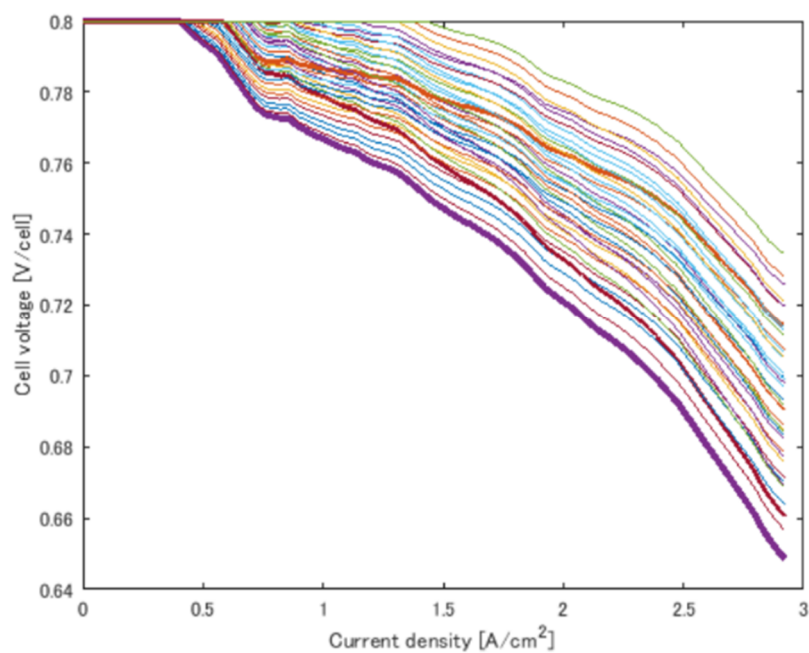


図 2.2.2-2 I-V 特性候補の例

(3) 動力性能要件

動力性能要件は所定の走行条件での車両走破性の要件を与えており、これにより FC の I-V 特性が規定される。I-V 特性は発電負荷（走行負荷）の増加に伴い発熱量が増加する性質を有しているが、FC（主に触媒）の劣化により I-V 特性が低下した場合は、同一負荷条件でも発熱量が上昇する（図 2.2.2-3）。このとき、FC の発熱量がラジエータの放熱量を常に上回ると FC の水温上昇が抑えられなくなり走行不能となる。よって FC 車両の動力性能要件は、ラジエータ放熱能力の制限の下で耐久後の EOL I-V 特性に対応させることができる。劣化シミュレーションにより BOL I-V 特性は EOL I-V 特性と対応づけられるため、耐久要件を満たす BOL I-V 特性が探索できる。

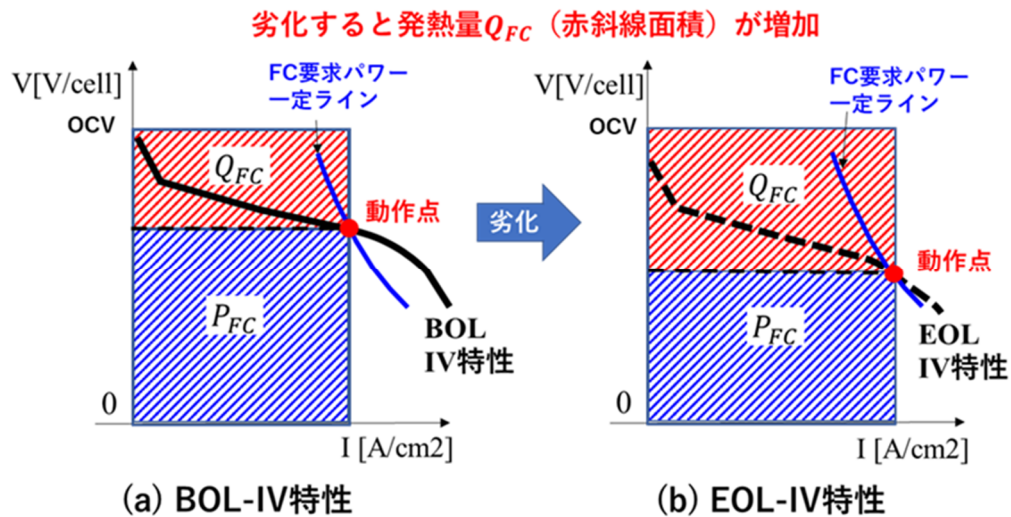


図 2.2.2-3 I-V 特性の低下に伴う発熱量増加

(4) 計算手順

以下に示す計算手順により、耐久性の要求値を満足する I-V 特性を探索する。

車両要求値（諸元、耐久時間、耐久走行パターン、動力性能要件）を設定。

活性指標である交換電流密度(i_0)、プロトン抵抗等の抵抗成分を含むオーム抵抗(R_Ω)、ガス拡散抵抗(R_{gas})をパラメータとして各上下限の範囲から抽出しその値の組み合わせから I-V 特性を式(1)に基づいて生成。

初期 I-V 特性に対し、車両が耐久走行パターンを耐久時間繰り返し走行したときの FC 劣化による I-V 特性低下をシミュレーションで算出。

耐久時間後の I-V 特性で車両が動力性能要件を満足するか判定。

(5) 要求 I-V 特性

計算結果を図 2.2.2-4 に示す。図 2.2.2-4 (a)の 3 次元平面上の各点は、耐久要求値を満たす MEGA 物性値（活性向上率、オーム抵抗低減率、ガス拡散抵抗低減率）の組み合わせを示している。各点が一本の I-V 特性に対応しており、図 2.2.2-4 (b)は耐久要求値を満たす I-V 特性の集合を表している。この結果から、要件を満たす I-V 特性は赤いラインのように「高活性、高抵抗なもの」から、青いラインのように「低活性、低抵抗なもの」まで複数存在することが分かる。これらの I-V 特性の候補から活性の最も低い I-V 特性を抽出し目標 I-V 特性とした(前節の図 1.3-1 を引用)。

目標 BOL I-V 特性に対し、25 トンクラスで WHVC と JH25 による繰り返し走行をそれぞれ耐久時間行った後の EOL I-V 特性を図 2.2.2-5 に示す。起動停止を含む耐久走行パターンの違いにより同一 BOL I-V 特性に対し EOL-IV 特性は異なる。各 EOL I-V 特性ライン上に、動力性能要件の 90km/h、1%勾配を走行するのに必要な動作点（熱定格動作点）を赤丸で示す。この中で劣化度合いが多い WHVC 走行後の熱定格動作点の電流密度が最も大きく、ラジエータの放熱必要量も大きくなることが推察される。同様に 44 トンクラスで行った結果を図 2.2.2-6 に示す。また、図 2.2.2-5、図 2.2.2-6 中の I-V 特性上の点線は今回のシミュレーションで使われなかった領域を

表しているが、アプリケーションや制御設計によって異なることを付記しておく。

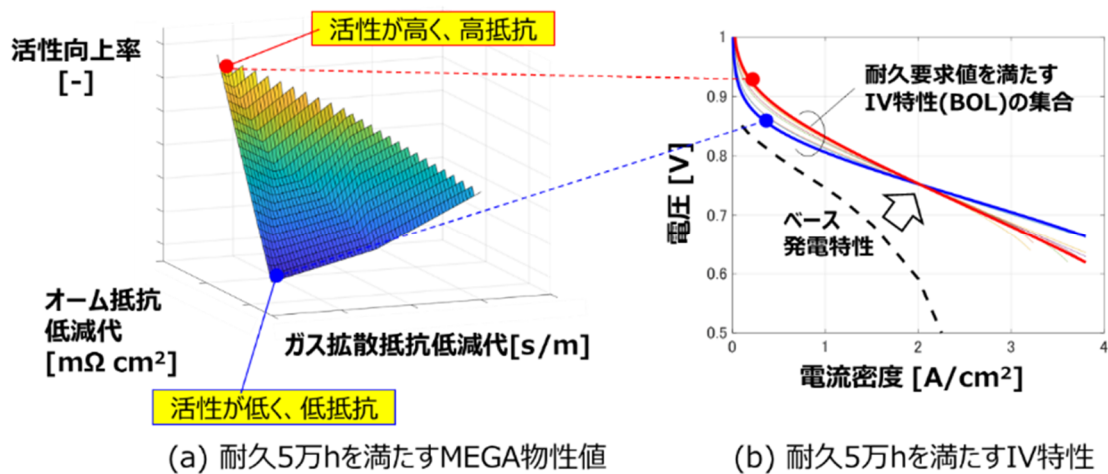


図 2.2.2-4 耐久 5 万 hr を満たす MEGA 物性値と I-V 特性

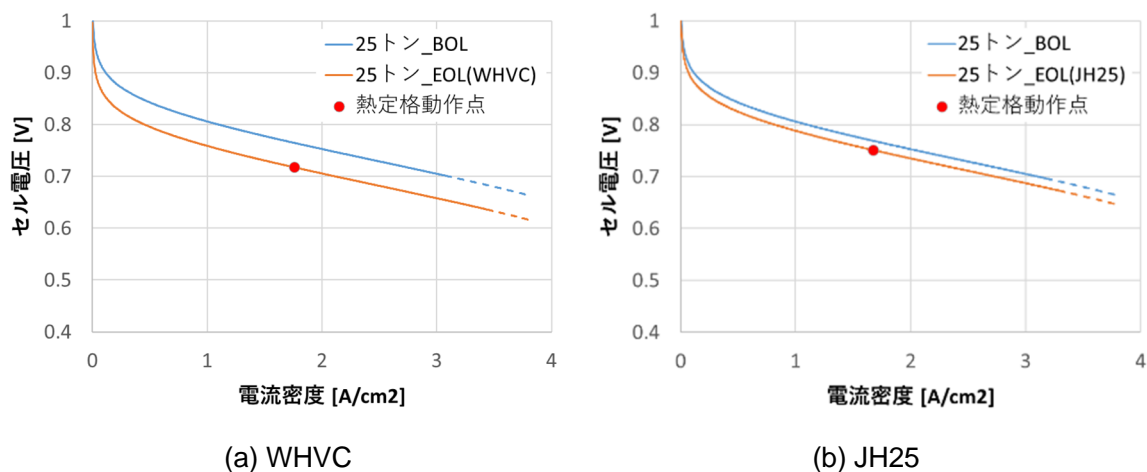


図 2.2.2-5 BOL I-V 特性と EOL I-V 特性 (25 トン)

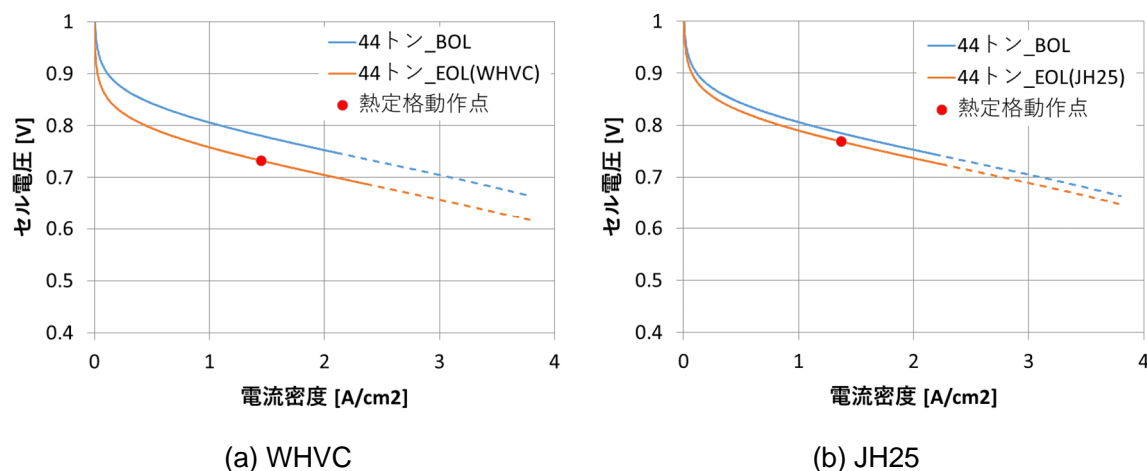


図 2.2.2-6 BOL I-V 特性と EOL I-V 特性 (44 トン)

目標 I-V 特性に対し WHVC を耐久目標時間繰り返し走行した後の EOL I-V 特性について、FC ネット出力に対する FC 発熱量を求めた結果を図 2.2.2-7 に示す。熱定格動作点での FC 発熱量は、25 トンクラスでは 210kW、44 トンクラスでは 336kW であり、それぞれに対応した FC 冷却能力が求められる。実際、外気温を 45 と仮定した場合、FC 最大水温が 105 においてラジエータ冷却能力として 25 トンクラスでは 3.5kW/、44 トンクラスでは 5.6kW/ が求められる。これらは表 2.2.2-2 のシステム構成で想定した冷却能力の範囲内であることが確認できる。したがって、25 トンクラスの製品要求から導出された I-V 特性目標値が 44 トンクラスの製品要求を満たすことが確認できた。

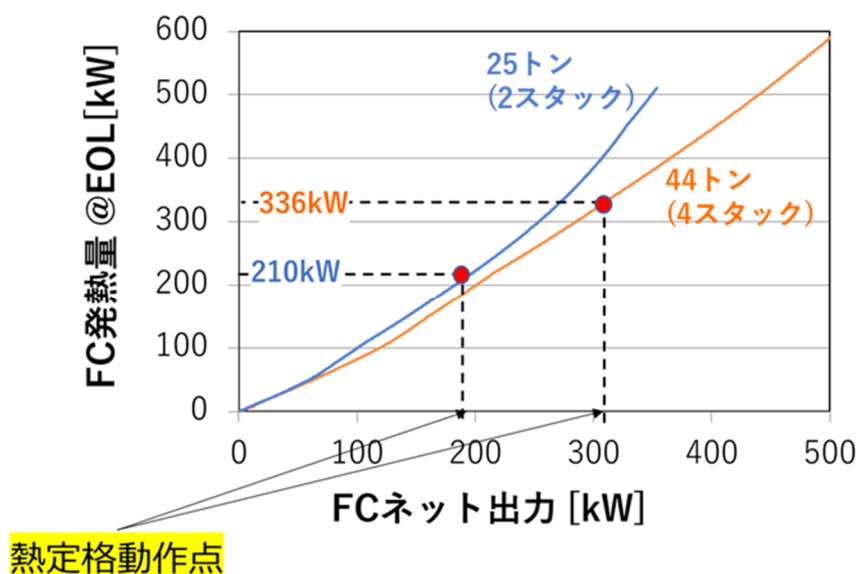


図 2.2.2-7 EOL I-V 特性(WHVC 耐久走行後)における熱定格動作点での発熱量

(6) 今後の課題

- 電解質膜の耐久性に関しては、(2) で述べた通りここまでの検討では考慮されていない。従って、耐久走行パターンをはじめ高負荷走行パターンでの電流、電圧、温度データにより電解質膜への耐久要件を示す必要がある。このため、耐久パターンの WHVC と JH25、高負荷走行パターンの山岳路と長距離輸送パターンでの走行シミュレーションにより求めた頻度分布データを次節に示す。
- 大型トラックは消防車等の特殊用途を含めると多様な形態での使用に応える必要があり、搭載要件は更に厳しい。これには 2 次電池の小型化も考慮しながら、出力密度向上による FC の小型化や、FC の運転温度を増加させるなど冷却性能向上によるラジエータを含めたシステム小型化にも取り組んでいく必要がある 2030 年頃の目標設定では 44 トントラックは 4 スタックが前提であるが 2 スタックでの成立性が望まれている (2030 年以降の課題は 2.2.4 参照)。
- 大型トラックの代表マーケットの 1 つである EU における HD トラック (HDT) 販売シェアを図 2.2.2-8 に示すが、EU では HDT に占めるトラクタータイプの比率が年々増加しており、2014 年時点で約 45% とほぼ過半数を占める。また図 2.2.2-9 より、2014 年時点でトラクタータイプのエンジン出力の約 90% 以上が 300-400kW である。GVW40 トンを超えることもあるトラクタータイプでは、大出力の動力源が望まれていると思われる。図 2.2.2-7 に示すように、

動力源の出力増加に伴い発熱量も増加するため、特にトラクタータイプでは、FC システムの高温作動化が強く望まれている（2030 年以降の課題は 2.2.4 参照）。

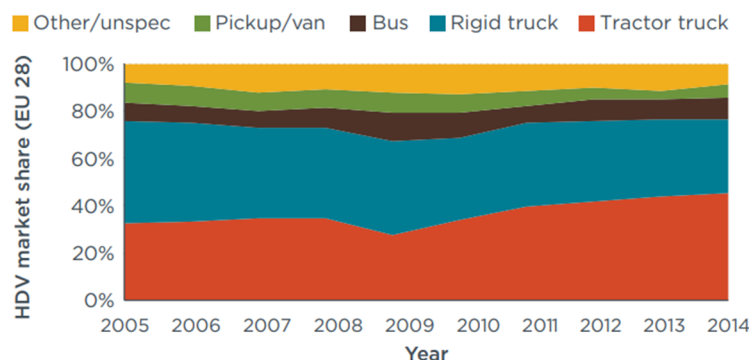


図 2.2.2-8 EU における HDT 販売シェア [1]

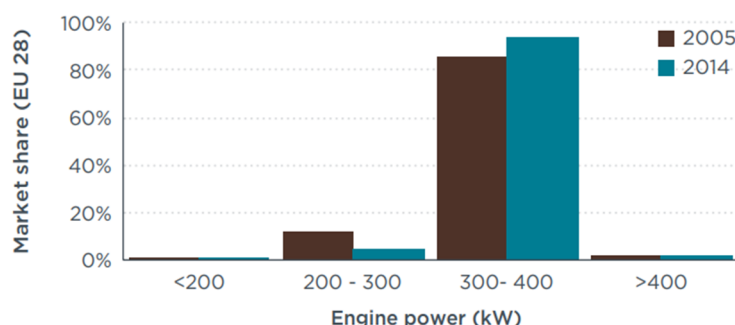


図 2.2.2-9 EU における Tractor truck 用エンジン販売シェア [1]

(参考文献)

[1] ICCT, “Overview of the heavy-duty vehicle market and CO2 emissions in the EU” (2015)

2.2.3 他のアプリケーションのシステム成立の検討

ここでは、他のアプリケーションについて、2030 年頃を想定したシステム構成で、2.2.2「大型トラック」で試算した目標 I-V 特性を用いた場合に、耐久要求を満足するかどうかについて、2.2.2 と同様のシミュレーションを用いて試算する。具体的には、2.2.2「大型トラック」で試算した目標 I-V 特性にて、さらにスタック数、冷却性能、2 次電池について性能を振ったシステム毎に、耐久走行パターンを耐久時間分実施し、動力性能判定にて耐久要求を満足するか否かを判定する。そして、耐久要求を満足するシステム構成が、2030 年頃想定 of システム範囲に含まれる場合、2.2.2「大型トラック」で試算した目標 I-V 特性で一本化が可能であると判断する。

(1) 各アプリケーションのシステム構成

今回試算では、表 2.2.3-1～表 2.2.3-3 に示す 2030 年頃を想定したシステム構成を前提とする。FC スタック数、冷却性能、2 次電池性能については、性能を振ってシミュレーションを実施し、表 2.2.3-1～表 2.2.3-3 に示す 2030 年頃の想定システム範囲内に、耐久性能を満足するシステム構成が存在するかを検証する。ただしフォークリフトについては、すでに第二世代の FC システ

ムでも耐久要求にミートしているため、今回試算の対象外とする。

表 2.2.3-1 システム構成の試算条件と 2030 年頃のシステム範囲：スタック

アプリケーション	システム構成の試算条件			2030 年頃の想定システム範囲 想定搭載可能数
	FC スタック数	面積・枚数	I-V 性能	
内航貨物船	3～6 基	273cm ² 330 枚/基 ¹	2.2.2 にて試算の I-V 特性	46 基以下
沿岸旅客船	2～5 基			18 基以下
鉄道 2 両編成	2～10 基			4 基以下
油圧ショベル 20 トンクラス	1～2 基			2 基以下
油圧ショベル 13 トンクラス	1 基			1 基以下
農業用トラクタ 50kW クラス	0.32～1 基			0.32 基以下

1：Gen2 MIRAI のセル仕様を想定

表 2.2.3-2 システム構成の試算条件と 2030 年頃のシステム範囲：冷却性能

アプリケーション	システム構成の試算条件 冷却性能	2030 年頃の想定システム範囲 想定冷却性能
内航貨物船	100 kW/ ²	制限なし
沿岸旅客船	100 kW/ ²	制限なし
鉄道 2 両編成	6～12 kW/	10 kW/ 以下
油圧ショベル 20 トンクラス	1.27(現状)～2.55 kW/	1.82 kW/ 以下
油圧ショベル 13 トンクラス	1.0(現状)～1.82 kW/	1.82 kW/ 以下
農業用トラクタ 50kW クラス	1.14(現状)～1.71 kW/	1.71 kW/ 以下

2：海水を使うことで十分な冷却が可能。シミュレーションでは極端に大きい値を設定することで模擬

表 2.2.3-3 システム構成の試算条件と 2030 年頃のシステム範囲：2 次電池

アプリケーション	システム構成の試算条件 2 次電池性能	2030 年頃の想定システム範囲 想定性能
内航貨物船	2 次電池なしを設定 ³	制限なし
沿岸旅客船	2 次電池なしを設定 ³	制限なし
鉄道 2 両編成	出力 800kW 容量 240kWh ⁴	-
油圧ショベル 20 トンクラス	出力 75～225kW 容量 2.6～7.8kWh	-
油圧ショベル 13 トンクラス	出力 75～225kW 容量 2.6～7.8kWh	-
農業用トラクタ 50kW クラス	出力 0～50kW 容量 0～5kWh	-

3：船舶では回生はなく、内航貨物船と沿岸旅客船での 2 次電池のシステムにおける用途は、微小な変動吸収のためのため、耐久への寄与度は小さい。したがってシミュレーションでは、FC 要求出力を与え、2 次電池はなしの設定にて実施

4：FC と 2 次電池の出力分配・回生制御は OEM にて実施、したがってシミュレーションでは、FC 要求出力を与え、2 次電池はなしの設定にて実施

(2) 各アプリケーションの耐久条件

各アプリケーションの通常の使われ方として、表 2.2.3-4～表 2.2.3-7 に示す耐久走行パターンを定義し、各アプリケーションの最も厳しい使われ方として、表 2.2.3-4～表 2.2.3-7 に示す動力性能判定パターンを定義する。

この耐久走行パターンを耐久時間分繰り返すことで市場での劣化を模擬し、そしてその劣化状態にて動力性能判定パターンを走破出来た場合に、耐久要求を満足できたと判定する。

表 2.2.3-4 耐久条件：船舶

	内航貨物船	沿岸旅客船
耐久時間	60,000 時間	30,000 時間
耐久走行パターン	<p>国内の貨物輸送を想定し、3 日航行+揚荷 1 日+積荷 1 日の計 5 日の作業パターン 起動停止は 1 回/1 作業パターン(5 日=120 時間)</p>	<p>国内の旅客輸送(例:島 to 島)を想定し、航行 乗/下船の停泊 を繰り返すパターン 起動停止は 1 回/1 日(7.5 時間)</p>
動力性能判定パターン	耐久走行パターンと同一	耐久走行パターンと同一

表 2.2.3-5 耐久条件：鉄道

	鉄道 2 両編成
耐久時間	50,000 時間
耐久走行パターン	<p>都市部近郊を想定し(駅間 3km 程度)、約 9 割が平坦線区、約 1 割が勾配線区となる路線 1 線区内では、一般的な電車で最高速である約 100km/h まで到達し、すぐに減速 起動停止は、2 回/1 日(=8 時間×2)</p> <div> </div> <p>9:1 8時間 8時間 8時間 8時間 IG ON ON/OFF ON/OFF ON/OFF IG OFF 50000時間</p>
動力性能判定パターン	耐久走行パターンと同一

表 2.2.3-6 耐久条件：建機

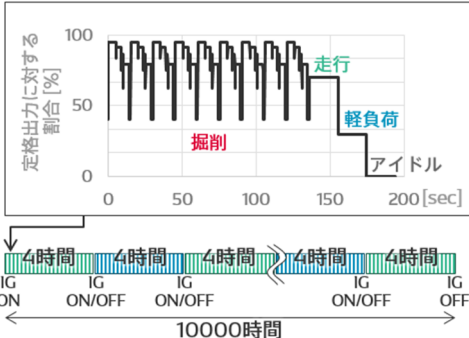
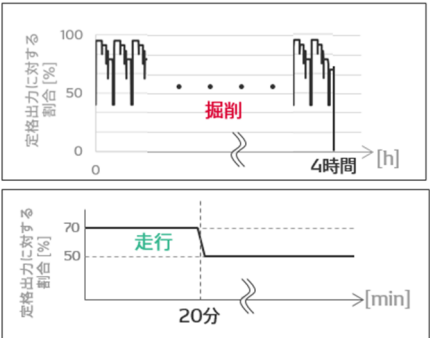
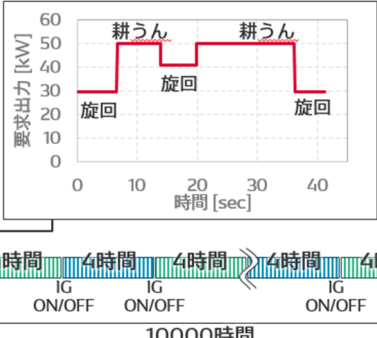
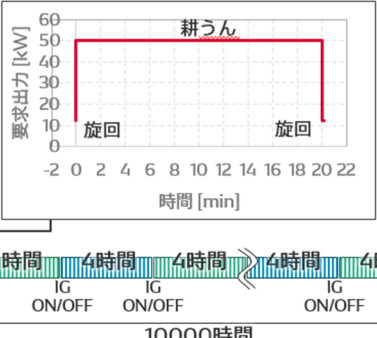
	油圧ショベル 20t クラス	油圧ショベル 13t クラス
耐久時間	10,000 時間	
耐久走行パターン	<p>10t ダンプにショベルで土砂などを積み込み(10 回で満載)その後、走行・軽負荷作業・アイドルを実施。これを耐久時間分繰り返す。起動停止は、2 回/1 日(=4 時間×2)</p> 	
動力性能判定パターン	<p>A かつ B が成立すること A: 連続掘削 4 時間継続作業者の休憩を考慮した、最悪想定 B: 連続走行 国内で最長想定 20 分を高速で走破、その後は中速を維持</p> 	

表 2.2.3-7 耐久条件：農機

	農業用トラクタ 50kW クラス
耐久時間	10,000 時間
耐久走行パターン	<p>負荷の高い耕うん作業について A・B を想定しそれぞれ実施 起動停止は、2 回/1 日(=4 時間×2)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>A：短めの畑→旋回多く負荷変動多</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>B：長めの畑→高負荷が継続</p>  </div> </div>
動力性能判定パターン	連続耕うんを想定し、50kW 連続運転で判定

(3) 耐久成立性の検討結果

2030 年頃を想定したシステム構成において耐久走行後に動力性能を満たせるかをシミュレートし、その結果が 2030 年頃想定 of システム範囲に対してどのような関係になっているかについてまとめた。その結果、今回対象とした全てのアプリケーションにて耐久性を満足する構成が存在することが分かった。各アプリケーションについて、耐久性を満足するシステム構成を表 2.2.3-8 に示す。

表 2.2.3-8 耐久成立性を満足するシステム構成の範囲

アプリケーション	システム構成		
	FC スタック数	冷却性能	2 次電池性能
内航貨物船	4 ~ 46 基	100kW/	-
沿岸旅客船	3 ~ 18 基	100kW/	-
鉄道 2 両編成	4 基	10kW/	-
油圧ショベル 20 トンクラス	1 基	1.8-1.82 kW/	-
	2 基	1.6-1.82 kW/	-
油圧ショベル 13 トンクラス	1 基	1.45-1.82 kW/	-
農業用トラクタ 50kW クラス (短い畑)	0.32 基	1.3-1.71 kW/	0kW 0kWh
	0.32 基	1.14-1.71 kW/	50kW 5kWh
農業用トラクタ 50kW クラス (長い畑)	0.32 基	1.5-1.71 kW/	0kW 0kWh
	0.32 基	1.3-1.71 kW/	-

(4) 各アプリケーションの使われ方

ここでは、材料開発における評価プロトコル検討の一助となるよう、各アプリケーションでの使われ方についてまとめる。

対象システムの定義

(2) にて検討したシステム構成のうち、耐久を満足する以下を対象とする。

表 2.2.3-9 使われ方まとめの対象システム

アプリケーション	システム構成			走行パターン
	FC スタック数	冷却性能	2 次電池性能	
25 トンクラストラック	表 2.2.2-2 に記載のシステム			WHVC, JH25 山岳路, 長距離輸送
44 トンクラストラック	表 2.2.2-2 に記載のシステム			WHVC, JH25 山岳路, 長距離輸送
内航貨物船	4 基	100kW/	-	表 2.2.3-4 耐久走行パターン
沿岸旅客船	3 基	100kW/	-	表 2.2.3-4 耐久走行パターン
鉄道 2 両編成	4 基	10kW/	-	表 2.2.3-5 耐久走行パターン
油圧ショベル 20 トンクラス	1 基	1.8kW/	-	表 2.2.3-6 耐久走行パターン
油圧ショベル 13 トンクラス	1 基	1.45kW/	-	表 2.2.3-6 耐久走行パターン
農業用トラクタ 50kW クラス	0.32 基	1.71kW/	-	表 2.2.3-7 耐久走行パターン

スタックあたり出力の時間分布

各アプリケーションの耐久時間内における、各出力帯での総使用時間は図 2.2.3-1 に示すとおり。

FC 水温の時間分布

各アプリケーションの耐久時間内における、各 FC 水温帯での総使用時間は図 2.2.3-4 に示すとおり。

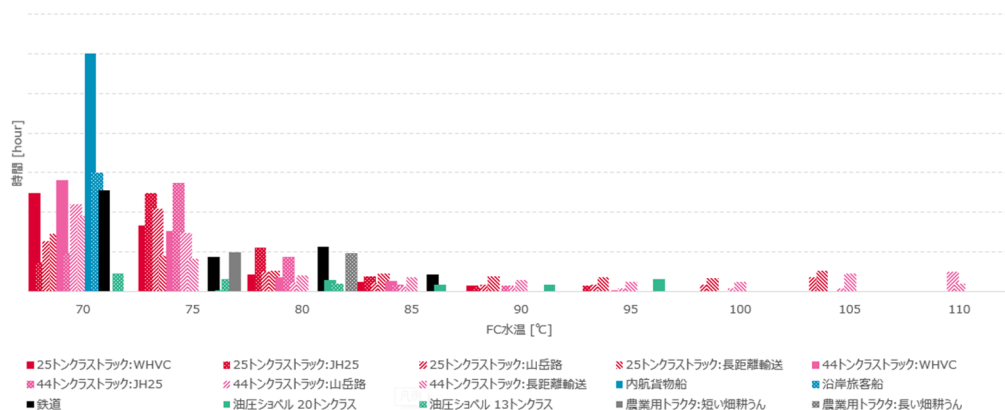


図 2.2.3-4 FC 水温の時間分布

スタック内平均湿度の時間分布

各アプリケーションの耐久時間内における、各湿度帯での総使用時間は図 2.2.3-5 に示すとおり。

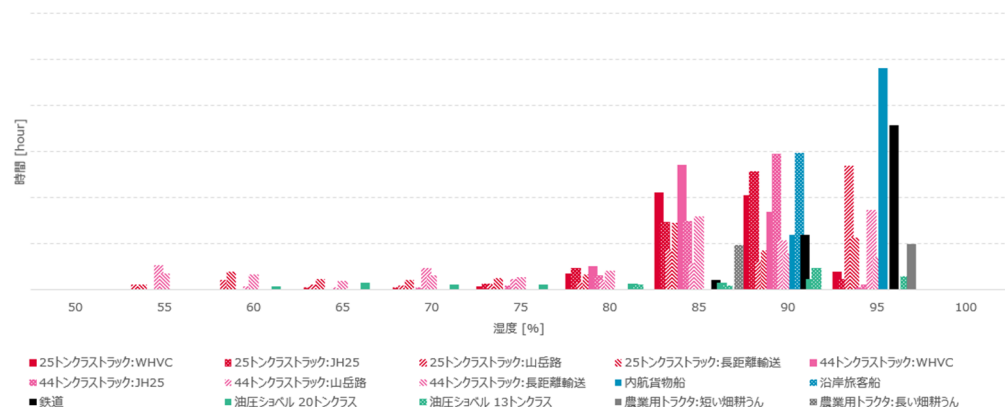


図 2.2.3-5 スタック内平均湿度の時間分布

起動停止回数

各アプリケーションの耐久時間内における起動停止回数は表 2.2.3-10 に示すとおり。

表 2.2.3-10 起動停止回数

アプリケーション	起動停止回数	走行パターン
25 トンクラストラック	100,000 回	WHVC
44 トンクラストラック	100,000 回	WHVC
内航貨物船	500 回	表 2.2.3-4 耐久走行パターン
沿岸旅客船	4,000 回	表 2.2.3-4 耐久走行パターン
鉄道 2 両編成	6,350 回	表 2.2.3-5 耐久走行パターン
油圧ショベル 20 トンクラス	2,500 回	表 2.2.3-6 耐久走行パターン
油圧ショベル 13 トンクラス	2,500 回	表 2.2.3-6 耐久走行パターン
農業用トラクタ 50kW クラス	2,500 回	表 2.2.3-7 耐久走行パターン

2.2.4 2040 年目標

(1) 2040 年頃の目標設定の考え方

2030 年頃の IV 目標設定では、25 トンクラス大型トラックの製品要件を代表点として I-V 特性目標を導出した。しかし 2.2.2 節の今後の課題で述べた通り、大型トラックで欠かすことのできない 300kW 以上のエンジン搭載車種の駆動源を FC で置き換えるには課題があった。2040 年頃の目標では、現在ディーゼルエンジンでカバーされている大型トラック全般の FC 化を、駆動ユニットの FC 置き換えにより可能とすることをゴールとして I-V 特性目標を導出する。

(2) 計算前提

表 2.2.4-1 に計算前提を示す。2040 年頃の目標では、現行大型トラックのディーゼルエンジンを、搭載スペースの大幅な拡張なく FC で置き換え可能とすることを目標設定の大前提とした。具体的には、2030 年頃の前提に対し、FC スタック数は 44 トントラックまでを包含する全てのクラスで 2 基とし、FC 定常出力とシステム最大出力をエンジン出力同等とした。これにより 2030 年頃に対して I-V 特性と出力密度のレベルアップが想定される。

一方、FC システム・車両側の性能向上を考慮することで I-V 特性への過大な目標割り付けとなることを回避する。具体的には、ラジエータは現行のエンジン冷却用ラジエータと同等のサイズとすることを求めつつも、FC 最大水温増加等による冷却能力向上を見込んだ。同様に、車両の空力改善による走行抵抗低減や FC システムの各種補機の消費電力低減、補機小型化やレイアウト改善（想定）によるセル面積向上を盛り込んだ。

また、I-V 特性の BOL 目標値導出において重要となるのが、I-V 特性の劣化特性の前提である。2040 年目標設定では、既定のストレス入力に対する触媒溶出・析出速度の現行値（Gen2 MIRAI 同等）を 1 とした場合の比率でケーススタディを行った。

表 2.2.4-1 ケーススタディの前提条件

項目		2040年頃の目標値	参考：2030年頃の目標値 HDT他、各種アプリ要件から	
車両		44トントラック	25トントラック	44トントラック
製品目標	耐久時間	5万時間	←	
	航続距離	1000km以上	—	
出力	FC定常出力 [kW] ※走行抵抗を現行値とした場合	350	200	300
	システム最大出力 [kW] ※走行抵抗を現行値とした場合	450	300	400
車両・システム	走行抵抗（空気抵抗Cd）	現行値（非公開）～10%低減	現行値（非公開）	
	FCスタック数 [基]	2	2	4
	セル枚数 [枚]	330	←	
	セル面積 [cm ²]	273, 293	273	
	2次電池容量 [kWh]	90	←	
	ラジエータ放熱量 [kW]	210, 220, 263※最大水温120℃前提	210	336
	FC最大水温[℃]	105, 120	105	
	FC補機消費電力 ※Gen2を100%とした場合の比率	ACP:93%, WP:90%, HP:0%, FDC:80%, RadFan:80%	各100%	
耐久要件	耐久走行パターン	WHVC + 始動停止(1回/cycle)	←	
	動力性能要件（耐久走行後）	350kW定常発電可能	200kW定常	300kW定常
触媒耐久前提	触媒溶出・析出速度 ※Gen2を1とした場合の比率	1, 1/30	1	



図 2.2.4-1 FC の各種補機

(3) 計算方法

2030 年頃目標の導出と同様に、EOL の I-V 特性で動力性能要件を満たすことを第 1 の要件として、さらに耐久走行による性能低下分（性能劣化）を耐久時間相当分の劣化シミュレーションで見込んだ時に必要となる BOL での I-V 特性を求めた。

(4) ギャップ把握とケーススタディ

2040 年目標のギャップ把握

まず、2030 年頃の目標に対する 2040 年頃の目標のギャップを把握するため、FC システム・車両側の性能向上がない場合を仮定して 2040 年頃の目標達成に必要な I-V 特性を求め、図 2.2.4-2 に示した。図 2.2.4-3 にはその根拠となる EOL での FC 発熱量を示す。2030 年頃の目標の状態では定常出力要求値 350kW での EOL における発熱量は 380kW となり、ラジエータ冷却能力の目標値 210kW に対して大きなギャップが存在することが分かる。これに対し、冷却能力 210kW で 350kW を定常出力可能とするためには、図 2.2.4-2 に示されるようにセル電圧を $2.5\text{A}/\text{cm}^2$ で 0.3V 向上させる必要がある。後（図 2.2.4-5）に示されるが、この電圧ギャップは触媒活性向上比率に直すと数千倍以上もの値となり実現可能性が懸念される。（2040 年 WG との意見交換により、触媒活性向上率の限界値は 100 倍以内を想定）

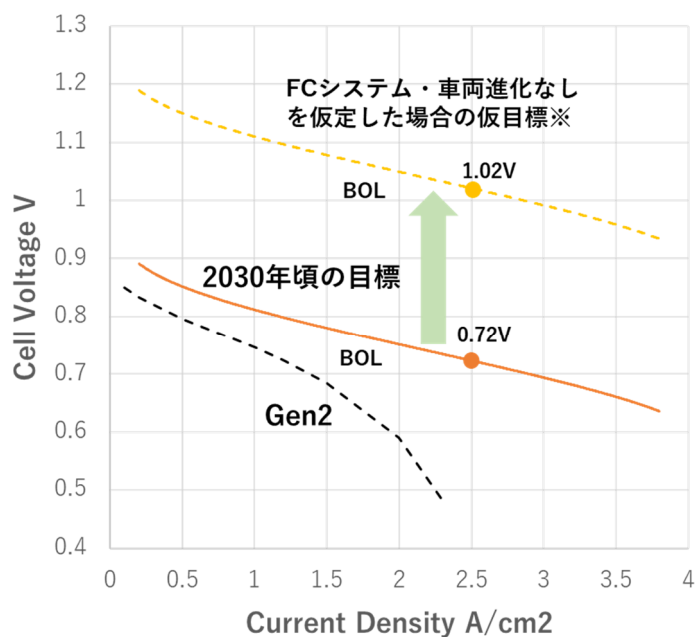


図 2.2.4-2 FC システム・車両進化なしの場合の 2040 仮目標 と 2030 年頃目標のギャップ

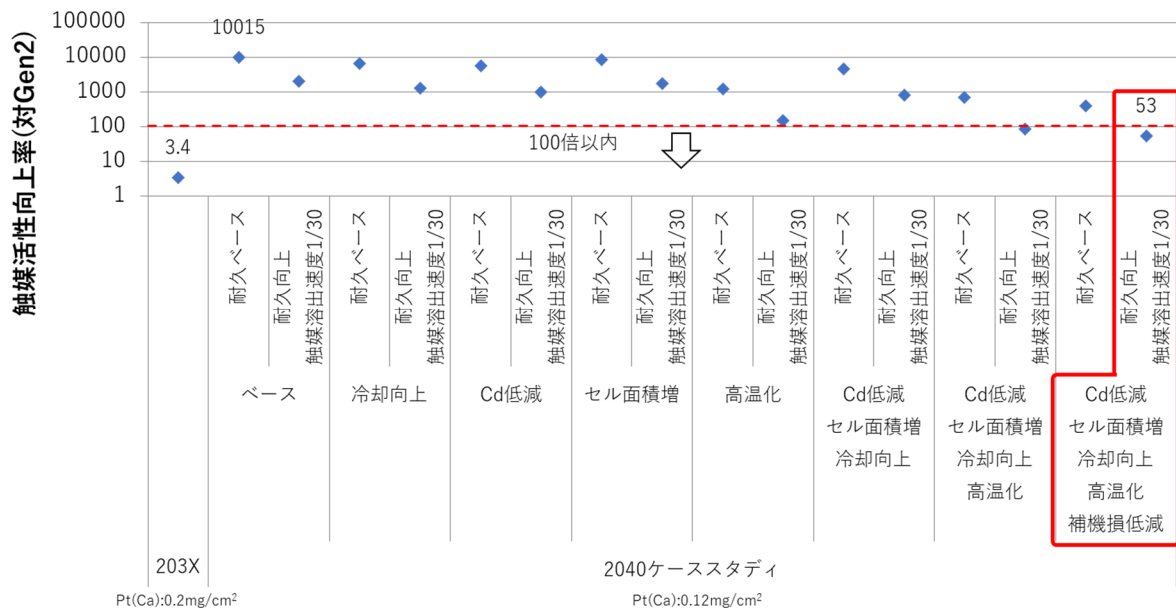


図 2.2.4-5 ケース毎の触媒活性向上率要求値（カソード Pt 目付前提：0.12mg/cm²）

（ 5 ） 結果：2040 年頃の目標 I-V 特性

以上に述べたケース毎の解析結果を踏まえ、2040 年頃の目標 I-V 特性は、表 2.2.4-2 に示される前提の下で図 2.2.4-6 に示される特性となった。電圧要求値は 2.5A/cm² で 0.86V であり、耐久向上を含め FC システムと車両の将来進化を見込むことで 0.16V（約 50%）緩和された。また、図 2.2.4-5 に示されるようにこの I-V 特性を実現するために必要な触媒活性向上率は、カソード Pt 目付 0.12mg/cm² で 53 倍（簡易モデルによる概算値）となった。

表 2.2.4-2 目標 I-V 設定の前提条件

項目		2040年頃の目標I-V特性の試算前提
車両・システム	走行抵抗（空気抵抗Cd）	現行の10%低減
	FCスタック数 [基]	2
	セル枚数 [枚]	330
	セル面積 [cm ²]	293
	2次電池容量 [kWh]	90
	ラジエータ最大放熱量 [kW]	263 ※最大水温120℃, 外気温45℃
	FC最大水温[℃]	120
	FC補機消費電力 ※Gen2を100%とした場合の比率	ACP:93%, WP:90%, HP:0%,FDC:80%, RadFan:80%
触媒耐久性能	触媒溶出・析出速度 ※Gen2を1とした場合の比率	1/30倍

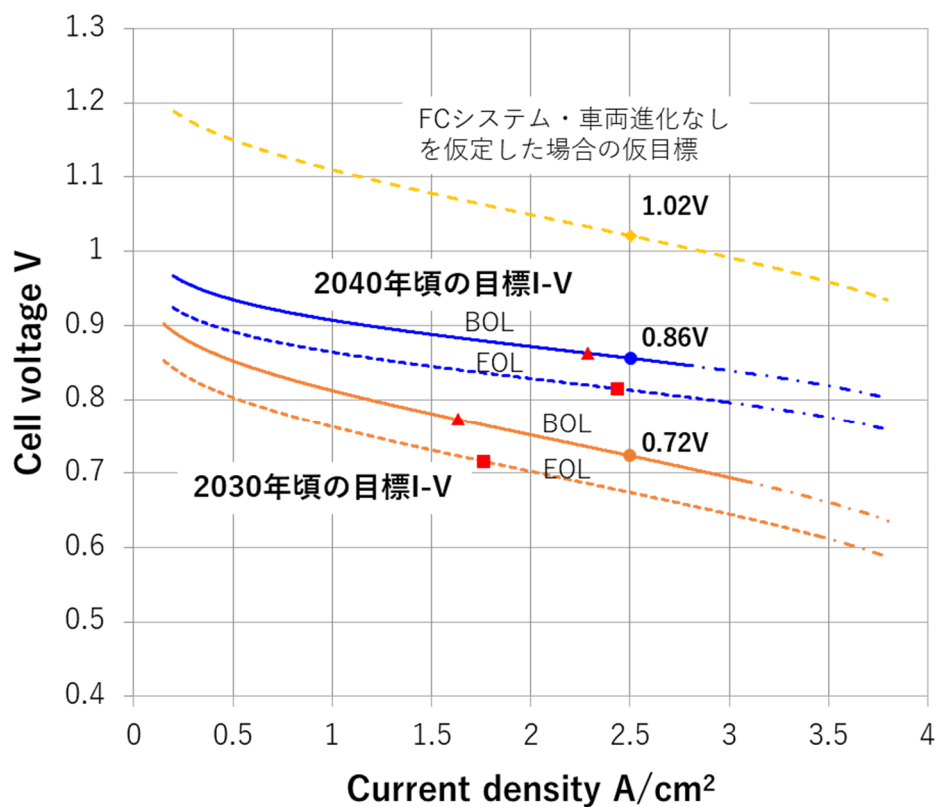


図 2.2.4-6 2040 年頃の目標 I-V 特性

注 1 BOL (Beginning of Life: 初期性能)、EOL (End of Life: 耐久後性能)、耐久パターン: WHVC+始動停止(1 回/cycle)

注 2 2030 年頃の目標 I-V (Pt 量 0.19g/kW 前提): : 電流密度 1.63A/cm²、電圧 0.77V、: 電流密度 1.76A/cm²、電圧 0.72V

注 3 2040 年頃の目標 I-V (Pt 量 0.07g/kW 前提): : 電流密度 2.29A/cm²、電圧 0.86V、: 電流密度 2.44A/cm²、電圧 0.81V

注 4 I-V 特性上の実線もしくは点線で示されている範囲は 44 トン HDT での使用範囲を表す。それ以外の一点鎖線の範囲は、乗用車を含めた他のアプリケーションで使われる可能性もある。

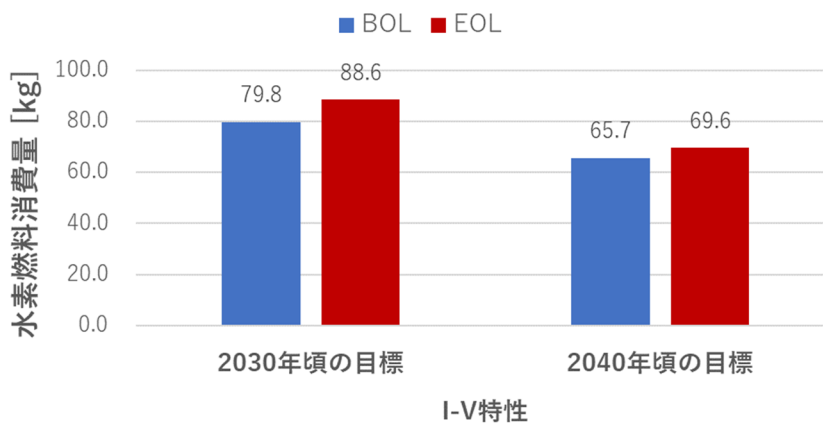


図 2.2.4-7 目標 I-V 特性の燃費 (1000km 走行に必要な燃料消費量@44 トン、WHVC)

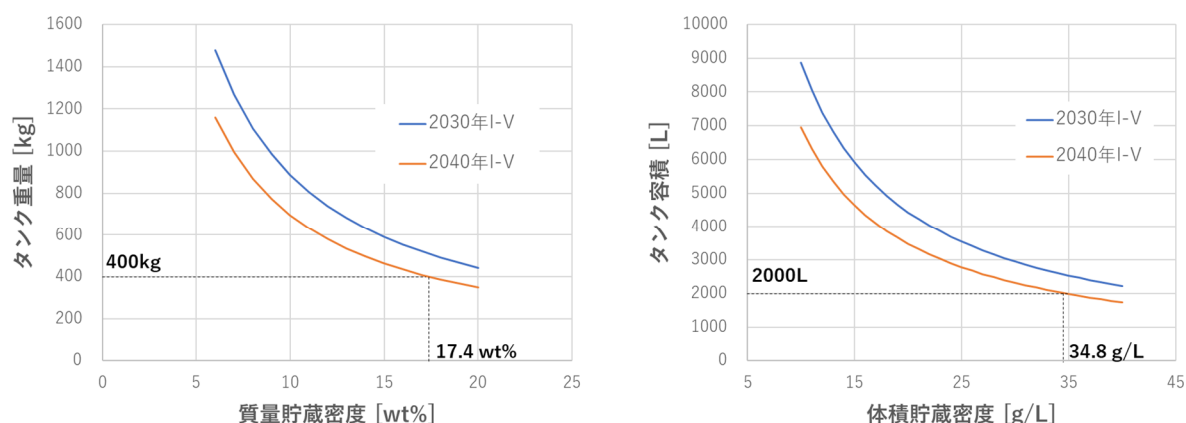


図 2.2.4-8 航続距離 1000km に必要な水素タンク質量と容積

図 2.2.4-7 に 2030 年頃と 2040 年頃の目標 I-V 特性による燃費（1000km 走行に必要な燃料消費量@WHVC）を示す。約 20%の燃費削減が見込まれ、これにより平均車速 80km/h で 5 万時間走行した場合、総燃料消費量に直すと HDT1 台当たり約 66 トン分の水素消費量削減となる。

また、2040 年頃の目標 I-V 特性による燃費から、1,000km 走行に必要な水素タンクの質量および体積を求め、図 2.2.4-8 に示した。ここでは水素貯蔵システムの性能指標である質量貯蔵密度および体積質量密度を現状相当から将来値を想定し、質量と体積を求めている。

2.2.5 2035 年目標

（１）2035 年の HDV 目標設定の考え方

2035 年頃の目標 I-V 特性は、2030 年頃から 2040 年頃にかけて、44 トントラックの製品要件（ディーゼルパリティ）を段階的に満たしていく中間目標として設定した。また、材料目標に変換した際に、材料進化のシナリオに無理なく整合する様、システム側の前提条件である電極総面積（セル面積、セル枚数）とラジエータ放熱能力の調整を行った。

（２）計算前提

表 2.2.5-1 に計算前提を示す。前項で述べたとおり、現行大型トラックの製品要件（ディーゼルパリティ）を段階的に満たしていくという考え方のもと、まずは FC システムをディーゼルエンジンの搭載スペースに収めることを優先して、44 トントラックまでを包含する全てのクラスで FC スタック数を 2 基とした。一方で、システム最大出力は 2030 年頃から 2040 年頃にかけて段階的に向上させる想定で 425kW とした。また、ラジエータ放熱能力については、現行のエンジン冷却用ラジエータに対してある程度積み増すことを許容し、ケーススタディの対象とした。その他の前提について、走行抵抗は現行同等としたほか、FC システムの各種補機の消費電力は 2030 年頃から 2040 年頃にかけて段階的に低減していく想定とした。

このような前提のもと、触媒活性向上率、電子・プロトン抵抗低減代、触媒溶出・析出速度などの材料特性パラメータに加え、運転水温、電極総面積（セル枚数、セル面積）、ラジエータ放熱能力などをパラメータとしてケーススタディを行った。

表 2.2.5-1 ケーススタディの前提条件

項目		2035年頃の目標値	参考：2030年頃の目標値		参考：2040年頃の目標値
車両		44トントラック	25トントラック	44トントラック	44トントラック
製品目標	耐久時間	5万時間	←	←	←
	航続距離	1000km以上	←	←	←
出力	FC定常出力 [kW] ※走行抵抗を現行値とした場合	325	200	300	350
	システム最大出力 [kW] ※走行抵抗を現行値とした場合	425	300	400	450
	走行抵抗（空気抵抗Cd）	現行値（非公開）	←		現行値10%減
車両・システム	FCスタック数 [基]	2	2	4	2
	セル枚数 [枚]	330,396	330		330
	セル面積 [cm ²]	273,283	273		293
	2次電池容量 [kWh]	90	←		←
	ラジエータ放熱量 [kW]	282～420	210	336	263
	FC最大水温 [°C]	105,110,120	105		120
	FC補機消費電力 ※Gen2を100%とした場合の比率	ACP:96.5%, WP:95%, HP:50%, FDC:90%, RadFan:90%	各100%		ACP:93%, WP:90%, HP:0%, FDC:80%, RadFan:80%
	耐久走行パターン	WHVC+始動停止(1回/cycle)	←		←
耐久要件	動力性能要件（耐久走行後）	325kW定常	200kW定常	300kW定常	350kW定常
触媒耐久前提	触媒溶出・析出速度 ※Gen2を1とした場合の比率	1,1/2	1		1/30

（３）計算方法

2030 年頃、2040 年頃の目標導出と同様に、EOL の I-V 特性で動力性能要件を満たすことを第 1 の要件として、さらに耐久走行による性能低下分（性能劣化）を耐久時間相当分の劣化シミュレーションで見込んだ時に必要となる BOL での I-V 特性を求めた。

（４）結果：2035 年の目標 I-V 特性

図 2.2.5-1 にケーススタディ結果を示す。計算前提はセル枚数 396 枚、セル面積 283cm²、ラジエータ放熱量 353kW（運転温度 120、外気温度 45 想定）である。縦軸に触媒活性向上率（対 Gen2 比）、横軸に電子・プロトン抵抗低減代（対 Gen2 比）を取り、等高線図で EOL の I-V 特性で動力性能要件を成立させるのに必要なラジエータ放熱量を示す。なお、触媒活性向上率、電子・プロトン抵抗低減代は簡易モデルによる概算値である。図中赤太線がそれぞれの運転温度毎のラジエータ放熱能力であり、線より右上の領域が各運転温度での成立範囲を示す。図より、2030 年頃、2040 年頃の目標導出の議論と同様、EOL での動力性能要件成立には、触媒活性向上、電子・プロトン抵抗低減、触媒溶出・析出速度低減、運転温度高温化、を組み合わせる必要があることが分かる。なお、ガス輸送抵抗低減について今回のケーススタディに含めていないが、その理由は 2030 年頃の目標導出の時点で既に十分に低減されたとするパラメータ値を採用しているためであり、ガス輸送抵抗低減の必要性を否定するものではないことを注記しておく。本ケーススタディ結果をもとに、材料研究者と議論を重ね、導出した I-V 特性を図 2.2.5-2 に示す。なおこの I-V 特性は今回のケーススタディにおいて図 2.2.5-1 中 点で示す条件で得られたものである。図 2.2.5-2 中、白抜きシンボルでセル枚数 330 枚、セル面積 273cm²、ラジエータ放熱量 420kW（運転温度 120、外気温度 45 想定）とした場合の熱定格動作点も重ねて示す。図より、総電極面積（セル枚数、セル面積）を増加させることで熱定格動作点を低電流密度側にシフトできることが分かる。熱定格動作点が高電流密度側にあるほど触媒層酸素輸送抵抗が大きくなり、触媒層の酸素輸送特性に対する要求が高くなる。材料研究者と議論を重ね、材料進化のシナリオに無理な

く整合させる様、セル枚数を 2030 年頃、2040 年頃の想定より 2 割増加、セル面積は 2030 年頃と 2040 年頃の間値とすることとした。2.3.2 項で述べた通り FC システム体積は各アプリの許容搭載スペースで定義しており、その大きさは変わらないため、今回の目標 I-V 特性で車両システムを成立させるためには同一セル枚数における FC スタックの小型化や FC システムの小型化が必要である。

以上の検討より決定した 2035 年頃の目標 I-V 特性について、表 2.2.5-2 に前提条件、図 2.2.5-3 に I-V 特性を示す。FC 冷却水高温化(最大 120)および耐久向上(触媒溶出・析出速度 Gen2 比 1/2 倍)を実現できる前提の元、電圧要求値は BOL で 0.76V@2.18A/cm²、EOL で 0.71V@2.37A/cm² となった。

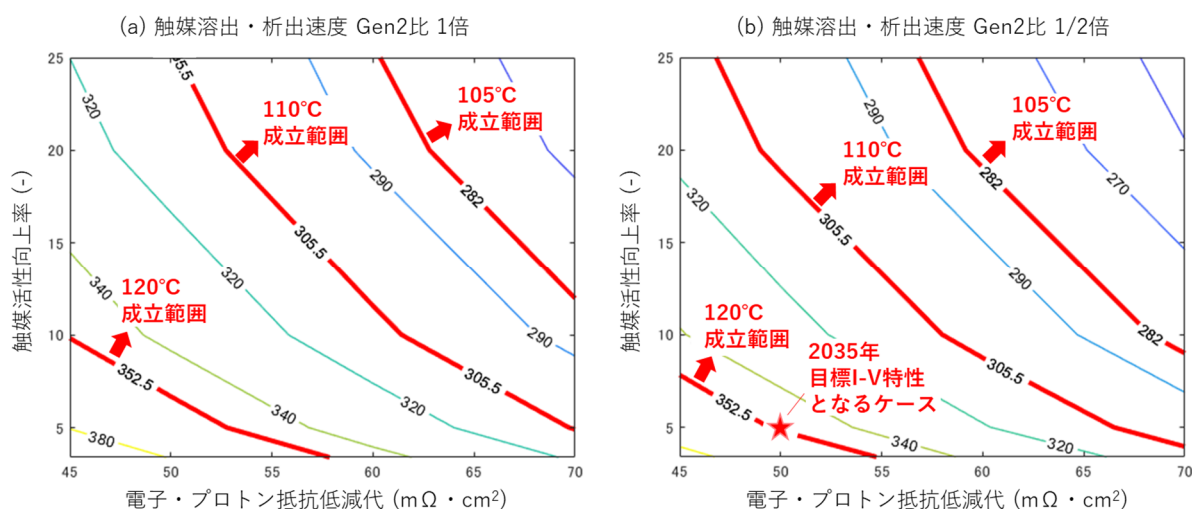
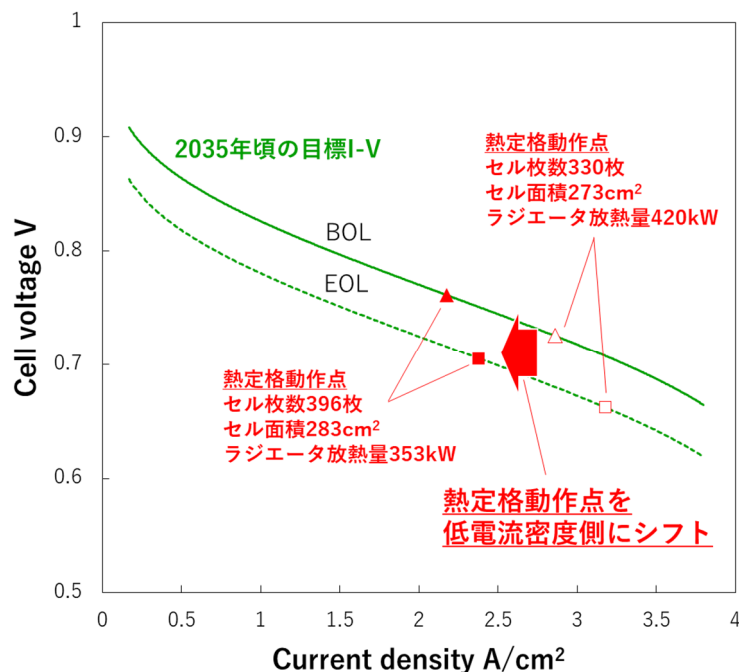


図 2.2.5-1 ケーススタディ結果

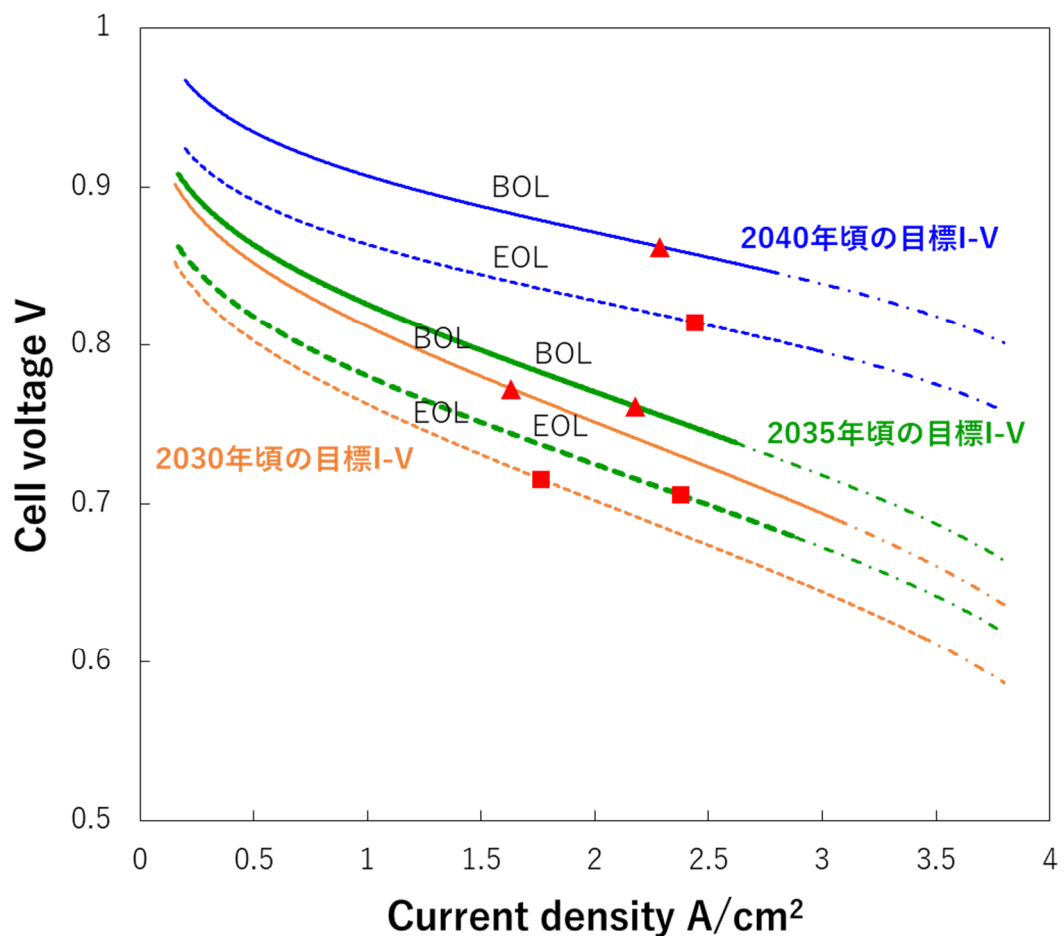


注 BOL(Beginning of Life: 初期性能)、EOL(End of Life: 耐久後性能)、耐久パターン: WHVC+始動停止(1 回/cycle)

図 2.2.5-2 セル枚数、セル面積、ラジエータ放熱量違いの熱負荷動作点

表 2.2.5-2 目標 I-V 設定の前提条件

項目		2035年頃の 目標I-V特性の試算前提	参考：2040年頃の 目標I-V特性の試算前提
車両・システム	走行抵抗（空気抵抗Cd）	現行同等	現行の10%低減
	FCスタック数 [基]	2	2
	セル枚数 [枚]	396	330
	セル面積 [cm ²]	283	293
	2次電池容量 [kWh]	90	90
	ラジエータ放熱量 [kW]	353 ※最大水温120℃、外気温45℃	263 ※最大水温120℃、外気温45℃
	FC最大水温 [℃]	120	120
	FC補機消費電力 ※Gen2を100%とした場合の比率	ACP:96.5%, WP:95%, HP:50%, FDC:90%, RadFan:90%	ACP:93%, WP:90%, HP:0%, FDC:80%, RadFan:80%
触媒耐久性能	触媒溶出・析出速度 ※Gen2を1とした場合の比率	1/2倍	1/30倍



注 1 BOL (Beginning of Life: 初期性能)、EOL (End of Life: 耐久後性能)、耐久パターン: WHVC+始動停止(1 回/cycle)

注 2 2030 年頃目標 I-V 特性(Pt 量 0.19g/kW 前提): : 電流密度 1.63A/cm²、電圧 0.77V、: 電流密度 1.76A/cm²、電圧 0.72V

注 3 2035 年頃目標 I-V 特性(Pt 量 0.13g/kW 前提): : 電流密度 2.18A/cm²、電圧 0.76V、: 電流密度 2.37A/cm²、電圧 0.71V

注 4 2040 年頃目標 I-V 特性(Pt 量 0.07g/kW 前提): : 電流密度 2.29A/cm²、電圧 0.86V、: 電流密度 2.44A/cm²、電圧 0.81V

注 5 I-V 特性上の実線もしくは点線は 44 トン HDT で想定した使用範囲を表す。それ以外の一点鎖線の範囲は、乗用車を含めた他のアプリケーションで使われる可能性があり、今後乗用車向けの検討の際に改めて必要性を議論する

図 2.2.5-3 2035 年頃の HDV 向け目標 I-V 特性

2.2.6 2035 年 FCV 目標

(1) 目標設定の考え方

1 章で示されている通り、2035 年は高いエネルギー密度が要求される大型セグメントが FC 乗用車(FCV)マーケットの中心であると想定し、Large-SUV クラスの代表的な車両スペックを前提に検討した。また、2035 年の HDV の IV 特性目標（物性値）と可能な限り共通化を図り、触媒目付は資源量制約と低コスト化を考慮し HDV よりも削減した。

(2) 計算前提

乗用車の Large-SUV クラスの代表的な車両スペックから計算前提を表 2.2.6-1 の通り設定した。乗用車の使われ方は用途・ユーザによって様々であるが、本検討では通常走行（車両の耐久時間の大半を占める使われ方）を想定した走行パターンとして WLTC+始動停止(1 回/cycle)を設定した。本走行パターンは市街地・郊外・高速の走行状態に始動停止を加えたものである。これによれば、走行時における燃料電池の発電状態での電位と共に、始動停止による高電位から低電位の変化を与えることができ、一般的な乗用車ユーザの使い方での燃料電池への劣化ストレス（電位、電流、湿度、温度）を模擬することができる。燃料電池セルは、本ストレスに耐久時間曝されることによる劣化を計算で模擬した。また、この走行パターンでは冷却水出口温度は 70 付近に保たれる冷却系設計を想定した。一方で、耐久時間の間、乗用車としての一定の性能を確保することを想定し、最も厳しい使われ方として牽引登坂条件での走行が担保されることを動力性能要件とした。なお、牽引登坂条件における燃料電池の冷却水出口温度は 120 以内である。

以上の計算前提の下、HDV 同様 EOL において所定の登坂条件での FC 発熱量がラジエータの冷却能力以内であること（動力性能要件）を I-V 特性選定の要件とした。そして、触媒活性やオーム抵抗、ガス拡散抵抗といった I-V 特性物性値を 2035 年頃の HDV 目標値と同一にした場合に要件が満たされるかを判定した。

表 2.2.6-1 2035 年頃の FCV 目標選定のための計算前提

項目		試算前提
車両システム	車両クラス	Large-SUV (SUV E セグ)
	FC スタック	1 基
	セル面積	283cm ²
	走行パターン	WLTC+始動停止(1 回/cycle) 冷却水出口温度は 70 付近
	耐久時間	1 万時間
	動力性能要件	牽引登坂
	冷却水出口最大水温	120 （牽引登坂など高負荷走行時）
	FC 補機消費電力 Gen2 を 100%とした場合の比率	ACP:96.5%, WP:95%, HP:50%, FDC:90%, RadFan:90%
触媒	Ca-Pt 目付	0.1mg/cm ² (HDV:0.178mg/cm ²)

	I-V 物性値 (比活性、オーム抵抗、物質移動抵抗)	2035 年頃の HDV と同等
	触媒溶出析出速度 Gen2 を 1 とした場合の比率	1/2 倍

ACP:エアコンプレッサー、WP:ウォーターポンプ、HP:水素循環ポンプ、FDC:FC 用 DCDC コンバータ、RadFan: ラジエータ用ファン

(3) 計算方法

表 2.2.6-1 の計算前提の下、HDV 同様 EOL において所定の登坂条件での FC 発熱量がラジエータの冷却能力以内であること（動力性能要件）を I-V 特性選定の要件とした。そして、触媒活性やオーム抵抗、ガス拡散抵抗といった I-V 特性物性値を 2035 年頃の HDV 目標値と同一にした場合に要件が満たされるかを判定した。

(4) 結果

Ca-Pt 目付を $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 、I-V 特性物性値を 2035 年頃の目標値とした場合の I-V 特性(EOL) に対する発熱量を解析した結果、図 2.2.6-1 に示される通り、熱負荷点における発熱量が冷却性能限界内に収まることが確認された。これより 2035 年頃の FCV 向け I-V 特性目標値は、HDV と共通の I-V 物性値で、HDV($0.178\text{mg}/\text{cm}^2$)よりも低減された Ca-Pt 目付により成立することが分かった。導出された I-V 特性を図 2.2.6-2 に示す。HDV に比べて低い I-V 特性(BOL)となっているが、これは目付量の差によるものである。点線は EOL の I-V 特性である。熱負荷点において BOL からの電圧低下が約 5%であり、耐久の目安とされることの多い 10%から半減されている。これは、触媒溶出析出速度を現状(Gen2)の 1/2 とした影響が大きいと考えられる。

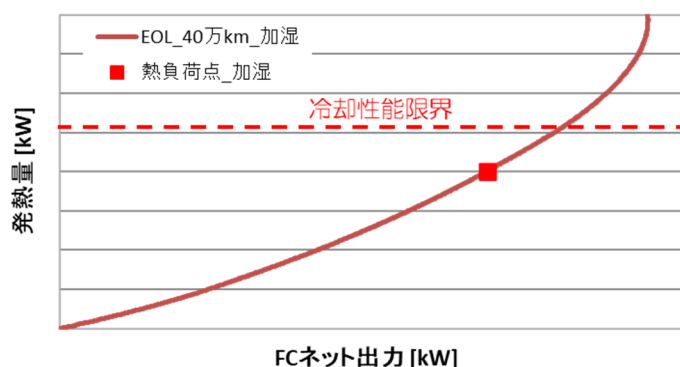
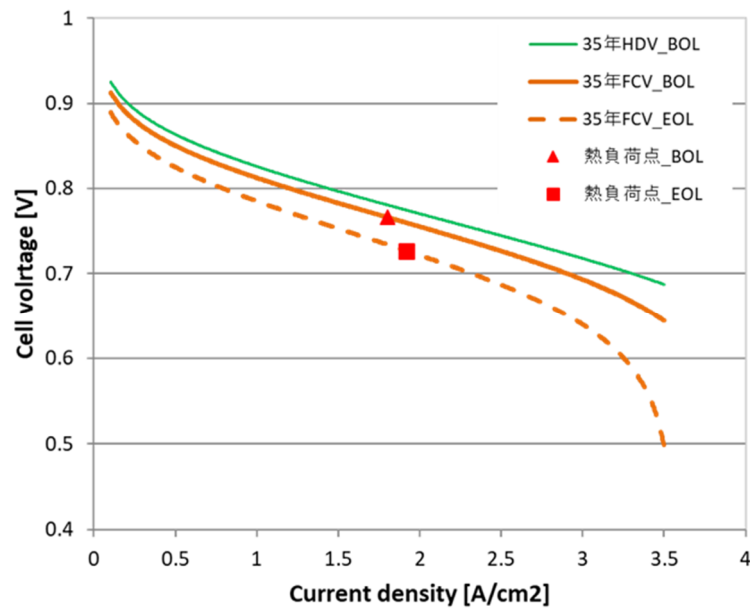


図 2.2.6-1 EOL における熱負荷点での発熱量



注 1 BOL (Beginning of Life: 初期性能)、EOL (End of Life: 耐久後性能)、耐久パターン: WLTC+始動停止(1 回/cycle)

注 2 : 電流密度 1.8A/cm², 電圧 0.77V, : 電流密度 1.92A/cm², 電圧 0.73V

注 3 Ca-Pt 目付 0.1mg/cm², I-V 特性物性値 2035 年頃の目標値と同一

図 2.2.6-2 2035 年頃の FCV 向け目標 I-V 特性

2.3 FC システムとしての技術目標

2.3.1 コスト

米国 DOE が試算した 2030 年の HDV コスト目標[1]を参考にして、2030 年頃の FC システム目標 0.9 万円/kW、FC スタックコスト 0.45 万円/kW (年産 10 万台前提)を提案する(為替レートは 2021 年頃の 110 円/ドルを前提)。ただし、FC システムのコストについてはスタックと水素、エア供給系および冷却系システムの BOP を対象とし、水素貯蔵システム、2 次電池、DC/DC コンバータ等のパワーエレクトロニクス、モータを含まない。

DOE の最終・中間目標 (Ultimate Target) はトップダウンで設定している。LDV (乗用車) はネット出力 80kW、HDV はネット出力 275kW の FC システムを前提とし、HDV についてはクラス 8 (米国における車両総重量 15 トン以上) の大型トラックを対象として、ディーゼルエンジン (排ガス処理装置を含む) のコスト 2.5 万ドルと等価の FC システムコスト (出力 390kW) を最終目標とし、現在からの技術進展で達成し得る 80 ドル/kW を 2030 年頃の中間目標と設定している。

【最終目標】: LDV : 30 ドル/kW、HDV : 60 ドル/kW

【中間目標】: LDV : 40 ドル/kW (2025)、HDV : 80 ドル/kW (2030)

最終・中間目標をトップダウンで定め、FC システムのコストを DFMA (Design for Manufacture and Assembly) に基づき、量産時の原材料、加工・アセンブリの積上げコストを計算し、原材料の低コスト化・生産技術等の R&D 成果によるコストインパクトを反映することで目標値とのギ

アップを把握、コスト低減の道筋を継続的にアップデートしている。

HDV については 2023 年から 2024 年の技術進展（M2FCT プロジェクトで開発された新規 PtCo/C-ZIF-8 カソード触媒による Pt 担持量低減、膜の e-PTFE や GDL の原材料のコスト増の影響、BOP の性能改善）で 12 ドル/kW を達成できる見込みであるが、2025 年目標\$140/kW（年産 5 万台前提）に対して依然として 20 ドル/kW 程度の乖離がある。一方、LDV については現状で 55 ドル/kW（年産 50 万台前提）で 2025 年目標である 40 ドル/kW 達成は困難であり、30 ドル/kW の最終目標達成はさらに困難と予測されている[2]。今後は、PGM 等の材料費の大幅な削減、システム簡素化による BOP 部品の除去または統合、耐久性の改善が必須であり、乾式 CCM プロセスや BPP 新規コーティング等の加工技術での効果、バッテリーとのハイブリッドシステムの最適化など、コスト低減に繋がる技術進展を継続することが重要とされている。

今年度は、米国 Strategic Analysis 社（以下、SA 社）が実施した 2023 年の HDV 用 FC システムコスト分析レポート（ドラフト）に基づき[3]、NEDO 技術開発ロードマップで定めた技術目標に対するコスト見通しを試算した。SA 社が前提としている FC システム構成を図 2.3.1-1 に、2023 年および 2030 年におけるシステムおよびスタック構成材料・部材の前提条件を表 2.3.1-1 および表 2.3.1-2 にそれぞれ示す。

FC システムは定格時のネット出力を 275kW とし、2 つのスタックを直列接続、各スタックは 500 セルで構成される。水素は圧縮水素タンクから供給されブロワで再循環し、空気はデミスター、エアフィルタを通してコンプレッサへ入り、プリクーラ、加湿器を通してスタックに供給、冷却システムは燃料電池スタックを冷却するための高温ループと電子部品を冷却するための低温ループ（圧縮空気の冷却でも使用）の 2 つで構成される。高出力密度化により、2023 年のセルのアクティブエリア（発電領域）は 526cm² であるが、2030 年には高出力密度化の達成により 343cm² に小型化されることを想定しており、小型化によって主要材料の使用量低減が期待される。

また、2023 年から 2030 年への技術進展として Pt 目付量の低減、電解質膜の薄膜化と補強材の低コスト化、センサー数削減やコンディショニング時間の短縮などを想定しているが、高活性触媒や高耐久担体、高酸素透過アイオノマなど新規材料の採用によるコストへの影響、低廉材料の使用と耐久性確保の両立などに留意が必要である。

SA 社の 2023 年および 2030 年における HDV 用 FC システムのコスト試算結果を図 2.3.1-2 に示す。量産効果については、年産 2 千台から 10 倍で 2/3 程度、100 倍で半減程度となっている。スタックコストについては、上記の技術進展によって 35%（2 千台/年）～ 45%（10 万台/年）となるが、BOP コストについては、交換コスト低減が主要因でスタックに比べてコスト低減効果が少ない結果となっている。

2030 年のスタックの主要材料・部材コスト内訳については、触媒層（触媒・担体・アイオノマの材料費と CCM 化）、電解質膜、GDL、セパレータおよびガasket で全体の 80%以上を占め、BOP については、水素・空気供給システムおよび冷却システムで約 70%、交換コストは約 15% である（図 2.3.1-3、図 2.3.1-4）。さらに、水素供給システムでは再循環ポンプで約 65%、空気供給システムではコンプレッサで約 80%、冷却システムではラジエータとファンで約 80%のコストを占める。

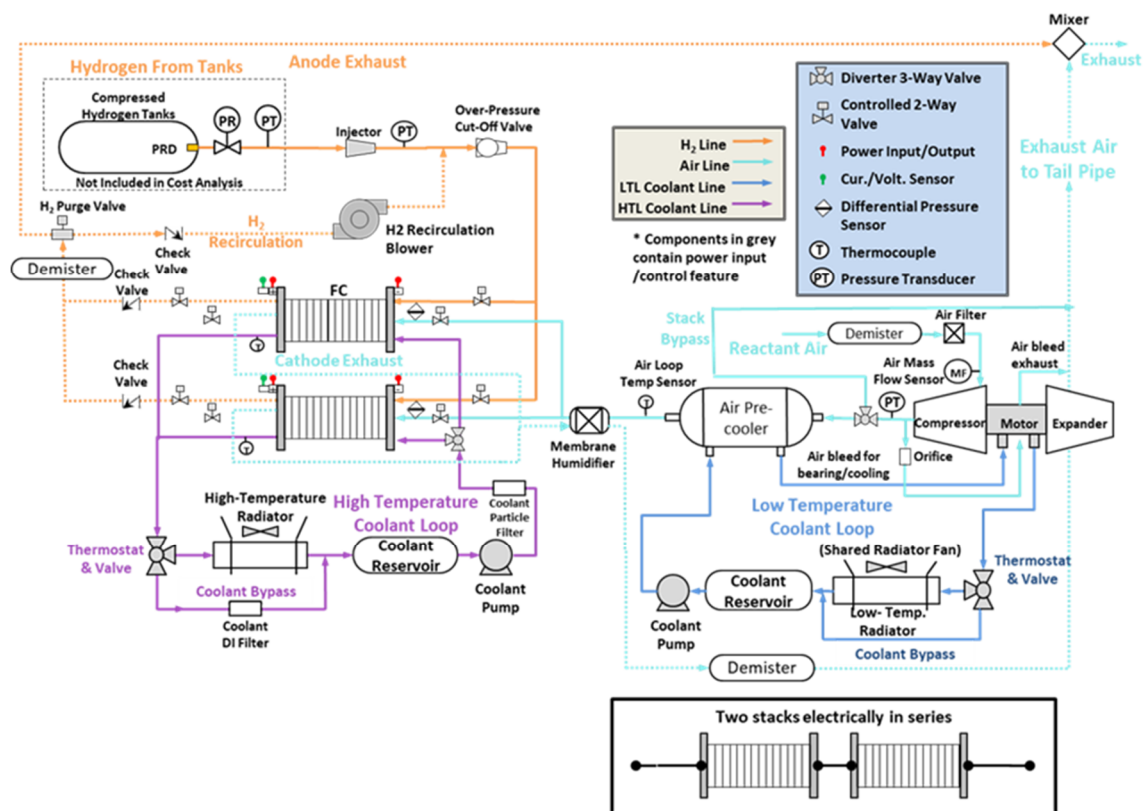


図 2.3.1-1 米国 Strategic Analysis 社の HDV 用 FC システム構成[3]

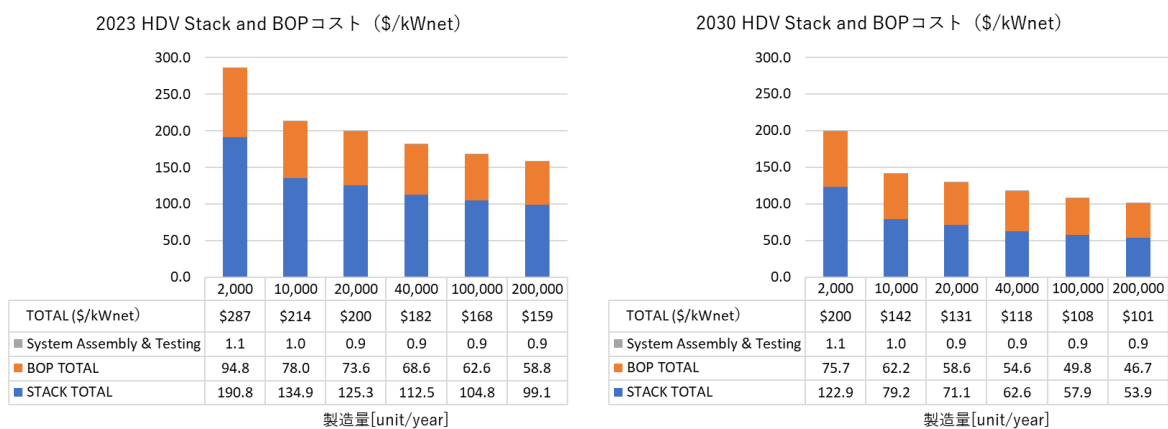


図 2.3.1-2 米国 Strategic Analysis 社の FC システムコスト試算[3]

表 2.3.1-1 FC システム・スタックの前提条件[3]

項目	2023 HDV System	2030 HDV System
ネット出力 (kW _{net})	344 (BOL), 275 (EOL)	340 (BOL), 275 (EOL)
グロス出力 (kW _{gross})	407 (BOL), 338 (EOL)	393 (BOL), 327 (EOL)
セル電圧 (V)	0.779 (BOL), 0.70 (EOL)	0.779 (BOL), 0.70 (EOL)
スタック出力密度@定格出力 (mW/cm ²)	774 (BOL), 642 (EOL)	1143 (BOL), 953 (EOL)
Pt 目付量 (mgPt/cm ² total area)	0.45	0.35
	(0.4 ca/0.05 an)	(0.3 ca/0.05 an)
Pt 担持量 (g/kW _{gross})	0.700	0.367
ECSA 低下率 (25,000 時間運転後)	50%	30%
運転圧力 (atm)	2.5	2.5

スタック温度 (冷却水出口温度) (°C)	90	90
Air ストイキ比	1.5	1.5
H2 ストイキ比	2	2
Q/ΔT (kW _{th} /°C)	5.31	5.14
総セル数	1,000	1,000
アクティブエリア面積 (cm ²)	526	343
アクティブエリア / セル面積比	0.625	0.65
スタック数	2 (直列接続)	2 (直列接続)
スタックオーバーサイジング	67%	35%
総アクティブエリア面積 (m ²)	52.6	34.4
スタック重量出力密度 (kW _{gross} /kg)	1.81	2.76
スタック体積出力密度 (kW _{gross} /L)	2.09	3.08
システム効率@定格出力 (%)	53%(BOL), 46%(EOL)	53%(BOL), 47%(EOL)

表 2.3.1-2 スタック構成材料・部材の前提条件[3]

項目	2023 HDV System	2030 HDV System
膜材料	20-micron Nafion® (850EW)	15-micron Nafion® (850EW)
膜補強材	ePTFE	Electrospun PPSU
GDL (非圧縮時)	150 μm (105 μm GDL, 45 μm MPL)	150 μm (105 μm GDL, 45 μm MPL)
触媒	カソード: 0.4 mgPt/cm ² a-Pt/HSC アノード: 0.05mgPt/cm ² Pt/HSC	カソード: 0.3 mgPt/cm ² a-Pt/HSC アノード: 0.05mgPt/cm ² Pt/HSC
CCM	Gore Direct-Coated Membrane with dual-side slot-die coated electrodes	Gore Direct-Coated Membrane with dual-side slot-die coated electrodes
MEA シール	R2R PEN sub-gaskets	R2R PEN sub-gaskets
BPP・表面処理	Flexible graphite with resin impregnation	Flexible graphite with resin impregnation
BPP フォーミング	Embossed	Embossed
BPP 接合	Adhesive	Adhesive
MEA ガスケット	Screenprinted polyolefin elastomer seal on BPP	Screenprinted polyolefin elastomer seal on BPP
冷却/エンドガスケット	Adhesive (Cooling) Screen-Printed Polyolefin Elastomer (End)	Adhesive (Cooling) Screen-Printed Polyolefin Elastomer (End)
エンドプレート	Composite Molded End Plates with Compression Bands	Composite Molded End Plates with Compression Bands
スタック締結方法		
セルアセンブリ	Robotic assembly of graphite BPP assembly, sub-gasketed MEA	Robotic assembly of graphite BPP assembly, sub-gasketed MEA
セル電圧モニタリング	Sensor every 3 cells (low volume), 4 cells (high volume)	Sensor every 4 cells (low volume), 10 cells (high volume)
コンディショニング (hrs)	2.5	1

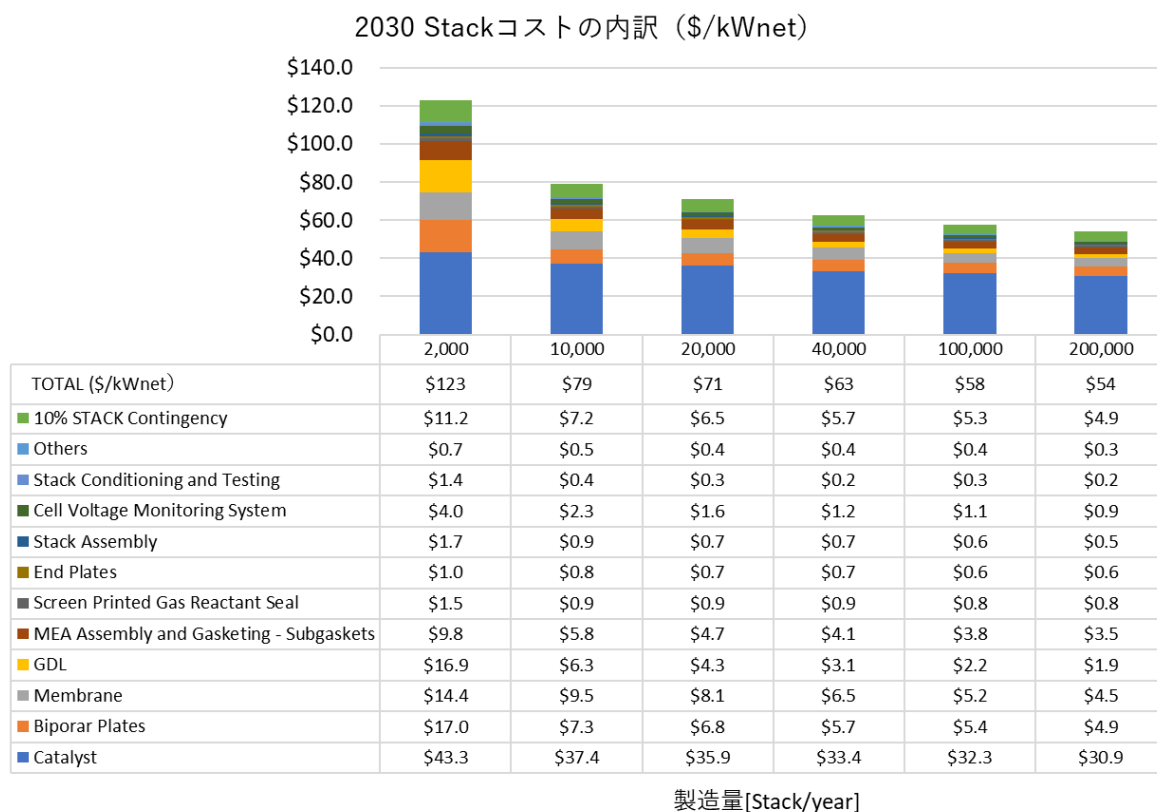


図 2.3.1-3 米国 Strategic Analysis 社の FC スタックコスト試算[3]

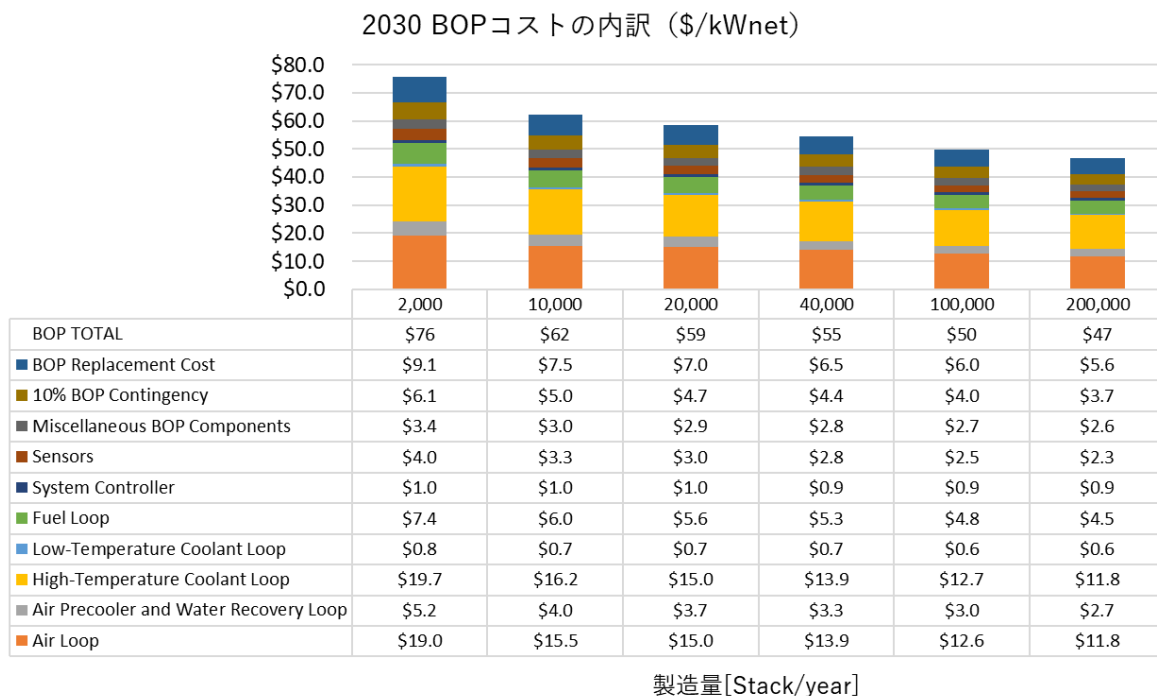


図 2.3.1-4 米国 Strategic Analysis 社の BOP コスト試算[3]

以上の SA 社の FC システムコスト分析の内容に基づき、NEDO 技術開発ロードマップにおける 2030 年頃、2035 年頃および 2040 年頃の技術目標に対するコスト見通しを試算した。ただし、

SA 社の分析については、国内の FC システムの構成、スタックの主要材料・部材の原材料費や加工費、BOP に関する部品費など考え方や前提条件が異なることが予想されるため、OEM 各社にアンケート調査を実施し、SA 社の試算値に対する感度分析を行った上で検討した。その結果、スタックの主要構成部材のコストは全体的に「安価」の傾向、BOP コストは水素・空気供給システムは「高価」、冷却システムは「安価」であるがトータルとしてはほぼ同等になる傾向となった。

表 2.3.1-3 にロードマップの技術目標に対する前提条件を示す。これらの条件をもとに、FC スタックおよび BOP のコストを試算する上で想定した考え方は以下のとおりである。

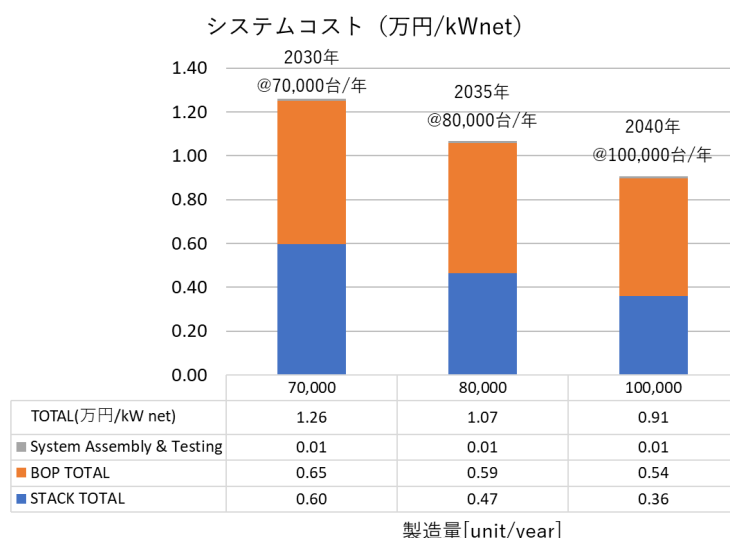
- FC システムの構成は同一（図 2.3.1-1）を前提、BOP はシステム出力に対して 0.8 乗則で試算（システム簡素化や BOP の技術進化によるコスト低減は含まない）
- 総アクティブエリアの小面積化により、スタック部材の材料コスト低減を想定（セル面積に対するアクティブエリア面積比は 65%で固定）
- スタックの主要材料・部材については、Pt 目付量低減および PEM の薄膜化で材料コスト低減を想定、セパレータに関しては、米国ではカーボン、NEDO では金属プレートと表面処理によるコストを想定（金属セパレータは SA 社 LDV 向け 2018 年コスト分析[4]に従う。母材は SS314, 表面処理は PVD による TiO_x コーティングに基づくが、NEDO では母材・表面処理は異なる可能性）、その他の材料・部材はセル面積あたりの同一コストを仮定
- 各部材の製造工程、スタック・システム組立工程も同一と仮定（更なるコスト低減に向けては生産技術の革新が必須）
- 耐久時間は米国では 25,000 時間、NEDO では 50,000 時間を想定しているが、耐久時間増加によるコストへの影響は未検討（Pt 目付量は耐久時間想定済の値、電解質膜・GDL・セパレータ・シールなど他の主要部材のコストへの影響は要検討項目）

表 2.3.1-3 ロードマップの技術目標に対する前提条件

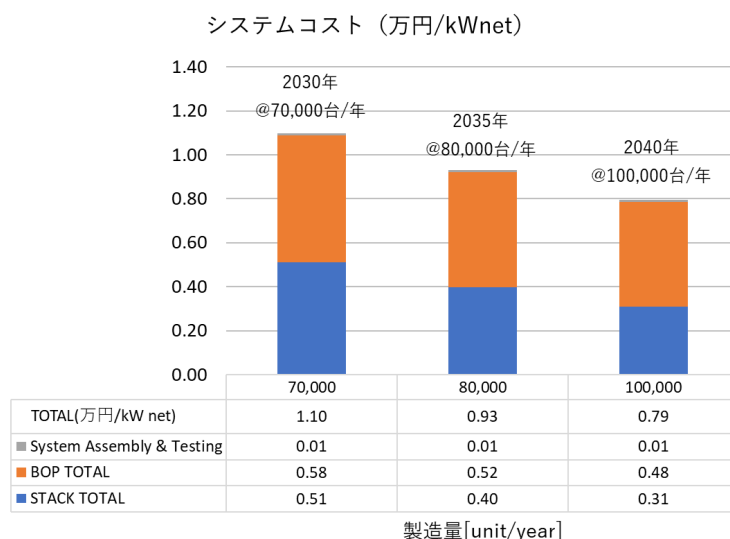
項目	SA 2030	NEDO 2030	NEDO 2035	NEDO 2040
ライン原単位 (万台/年)	-	7	8	10
FC システム出力 (kWnet)	275(Class8, 34t)	200(25t)	325(44t)	350(44t)
スタック数 (直列接続)	2	2	2	2
セル数/スタック	500	330	396	330
アクティブエリア面積 (cm ²)	343	273	283	293
総アクティブエリア面積 (m ²)	17.15	9.01	11.21	9.67
EOL 出力密度 (W/cm ²) (熱定格点)	0.953 (0.70V at 1.36A/cm ²)	1.267 (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	50,000	50,000	50,000
Pt 目付量 (mg/cm ²)	0.35	0.24	0.22	0.14
PEM 厚 (μm)	15	8	5	1
セパレータ	樹脂含浸グラファイト(BPP)	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

図 2.3.1-5 に NEDO 技術目標に対する FC システムコストの試算見通しを示す。NEDO 目標（2030/2035/2040 年頃）に対して Pt 使用量、薄膜化等の材料費削減と出力密度向上によるスタック部材の使用量低減を考慮してコストを試算した。為替レートを 2021 年頃の 110 円/ドルとした場合、2030 年頃では 1.1～1.26 万円/kW、2035 年頃では 0.93～1.07 万円/kW、2040 年頃では 0.79～0.91 万円/kW であった。2030 年頃については前述で提案した中間目標 0.9 万円/kW と比べて乖離があり、2040 年頃の想定コストで等価となるレベルである。

ただし、システム構成によって BOP コストの変動要因は大きく、日本版のシステム条件（加湿方法、水素供給システム、空気供給システム、冷却システム等）を決定した上での評価が必須であること、スタックの材料・部材についても単なる材料使用量の低減のみならず、新規材料によるコストへの影響、低廉材料の使用と耐久性確保の両立、生産技術の進展などを検討することが今後の課題である。



ケース A(SA 社のコストに対して安価な項目を 2.0 倍と仮定)



ケース B(SA 社のコストに対して安価な項目を 1.5 倍と仮定)

図 2.3.1-5 NEDO 技術目標に対する FC システムコスト試算結果

一方、HDV のコストを考える上で、乗用車が車両価格、燃費、消費者の嗜好性、利便性、環境意識などの幅広い基準で選択されることに対して、商用車では顧客（事業者）の事業の経済性の成立が最優先であり、車両の総保有コスト（TCO：Total Cost of Ownership）の考え方が重要となる。TCO は車両購入費と運用費（燃料費、メンテナンス費、高速道路料金、等）の合計であり、現状ではディーゼル車両と比べて車両価格・燃料費は高い。2030 年頃においても、FC システムコストがディーゼルエンジンと等価のレベルではなく、さらに水素貯蔵システム、2 次電池、他の電動化に必要な車両改造のコストも想定すると現行のディーゼル車両価格との差がある。

将来は、水素供給価格の低減を想定しつつ、更なる FC・水素貯蔵システムのコスト低減、システム効率向上による燃費改善などを進めていくことによって TCO でのパリティの早期成立を目指すことが重要である。

今後は、日本の水素・燃料電池の競争力を高めるために、将来のコスト目標に対する達成シナリオの検討を行い、現状の技術レベルと研究開発事業による技術進展と連動した FC システムコストの評価に加え、燃費や効率改善も含めた TCO の評価を推進できる仕組みを構築、推進していくことが課題である。

（参考文献）

- [1] “Hydrogen Class 8 Long Haul Truck Targets”, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record #19006
- [2] B. D. James, “Fuel Cell Systems Analysis”, 2024 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Review Presentation
- [3] B. D. James, et al., (Draft) “Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2023 Update on Heavy and Medium-Duty Vehicles”
- [4] B. D. James, et al., “Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update”

2.3.2 FC 体積出力密度

今回の検討を基に FC システム、FC スタックそれぞれの体積出力密度を算出した。算出の前提として出力を以下の表 2.3.2-1 のとおり定義した。

表 2.3.2-1 体積出力密度算出の定義

FC システム出力	FC システムの出力 (Net 出力) 2 次電池は含まない
FC スタック出力	FC スタック単独の出力 (Gross 出力) FC システムから補機損を除いた値
FC システム体積出力密度	FC システム出力/FC システム搭載スペースで算出 搭載スペースはモータ、インバータを除く値
FC スタック体積出力密度	FC スタック出力/FC スタック体積

大型トラックの場合の定格出力は熱定格動作点の値を代表とし、建機の場合は連続掘削の平均値とした。特に記載のないアプリケーションに関しては定格出力が最大出力となっている。

ここでは FC スタックの体積については各アプリの許容 FC システムスペースに係数（トヨタ FC モジュール横型の FC スタック体積[1]/ FC システム体積[2]の比率と仮定）を掛けて算出し

た。鉄道のみ実際の許容 FC スタック体積を記載している。

ここで、表 2.3.2-2 と表 2.3.2-3 は 44 トンクラス的大型トラックのみ 2035 年頃と 2040 年頃の FC システム前提から算出しており、その他のアプリケーションに関しては 2030 年頃の FC システム前提から算出した。

これらの結果、2030 年頃の FC システムの体積出力密度は最大出力ベースの場合は 25 トンクラス大型トラックが 0.60kW/L、定格出力ベースの場合は農業用トラクタ 50kW クラスが 0.41kW/L と最も大きな値となった。また、FC スタックの体積出力密度は定格出力ベースの場合、農業用トラクタ 50kW クラスが 6.76kW/L と最も大きな値となった。2040 年頃の FC システムの体積出力密度は最大出力ベースの場合は 0.80kW/L、定格出力ベースの場合は 0.70kW/L となった。また、FC スタックの体積出力密度は定格出力ベースの場合、10.38kW/L となった。

2035 年頃の FC システムの体積出力密度は 44 トンクラス大型トラックで最大出力ベースの場合は 0.75kW/L、定格出力ベースの場合は 0.65kW/L となった。また、FC スタックの体積出力密度は定格出力ベースの場合、8.42kW/L となった。ここでは 2035 年においてはシステムを成立させるために、暫定的にセル枚数を増やしておりスタック体積もそれに応じて増加すると仮定した。

スタック出力密度達成のためには I-V 特性の向上だけでなくセル厚みの低減、シールやマニホールド面積の低減に向けた開発も必要になる。また、本検討の結果から最大電流密度(最大電流)は EOL で 3.44A/cm² (939A) となっており、補機部品に関しても本電流密度に対応する設計が必要となる。ただし、目標となる体積出力密度は搭載設計の前提によって大きく異なること、最大出力は FC と 2 次電池のバランスや制御方法により左右されること、補機とスタックの体積配分などこれらの値は仮定を含んでいるため今回は暫定値とし、乗用車の目標値も踏まえて来年度以降更新を実施する。

表 2.3.2-2 FC システムの体積出力密度

アプリケーション	FC システム 体積 [L]	FC システム 最大出力 (Net) [kW]	FC システム 定格出力 (Net) [kW]	FC システム 体積出力密度 ¹ 最大出力ベース [kW/L]	FC システム 体積出力密度 ¹ 定格出力ベース [kW/L]
25 トンクラス大型トラック	502	303	187 ²	0.60	0.37 ²
44 トンクラス大型トラック(35 年)	502	375	325 ²	0.75	0.65 ²
44 トンクラス大型トラック(40 年)	502	400	350 ²	0.80	0.70 ²
内航貨物船	18,000	600	600	0.03	0.03
沿岸旅客船	7,000	480	480	0.07	0.07
鉄道 2 両編成	1,300	400	400	0.30	0.30
油圧ショベル 20 トンクラス	1,300	120	101	0.09	0.08
油圧ショベル 13 トンクラス	400	74	63	0.19	0.16
農業用トラクタ 50kW クラス	125	51.5	51.5	0.41	0.41

1：体積出力密度 = FC システム定格出力 (Net) / FC システム搭載スペースで算出、搭載スペースはモータ・インバータを除く値

2：大型トラックの出力は熱定格動作点

表 2.3.2-3 FC スタックの体積出力密度と最大電流

アプリケーション	定格出力 (Gross) [kW]	FC スタック 体積 ¹ [L]	体積出力密度 [kW/L]	EOL 最大電流密度 [A/cm ²]	EOL 最大電流 [A]
25 トンクラス大型トラック	228 ³	36.72	6.21 ³	3.44	939
44 トンクラス大型トラック (35 年)	371 ³	44.06	8.42 ³	2.88	815
44 トンクラス大型トラック (40 年)	381 ³	36.72	10.38 ³	2.96	867
内航貨物船	723	1316.91	0.55	3.04	829
沿岸旅客船	578	512.13	1.13	3.30	900
鉄道 2 両編成	475	96.00	4.95	1.88	513
油圧ショベル 20 トンクラス	120	95.11	1.26	1.97	537
油圧ショベル 13 トンクラス	74	29.26	2.53	1.29	353
農業用トラクタ 50kW クラス	61.8	9.15	6.76	3.19	872

3：大型トラックの出力は熱定格点

(参考文献)

[1] 高橋剛ほか, “新型 MIRAI の第 2 世代 FC システム概要”, TOYOTA Technical Review Vol. 66 Feb. 2021 ,p.12-15 (2021)

[2] <https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/34799387.html>

2.3.3 Pt 量 (資源循環と将来目標)

モビリティ用途で消費する Pt 量は、図 2.3.3-1 より 2000 年以降ほぼ 100 トン/年となっており、将来にわたってモビリティ用途で消費できる Pt 量は 100 トン/年と仮定する。因みに、モビリティ用途でリサイクルされる Pt 量は、図 2.3.3-1 より約 40%である。

モビリティ用途内の内訳は、表 2.3.3-1 より小型ガソリン車向け (乗用車・小型商用車・2 輪車など) が約 19%、小型ディーゼル車向け (乗用車・ピックアップトラック・小型商用車など) が約 65%、大型車向けが約 15%、自動車以外の移動機器向けが約 1%である。小型ガソリン車向けのカテゴリーは将来 BEV への置き換えがメインと仮定すると今回の議論の対象である大型車が消費できる Pt 量は、小型ガソリン車向けと大型車向けの合計で将来に渡って 32 トン/年と仮定する。

大型車のグローバル生産台数は、図 2.3.3-2 より約 400 万台/年であり、この需要が、将来に渡って継続すると仮定する。将来の CN 社会 (2050 年) において、大型車に占める FCV の販売比率は、図 2.3.3-3 より約 30%と予測されており、FC 大型車の販売台数は約 120 万台/年 (2050 年) と予測される。

以上から、2050 年に FC 大型車 1 台当たりが消費できる Pt 量は約 26.5g/台 (=32 トン ÷ 120 万台) となる。FC 本格普及期までには、FC 大型車 1 台当たり Pt 使用量 26.5g 以下の低 Pt 技術確立を目指すべきである。また Pt リサイクル率を更に高める取組も大変重要となる。

2040 年では上記の FC 大型車 1 台当たりの Pt 使用量 26.5g と表 2.3.2-3 の定格出力 381kW から 0.07g/kW を目標値とした。

また、2035 年頃の検討では図 2.3.3-3 から LDV と HDV の電動車普及率はそれぞれ 80%、45% 程度になると仮定した。また、HDV 全体の 10%が FC に置き換わると仮定すると、図 2.3.3-2 から 2035 年時点の FC 大型車のグローバル生産台数は 40 万台になる。以上より、図 2.3.3-1 から 2035 年時点で FC 大型車に使用できる Pt 量は小型ガソリン車向けの 80%と大型車向けの 45%の合計 19.6 トン/年となり、FC 大型車 1 台当たりの Pt 使用量は 48.9g/台となる。これを表 2.3.2-3

の定格出力 371kW を考慮して 0.13g/kW を 2035 年の Pt 量の目標値とした。

ただし、これらの目標値は小型ディーゼル車向けカテゴリーの Pt は全て乗用車に使用される前提としたため、大型トラックの目標 Pt 量としては厳しい値となる。よってこの目標 Pt 量は今後将来の乗用車の市場規模、HDV 向けの FC システムコスト目標の検討、Pt のリサイクル技術や将来の非 Pt 触媒の開発状況も鑑みて更新する。

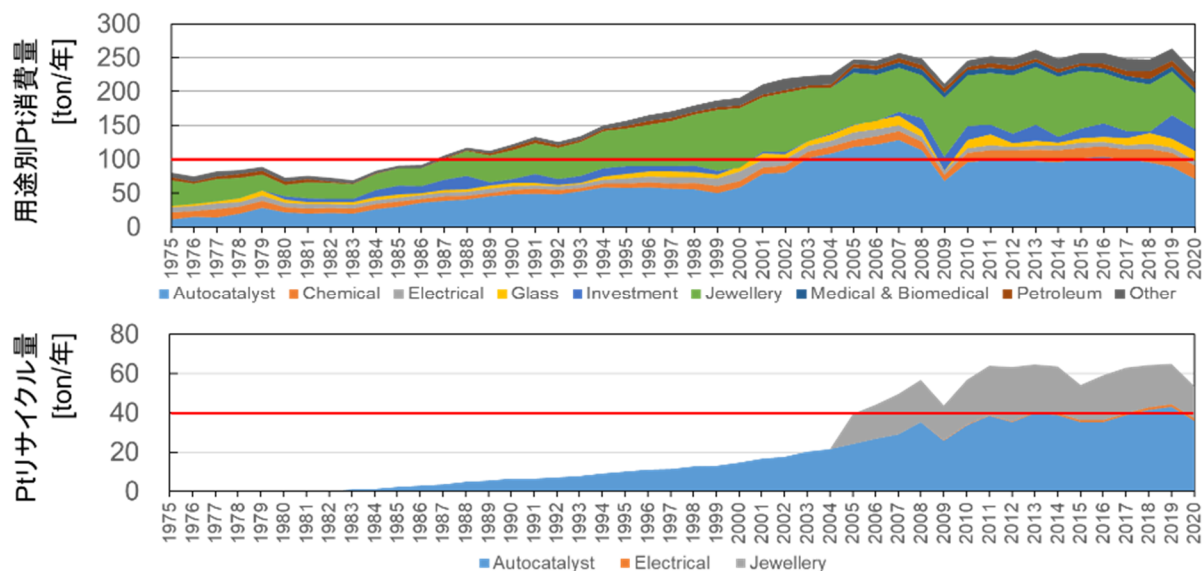


図 2.3.3-1 用途別 Pt 消費量とリサイクル量[1]

表 2.3.3-1 モビリティ向け Pt 需要の内訳[2]

車種	プラチナ需要:自動車触媒(単位:1,000 oz)		
	2010 年	2011 年	2012 年
小型ガソリン車	640	545	620
小型ディーゼル車	2,025	2,105	2,020
大型車	400	490	500
自動車以外の移動機器	10	45	100

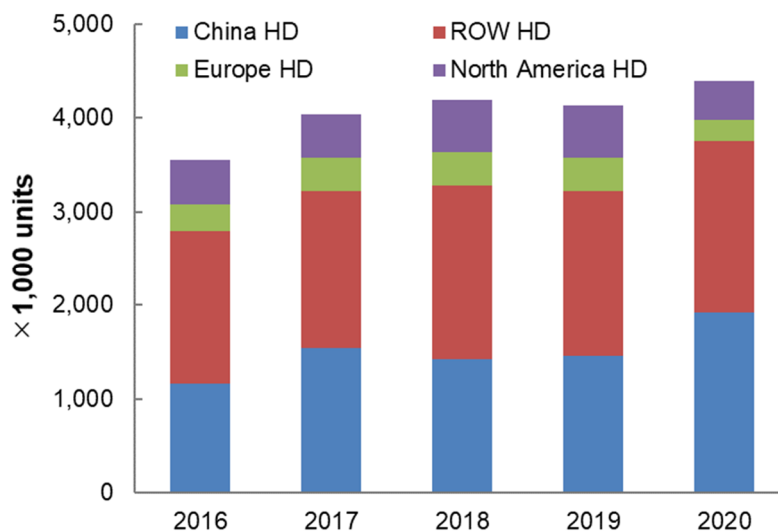


図 2.3.3-2 大型車のグローバル生産台数[3] (ROW: Rest of World の略)

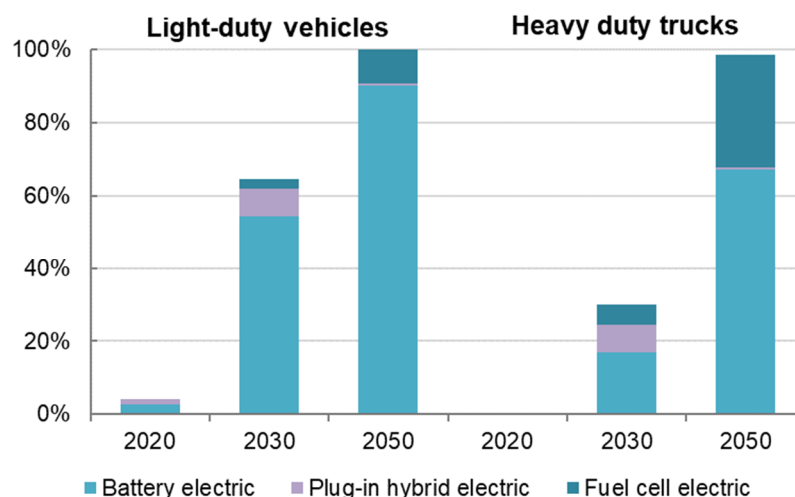


図 2.3.3-3 EV-PHEV-FCV の販売比率予測[4]

(参考文献)

[1] Johnson Matthey ホームページ

[2] Johnson Matthey ホームページより当社作成

[3] World Platinum Investment Council, https://platinuminvestment.com/files/884932/WPIC_Platinum_Perspectives_August_2021_JA.pdf より当社作成

[4] IEA, "Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector"より当社作成

2.3.4 CN 対応に向けた水素 FC 以外の取り組み状況

CN の実現に向けては様々な技術が提案・発案され開発が進められている。単独の技術・対応だけでは CN 実現は難しく、多くの技術をバランスよく開発していくことが重要と言われている。そのような状況で水素 FC が CN の対応で貢献していくためには、水素 FC が期待される製品・アプリケーションで同様に活用が期待されている他の技術の開発状況も常に把握して進むべき方向を配慮する必要がある。ここでは代表的な技術として水素エンジン・e-Fuel・2 次電池（バッテリー）について考察を加え水素 FC の目指すべき開発について言及する。

(1) 水素エンジン

水素を活用するという事では FC 同様に大変期待できる技術である。また多くの製品・商用アプリケーションではエンジンが現在使われているので適用が容易なことや内燃機関の既存サプライチェーンの活用などの優位性も多くある。近年、燃焼効率の改良も著しく高負荷域では FC の効率と肉薄している。一方で、排気対応や生成水のオイル混濁など製品化・普及に向けては解決しなければならない課題が FC 同様に多くある。また、効率以外にも表 2.3.4-1 に示すような指標があり、 がある項目では FC システムの改良が必要な項目であり開発が必要である。

表 2.3.4-1 水素エンジンを参考にした FC で更なる開発を推進したい項目

ZEV		冷却性		メンテナンス	
効率		耐久性(性能低下)		ドライバビリティ	
燃費(含むトンキロ燃費)		燃料性状耐性		回生力	
コスト・TCO		搭載(システム体積)		騒音	

(2) e-Fuel

水素エンジン同様に既存のシステムへの適用の容易さや燃料の搭載課題で e-Fuel に対する期待は大変大きい。ただし CN ではあるがゼロエミッションではないことや、燃料価格の課題で使用を限定する動きもある。効率の比較では水素エンジン同様に FC の効率も向上させる必要があると言える。

(3) 2 次電池 (バッテリー)

FC と 2 次電池 (バッテリー) はエネルギー密度とコストとエネルギー補給の 3 点で比較されることが多い。バッテリーパックの体積エネルギー密度の向上が進んでいる。製品に近いレベルで 200 ~ 300Wh/L というような意欲的な数値が公表されている (Tesla、CATL、ONE)。70MPa の高圧水素のタンク込みの体積エネルギー密度は 800Wh/L 程度である。FC システムの効率や FC システムの体積を含めた体積を考慮するとかなり拮抗した状況になっている。FC システムの効率向上や軽量コンパクト化は重要な開発要素である。

各パワートレインの比較のため 2040 年頃の水素エンジンや 2 次電池 (バッテリー) の効率やエネルギー密度の進化を想定し、FC、水素エンジン、2 次電池それぞれの大型トラックのトンキロ燃費 (電費) の比較を行った。ここでトンキロ燃費 (電費) とは燃費に積載可能な重量を掛けた数値であり、商用トラックで一般的に使われる性能指標である。2040 年頃の FC システム目標が達成できれば FC は水素エンジンと比較して燃費が良いこと、バッテリーと比較して質量密度が高い (積載可能な重量が大きくなる) ことから FC の優位性を確認した。

2.4 水素貯蔵システムとしての技術目標

2.4.1 高圧水素貯蔵

CFRP (炭素繊維強化プラスチック) 製高圧水素タンクのコスト低減のため、その構成材料である炭素繊維やエポキシ樹脂等の材料価格の低減と、それらの使用量を削減する研究が精力的に取り組まれている。

従来構造の CFRP 製高圧水素タンクは、フィラメントワインディング (FW) 工法で製造されており、連続した炭素繊維にて構成されている。このため、必ずしもタンク全体に炭素繊維が力学的に最適配置されているわけではなく、強度に余裕がある部分 (タンク内圧の荷重分担を十分に受ける役割を果たさない) が少なからず存在することが知られている (図 2.4.1-1)。

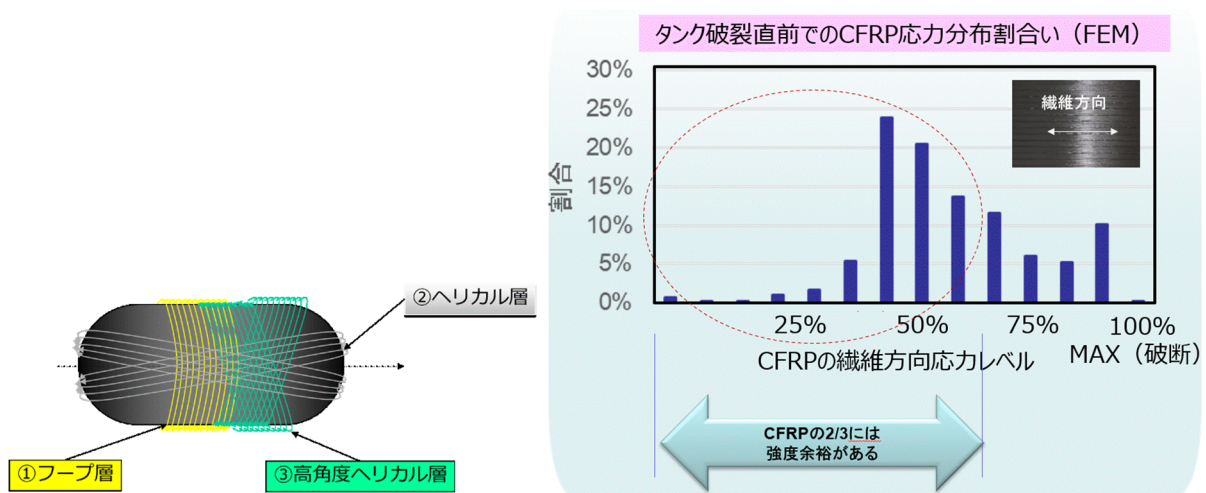


図 2.4.1-1 CFRP 製高圧タンクの積層と応力分布割合
(第2回 FC-Cubic オープンシンポジウム資料より)

上記の理由から、従来の FW タンク構造の最適化に加え、革新構造の採用による全ての炭素繊維の応力分担能を高めることによる、炭素繊維使用量を大幅削減に繋がる検討が進められており、コスト低減と質量貯蔵密度の目標達成が期待される。

将来期待される、研究・開発のポイントを勘案し、2030 年および 2040 年の高圧水素貯蔵タンクの目標値および目標達成へのシナリオを立案した。質量貯蔵密度を図 2.4.1-2 に、体積貯蔵密度を図 2.4.1-3 に、各シナリオを示す。

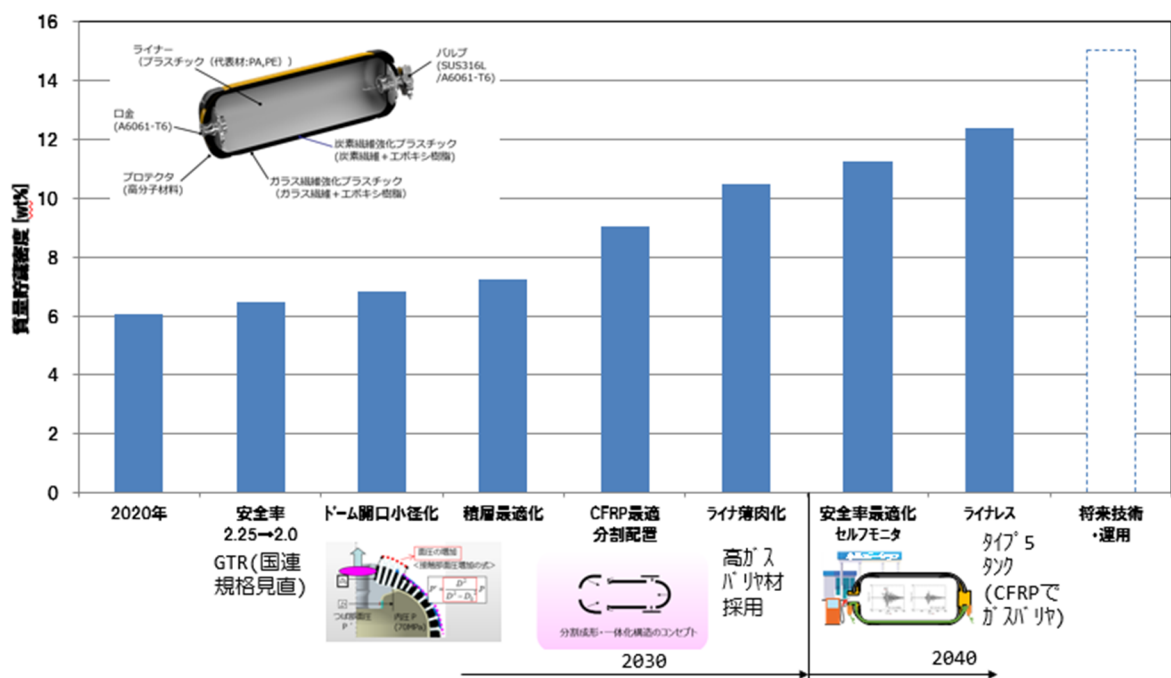


図 2.4.1-2 使用材料の削減シナリオと質量貯蔵密度の関係（試算）

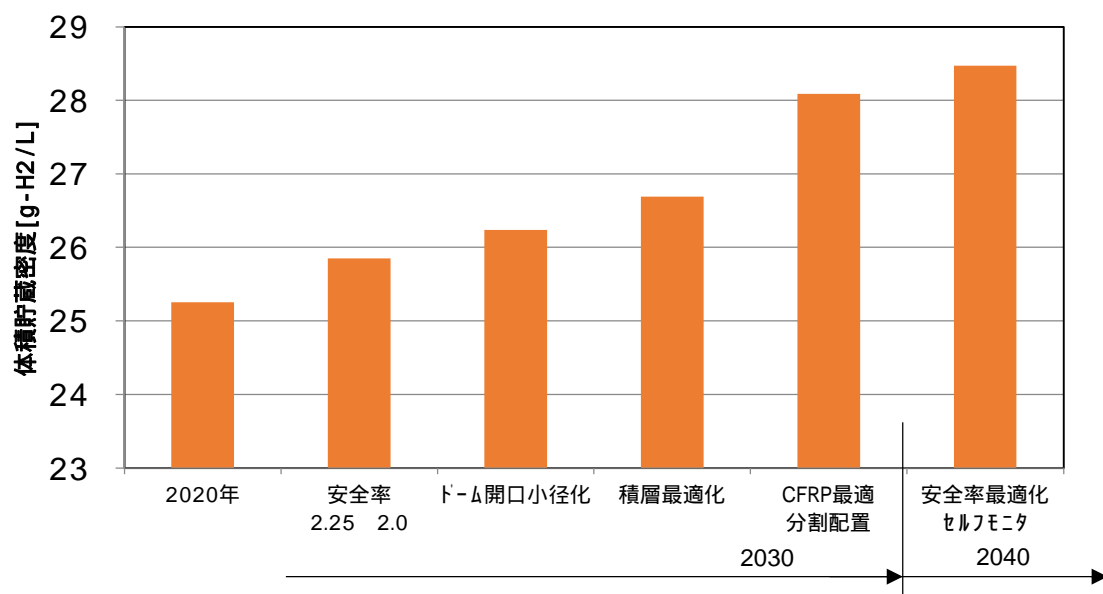


図 2.4.1-3 使用材料の削減シナリオと体積質量密度の関係（試算）

シナリオ達成に向けた代表的なポイントを下記に示す。

【新規材料開発】

高圧水素タンクの全質量の半分以上を占めるとされる炭素繊維の強度を向上し、炭素繊維使用量を低減することは有効な手段の1つである。更に、CFRP層の薄肉化にも繋がる為、体積貯蔵密度向上にも有効と考える。炭素繊維の強度目標値は、2030年に5,900MPa、2040年に7,100MPa達成をそれぞれ設定した。また、新規に開発する炭素繊維は強度向上の達成に加え、タンクコストの大幅低減を実現する為に、\$10/kgを同時に達成することが求められる。

水素を封止するライナー材料の新規開発も重要である。ライナー材料の開発指標としては、低温引張特性と水素ガス遮断性の両立化が挙げられる。一般的な樹脂においては、相反する物性である為、高分子の設計コンセプトの立案が必要となる。低温引張特性としては、運用中のタンク内部が晒される下限温度として-60℃を設定、本環境下にて1軸引張試験での降伏破断伸びを10%と設定した。一方、水素ガス遮断性においては、70MPa水素タンクの静的漏洩基準である最大許容水素放出量46ml/hr/L [1]から算出される材料単体の水素透過係数を設定した。特に、高い水素遮断性が求められる小径（コンフォーマブル）タンク（ここでは、ライナー内径85mm、ライナー長さ1,500mm、ライナー平均肉厚0.5mmを試算の前提とした）に対し、 $0.15 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm/cm}^2/\text{sec/cmHg}@55^\circ\text{C}$ ・80.5MPaを2035年に社会実装するライナー物性目標値として設定した。

（参考文献）

[1] UNR No.134 水素燃料車 参照

【タンク構造、工法開発】

材料単体以外の開発アイテムとして、CFRP 使用量の低減も、質量貯蔵密度目標の達成に不可欠である。現状全てのタンクメーカーが採用する FW (Filament Winding) 法を用いた一筆書きによる CFRP 積層構造の改良に加え、更に、分割した CFRP 部品を接合する新たなタンク構造を探索し、2020 年比 35wt% の CFRP 使用量を低減可能とする仕様を 2035 年に社会実装することを目指す。

このような、新規材料、新規タンク (CFRP 積層) 構造の研究・開発に加え、それらをタンク形状として成立させる工法の開発もセットで必要となる。現在主流の積層方法である FW 法以外に、複合材料分野で研究されている他の成形法の改良およびタンク分野への転用が待たれる。

【SHM (Structural Health Monitoring)】

2024 年に GTR13 Phase2 にて高圧水素タンクの初期破裂安全率が 2.25→2.0 へ引き下げられたことにより、炭素繊維使用量の低減が見込まれる。将来に向けては、上述した材料開発や CFRP 積層設計・製造技術の進化に加え、各種センサー類を用いた SHM を活用した安全管理技術の導入が待たれる。本技術は、不具合品の市場流出防止により、これまでの高圧水素タンクが実現している高い信頼性を維持することに加えて、市場タンクの性状解析の進展等により、安全率の更なる低減等、各種規制の適正化議論が進むことが期待される。尚、図 2.4.1-2 の“将来技術・運用”@2040 年には、SHM を用いた安全率 1.8 化を必達目標として位置付けている。

2.4.2 液体水素貯蔵

高圧水素貯蔵で不足する水素量に対し、連続的に長距離、又は長時間運用する用途への解決策候補の一つとして、液体水素貯蔵が期待されている。液体水素の沸点は -253 であるため、外部からの入熱による水素の蒸発・圧力上昇を回避するためのボイルオフガス(BOG)や、充填時のオフガス量の低減などの技術課題が従来から認識されている。燃料電池の用途拡大のため、大量の水素を運搬・供給する技術の重要性については疑いの余地がないものの、22 年度の検討では移動体の燃料装置に関する調査・議論が十分にできておらず、技術目標と開発項目について 23 年度～24 年度に検討を行なった。

技術目標を設定するために、調査、及び、パラメータスタディを実施した。まず主要なアプリケーションを特定するために、液体水素モビリティに関するニーズ調査を実施した。続いて国際競争力を保持する観点から、政策動向と研究開発動向を調査した。さらに、液体水素貯蔵が既存技術に対し市場での競争力を確保するため、圧縮天然ガスの後から普及を実現した液化天然ガス(LNG)トラックに焦点を当て、利便性目標等市場で受け入れられる要件の検討を行った。その後、具体的目標値算出のため、仮想的なタンクモデルを作成し、パラメータスタディを実施した。

【液体水素モビリティのニーズ】

液体水素貯蔵は高い体積・質量貯蔵密度を実現する。これにより、高圧水素貯蔵では対応できない長距離移動や長時間運用が必要なモビリティ分野、例えば、大型車両・航空機・船舶などにおいて活用が期待される。さらに鉄道や建設機械への応用に向けた開発も進められている。下記欧州の事例では、液体水素を燃料とするトラックが実証試験において 1,000km 以上の航続距離を

達成している。これは 2.1.8 項「(3) 水素貯蔵方法を考慮した場合の航続距離または連続運転時間」の要件を満たしている。

【政策動向】

米国は DOE が主体となって、液体水素トラックの貯蔵密度等の研究開発目標値を定めているが、政策として液体水素モビリティの普及目標を定めるには至っていない。また米国以外の国は貯蔵密度の目標値及び普及目標を定めていない。しかしながら液体水素貯蔵技術の研究開発に関しては多くの国が水素政策の一環としてこれをサポートしている。直近では DOE の水素・燃料電池技術事務所(HFTO)が、2023 年 9 月に車載用液体水素貯蔵システムの研究開発に向けて約 1,170 万ドルを支援した [1]。この資金援助の目的は、H2@Scale イニシアチブの実現に寄与することにある。

欧州では、Clean Hydrogen Partnership の水素貯蔵に関する研究開発プロジェクトにおいて、車載用高圧水素貯蔵技術から航空機用液体水素貯蔵技術への資金移行が行われている。具体的には、車載用高圧水素貯蔵の研究開発プロジェクトである TAnk HYdrogen Automotive [2]、Thermoplastic Hydrogen tanks Optimized and Recyclable [3]、STORAGE OF HYDROGEN: ALTERNATIVE PRESSURE ENCLOSURE DEVELOPMENT [4]は 2023 年までに終了し、2023 年からは航空機用液体水素貯蔵の研究開発プロジェクトである COmposite COncformal LIquid H2 Tank (COCOLIH2T) [5]が開始した。また、欧州連合の Important Project of Common European Interest (IPCEI) の一環として、Daimler Truck が連邦政府、Baden-Württemberg 州政府、Rhineland-Palatinate 州政府から、液体水素を利用する燃料電池トラックの開発と生産に対して 2 億 2600 万ユーロの資金提供を受けた[6]。

日本では、特に航空機産業の脱炭素化に向けた液体水素技術の活用が期待されており、航空機産業戦略[7]で政策が定められている。航空機産業戦略では、水素などの新技術による従来の安全基準・国際基準の変化を利用して日本の航空機産業の競争力を強化する方針や、水素基本戦略で構築が示された大規模な水素サプライチェーンと連携する方針などが示されている。自動車産業分野では水素・燃料電池戦略ロードマップにおいて、液体水素大型トラックに関するフェージビリティスタディの実施が示されている。

【研究開発動向】

日本では液体水素航空機のプロジェクトが進められている[8]が、大型商用車用途に向けてはフェージビリティスタディに続く基礎的研究が実施されているものの、燃料供給インフラ整備までを想定した具体的な研究開発事例は見られない。一方、海外では液体水素貯蔵技術や燃料供給インフラの研究開発が進展しており、それぞれの地域での規格化やガイドラインの策定が進められている。以下に、各国の研究機関や民間企業による主要な研究開発動向を示す。

(1) 米国

2020 年 10 月から 2021 年 12 月にかけて、中・大型トラック用液体水素貯蔵システムに関するプロジェクトが行われ、システムの質量貯蔵密度 15wt%、体積貯蔵密度 35g/L の目標が達成された [9]。2023 年の水素貯蔵のシステムレベルの分析のプロジェクト[10]に

において、物理・熱力学・動力学モデルが分析され、クラス 8トラックにおいてフレームマウントタンクを 2 つ使用することで 85kg 以上の液体水素が貯蔵可能であり、システムの質量貯蔵密度 15wt%以上、体積貯蔵密度 40g/L 以上が達成できる可能性があることが示された。さらに、大量製造時におけるクラス 8 トラック用の LH₂ 貯蔵システムのコストが、目標である 8\$/kWh を下回ると予測された。2023 年 9 月、HFTO の資金提供公募により、車載用液体水素貯蔵に係る 3 件の民間企業のプロジェクトが採択された [1]。

(2) 欧州

2023 年 9 月、ドイツのダイムラー・トラックの液体水素タンクシステムを搭載したトラックが試験走行で航続距離 1,047km を達成した [11]。2023 年 1 月、Clean Hydrogen Partnership の支援により、液体水素の安全運用を目的とする研究開発プロジェクトが開始した [12]。プロジェクトは液体水素の規格化を目標の一部としている。前任プロジェクトの成果は ISO 技術委員会 197 による液体水素の安全性に関する章の改定・拡張に繋がっている [13]。2023 年 2 月開始した COCOLIH₂T プロジェクトは高強度かつ軽量の熱可塑性複合材製の液体水素タンクを開発しており、航空機における液体水素の効率的な貯蔵を目指している [5]。また、2024 年、SAE International と EUROCAE (欧州民間航空機器機構) は共同で「Hydrogen Fueling Stations for Airports, in Both Gaseous and Liquid Form」と題する包括的なガイドラインを発行した [14]。このガイドラインは、水素燃料供給プロセスを細かく分類し、さまざまな運用条件や環境条件に適応できる堅牢な燃料供給プロトコルの開発を保証する。特に、空港の定置式および移動式給油所特有の要件に対応するため、気体および液体水素の給油プロセスパラメータを確立している。2024 年 6 月、川崎重工業とダイムラー・トラックは「ドイツ向け液化水素サプライチェーンの構築および欧州における液化水素ステーションの輸送網の構築に向けた協力の覚書」を締結した [15]。この覚書は道路貨物輸送における液化水素の利用拡大を目指すものであり、両社が液化水素サプライチェーン構築の検討に加え、液体水素ターミナル、大型および中規模の海上輸送、大規模な液体水素貯蔵についても検討を進めること、2030 年代早期に欧州での液化水素サプライチェーンの確立を目指すこと、などが示されている。

(3) 中国

2024 年、長城汽車のエコシステム企業 FTXT が液体水素貯蔵システムを発表した。同社の液体水素貯蔵システムは、単一タンクで 80kg 以上の水素を貯蔵し、8wt%を超える貯蔵密度を実現しており、搭載された商用車は 1,000km 以上の航続距離を達成している [16]。2024 年、中国第一汽車は中国初の液体水素燃料電池トレーラーを発表した。この車両は 100kg クラスの車載液体水素システムを搭載しており、航続距離は 1,200km を超える [17]。

【利便性 (ホールドタイム) 目標の設定】

LNG トラックは、極低温技術が必要である点において液体水素トラックと類似しており、欧州や中国で既に普及が進んでいることから、これをベンチマークの対象とした。航続距離については、LNG トラック (エンジン駆動) が 1,200 から 1,500km 程度であり、液体水素トラック (燃料電池駆動) と同程度の性能を有すると想定される。タンクへの入熱による液体の蒸発等に関連する利便性については、国連欧州委員会が規則 UN-R110 の Annex3B.2.7 において、「車両用 LNG

タンクは設計充填温度・圧力範囲の最高点で、満タン充填後、最低 5 日の設計保持時間（ホールドタイム：可燃ガスを放出しないこと、安全弁が作動しないこと）を有すること」と定めている [15]。現在の液体水素トラックのホールドタイムは 2 日程度と推定されており、LNG が CNG と競合してシェアを獲得していることを考慮すると、液体水素にも LNG と同等のホールドタイムが求められると考えられる。そのため、利便性（ホールドタイム）に関する目標を LNG 同等以上（2035 年までに 5 日以上、2040 年までに 7 日以上）と設定した。水素の沸点は-253 であり、メタンの-161 との温度差を考慮すると、目標達成には LNG よりも高いレベルの技術革新が不可欠である。この技術開発課題については、2.8.2 項に記載する。

【パラメータスタディを踏まえた貯蔵密度の達成シナリオ】

DOE では液体水素システムの水素貯蔵密度を 20wt%程度と試算しているが、より利便性を高めると期待される sLH₂ システムでは充填圧力の増加に伴い水素貯蔵密度は最大 15wt%程度まで下がると試算しており、NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップにおける高圧水素技術目標に対してメリットが少ない結論となっている。そのため、本検討の新たな取り組みとして、材料の選択肢を拡大し、貯蔵密度と利便性の両立という観点から、圧力・貯蔵密度・材料の関係をパラメータスタディによって定量化した。タンクの構造は内槽・外槽ともに薄肉円筒モデルを用いて検討し、真空断熱二重構造を仮定した（図 2.4.2-1 左図）。また、図 2.4.2-1 右図のタンク質量構成を用いて、タンク外槽、タンク内槽以外の補機類の質量構成割合は約 15%と仮定した上で、質量貯蔵密度を算出した。

なお、目標値の定義について本ロードマップでは「水素貯蔵システムの目標値は補機を含まない」としているが、本パラメータスタディでは上記の定義を用いる。また用途によっては目標値の定義が異なる場合があり、航空機の GI: Gravimetric Index については 2.8.2 項に記載した。

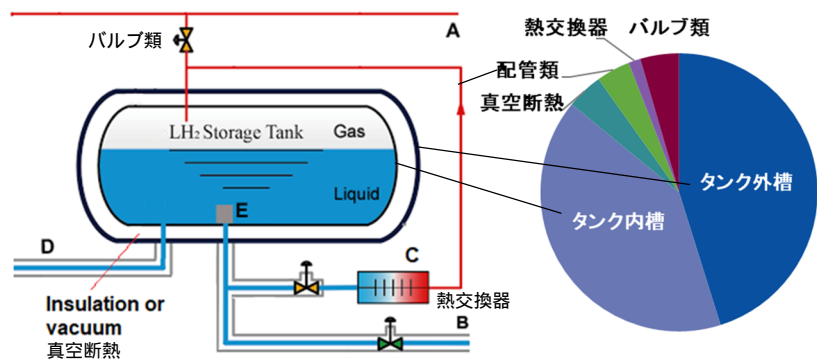


図 2.4.2-1 タンクシステム、タンク質量構成

パラメータスタディでは表 2.4.2-1 の試算パラメータを使用した。タンク構造は図 2.4.2-2 のように、内槽には Type1~3,5、外槽には Type1 を用いるものとした。

表 2.4.2-1 試算パラメータ

		従来 SUS	高強度化	外槽 AI	CFRP 化		
内	タンク構造	Type1	Type1	Type1	Type2	Type3	Type5

槽	材料	SUS316L	XM-19	XM-19	XM-19/高強度 CFRP	XM-19/ 高強度 CFRP	高 強 度 CFRP
	内径の半径	366mm	372mm	362mm	362mm	361mm	351mm
	アレージ容積割合	10%	10%	10%	10%	10%	10%
	圧力	0.6MPa	0.6MPa	0.6MPa	2.5MPa	2.5MPa	2.5MPa
	水素量	35kg	35kg	35kg	35kg	35kg	35kg
	槽間距離	50mm	50mm	40mm	40mm	40mm	30mm
	安全率	引張強度の4 倍	引張強度の3 倍	引張強度の3 倍	引張強度の3 倍	引張強度の3 倍	引張強度の3 倍
外槽	タンク構造	Type1	Type1	Type1	Type1	Type1	Type1
	材料	SUS316L	SUS316L	A6061-T6	A6061-T6	A6061-T6	A6061-T6
	安全率	降伏応力の1.5 倍	降伏応力の1.5 倍	降伏応力の1.5 倍	降伏応力の1.5 倍	降伏応力の1.5 倍	降伏応力の1.5 倍

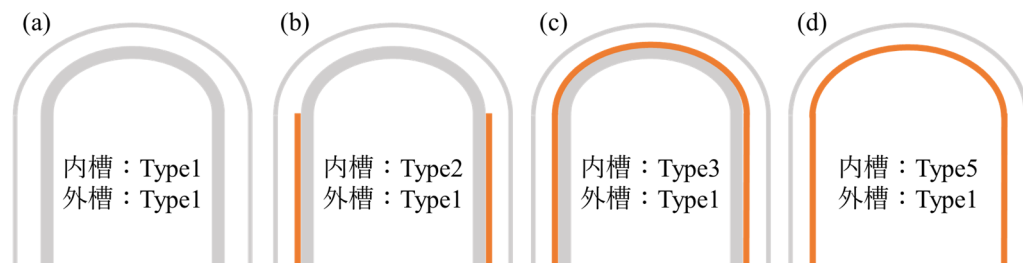


図 2.4.2-2 貯蔵密度向上に向けたタンクタイプの設定（Type5 はライナーレス）

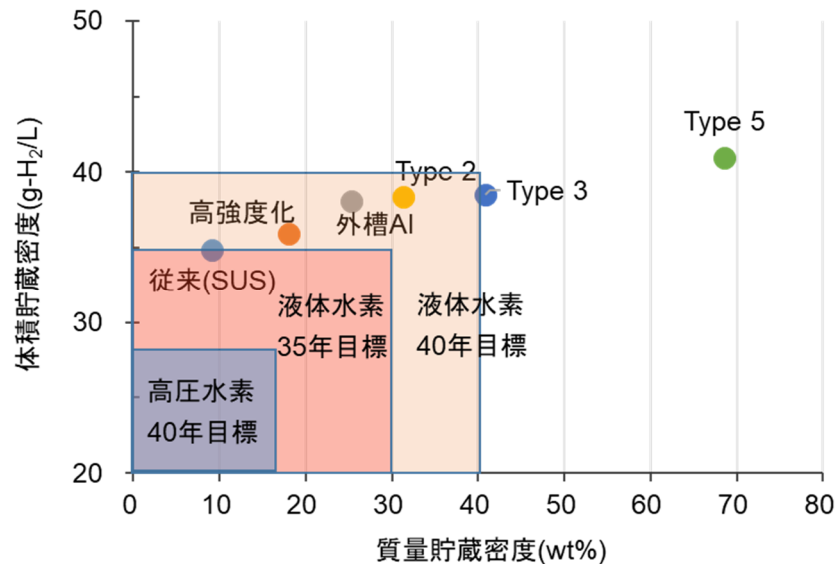


図 2.4.2-3 貯蔵密度試算結果

パラメータスタディの結果について、図 2.4.2-3 に示す。2.1.8. (3) 項より 44 トン大型トラックが 1000 km 走行するために必要な水素量を 70 kg/台、35 kg/タンク（2 本搭載を想定）とした。現状の液体水素貯蔵タンク技術では SUS316L 材料を用いた Type1 タンクを用いて、質量貯蔵密度 9wt% 程度であるが、内槽の高強度化や外槽にアルミニウム材料（A6061-T6 等）を用いてタン

ク全体を軽量化することによって質量貯蔵密度は 18~25wt%に到達する見込みである。加えて、CFRP (引張強度 3000 MPa)を用いた Type2, Type3, Type5 タンクを用いることで、質量貯蔵密度が 30~40wt%に到達する可能性が示された。

上述のパラメータスタディの結果から、液体水素貯蔵タンクの質量貯蔵密度目標として、2035 年頃に 20~30wt%、2040 年頃に 30~40wt%を設定した。体積貯蔵密度に関しては、上記の試算結果に対して真空度維持に必要な断熱部容積を削減（改良）することにより、大型トラックなど水素量 70 kg ~ 90 kg のアプリケーションについては 40 g-H₂/L、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-H₂/L を目標値と設定した。また今回、圧力・容積・材料強度などの関係を大まかに定量化することができたため、ニーズがアプリケーション毎に異なる場合には、仕様に応じた目標の再検討が可能である。

パラメータスタディの前提となる液体水素用 CFRP 材料の要件を材料目標試案として、水素貯蔵システム WG、アカデミア WG で検討した。その結果を表 2.4.2-2 に示す。材料目標は、高強度 CFRP と高強度・高弾性 CFRP の 2 つの仕様について設定した。日本の強みである高圧水素技術の活用または共通化の可能性を視野に入れた検討が期待される。また、金属材料については既存の高強度 SUS 材料（例えば SUS304 など）の活用に関して、既存の NEDO 事業の成果活用・連携を検討していく方針であり、新規材料開発目標は設定しない。

表 2.4.2-2 液体水素用 CFRP 材料目標

([0°、一方向、フープ巻き成形]および[+20°/-20°、二方向、ヘリカル巻き成形])

材料	降伏点 ^{*1} (MPa)	引張強さ ^{*1} (MPa)	縦弾性係数 (GPa)	比重 (g/cm ³)	真空管理要件	
					真空度 ^{*2} (Pa)	維持期間 (日)
高強度 CFRP	250	3000	160	1.8	1×10^{-2}	航空機: 30 ^{*3}
高強度・高弾性 CFRP	300	3500	180	1.8		トラック: 750 ^{*4}

*1 材料強度は 20K での材料試験で確認する。LNG 基準に倣い、疲労強度は規定せず、個別要件とする。

*2 真空度は初期真空度を 1×10^{-3} Pa 未満とした場合の許容上限値を示す。運用は低温(20K)、真空度確認は室温を想定。

*3 現状の航空機の整備期間から推定した時間

*4 2 年ごとに行われる車検に基づく時間

(参考文献)

- [1] DOE “Selections for Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office Funding Opportunity Announcement in Support of Hydrogen Shot”, 2023
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/selections-hydrogen-and-fuel-cell-technologies-office-funding-opportunity>
- [2] European Commission, Clean Hydrogen Partnership “Tank Hydrogen Automotive”
https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-dashboard/projects-repository/tahya_en
- [3] European Commission, Clean Hydrogen Partnership “Thermoplastic Hydrogen tanks Optimized and Recyclable”

- https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-dashboard/projects-repository/thor_en
- [4] European Commission, Clean Hydrogen Partnership “Storage Of Hydrogen: Alternative Pressure Enclosure Development”
https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-dashboard/projects-repository/sh2aped_en
- [5] European Commission, Clean Hydrogen Partnership “COMposite CONformal LIquid H2 Tank”
https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-dashboard/projects-repository/cocolih2t_en
- [6] Daimler truck “Daimler Truck receives funding for fuel cell trucks from German federal and state governments”, 2023
<https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/daimler-truck-receives-funding-for-fuel-cell-trucks-from-german-federal-and-state-governments-52916055>
- [7] 産業構造審議会 製造産業分科会 航空機産業小委員会 “航空機産業戦略”, 2024
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/seizo_sangyo/kokuki_u chu/pdf/20240409_1.pdf
- [8] NEDO “グリーンイノベーション基金事業 / 次世代航空機の開発 2023 年度 WG 報告資料”, 2023
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/industrial_restructuring/pdf/020_07_00.pdf
- [9] “Cost Assessment and Evaluation of Liquid Hydrogen Storage for Medium- and Heavy-Duty Applications”, DOE Hydrogen Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Virtual Meeting 2021, Project ID# ST223
- [10] “System Level Analysis of Hydrogen Storage Options”, DOE Hydrogen Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Virtual Meeting 2023, Project ID# ST001
https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review23/st001_ahluwalia_2023_p-pdf.pdf
- [11] Daimler truck “Daimler Truck #HydrogenRecordRun: Mercedes-Benz GenH2 Truck cracks 1,000 kilometer mark with one fill of liquid hydrogen”, 2023
<https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/daimler-truck-hydrogenrecordrun-mercedes-benz-genh2-truck-cracks-1000-kilometer-mark-with-one-fill-of-liquid-hydrogen-52369346>
- [12] ELVHYS, “ELVHYS 公式ウェブサイト”
<https://elvhus.eu/>
- [13] Pre-normative REsearch for Safe use of Liquide HYdrogen”, 2023
<https://cordis.europa.eu/project/id/779613/reporting>
- [14] “Hydrogen Fueling Stations for Airports, in Both Gaseous and Liquid Form”, AIR8466
<https://www.sae.org/standards/content/air8466/>
- [15] 川崎重工業株式会社, Daimler Truck 社, “川崎重工とダイムラー・トラック、「ドイツ向け液化水素サプライチェーンの構築および欧州における液化水素ステーションの輸送網の構築に向けた協力の覚書」を締結”, 2024
https://www.khi.co.jp/pressrelease/news_240612-1.pdf
- [16] Great Wall Motor. “FTXT Debuts at IAA Transportation 2024 in Germany, Long-Haul Hydrogen Power Solutions Garner Significant Attention.”
<https://www.gwm-global.com/news/3403470.html>

[17] 科学技術振興機構, “中国初の液体水素燃焼発電車が発表”, Science Portal China, 2024

https://spc.jst.go.jp/news/240702/topic_5_04.html

[18] Regulation No 110 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE)”

[https://eur-lex.europa.eu/legal-](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A42015X0630%2801%29&qid=1699956594789)

[content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A42015X0630%2801%29&qid=1699956594789](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A42015X0630%2801%29&qid=1699956594789)

2.4.3 水素貯蔵材料システム

水素貯蔵材料システムについては、1.3.5 項「水素貯蔵システム目標」のとおり 2022 年度に検討したシステム目標を据え置くこととした。「水素貯蔵材料」は本検討のスコープ外としたが、以下に 2022 年度版解説書「水素貯蔵材料」より昨年度の検討結果について記載する。

高压水素貯蔵や液体水素貯蔵では実現困難な体積貯蔵密度向上による貯蔵容器の小型化を目指していく（図 2.4.3-1）。貯蔵密度は、CO₂ を排出しないカーボンフリーな燃料である液化アンモニアと同等レベルとなる「（容器ベースで）80g-H₂/kg 以上かつ 70g-H₂/L 以上」を 2050 年仮目標とする。更に貯蔵圧力は究極的には「1MPa 以下」を目指すことで、容器コスト低減や容器形状自由度向上、更には水素供給コスト低減にも貢献していく。その中間マイルストーンとして、「2050 年仮目標の達成率 60%」を 2040 年仮目標とする。貯蔵密度以外に「（仮）タンク内部の上下限温度範囲内（-40 ～ 85 ）で、速やかに水素吸放出できること」、「（仮）11,000 サイクル後の貯蔵能力低下は 10%以下のこと」なども実装段階では要件となる。上記仮目標の妥当性に関しては、2025 年度以降も継続的に検討していく。

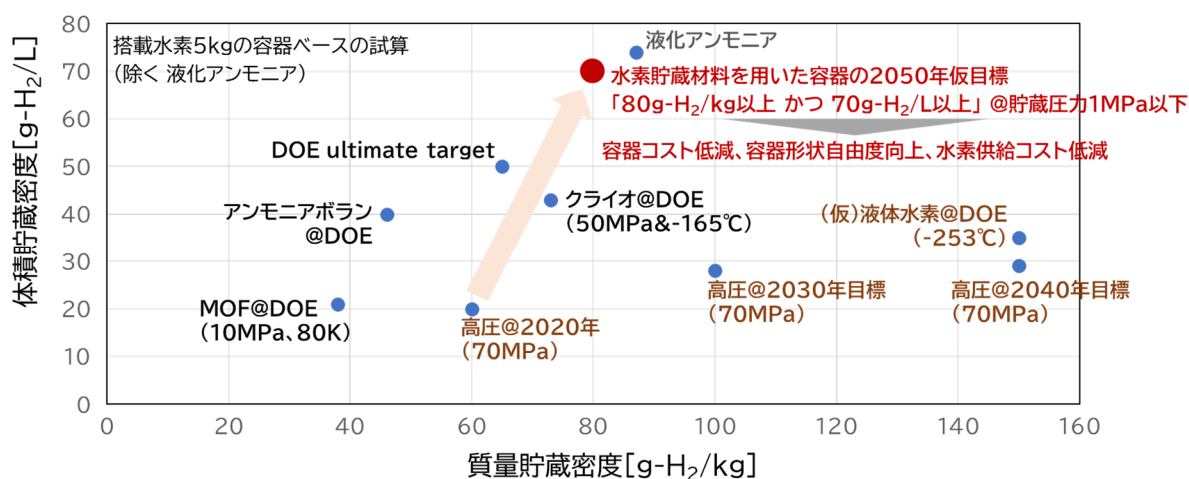


図 2.4.3-1 各技術の水素貯蔵密度

材料研究者の検討の一助とするため、上記仮目標（容器ベース）を貯蔵材料単体の仮目標にブレイクダウンする。表 2.4.3-1 に比較対象となる液化アンモニア容器とその貯蔵密度を示す。液化アンモニア容器の仕様は＜高压ガス容器のご案内 (kobelco-gascylinder.co.jp)＞を参照した。

表 2.4.3-1 液化アンモニア容器仕様と貯蔵密度

液化アンモニア容器仕様と貯蔵密度		詳細内容
容器の内容積	930L	
容器の外容積	1,188L	$=1/4 \times 79.4 \text{cm}^2 \times \pi \times 240 \text{cm} / 1,000$
容器内のガス量	500kg	
容器内の水素量	88kg	$= 500 \text{kg} \times 3/17 \text{ (3H/NH}_3\text{)}$
容器質量	505kg	
容器耐圧	3.6MPa	
容器材質	SM5208	
質量貯蔵密度	87g-H ₂ /kg	$= 88 / (500 + 505)$
体積貯蔵密度	74g-H ₂ /L	$= 88 / 1188$

次に上記容器を用いて、2050 年仮目標「80g-H₂/kg かつ 70g-H₂/L」の達成に求められる貯蔵材料単体の仮目標を表 2.4.3-2（材料充填率 50%の場合）と表 2.4.3-3（材料充填率 80%の場合）に示す。貯蔵材料単体の仮目標は「186kg-H₂/kg かつ 115～184g-H₂/L（材料充填率 80%～50%の場合）」となる。

表 2.4.3-2 2050 年仮目標達成に求められる貯蔵材料単体の仮目標
(SM5208 容器・材料充填率 50%の場合)

容器仕様と貯蔵密度		詳細内容
容器の内容積	930L	
容器の外容積	1,188L	$=1/4 \times 79.4 \text{cm}^2 \times \pi \times 240 \text{cm} / 1,000$
容器内の水素量目標	83kg	$= 1,188 \times 0.070$
容器の質量	505kg	
容器の総質量目標	1,040kg	$= 1,188 \times 0.070 / 0.080$
容器材質	SM5208	
熱交換器の質量	89kg	$= \text{水素貯蔵材料の 20\% と仮定}$
熱交換器の体積	33L	$= 89 / 2.7 \text{ (アルミニウム比重)}$
貯蔵材料の質量	446kg	$= 1,040 - 505 - 89$
貯蔵材料の充填率	50%	
貯蔵材料の体積	449L	$= (930 - 33) \times 0.50$
空隙部の水素体積	448L	$= 930 - 33 - 449$
空隙部の水素重量	0.36kg-H ₂	$= 448 \times 0.0008 \text{ (=水素密度 @ 1MPa)}$
貯蔵材料単体の質量貯蔵密度目標	186g-H ₂ /kg	$= (83 - 0.36) \text{g-H}_2 / 446 \text{kg}$
貯蔵材料単体の体積貯蔵密度目標	184g-H ₂ /L	$= (83 - 0.36) \text{g-H}_2 / 449 \text{L}$

表 2.4.3-3. 2050 年仮目標達成に求められる貯蔵材料単体の仮目標
(SM5208 容器・材料充填率 80%の場合)

容器仕様と貯蔵密度		詳細内容
容器の内容積	930L	
容器の外容積	1,188L	$=1/4 \times 79.4 \text{cm}^2 \times \pi \times 240 \text{cm} / 1,000$
容器内の水素量目標	83kg	$=1,188 \times 0.070$
容器の質量	505kg	
容器の総質量目標	1,040kg	$=1,188 \times 0.070 / 0.080$
容器材質	SM5208	
熱交換器の質量	89kg	=水素貯蔵材料の 20%と仮定
熱交換器の体積	33L	$=89 / 2.7$ (アルミニウム比重)
貯蔵材料の質量	446kg	$=1,040 - 505 - 89$
貯蔵材料の充填率	80%	
貯蔵材料の体積	718L	$=(930 - 33) \times 0.80$
空隙部の水素体積	179L	$=930 - 33 - 718$
空隙部の水素重量	0.14kg-H ₂	$=179 \times 0.0008$ (=水素密度@1MPa)
貯蔵材料単体の質量貯蔵密度目標	186g-H ₂ /kg	$=(83 - 0.14) \text{g-H}_2 / 446 \text{kg}$
貯蔵材料単体の体積貯蔵密度目標	115g-H ₂ /L	$=(83 - 0.14) \text{g-H}_2 / 718 \text{L}$

液化アンモニア容器の材質にアルミニウム材を用いると腐食の懸念があるが、低圧水素 (1MPa 以下) 容器の材質にアルミニウム材を用いても腐食の懸念は小さいと考えられる。そこで容器材質を SM5208 (溶接構造用圧延鋼材) からアルミニウム材に変更して、2050 年仮目標「80g-H₂/kg かつ 70g-H₂/L」の達成に求められる貯蔵材料単体の仮目標を試算した。その結果を表 2.4.3-4 (材料充填率 50%の場合) と表 2.4.3-5 (材料充填率 80%の場合) に示す。貯蔵材料単体の仮目標は「115kg-H₂/kg かつ 118 ~ 188g-H₂/L (材料充填率 80% ~ 50%の場合)」となる。

表 2.4.3-4 2050 年仮目標達成に求められる貯蔵材料単体の仮目標
(アルミ容器・材料充填率 50%の場合)

容器仕様と貯蔵密度		詳細内容
容器の内容積	930L	
容器の外容積	1,188L	$=1/4 \times 79.4 \text{cm}^2 \times \pi \times 240 \text{cm} / 1,000$
容器内の水素量目標	83kg	$=1,188 \times 0.070$
容器の質量	175kg	$=505 \times 2.7 / 7.8$
容器の総質量目標	1,040kg	$=1,188 \times 0.070 / 0.080$
容器材質	アルミニウム	
熱交換器の質量	144kg	=水素貯蔵材料の 20%と仮定
熱交換器の体積	53L	$=89 / 2.7$ (アルミニウム比重)
貯蔵材料の質量	721kg	$=1,040 - 175 - 144$

貯蔵材料の充填率	50%	
貯蔵材料の体積	440L	$= (930-53) \times 0.50$
空隙部の水素体積	437L	$= 930-53-440$
空隙部の水素重量	0.35kg-H ₂	$= 437 \times 0.0008$ (=水素密度@1MPa)
貯蔵材料単体の質量貯蔵密度目標	115g-H ₂ /kg	$= (83-0.35) \text{g-H}_2 / 721 \text{kg}$
貯蔵材料単体の体積貯蔵密度目標	188g-H ₂ /L	$= (83-0.35) \text{g-H}_2 / 440 \text{L}$

表 2.4.3-5 2050 年仮目標達成に求められる貯蔵材料単体の仮目標
(アルミ容器・材料充填率 80%の場合)

容器仕様と貯蔵密度		詳細内容
容器の内容積	930L	
容器の外容積	1,188L	$= 1/4 \times 79.4 \text{cm}^2 \times \pi \times 240 \text{cm} / 1,000$
容器内の水素量目標	83kg	$= 1,188 \times 0.070$
容器の質量	175kg	$= 505 \times 2.7 / 7.8$
容器の総質量目標	1,040kg	$= 1,188 \times 0.070 / 0.080$
容器材質	アルミニウム	
熱交換器の質量	144kg	=水素貯蔵材料の 20%と仮定
熱交換器の体積	53L	$= 89 / 2.7$ (アルミニウム比重)
貯蔵材料の質量	721kg	$= 1,040 - 175 - 144$
貯蔵材料の充填率	80%	
貯蔵材料の体積	702L	$= (930-53) \times 0.80$
空隙部の水素体積	175L	$= 930-53-702$
空隙部の水素重量	0.14kg-H ₂	$= 175 \times 0.0008$ (=水素密度@1MPa)
貯蔵材料単体の質量貯蔵密度目標	115g-H ₂ /kg	$= (83-0.14) \text{g-H}_2 / 721 \text{kg}$
貯蔵材料単体の体積貯蔵密度目標	118g-H ₂ /L	$= (83-0.14) \text{g-H}_2 / 702 \text{L}$

以上より、2050 年仮目標「80g-H₂/kg 以上かつ 70g-H₂/L 以上」の達成に求められる貯蔵材料単体の仮目標を表 2.4.3-6 に整理する。その中間マイルストーンとして、2050 年仮目標の達成率 60% となる「69g-H₂/kg 以上かつ 71g-H₂/L 以上」を 2040 年仮目標とする。

表 2.4.3-6 2050 年仮目標達成に求められる貯蔵材料単体の仮目標

容器材質	SM5208	アルミニウム
質量貯蔵密度	186g-H ₂ /kg	115g-H ₂ /kg
体積貯蔵密度	115 ~ 184g-H ₂ /L (材料充填率 80 ~ 50%の場合)	118 ~ 188g-H ₂ /L (材料充填率 80 ~ 50%の場合)

2.5 FC 材料目標

2.5.1 材料目標の考え方

(1) 2030 年頃の目標

MBD シミュレーションにより、システム性能を成立させるのに必要な BOL および EOL の電流・電圧曲線（以下、電流・電圧曲線を I-V と呼ぶ）が提示された。この目標 I-V を成立させるのに必要な各要素の物性目標を提示する。物性目標の提示は 2 段階で行う。はじめに物性から定常状態の I-V を予測するシミュレータを用い、BOL の目標 I-V を満たす材料物性値を試算する。次にこの試算結果を参考に、実際の測定技術を加味して目標物性を設定する。

目標 I-V を満たす材料物性値を検討するための前提として Pt 目付量を決定する必要がある。米国では HDV 向け FC スタックの 2030 年における Pt 目付量を $0.3[\text{mg cm}^{-2}]$ （空気極 $0.25[\text{mg cm}^{-2}]$ 、水素極 $0.05[\text{mg cm}^{-2}]$ ）[1,2]、FCV 向けでは $0.125[\text{mg cm}^{-2}]$ （空気極 $0.1[\text{mg cm}^{-2}]$ 、水素極 $0.025[\text{mg cm}^{-2}]$ ）[2]。一方、HDV 向けの FC スタックは FCV と比べて、高温領域での要求 I-V 特性を達成するための活性と長時間の耐久性の両立が求められることを鑑み、ここでは Pt 目付量の目標値として $0.24[\text{mg cm}^{-2}]$ （空気極 $0.2[\text{mg cm}^{-2}]$ 、水素極 $0.04[\text{mg cm}^{-2}]$ ）を提案する。

この目標値では、25 トンクラスの大型トラック（FC 定格出力 228kW）で約 43g/台となり、2.3.3 項で示した 2050 年目標の 12.5g/台に比べて約 30g 程度多いが、2.3.1 項で説明したように HDV では TCO のうち初期導入コストの割合が小さいこと（30g 程度では約 10 万円の材料コストアップ）、主要国の目標に対して高い競争力を有することを踏まえると、上記の目標設定は将来的な究極目標を達成するための中間目標として妥当であると考えた。

(参考文献)

[1] “M2FCT: Million Mile Fuel Cell Truck Consortium”, DOE Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting 2021, Project ID# FC339

[2] “Fuel Cell System Analysis”, DOE Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting 2021, Project ID# FC163

(2) 2035 年頃の目標

2030 年目標と同様に MBD シミュレーションにより、2035 年の FC システム性能を成立させるのに必要な BOL および EOL の I-V 特性が提示された。2035 年頃の目標 I-V は 2040 年頃に向けて、44 トントラックの製品要件（ディーゼルパリティ）を段階的に満たしていく中間目標として設定されている。44 トントラックの製品進化として、2030 年頃までは FC スタック 4 基が想定されているのに対し、2035 年頃および 2040 年頃は FC スタック 2 基の想定となる。セル枚数を 2030 年頃の 330 枚に据え置いた検討では、動力性能要件を材料目標に変換した際に熱負荷点の電流密度が 3Acm^{-2} を超えてしまうことから、材料研究者と議論を重ね、2035 年頃はセル枚数を暫定的に 396 枚へ増やすことで熱負荷点の電流密度を 2.5Acm^{-2} 以下に下げている。また、EOL の I-V 特性で動力性能要件を満たすことが要件となるため、触媒からの Pt の溶出速度が重要な因子となる。Pt の溶出速度を 2030 年頃の現行 1 倍に据え置いた検討では、BOL 質量活性の向上や BOL 酸素拡散抵抗の低減などに過大な要求が生じることや、2040 年頃の目標で Pt の溶出速度

1/30 倍が掲げられていることも踏まえ、2035 年頃は Pt の溶出速度 1/2 倍としている。

(3) 2040 年頃の目標

2030 年目標と同様に MBD シミュレーションにより、2040 年の FC システム性能を成立させるのに必要な BOL および EOL の I-V 特性が提示された。この目標値は、HDV における燃料電池アプリケーションとして最も FC スタックへの要求性能が厳しい 44 トンクラスの大型トラックを対象とし、2 次電池 (BEV) や水素エンジンと比較して商材としての優位性を示す性能目標として、現在の PEFC の Pt 触媒系のシステムでは、現行の延長線上の改良だけで到達困難なレベルと想定される。そのため、2.5 節で説明した、現行技術の高度化による性能向上を目指す 2030 年頃までの PEFC 技術開発に比べて、2040 年以降の目標達成へのシナリオは、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し、その時期や程度を正確に予測できるものではない。

ここでは、2040 年の BOL の目標 I-V を成立させるのに必要な初期材料物性を検討し、各材料物性および耐久性を両立させるための材料開発の方向性 (特に触媒、電解質材料) については、個別の物質・材料種にフォーカスせず、それぞれの材料のポテンシャルの科学的な理解を軸に分類して、学理で成り立つ可能性のシナリオを検討し、将来の研究ニーズとして整理した。

さらに、こうした材料開発においては、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) が重要となる。高度な解析、計算科学技術による現象・機構解明にもとづき材料設計の指針を提示するとともに、これらの解析・計算データを蓄積し、DX 技術 (個別の要素技術は 2.9 節を参照) 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・プロセスの探索を行うことができる。さらに、その過程で創生された材料候補の実測データをフィードバックすることで、目標達成へ向けた開発サイクルを加速していくことができる。

本節では、2040 年目標達成のシナリオとして、2.5 節と同様に 2040 年頃の要求 I-V 特性を満たす材料初期物性をシミュレーションにより検討し、それらの目標を達成しうる検討材料開発の方向性に加えて、材料・プロセス探索加速のための DX 技術、機構・現象解明 (解析・計算科学) およびこれらの研究推進に必要不可欠な人材育成の在り方も検討し、以降にまとめた。なお、今後も最新動向や解析・計算データ等の収集を並行して進め、シナリオの仮説・検証を継続的に検討していく方針である。

2.5.2 材料初期物性検討のためのシミュレーションモデル

本項では、要求 I-V 特性を満たす材料初期物性検討のためのシミュレーションモデルについて説明する。シミュレーションには、図 2.5.2-1 に示すモデル[1]を用いる。セルの流路の長さは膜電極ガス拡散層接合体 (以下、MEGA) の厚さよりも極めて長く、流路方向の物質の濃度分布は電解質膜に垂直方向のそれよりも無視できるほど小さい。この MEGA の性質に基づき、本モデルでは、熱および物質の輸送現象を流路方向と垂直方向とに分離して取り扱う、いわゆる 1+1D モデルを適用する。この近似では、流路方向のガス組成、流量、温度変化は、各所における流路と MEGA との間のエネルギーおよび物質の保存を考慮することにより計算される。垂直方向の熱および物質輸送は、各所の熱および物質輸送あるいは反応の垂直方向に対する支配方程式を解くことにより得られる。

流路方向のエネルギー・物質保存式は文献[1-4]のとおりであるので説明を割愛する。垂直方向の物質輸送および反応に関わる方程式にも既往の文献[1-4]のものを適用しているが、いくつか本検討固有のモデルを使用しているので簡単に説明する。ガス拡散層（GDL）および触媒層中の圧力差による移流ならびに濃度勾配によるガス拡散に対して Darcy 則・Stefan-Maxwell の式・質量保存則を、電解質やアイオノマ中のプロトン伝導に関しては電位勾配による伝導を表現する式、電解質中の水輸送に関しては拡散および電気浸透流を表現する式を使用する。そして触媒層中の電極触媒反応に対しては Butler-Volmer 式を適用する。図 2.5.2-1 には、これらの主要な方程式の概要も示している。計算結果を左右するのは、これらの式に現れる物性モデルならびにパラメータである。I-V 特性に特に強く影響する物性として、(1) 電解質のプロトン伝導率、(2) 空気極流路/GDL ガス輸送特性、(3) 空気極触媒層ガス輸送特性、(4) 空気極触媒活性、がある。これらのモデルに関して以下に説明する。

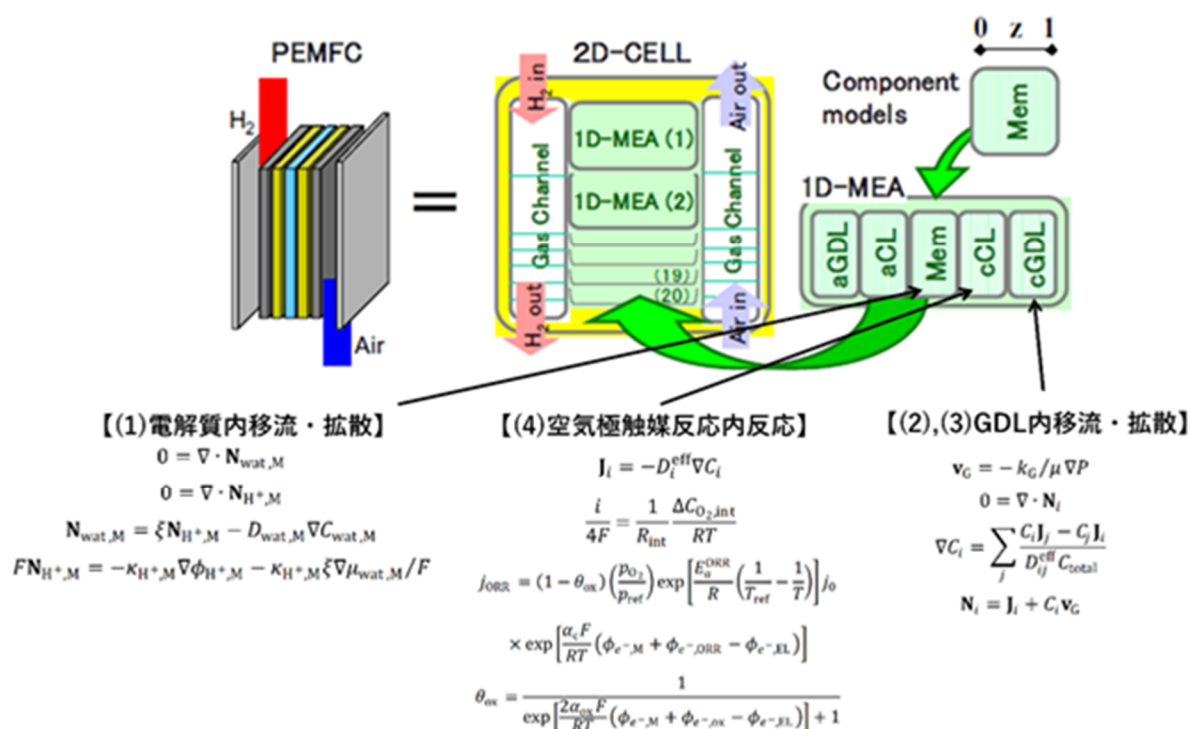


図 2.5.2-1 FC 発電モデルの概要

(1) 電解質のプロトン伝導率

電解質膜、アノード・カソードアイオノマのプロトン伝導率には、様々なフッ素系膜の性質をスルホン酸基 1 モル当たりの電解質重量（EW: Equivalent Weight）の関数として統一的に表現する下記のモデル[4,5]を適用した。

$$\kappa = 0.5(f - 0.06)^{1.5} \exp \left[\frac{15000}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.5.1)$$

$$f = \frac{\lambda \bar{V}_0}{\bar{V}_m + \lambda \bar{V}_0} \quad (2.5.2)$$

$$\bar{V}_m = \frac{\text{EW}}{\rho_m} \quad (2.5.3)$$

$$\lambda = \frac{c_1 c_2 a_w}{1 - c_2 a_w} + \frac{c_1 c_2 (c_3 - 1) a_w}{1 + c_2 (c_3 - 1) a_w}, c_1 = 2.671, c_2 = 0.7677, c_3 = 7.269 \quad (2.5.4)$$

κ はプロトン伝導率、 \bar{v}_0 は水のモル体積、 \bar{v}_m は乾燥電解質のモル体積、 ρ_m は乾燥電解質の密度、 λ は電解質中のスルホン酸 1 モル当たりの含水モル量、 a_w は水の相対湿度である。(2.5.3)式に EW を入力すると伝導率が決まる形式となっている。本検討では、電解質膜の EW は補強層を含むものとする。またラジカルクエンチ剤によるプロトン伝導率の低下を加味しない。そして触媒層中の有効プロトン伝導率は、触媒層中のアイオノマ体積分率・屈曲率による低下を加味して電解質の伝導率の 1/3 とした。

(2) 空気極流路/GDL ガス輸送特性

リブにより流路形状が規定されたセパレータを使用する MEGA では、流路中のガスと接しないリブ下の GDL にはガスが供給されにくい等、MEGA 面内に流路形状に由来した不均一性が現れる。本モデルではこうした流路の幾何形状の影響を無視し、3D ファインメッシュのような多孔体流路のように、一様に流路から GDL へとガスが行き渡るものと仮定し、現象を単純化する。そして GDL 中の物質輸送に関しては、上述のとおり下記の Darcy 則、Stefan-Maxwell の式、質量保存の式を組み合わせ定常解を得る。Stefan-Maxwell の拡散方程式で用いる物質 i と j との間の相互拡散係数 D_{ij}^{eff} は、GDL の空隙率 ε_{GDL} 、屈曲率 τ_{GDL} 、物質の相互拡散係数 D_{ij} を用いて、下記のように表現する。

$$D_{ij}^{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_{\text{GDL}}}{\tau_{\text{GDL}}} D_{ij} \quad (2.5.5)$$

細孔径の大きい GDL では分子拡散が支配的であるとし、相互拡散係数 D_{ij} を下記の式により表現する。

$$D_{ij} = \frac{0.001T^{1.75}}{p(v_i^{1/3} + v_j^{1/3})^2} \sqrt{\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j}} \quad (2.5.6)$$

ここで T は温度、 p は全圧、 v_i は拡散体積、 M_i は分子量である。各々の値に関しては文献[1-3]を参照されたい。

なお本検討で想定した流路/GDL のモデルは上述のとおりであるが、目標 I-V を達成する流路/GDL はこれに限るものではない。様々な流路/GDL の性能を一般化して測る物性指標として、本検討では分子拡散抵抗 R_{mol} を重視し、これよりも小さいか否かがガス拡散性の目標を満たす流路/GDL であるか否かを左右すると考える。 R_{mol} の定義に関しては文献[6]を参照されたい。

(3) 空気極触媒層ガス輸送特性

現状の MEGA でよく使用される Pt 担持カーボンとフッ素系のアイオノマとから成る多孔質体を前提としてシミュレーションを実施する。触媒層中での移流に対しても、GDL と同様に Darcy 則を適用する。触媒層中の拡散に関しては、細孔径の小さい触媒層では Knudsen 拡散が支配的であると考え、以下の Knudsen 拡散モデルを適用する。

$$J_i = -D_i^{\text{eff}} \nabla C_i \quad (2.5.7)$$

GDL と同様に、有効拡散係数 D_i^{eff} を、触媒層の空隙率 ε_{CL} と屈曲率 τ_{CL} とを用い、下記のように表現する。

$$D_i^{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_{\text{CL}}}{\tau_{\text{CL}}} D_i \quad (2.5.8)$$

拡散係数 D_i は下記により計算する。

$$D_i = \frac{2r_K}{3} \left(\frac{8RT}{\pi M_i} \right)^{1/2} \quad (2.5.9)$$

r_K は細孔半径であり本検討では 40 nm とする。 R は気体定数である。

空気極触媒層中のガス拡散でもう一つ重要な点は、アイオノマと触媒との界面に酸素透過抵抗の存在である[7,8]。本検討では、界面抵抗 R_{int} が触媒のラフネスファクタ RF に反比例するとする経験式[8,9]

$$R_{\text{int}} = \frac{560}{RF} \text{ (s m}^{-1}\text{)} \quad (2.5.10)$$

を用い下記のように、界面抵抗による酸素濃度の低下 $\Delta C_{\text{O}_2, \text{int}}$ を表現する。

$$\frac{i}{4F} = \frac{1}{R_{\text{int}}} \frac{\Delta C_{\text{O}_2, \text{int}}}{RT} \quad (2.5.11)$$

F はファラデー定数である。

GDL と同様に、目標 I-V を満たす触媒層構造は、本検討で前提とした構造に限るものではない。本検討では、多様な触媒層構造のガス拡散性を一般化して測る指標として、分子拡散抵抗以外のガス拡散抵抗 R_{other} を重視し、これよりも小さいか否かがガス拡散性の目標満たす触媒層であるか否かを左右すると考える。 R_{other} の定義に関しても文献[6]を参照されたい。

(4) 空気極触媒活性

空気極触媒活性を規定する酸素還元反応モデルには、以下の酸化被膜による被毒効果を考慮した簡易モデル[1]を使用する。

$$i = (1 - \theta_{\text{ox}}) \left(\frac{p_{\text{O}_2}}{p_{\text{ref}}} \right) \exp \left[\frac{E_a^{\text{ORR}}}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T} \right) \right] i_0 \exp \left[\frac{\alpha_c F}{RT} \eta_{\text{ORR}} \right] \quad (2.5.12)$$

$$\theta_{\text{ox}} = \frac{1}{\exp \left[\frac{2\alpha_{\text{ox}} F}{RT} \eta_{\text{ox}} \right] + 1} \quad (2.5.13)$$

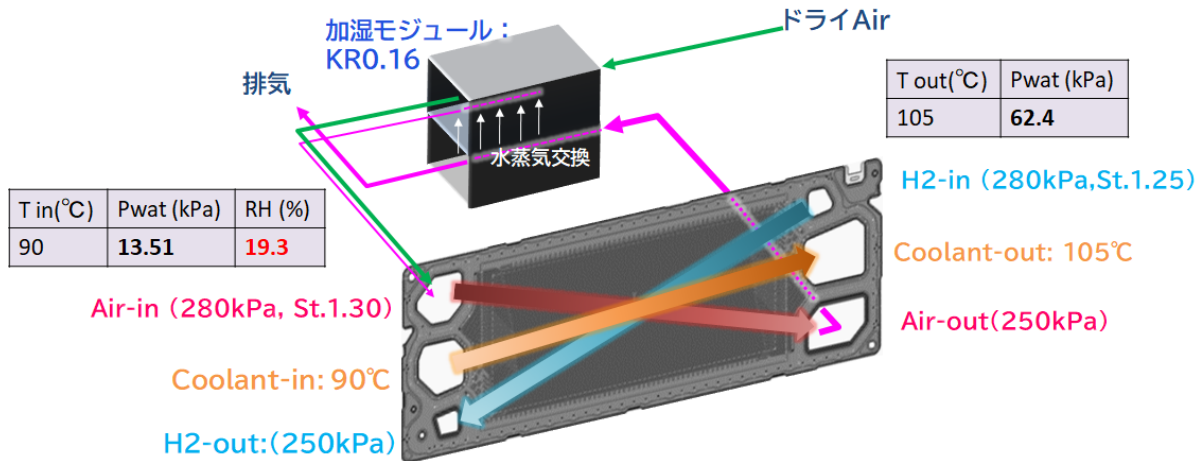
p_{O_2} は酸素分圧、 p_{ref} は基準圧力、 E_a^{ORR} は酸素還元反応の活性化エネルギー（ガス中の酸素を基準とする）、 i_0 は交換電流密度、 α_c は移動係数、 η_{ORR} は過電圧、 α_{ox} は酸化被膜形成の移動係数、 η_{ox} は酸化被膜形成の過電圧である。本検討では、 E_a^{ORR} に、文献[10]の電解質の酸素を基準とした有効活性化エネルギー 38 kJ/mol を、電解質中の溶存酸素濃度の実測値[11]で補正した活性化エネルギー 17 kJ/mol を用いる。また酸化物形成の η_{ox} を酸化物形成の平衡電位 0.75 V (RHE)として定義する。

2.5.3 材料物性目標の検討

(1) 2030 年頃の目標

図 2.5.3-1 に運転条件の前提を示す。空気極出口から排気されるガス中の水蒸気量の 16 %を、空気極入口ガスへと交換する加湿システムを想定し、運転条件は、空気極入口全圧 280kPa（酸素濃度 20.8%）、空気極入口湿度 20%RH、空気極出口圧力 250kPa（2.0 A cm⁻²時）、燃料極入口全圧 280 kPa、燃料極入口無加湿、燃料極出口全圧 250 kPa、冷却水入口温度 90 °C、冷却水出口温度

度 105 とし、エジェクタによる水素循環を考慮する。水素循環は、燃料タンクからの水素ガスに対する燃料極出口からのガスの質量流量比が 5 となるように設定する。セル構成は、面積 273cm²、燃料極・空気極対向流とする。ただし出口の全圧は成り行きで決まるため、想定した圧力 250 kPa から±10 kPa 程度のずれがある。空気極および燃料極のストイキ比はそれぞれ 1.3 および 1.25 と設定する。上記の計算に加え、前述した GDL の分子拡散抵抗 R_{mol} と触媒層内の酸素輸送抵抗 R_{other} とを抽出するためのシミュレーションも行う。本計算では、実験での抽出法[6, 8]を参考に、電極面積を 1 cm²、セル温度 80 、相対湿度 90%RH、燃料極流量 1 L/min、空気極流量 2 L/min (酸素濃度 5 %) とし、空気極の全圧を 100 ~ 250 kPa と変化させた際の限界電流密度から、酸素輸送抵抗を抽出する。



連続定格点 (105 運転条件) / 水素循環あり			
電極面積	273 cm ²	Air 入圧 / 出圧	280 / 250 KPa _{abs}
動作点電流	2.0A cm ⁻²	加湿モジュール出圧	240 KPa _{abs}
H2 ストイキ比	1.25	水蒸気交換量	16 %
Air ストイキ比	1.30	セル入口冷却水温度	90
H2 入圧 / 出圧	280 / 250 KPa _{abs}	セル出口冷却水温度	105

図 2.5.3-1 想定するシステム構成および運転条件

MBD シミュレーションにより提示された BOL の目標 I-V を満足する物性パラメータを検討した。検討は、低電流密度域 (0.2 A cm⁻² 付近) での電圧を満たすよう交換電流密度 i_0 を調整、中電流域 (2 A cm⁻² 付近) での電圧を満たすよう電解質の EW を調整、高電流域 (3 A cm⁻² 以上) の電圧を満たすよう GDL・触媒層のガス拡散抵抗を調整する流れとした。表 2.5.3-1 に物性パラメータを示す。また図 2.5.3-2 にシミュレーションにより得た発電特性を示す。

表 2.5.3-1 シミュレーションで設定した物性値

要素	物性	物性値 (目標値)	備考
電解質膜	H ⁺ 伝導率@120 , 30%RH	0.032 S cm ⁻¹	厚さ 8 μm の EW600(補強層込み)のフッ素系膜を想定し、普遍モデル[4, 5]を用いて算出。計算においてラジカルクエンチ剤による伝導率の低下は加味していない。なおモデル(2.5.1)～(2.5.4)式は実測されるプロトン伝導率よりも低い値を与える。実質的にはより高い EW により、本伝導率は達成されると推測される。
	H ⁺ 伝導率@100 , 40%RH	0.041 S cm ⁻¹	
	H ⁺ 伝導率@ 80 , 80%RH	0.117 S cm ⁻¹	
空気極 触媒層	Pt 目付量	0.2 mg cm ⁻²	電解液中の溶存酸素濃度変化を補正した速度定数の活性化エネルギーの実測値 (38 kJ mol ⁻¹) [10]と電解質への酸素溶解度[11]を用い、気相中の酸素を基準として算出した活性化エネルギー 17 kJ mol ⁻¹ を使用。
	ECSA	60 m ² g ⁻¹	
	質量活性@100 , 100%RH , O ₂ 分圧 100 kPa _{abs} , 0.9 V	1810 A g ⁻¹	
	質量活性@80 , 100%RH , O ₂ 分圧 100 kPa _{abs} , 0.9 V	1740 A g ⁻¹	
	アイオノマ H ⁺ 伝導率 @120 , 30%RH	0.032 S cm ⁻¹ (0.129 Ω cm ²)	EW600 のフッ素系アイオノマを想定し、普遍モデル[4, 5]を用いて算出。括弧内の値は、触媒層中のアイオノマの有効プロトン伝導率 κ_1^{eff} (先の値の 1/7 と設定)と触媒層厚さ δ_{CL} とから、 $\delta_{\text{CL}}/\kappa_1^{\text{eff}}$ として算出。なおモデル(2.5.1)～(2.5.4)式は実測されるプロトン伝導率よりも低い値を与える。実質的にはより高い EW により、本伝導率は達成されると推測される。
	アイオノマ H ⁺ 伝導率 @100 , 40%RH	0.041 S cm ⁻¹ (0.101 Ω cm ²)	
	アイオノマ H ⁺ 伝導率@ 80 , 80%RH	0.117 S cm ⁻¹ (0.035 Ω cm ²)	
	電子伝導率	2.0 S cm ⁻¹	Pt 目付量および ECSA から算出される RF より、DE2020 を想定した文献[9]の式を HOPI の界面抵抗[8]となるよう補正した式 $R_{\text{int}}=560/\text{RF}$ (s m ⁻¹) にて界面抵抗を定義。左記拡散抵抗値は図 2.3.3 (C)の切片より導出。
	触媒層内 O ₂ 拡散抵抗	10 s m ⁻¹	
	I/C	1.0	
	触媒層厚さ	6 μm	
	Pt 担持率	60 wt%	触媒層厚さが 6 μm となるよう空隙率を調整。
燃料極 触媒層	Pt 目付量	0.04 mg cm ⁻²	EW600 のフッ素系アイオノマを想定し、普遍モデル[4, 5]を用いて算出。なおモデル(2.5.1)～(2.5.4)式は実測されるプロトン伝導率よりも低い値を与える。実質的にはより高い EW により、本伝導率は達成されると推測される。
	アイオノマ H ⁺ 伝導率 @120 , 30%RH	0.032 S cm ⁻¹	
	アイオノマ H ⁺ 伝導率 @100 , 40%RH	0.041 S cm ⁻¹	
	アイオノマ H ⁺ 伝導率@ 80 , 80%RH	0.117 S cm ⁻¹	
	電子伝導率	2.0 S cm ⁻¹	
	I/C	1.2	
	触媒層厚さ	2 μm	
空気極 流路/GDL	Pt 担持率	20%	例えば 3D ファインメッシュ等を想定し、GDL に一様にガスが行き届くと想定。ε _{GDL} =0.75 , τ _{GDL} =7 と設定。分子拡散抵抗は、図 2.5.3-2 (C)の勾配より導出。
	GDL 厚さ	50 μm	
	分子拡散抵抗	18 s m ⁻¹	
燃料極 流路/GDL	電子伝導率	4.9 S cm ⁻¹	例えば 3D ファインメッシュ等を想定し、GDL に一様にガスが行き届くと想定。
	GDL 厚さ	150 μm	
セパレータ関係	電子伝導率	2.7 S cm ⁻¹	セパレータ/セパレータ、セパレータ/GDL、全接触抵抗の合計値。
	接触抵抗	6.5 mΩ cm ²	

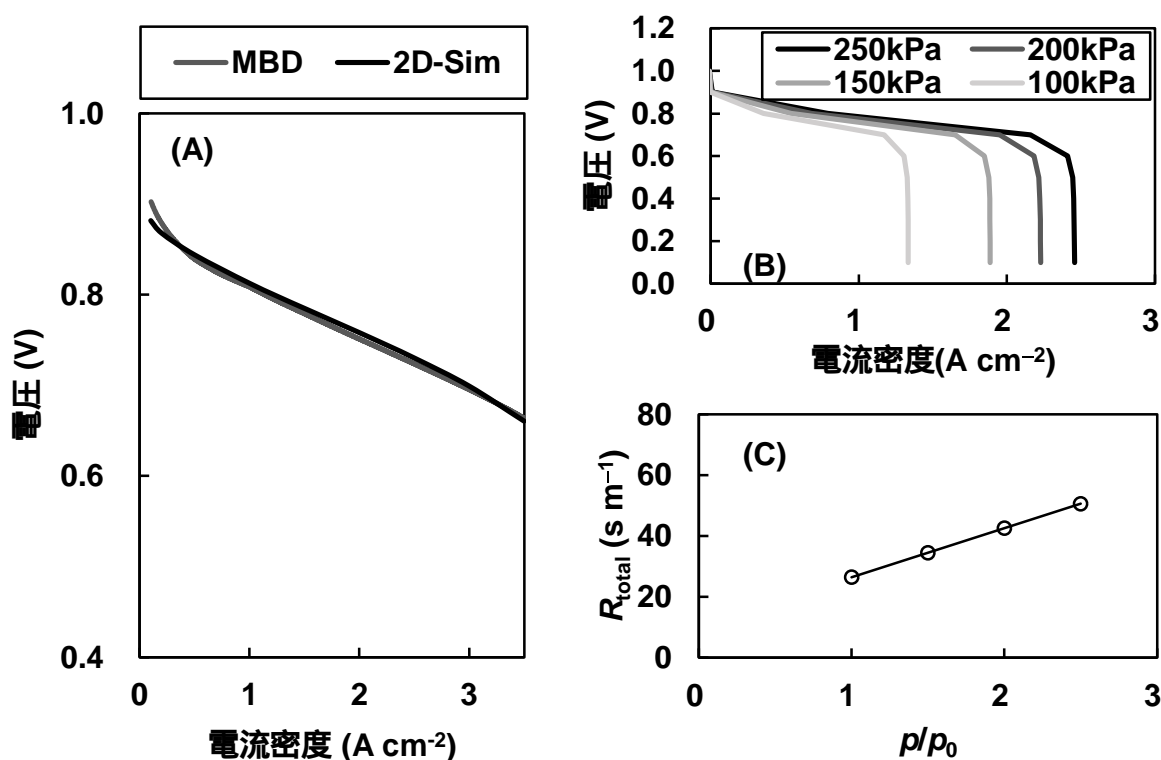


図 2.5.3-2 電流電圧曲線

(A)発電性能(MBD: MBD による目標 I-V, 2D-Sim.:本検討結果)、(B)および(C) ガス拡散抵抗抽出シミュレーションの結果、基準圧力 $p_0 = 100\ kPa_{abs}$ (C)の傾きおよび切片から R_{mol} および R_{other} を算出

(参考文献)

- [1] N. Nonoyama and Y. Ikogi, *ECS Trans.* **16** 13-21 (2008).
- [2] A. Z. Weber and J. Newman, *Chem. Rev.* **104** 4679-4726 (2004).
- [3] A. Z. Weber and J. Newman, *J. Electrochem. Soc.* **153** A2205-A2214.
- [4] A. Z. Weber and J. Newman *J. Electrochem. Soc.* **151** A311-A325 (2004).
- [5] S. Shi, A. Z. Weber and A. Kusoglu *Electrochim. Acta* **220** 517-528 (2016).
- [6] Y. Ono, T. Mashio, S. Takaichi, A. Ohma, H. Kanesaka and K. Shinohara *ECS Trans.* **28**, 69-78 (2010).
- [7] R. Jinnouchi, K. Kudo, N. Kitano and Y. Morimoto *Electrochim. Acta* **188** 767-776 (2016).
- [8] R. Jinnouchi, K. Kudo, K. Kodama, N. Kitano, T. Suzuki, S. Minami, K. Shinozaki, N. Hasegawa, A. Shinohara *Natur. Commun.* **12** 4956 (2021).
- [9] A. Kongkanand and M. F. Mathias, *J. Phys. Chem. Lett.* **7** 1127-1137 (2016).
- [10] H. Uchida, K. Izumi, and M. Watanabe *J. Phys. Chem. B* **110** 21924-21930 (2006).
- [11] Z. Zhu, Q. Liu, X. Liu, and J. Shui *J. Phys. Chem. C* **124** 3069-3079 (2020).

初期の目標 I-V 特性を満たすための物性パラメータを根拠に、主要材料の物性目標の項目と目標値を表 2.5.3-2 のように定めた。また、参考のため、その各項目の現行材料からなる MEA での物性、特性値の実測値も併せ示した。

表 2.5.3-2 主要材料の物性目標 は、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 8	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 9
		ECSA (m ² /g)		60		48	61	
		質量活性 (A/g) @0.9V	at 100 , 100%RH, O ₂ 分圧 100 kPa _{abs} , 0.9 V	1810		★	★	
			at 80 , 100%RH, O ₂ 分圧 100 kPa _{abs} , 0.9 V	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 , 80%RH	10		9.1	18.1	
電解質	膜	膜厚 (μm)			8.0	8.5	25	Chemours Nafion™ NR211 9
		H ⁺ 伝導率 (S/cm) 1	at 120 , 30%RH	0.032		0.018	0.016	
			at 100 , 40%RH	0.041		0.027	0.024	
			at 80 , 80%RH	0.12		0.106	0.086	
			at -30 , 0%RH 2	今後設定		★	★	
		水素透過性	3	今後設定		★	★	
		酸素透過性	4	今後設定		★	★	
		機械強度 5	(暫定) 引張最大強度(MPa) at 23 , 50%RH	今後設定		50	30	
	(暫定) 引張破断伸び(%) at 23 , 50%RH		今後設定		★	250		
	アノイオ	H ⁺ 伝導率 (S/cm)	at 120 , 30%RH	0.032		—	★	Chemours Nafion™ D2020 触媒層抵抗 9
			at 100 , 40%RH	0.041		—	★	
			at 80 , 80%RH	0.12		—	★	
		空気極触媒層抵抗(Ωcm ²)	at 120 , 30%RH		0.13	0.77	0.37	
			at 100 , 40%RH		0.10	0.41	0.24	
			at 80 , 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 10 分子拡散抵抗 9
		流路・GDL (分子拡散抵抗) (s/m) 6	at 80 , 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 7	(暫定) 圧縮弾性率	今後設定		★		
(暫定) 曲げ剛性 (N/mm)	今後設定			★	0.9 ~1.5			

1：電解質膜の H⁺ 伝導率は、補強材込みの伝導率。クエンチャ添加など、耐久性を担保した状態での伝導率。

2：低温起動性に影響する因子。スタックとしての要求仕様を集約したうえで設定。

3、 4：耐久性、燃費に影響する因子。今後、設定。

5：セルの構造・仕様により必要な物性値が異なると考えられることから、当面、指標となる物性項目は仮置き。

目標値とともに今後の議論とする。ここでは、現行材料の物性を参考値として示す。

6：GDL と流路の構造との組み合わせで決まる特性値。

7：セルの構造・仕様により必要な物性値が異なると考えられることから、当面、指標となる物性項目は仮置き。目標値とともに今後の議論とする。ここでは、現行材料の物性を参考値として示す。

8：第二世代 MIRAI の MEA を用いた実測値、解析結果。(FC-Cubic 測定)

9：触媒：田中貴金属 TEC10V30E、カソード触媒担持量：0.2mg-Pt/cm²、アノード触媒担持量：0.1mg-Pt/cm²、アイオノマ：Chemours Nafion™ D2020、I/C:1.0、電解質膜：Chemours Nafion™ NR211、GDL：SGL-CARBON SIGRACET® 22BB からなる MEA で測定した値。(FC-Cubic 測定)

10：メーカー公表値 <https://www.sglcarbon.com/en/markets-solutions/material/sigracet-fuel-cell-components/>

これら材料目標一覧に示されている特性の測定手法は、「NEDO PEFC セル評価解析プロトコル」にまとめられている。下記に現在、FCV 向けに決まっている評価手法について表 2.5.3-3 に示す。

実際の測定手法に関しては、NEDO、FCCJ (燃料電池実用化推進協議会) 技術研究組合 FC-Cubic のホームページに掲載される「NEDO PEFC セル評価解析プロトコル」に記載されている。

表 2.5.3-3 材料特性の測定手法

部位・抵抗要素		項目	評価手法
空気極触媒		ECSA	C-2(-3-4)CV 評価方法(ECA 測定方法)
		質量活性(ORR 活性) 1	C-4(-3-2)ORR 活性評価方法
		ガス拡散抵抗(s/m)	C-6 酸素拡散抵抗(電極触媒層)
電解質	膜	H ⁺ 伝導率:膜単体 2	M-1(-1-1)プロトン伝導度測定方法
		H ⁺ 伝導率:MEA 2	M-5 プロトン輸送抵抗(電解質膜)
		水素透過性	M-6 ガス透過性測定方法(水素/酸素)
		酸素透過性	M-6 ガス透過性測定方法(水素/酸素)
		引張強度 3	
	アイオノマ	H ⁺ 伝導率 2	M-5 プロトン輸送抵抗
		空気極触媒層抵抗 2	C-7 プロトン輸送抵抗(触媒層)
GDL		ガス拡散抵抗(s/m)	G-1 酸素拡散抵抗(拡散層)
		面積抵抗(cm ²) 3	
		圧縮弾性率 3	
		曲げ剛性(N/mm) 3	

1：現在、測定手法として記載されているのは 80 の条件。100 の測定手法は現在、検討中で今後、追加される予定。

2：現在、測定手法として記載されているのは 80 までを想定した手法。80 より高い温度での測定手法については今後、追加される予定。

3：現在、測定手法について検討中。今後、追加予定。

図 2.5.3-2 では、FC 単セルを構成する各材料の物性(表 2.5.3-1)を積み上げ、図 2.5.3-1 で想定するセル・システム構成および運転条件での電流電圧曲線をシミュレーション(2D-Sim.)によ

り予測した。同条件（連続定格点）のシミュレーションにおいて、セル面内環境分布を各パラメータ（電流密度 i 、相対湿度 RH、酸素分圧 P_{O_2} 、電解質膜面温度 T_{mem} ）に分離し、図 2.5.3-3 にそれぞれ示した。図中の横軸は、空気入口から出口までの相対距離を示している。特に電解質膜面温度 T_{mem} のセル面内における最高温度は、セル出口冷却水温度の+5～10 となることが試算によって示された。2030 年に向けた材料の作動上限範囲を 120 （セル出口冷却水温度 105 ）として、-30 から 120 に至る広範囲な温度条件で作動できることを材料要件として定めた。

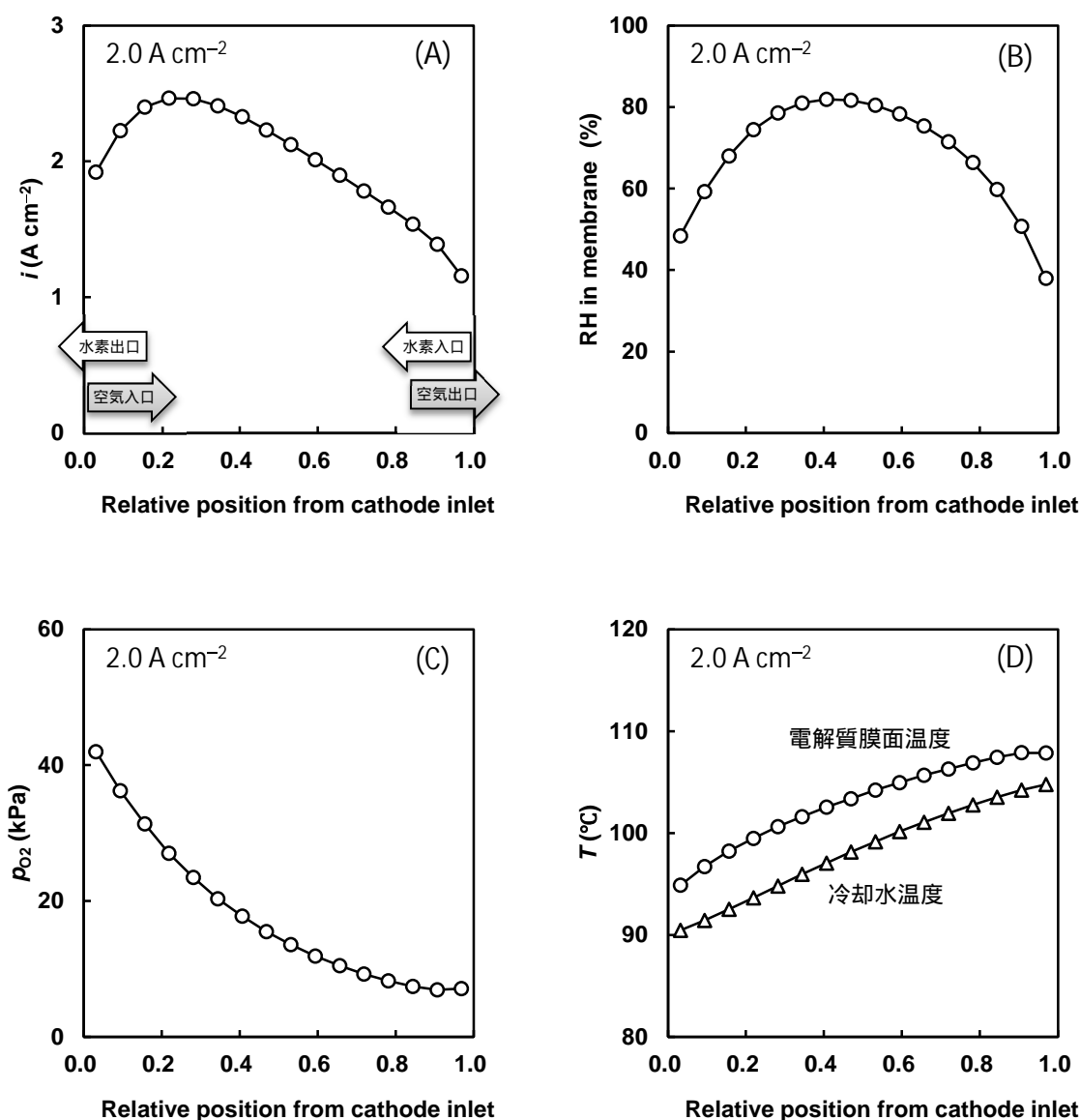


図 2.5.3-3 連続定格点運転（図 2.5.3-2 の 2D-Sim.電流電圧曲線）における FC セル面内の (A)電流密度分布、(B)相対湿度分布、(C)酸素分圧分布、(D)温度分布、図中 Δ は冷却水温度、 \circ は電解質膜面温度

(2) 2035 年頃の目標

2030 年頃の要求 I-V 特性の場合と同様に、2035 年頃の要求 I-V 特性を満たす材料初期物性をシミュレーションにより検討する。シミュレーションは 2.5.2 項に示すとおり、固体高分子形燃料電池を想定したものである。既存のシミュレータを活用した材料初期物性の試算であるため、現行の Pt 触媒、プロトン伝導型の電解質膜を用いる固体高分子形燃料電池を想定したシミュレーションとなる。図 2.5.3-4 に、製品・システム検討に基づくセルの構成ならびに動力性能要件に相当する運転条件を示す。運転条件は HDV と FCV とで同一である。2030 年との大きな違いは、冷却水出口温度が 120 と高温化した点である。これは動力性能要件においてセルから発生する熱を、限られた面積のラジエータで冷却することを目的としている。運転温度の高温化に伴い、空気極入口の湿度が 20%RH から 12 %RH に低下している。電極面積は、製品・システムより求められる出力を実現可能な電流密度で実現できるよう、セル当たりの電極面積を 273 cm² から 283 cm² に、セル枚数を HDV では 330 枚から 396 枚に増加している。これにより動作点での電流密度の増加が、初期において 1.63 Acm⁻² から 2.18 Acm⁻²、劣化後に 1.76 Acm⁻² から 2.37 Acm⁻² に抑えられている。なお FCV の動作点での電流密度は、初期において 1.80 Acm⁻²、劣化後において 1.92 Acm⁻² である。

HDV、FCV いずれにおいても、動力性能要件は燃料電池の運転全体の中で主要な条件ではないが、出力・温度共に性能上、最も過酷な運転条件である。このため MBD により提示されたこの条件での劣化前後の性能要件を満たすか否かを、材料物性がシステムからの要求性能を満たすか否かの判定条件とした。要素材料の HDV と FCV との違いは、空気極 Pt 目付のみである。HDV では 0.178 mg cm⁻² とし、FCV では 0.10 mg cm⁻² を想定している。要求 I-V 特性に強く影響するもう一つの因子は触媒からの Pt の溶出速度である。MBD シミュレーションでは粒子径 3 nm の Pt ナノ粒子と比較して 1/5 ~ 1 倍の溶出速度が検討され、溶出速度が遅いほど、要求される初期の I-V 特性が低下する結果が示されている。しかし触媒活性と溶出速度とには背反関係があるため、2035 年頃の触媒材料の到達可能な活性と溶出速度とを予測しながら、両者をバランスする必要がある。本検討では、現行技術の推移に基づき、2035 年頃には粒子径 3 nm 程度の Pt ナノ粒子の 1/2 程度まで溶出速度の低減を期待できるとし、この前提に基づく要求 I-V 特性を材料初期物性の検討対象とした。要求される耐久性については、HDV で時間に対して 50000 時間相当、FCV で走行距離に対して 10000 時間相当と想定した。

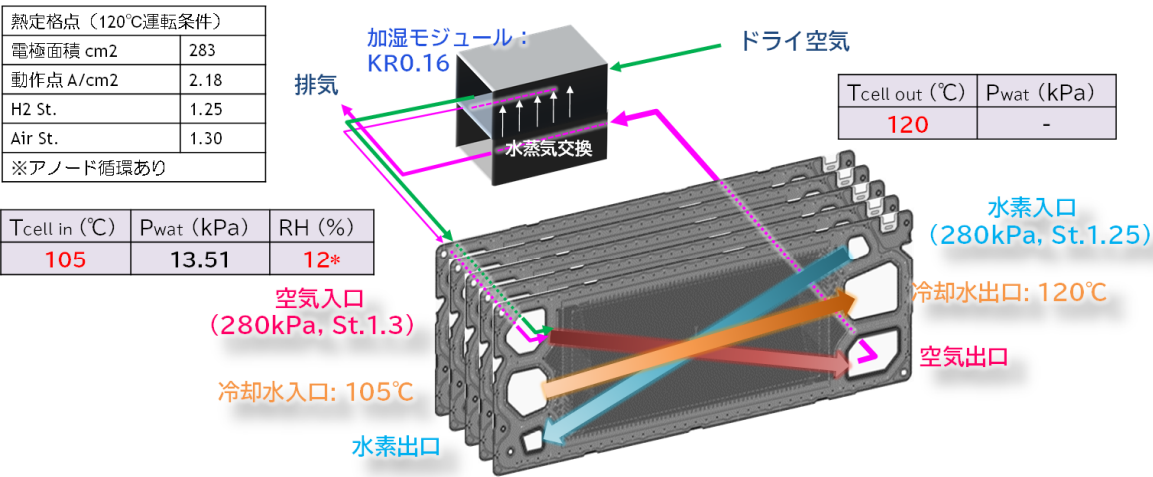
シミュレーションに用いる物質輸送・電極反応のモデルは、2.5.2 項で説明したものと同じである。ただし(2.5.1)式で表現される電解質のプロトン伝導率のモデルは低湿での高い伝導率を表現できなかった。そのため下記のように数式を変更し、物性値検討を行った。

$$\kappa = 0.5(f - 0.038)^{1.5} \exp \left[\frac{15000}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.5.14)$$

シミュレーションにより得た初期の I-V 特性を、MBD により提示された I-V 特性や他の I-V 特性と共に図 2.5.3-5 に示す。参考のため、同図に劣化後の I-V 特性も示す。加えて本シミュレーションから得られた初期の各過電圧を、2030 年頃の要求 I-V 特性を想定したシミュレーションから得た過電圧ならびに IR 補正電流電圧曲線と共に示す。シミュレーションに用いた材料物性の入力値を表 2.5.3-4 にまとめる。参考のため電解質のプロトン伝導率の湿度依存性を図 2.5.3-6 に示す。また HDV に対するシミュレーションにより得たセル内部の電流密度、相対湿度、酸素分圧、

温度の分布を図 2.5.3-7 に示す(FCV に対する結果もほぼ同等であるため割愛する)。なお表 2.5.3-4 に示す物性入力値は、電解質、触媒層、流路、GDL の現状と 2035 年頃に到達可能な見込みを考慮し、各要素にバランス良く目標設定がなされるよう決定した。

以上のシミュレーション結果を踏まえ、2035 年頃の物性目標を表 2.5.3-5 にまとめる。



連続定格点 (120 運転条件) / 水素循環あり			
電極面積	283 cm ²	Air 入圧 / 出圧	280 / 250 KPa _{abs}
動作点電流	HDV: 2.18 A cm ⁻² FCV: 1.80 A cm ⁻²	加湿モジュール出圧	240 KPa _{abs}
H ₂ ストイキ比	1.25	水蒸気交換量	16 %
Air ストイキ比	1.30	セル入口冷却水温度	105
H ₂ 入圧 / 出圧	280 / 250 KPa _{abs}	セル出口冷却水温度	120

図 2.5.3-4 想定するシステム構成および運転条件
動作点電流のみ HDV と FCV とで異なるが、他は同じ。

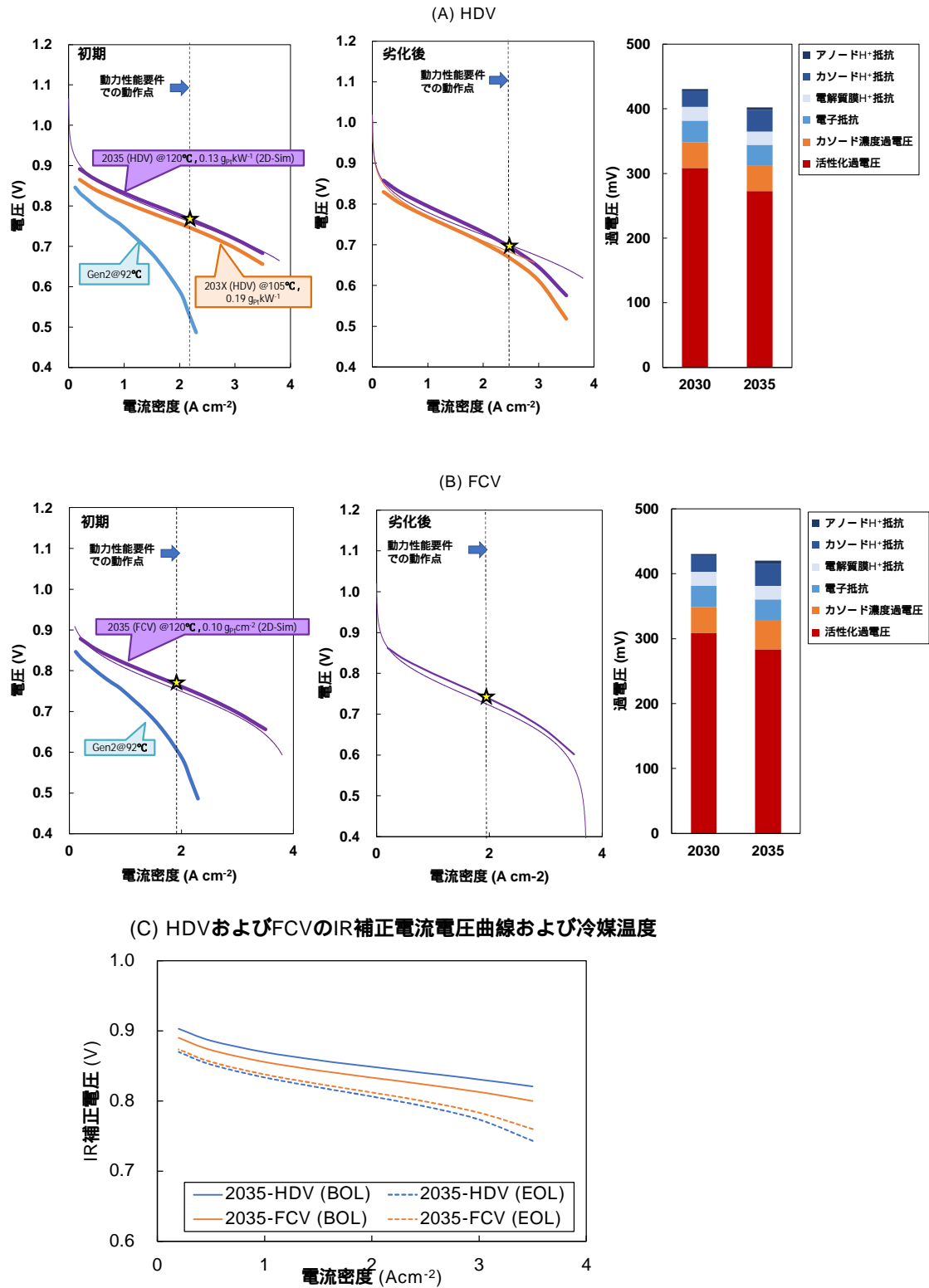


図 2.5.3-5 要求される初期および劣化後の I-V 特性の 2D-Sim.結果と過電圧内訳

(A)はHDV, (B)はFCV に対する結果. 参考のため IR 補正電流電圧曲線を(C)に示す. 左図には Gen2 MIRAI の初期 I-V 特性 (青)、2030 年頃に要求される初期 I-V 特性 (オレンジ)、2035 年頃に要求される初期 I-V 特性 (紫、太線が 2D-Sim., 細線が MBD) を、中央の図に 2030 年頃および 2035 年頃に要求される劣化後の I-V 特性を、右図には 2030 年頃と 2035 年頃の I-V 特性における過電圧内訳のシミ

シミュレーション結果を示す。過電圧分離は、2030 年頃、2035 年頃のそれぞれの動力性能要件での運転条件、ただし電流密度は 2.5 A cm^{-2} にそろえて評価した。

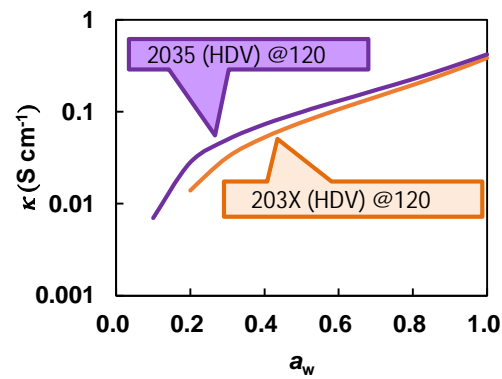


図 2.5.3-6 2030 年頃および 2035 年頃に求められる電解質膜およびアイオノマのプロトン伝導率 κ の相対湿度 a_w への依存性

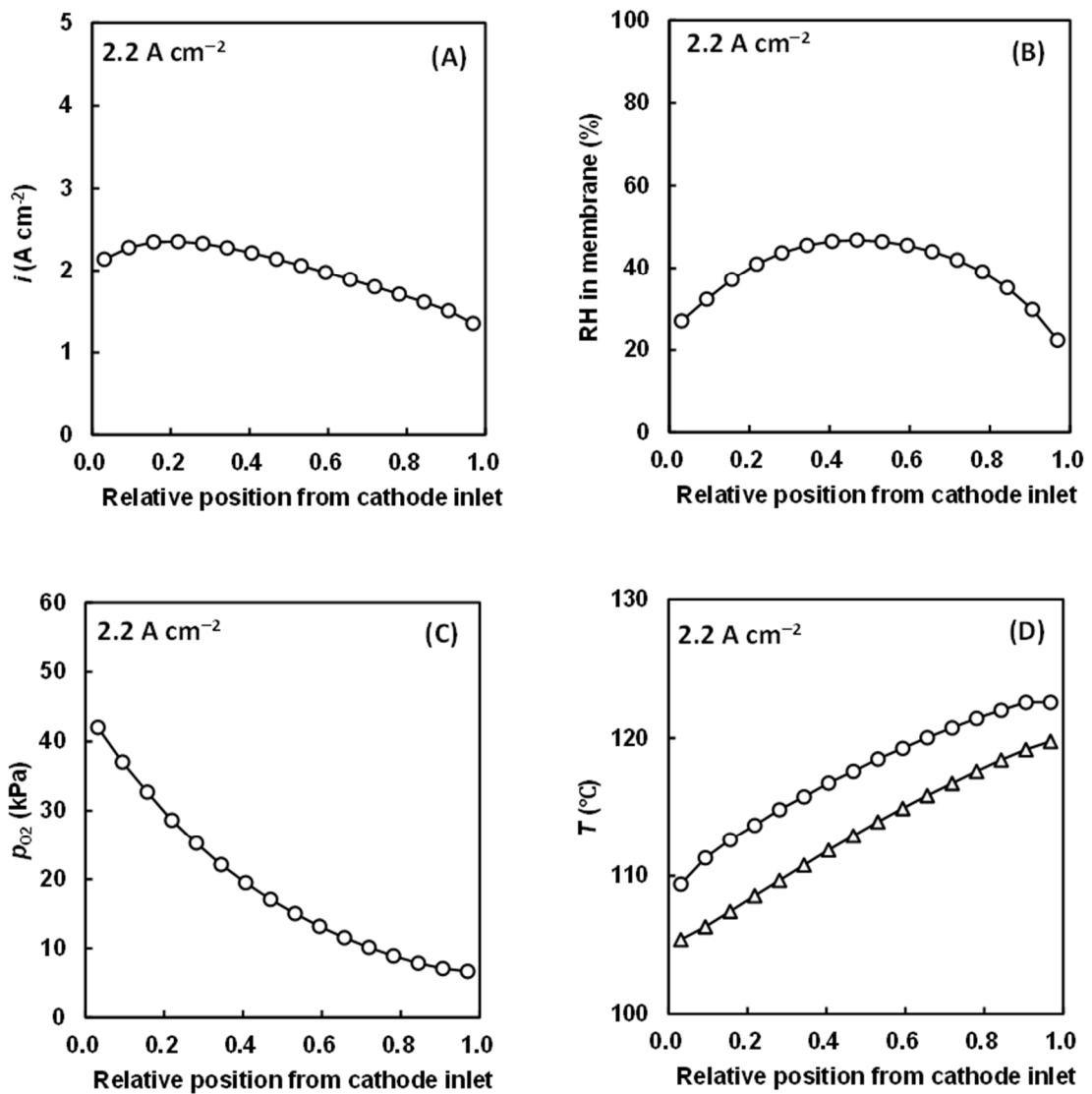


図 2.5.3-7 2035 年頃の HDV の動力性能要件での連続定格点運転（図 2.5.3-5 の 2D-Sim. 電流電

圧曲線)における FC セル面内の (A)電流密度分布、(B)相対湿度分布、(C)酸素分圧分布、(D)温度分布、図中 は冷却水温度、 は電解質膜面温度

表 2.5.3-4 シミュレーションで設定した物性値

(空気極の Pt 目付は HDV と FCV とで異なる。また RF が異なることに由来して、触媒層内酸素輸送抵抗も HDV と FCV とで異なる。これ以外の物性値は両者で同等である。) 要素	物性	物性値 (目標値)	備考
	電解質膜	H ⁺ 伝導率@120 , 20%RH	0.028 S cm ⁻¹
		H ⁺ 伝導率@120 , 30%RH	0.050 S cm ⁻¹
		H ⁺ 伝導率@100 , 40%RH	0.057 S cm ⁻¹
		H ⁺ 伝導率@ 80 , 80%RH	0.135 S cm ⁻¹
空気極 触媒層	Pt 目付量	HDV: 0.178 mg cm ⁻² FCV: 0.100 mg cm ⁻²	
	ECSA	60 m ² g ⁻¹	
	質量活性@120 , 100%RH , O ₂ 分圧 100 kPa _{abs} , 0.9 V	4990 A g ⁻¹	温度依存性に関しては、2030 年頃のシミュレーションと同様に活性化エネルギー 17 kJ mol ⁻¹ を使用。
	質量活性@80 , 100%RH , O ₂ 分圧 100 kPa _{abs} , 0.9 V	4630 A g ⁻¹	
	アイオノマ H ⁺ 伝導率 @120 , 20%RH	0.028 S cm ⁻¹ (0.147 Ω cm ²)	(2.5.14)式により算出。括弧内の値は、触媒層中のアイオノマの有効プロトン伝導率 κ_1^{eff} (先の値の 1/7 と設定)と触媒層厚さ δ_{CL} とから、 $\delta_{\text{CL}}/\kappa_1^{\text{eff}}$ として算出。
	アイオノマ H ⁺ 伝導率 @120 , 30%RH	0.050 S cm ⁻¹ (0.083 Ω cm ²)	
	アイオノマ H ⁺ 伝導率 @100 , 40%RH	0.057 S cm ⁻¹ (0.073 Ω cm ²)	
	アイオノマ H ⁺ 伝導率@ 80 , 80%RH	0.135 S cm ⁻¹ (0.030 Ω cm ²)	
	電子伝導率	2.0 S cm ⁻¹	
	触媒層内 O ₂ 拡散抵抗	HDV: 10 s m ⁻¹ FCV: 14 s m ⁻¹	Pt 目付量および ECSA から算出される RF より、DE2020 を想定した文献[9]の式を HOPI の界面抵抗[8]となるよう補正し、さらに 10%の界面抵抗低減を見込んだ式 $R_{\text{inti}}=560/\text{RF} \times 0.9$ (s m ⁻¹) にて界面抵抗を定義。
	I/C	1.0	触媒層厚さが 6 μm となるよう空隙率を調整。
	触媒層厚さ	6 μm	
	Pt 担持率	60 wt%	
燃料極 触媒層	Pt 目付量	0.04 mg cm ⁻²	
	アイオノマ H ⁺ 伝導率	0.028 S cm ⁻¹	(2.5.14)式により算出。

	@120 , 20%RH		
	アイオノマ H ⁺ 伝導率 @120 , 30%RH	0.050 S cm ⁻¹	
	アイオノマ H ⁺ 伝導率 @100 , 40%RH	0.057 S cm ⁻¹	
	アイオノマ H ⁺ 伝導率@ 80 , 80%RH	0.135 S cm ⁻¹	
	電子伝導率	2.0 S cm ⁻¹	
	I/C	1.2	
	触媒層厚さ	2 μm	
	Pt 担持率	20%	
空気極 流路/GDL	GDL 厚さ	40 μm	想定する構成は 2030 年頃のものと同じ。 例えば 3D ファインメッシュ等を想定し、GDL に一樣にガスが行き届くと想定。
	分子拡散抵抗	16 s m ⁻¹	
	電子伝導率	4.9 S cm ⁻¹	
燃料極 流路/GDL	GDL 厚さ	150 μm	
	電子伝導率	2.7 S cm ⁻¹	
セパレータ関係	接触抵抗	6.5 mΩ cm ²	セパレータ/セパレータ、セパレータ/GDL、全接 触抵抗の合計値。初期・劣化後共にこの値を 利用。

表 2.5.3-5 2035 年頃の主要材料の物性目標

は、今後測定。HDV、FCV 目標の関係については表 2.5.3-4 と同じ。

要素		項目		2035 年頃の目標値		実測値		
				物性値	仕様・ 特性値	Gen2 MIRAI 8	一般材料	
空気極触媒 (層)		PGM 目付量(mg/cm ²)			HDV: 0.178 FCV: 0.100	0.17	0.20	田中貴金属 Pt/C TEC10V30E 9
		ECSA (m ² /g)		60		48	61	
		質量活性 (A/g) @0.9V 11	at 120 , 100%RH, O ₂ 分圧 100 kPa _{abs} , 0.9 V	4990		★	★	
			at 80 , 100%RH, O ₂ 分圧 100 kPa _{abs} , 0.9 V	4630		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 , 80%RH	HDV: 10 FCV: 14		9.1	18.1	
電 解 質	膜	膜厚 (μm)			5.0	8.5	25	Chemours Nafion™ NR211 9
		H ⁺ 伝導率 (S/cm) 1	at 120 , 20%RH	0.028				
			at 120 , 30%RH	0.050		0.018	0.016	
			at 100 , 40%RH	0.057		0.027	0.024	
			at 80 , 80%RH	0.135		0.106	0.086	
			at -30 , 0%RH 2	今後設定		★	★	
	イ ア	H ⁺ 伝導率 (S/cm)	at 120 , 20%RH	0.028				
			at 120 , 30%RH	0.050		—	★	Chemours Nafion™

			at 100 , 40%RH	0.057		—	★	D2020 触媒層抵抗 9
			at 80 , 80%RH	0.135		—	★	
			at -30 , 0%RH 2	今後設定				
		空気極触媒層 抵抗(Ωcm^2)	at 120 , 20%RH		0.147			
			at 120 , 30%RH		0.083	0.77	0.37	
			at 100 , 40%RH		0.073	0.41	0.24	
			at 80 , 80%RH		0.030	0.10	0.060	
			at -30 , 0%RH 2	今後設定	今後設定			
		GDL 面積抵抗 (Ωcm^2)			0.0010	★	<0.01	SGL CARBON SIGRACET® 22BB 10 分子拡散抵 抗 9
		流路・GDL (分子 拡散抵抗) (s/m) 6	at 80 , 80%RH		16	58.3 (並行 流路)	60.8 (並行 流路)	
GDL・流路・ セパレータ		GDL/セパ、セパ/セパ等:接触抵抗 合計 (Ωcm^2) 10			0.0065	★	—	
		GDL 機械強 度物性 7	(暫定)圧縮弾性 率	今後設定		★		
			(暫定)曲げ剛性 (N/mm)	今後設定		★	0.9 ~1.5	

1～9：表 2.5.3-2 の脚注参照。

10：劣化後この値以下となる必要がある。

11：80、100%RHでの活性値を満たし、かつ現行の Pt/C 系触媒で観測されている温度上昇に伴う酸素溶解度の低下を加味した活性化エネルギー 17 kJ/mol の温度依存性を満たすことが、120、100%RH で必要となる物性目標を満たす要件となる。

(3) 2040 年頃の目標

2040 年頃の要求 I-V 特性を満たす材料初期物性を 2D-シミュレーションにより検討する。2040 年頃を想定したシステムシミュレーションでは、HDV と FCV とで同一の運転条件、Pt 目付、共通の IV 性能で、双方の要件を満たすことができると示されている。よって双方の 2D-シミュレーションは同じ内容となる。そこで本項では、以後、HDV の結果のみを示す。シミュレーションから結論付けられる必要な物性目標、セル内部の温度・湿度分布の結果は、HDV と FCV とで共通のものと認識して頂きたい。

シミュレーションは 2.5.2 項に示すとおり、燃料である水素を空気中の酸素で酸化して水を生成する電気化学プロセスにより発電する固体高分子形燃料電池を想定したものである。既存のシミュレータを活用した材料初期物性の試算であるため、現行の Pt 触媒、プロトン伝導型の電解質膜を想定したシミュレーションとなる。しかし算出される活性、イオン伝導率に関しては、非 Pt 触媒やアルカリ型電解質の目標値にも転用できるものと考え、製品・システムの検討から提示された要求 I-V 特性には、2030 年と同様の冷却水出口温度 105 での運転を前提とするものと、120 を前提とするものとがある。前者では、小さな外気温との温度差で FC を冷却できるよう、極めて高い発電効率が要求されている。これを実現する触媒活性は、Tafel 勾配を Pt 触媒が示す 70 mVdecade^{-1} と仮定すると、現行材料の数千倍という達成し難い値となる。そこで本検討では、より現実的な物性目標を与え得る、冷却水出口温度 120 での運転を検討する。要求 I-V 特性に

強く影響するもう一つの因子は触媒の劣化速度である。MBD シミュレーションでは粒子径 3 nm の Pt ナノ粒子と比較して、1/100 ~ 1/30 の劣化速度が検討され、劣化速度が遅いほど、要求される初期の I-V 特性は低下するとの結果が示されている。しかし触媒活性と溶出速度とは相反関係があり、高すぎる耐久性もまた非現実的な目標を与え得る。本検討では、各種文献調査に基づき、2040 年頃には粒子径 3 nm 程度の Pt ナノ粒子の 1/30 程度まで溶出速度の低減を期待できるとし[1]、この前提に基づく要求 I-V 特性を材料初期物性の検討対象とした。

図 2.5.3-8 に想定するシステム構成および運転条件を示す。運転条件は 2035 年頃のそれに近い。違いは、電極面積が 293 cm² に増加し、動作点電流密度が 1.6 Acm⁻² から 2.3 Acm⁻² に増加した点である。動作点電流密度 2.3 Acm⁻² は MBD より提示された動力性能要件における電流密度に相当し、この点での電圧を満たすか否かを、材料物性が要求性能を満たすか否かの判定条件とした。この判定は、動力性能要件において FC を冷却できるか否かが要求 I-V 特性を決定づけるとの背景に基づいている。なお FC は、高温運転条件で常に動作する訳ではなく、WHVC や JH25 の走行パターンでは、その多くの動作温度は 70 °C 付近である。すなわちここで検討する条件は、初期材料物性を決定づける条件ではあるが、主要な運転条件ではない。

シミュレーションに用いる物質輸送・電極反応のモデルは、2.5.2 で説明したものとほぼ同じであるが、電解質のプロトン伝導率のみ、(2.5.1)式の含水率依存性を加味するモデルから、含水率に依存しない定数値へと変更した。これは、2040 年頃の高い要求 I-V を満たす電解質材料が現状のフッ素系電解質膜の延長線上にあるとは限らないとの判断に基づく。

シミュレーションにより得た I-V 特性を MBD により提示された I-V 特性や他の I-V 特性と共に図 2.5.3-9 に示す。同図には、本シミュレーションから得られた各過電圧を、2030 年頃の要求 I-V 特性を想定したシミュレーションから得た過電圧と共に示す。また参考のため、シミュレーションに用いた材料物性の入力値を表 2.5.3-6 に示す。加えて、図 2.5.3-3、図 2.5.3-7 と同様に、セル内部の電流密度、相対湿度、酸素分圧、温度の分布を図 2.5.3-10 に示す。

要求 I-V 特性を満たす初期材料物性の組み合わせは無数にある。本検討では、以下の考えに基づき入力値を設定した。第一に触媒材料である。図 2.5.3-5 の 2030 年頃、2035 年頃の想定における過電圧の内訳からも分かるとおり、活性化過電圧は最も大きく、2040 年頃の要求 I-V 特性を達成する上で、触媒は最も重要な材料と言える。普及シナリオから、Pt を触媒として使用する場合に許容される使用量は、セル面積当たり 0.14 mg cm⁻² (0.07 gPt/kW に相当) と試算されている。ここではその内の 0.12 mg cm⁻² をカソードに、残りの 0.02 mg cm⁻² をアノードに利用するとの前提を置いた。なお上述の Pt 使用量よりも資源・コストのリスクがなく、後述する活性を満足できれば、材料は Pt 系触媒に限ったものではない。高温化により要求 I-V 特性が下がったとは言え、2040 年頃の要求 I-V 特性の 2.3 Acm⁻² での電圧は 2030 年頃のそれよりも 130 mV 程度 (2035 年頃のそれよりも 110 mV) 程度高く、これを触媒活性の向上のみで実現するとの前提に立つと、現行材料の 100 倍以上の活性を要するとの達成困難な試算結果を得る。これを実現する不連続的な新材料の進化を否定できるものではないが、材料開発のアプローチを多様化するという観点で、現行の Pt 系触媒材料の進化形でも目標を達成する道筋があることが望ましい。本検討では、各種文献調査に基づき、Pt 系触媒が従うとされる Volcano plot の頂点に位置する Pt₃Ni(111) 単結晶表面の比活性 18 mAcm⁻² (0.9 V vs. RHE、室温、0.1 M HClO₄ 溶液、RDE 試験結果) [2] を、究極的に高い比表面積 (200 m²g⁻¹) を持つ単原子層触媒で達成するとして、質量活性 34,000-

42,500 Ag⁻¹（温度に依存）をシミュレーションの入力値とした。しかしこのような究極とも言える Pt 系触媒をもってしても、他の部材の物性を表 2.5.3-4 に示す 2035 年頃の値に据え置くと、要求 I-V 特性が示す 2.3 Acm⁻² での電圧を満足しない。よって抵抗過電圧や濃度過電圧も減少する必要がある。これらの内、2035 年頃の要求 I-V 特性における濃度過電圧に関しては、その大半が、限られたストイキ比によるカソード流路下流での酸素分圧低下に由来しており、流路・GDL・触媒層要素材料の物質輸送特性の向上による I-V 特性の改善の余地は少ないことがシミュレーションによる検討により判明した。よって本検討では、電解質のプロトン抵抗と電極の電子抵抗とに取り分があると考えた。電解質膜に関しては、その厚さを 2035 年頃の 5 μm から 1 μm へと薄膜化し、かつプロトン伝導率を温度 55 ~ 125 °C、湿度 12 %RH 以上で 0.15 S cm⁻¹ を満たすとの前提を置いた。プロトン伝導率に関しては、40 °C 以上でプロトン伝導性を示すリン酸のプロトン伝導率 0.15 S cm⁻¹[3,4]を参考値とした。なお当然のことながら、リン酸のように触媒を被毒する電解質であってはならない。上限温度に関しては、動力性能要件において、電解質の温度が冷却水出口温度 120 °C よりも 3 °C 上がるとの図 2.5.3-10 に示すシミュレーション結果を加味し、シミュレーションの誤差を考慮して 2 °C のマージンを考慮して設定したものであり、下限温度に関しては、先述の通常走行時（冷却水出口温度 70 °C 付近）での燃費を担保することを念頭に、この条件での空気極入口温度 55 °C と想定して設定したものである。なおさらなる低温領域でのプロトン伝導率に関しては、起動システムとの兼ね合いで要求値が変動し得るもので、今後の検討課題と考える。湿度に関しては、図 2.5.3-10 の湿度分布から、湿度が空気極入口の 12 %を下回らないことに基づき設定した。また界面電子抵抗をセル全体で 0.4×10⁻⁸ Ωm⁻² とした。また薄膜化しても商用において求められる長い耐久性を担保しなければならないことも注記しておく。湿度条件は、後述するセル内の湿度に関するシミュレーション結果が空気極入口での相対湿度 12 %RH を下回らないことを確認して設定した。界面電子抵抗は、セパレータ・GDL 等の界面を溶接する等して接合することを前提としている。なおこれらの材料物性値の達成手段は、触媒の場合と同様に、ここに記載する方法に限るものではない。また 2035 年頃を起点とした場合、流路・GDL、触媒層の濃度過電圧に改善の余地が少なくと述べたが、このことは濃度過電圧に関わる研究開発の重要性を否定するものではないことも強調しておく（なお 2022 年度に公開時の 2040 年の物質輸送抵抗の目標値は 2030 年頃の目標値と同じ 18 s m⁻¹ であったが、2023 年度の検討を経て、これを 16 s m⁻¹ に変更した。これは 2035 年頃の目標検討において、2035 年に想定するシステムでの触媒の耐久性と動作点電流密度とのバランスの観点で、より低い物質輸送抵抗が必要であることが明らかとなったこと、2023 年度の研究開発状況から、物質輸送抵抗にさらなる改善の余地が期待できると判明したことから、2040 年頃の目標値を 16 s m⁻¹ に変更した）。プロトン伝導率や触媒活性の格段に高い電解質や触媒が開発されたとしても、これらを組み合わせてセルを構成した際に物質輸送が律速となり所望の出力を得られないことは十分に起こり得る。新素材の持つ性能を最大化する、あるいはあるべきプロトン・ガス輸送経路や活性点密度を予測して要素を設計する上で、これらの研究は重要であり続けると考えられる。

（参考文献）

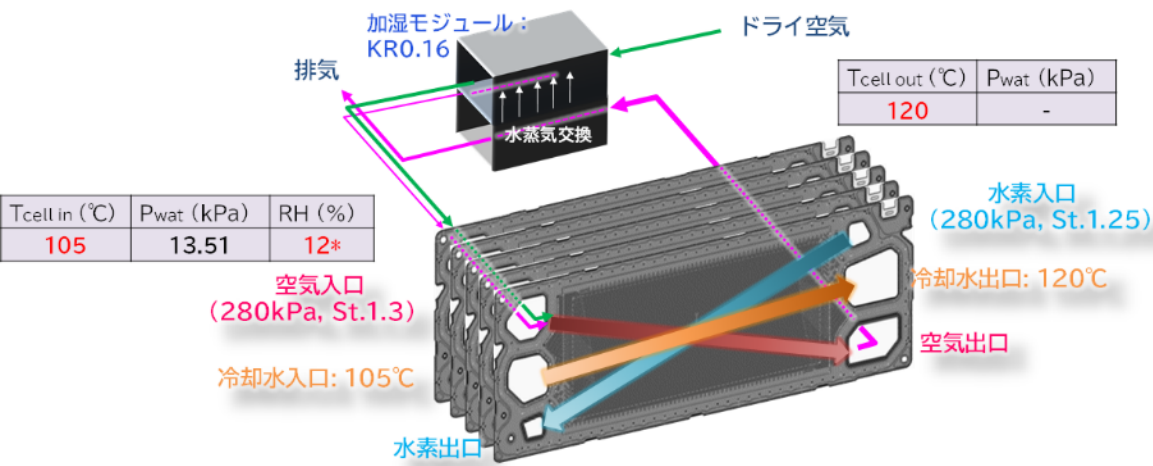
- [1] Lopes et al. *Nature Mater.* **19** 1207 (2020).
- [2] Stamenkovic et al. *Science* **315** 493 (2007).

[3] Greenwood et al. *J. Chem. Soc.* 3485 (1959).

[4] Aihara et al., *J. Phys. Chem. B* **110** 24999 (2006).

[5] H. Yano, E. Higuchi, H. Uchida, and M. Watanabe *J. Phys. Chem. B* **110** 16544-16549 (2006).

[6] Z. Zhu, Q. Liu, X. Liu, and J. Shui *J. Phys. Chem. C* **124** 3069–3079 (2020).



連続定格点 (120 運転条件) / 水素循環あり			
電極面積	293 cm ²	Air 入圧 / 出圧	280 / 250 KPa _{abs}
動作点電流	2.3A cm ⁻²	加湿モジュール出圧	240 KPa _{abs}
H ₂ ストイキ比	1.25	水蒸気交換量	16 %
Air ストイキ比	1.30	セル入口冷却水温度	105
H ₂ 入圧 / 出圧	280 / 250 KPa _{abs}	セル出口冷却水温度	120

図 2.5.3-8 想定するシステム構成および運転条件

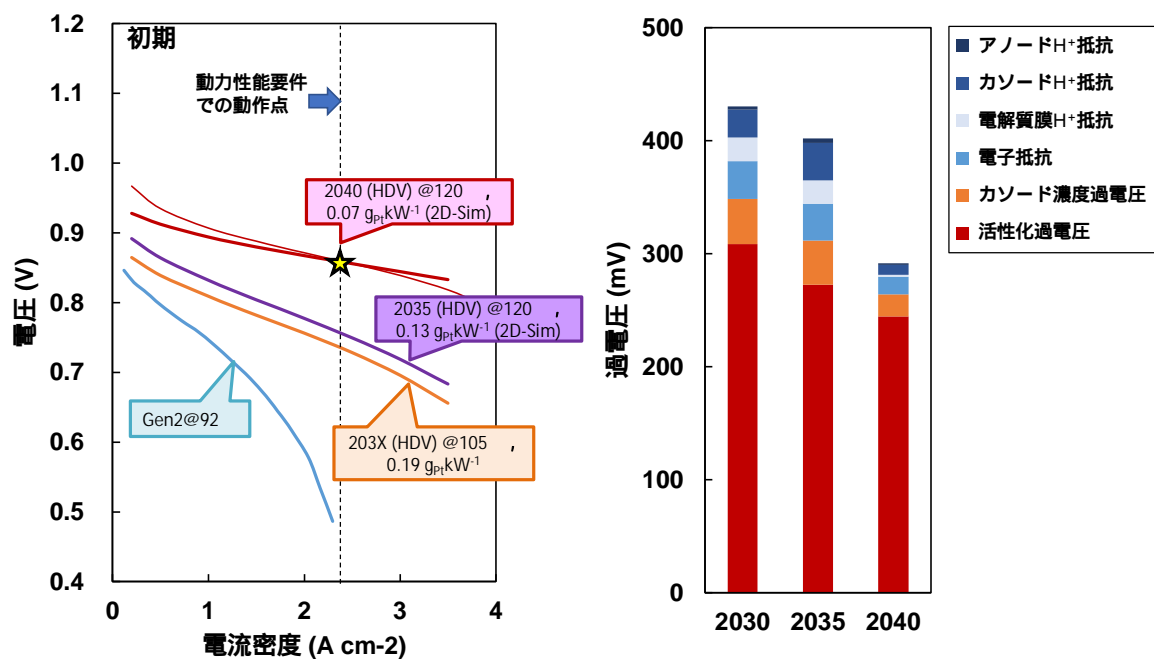


図 2.5.3-9 要求される初期 I-V 特性の 2D-Sim.結果と過電圧内訳

左図には Gen2 MIRAI の初期 I-V 特性(青)、2030 年頃の HDV に要求される初期 I-V 特性(オレンジ)、2035 年ごろの HDV に要求される初期 I-V 特性(紫)、MBD により試算された 2040 年ごろの HDV、FCV に要求される初期 I-V 特性(赤、太線が 2D-Sim.、細線が MBD)を、右図には 2030 年頃、2035 年頃(HDV に対する結果)、2040 年頃の I-V 特性における過電圧内訳のシミュレーション結果を示す。過電圧分離は、2030 年頃、2035 年頃、2040 年頃のそれぞれの動力性能要件での運転条件、ただし電流密度は 2.5 A cm^{-2} にそろえて評価した。

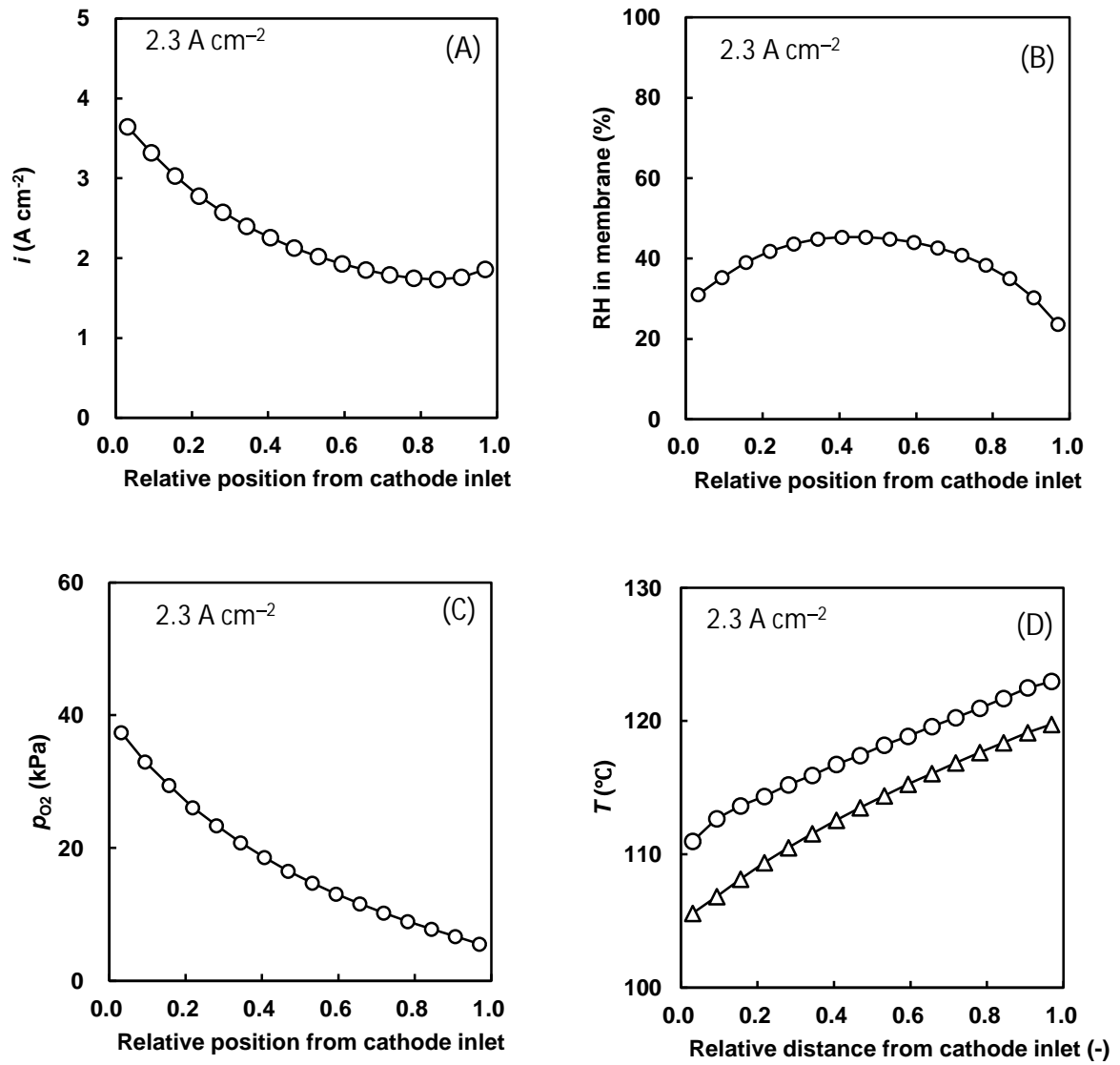


図 2.5.3-10 HDV の連続定格点運転における FC セル面内の (A)電流密度分布、(B)相対湿度分布、(C)酸素分圧分布、(D)温度分布、図中 \circ は冷却水温度、 \triangle は電解質膜面温度

表 2.5.3-6 2040 年頃の要求 I-V 特性を想定した 2D-Sim.で設定した物性値

同一の物性で HDV・FCV の性能要件を満たす。

要素	物性	物性値 (目標値)	備考
電解質膜	H ⁺ 伝導率@55-125 , 12%RH	0.15 S cm ⁻¹	厚さ 1 μm の電解質膜を想定し、プロトン伝導率は湿度に依存しないモデルを利用。計算においてラジカルクエンチ剤による伝導率の低下は加味していない。2D-Sim.は動力性能要件に相当する高温(冷却水出口温度 120)を前提としているが、大半の運転温度は、通常運転での冷却水出口温度 70 付近である、これを念頭に、燃費確保の観点で、下限温度をこの条件での空気極入口温度 55 を想定する。なおさらなる低温での設定値に関しては、今後の検討課題とする。
空気極触媒層	Pt 目付量	0.12 mg cm ⁻²	Pt 単原子層を想定した比表面積。
	ECSA	200 m ² g ⁻¹	
	質量活性@120 , 100%RH , O ₂ 分圧 100 kPa _{abs} , 0.9 V	42,500 A g ⁻¹	2030 年、2035 年頃のシミュレーションと同様に、活性化エネルギー 17 kJ mol ⁻¹ を使用。
	質量活性@80 , 100%RH , O ₂ 分圧 100 kPa _{abs} , 0.9 V	39,000 A g ⁻¹	
	アイオノマ H ⁺ 伝導率 @55-125 , 12%RH	0.15 S cm ⁻¹	電解質膜と同様に、プロトン伝導率は湿度に依存しないと仮定。触媒層中のアイオノマの有効プロトン伝導率 κ_1^{eff} は体積分率/屈曲率=1/5 として計算。温度・湿度条件に関しても、電解質膜と同様の考えに基づく。
	電子伝導率	2.0 S cm ⁻¹	触媒層厚さが 3.6 μm となるよう空隙率を調整。
	触媒層内 O ₂ 拡散抵抗	8 s m ⁻¹	
	I/C	1.0	
	触媒層厚さ	3.6 μm	
	Pt 担持率	60 wt%	
燃料極触媒層	Pt 目付量	0.02 mg cm ⁻²	空気極と同様の前提にて試算。
	アイオノマ H ⁺ 伝導率 @55-125 , 12%RH	0.15 S cm ⁻¹	
	電子伝導率	2.0 S cm ⁻¹	
	I/C	1.2	
	触媒層厚さ	2 μm	
空気極流路/GDL	Pt 担持率	20%	2030 年、2035 年頃の構成と同様に、例えば 3D ファインメッシュ等を想定し、GDL に一様にガスが行き届くと想定。 $\varepsilon_{\text{GDL}}=0.75$, $\tau_{\text{GDL}}=7$ と設定。
	GDL 厚さ	50 μm	
	分子拡散抵抗	16 s m ⁻¹	
燃料極流路/GDL	電子伝導率	4.9 S cm ⁻¹	例えば 3D ファインメッシュ等を想定し、GDL に一様にガスが行き届くと想定。
	GDL 厚さ	150 μm	
セパレータ関係	電子伝導率	2.7 S cm ⁻¹	
	接触抵抗	0.4 mΩcm ²	溶接等活用し、接触抵抗を低減することを想定。

初期の目標 I-V 特性を満たすための物性パラメータを根拠に、主要材料の物性目標の項目と目標値を表 2.5.3-7 のように定めた。また、参考のため、2030 年頃の物性目標および現行材料からなる MEA での物性、特性値の実測値も併せ示した。

表 2.5.3-7 2040 年頃の主要材料の物性目標 は、今後測定

2030 年頃は HDV の目標値。2035 年頃では HDV・FCV 目標が設定されており、HDV と FCV とで空気極 Pt 目付および触媒層ガス拡散抵抗のみ値が異なるが、他は同じ。2040 年頃では同じ目標値で HDV、FCV の性能要件が満たされる。

要素	物性	2040 年頃 の目標値	2035 年頃 の目標値	2030 年頃 の目標値	Gen2- MIRAI 4	一般材料	
空気極 触媒層	Pt 目付量 (mg cm ⁻²)	0.12	HDV: 0.178 FCV: 0.100	0.20	0.17	0.20	田中貴金 属 Pt/C TEC10V 30E 5
	ECSA (m ² g ⁻¹)	200	60	60	48	61	
	質量活性 @120 , 100%RH , O ₂ 分圧 100 kPa _{abs} , 0.9 V (A g ⁻¹)	42,500	4990	—	—	—	
	質量活性@80 , 100%RH , O ₂ 分圧 100 kPa _{abs} , 0.9 V (A g ⁻¹)	39000	4630	1740	500	95	
	触媒層ガス拡散 抵抗 (s m ⁻¹)	8	HDV: 10@80 , 80%RH FCV: 14@80 , 80%RH	10@80 , 80%RH	9.1@80 , 80%RH	18.1 @80 , 80%RH	
	触媒層厚さ (μm)	3.6	6.0	6.0	9.1	7.4	
	アイオノマ H ⁺ 伝導率@120 (S cm ⁻¹) 1	0.15 @12%RH	0.050 @30%RH	0.032 @30%RH	0.018 @30%RH	★	Chemour s Nafion™ D2020 触媒層抵 抗 5
電解質 膜	膜厚 (μm)	1	5.0	8.0	8.5	25	Chemour s Nafion™ NR211 5
	H ⁺ 伝導率@120 (S cm ⁻¹) 1	0.15 @12%RH	0.050 @30%RH	0.032 @30%RH	0.018 @30%RH	0.016 @30%R H	
GDL・ 流路・セ パレー タ	GDL 面積抵抗 (Ωcm ²)	0.0010	0.0010	0.0010	★	<0.01	SGL CARBON SIGRAC ET® 22BB 6 分子拡散 抵抗 5
	流路・GDL(分子拡 散抵抗) (s/m) 2	16 3	16@80 , 80%RH	18@80 , 80%RH	58.3 @80 , 80%RH (並行流路)	60.8 @80 , 80%RH (並行流 路)	
	GDL/セパ、セパ/セ パ等: 接触抵抗 合計 (Ωcm ²)	0.0004	0.0065 (劣化後)	0.0065	★	—	

1: 電解質膜の H^+ 伝導率は、補強材込みの伝導率。クエンチャ添加など、耐久性を担保した状態での伝導率。表では 2030 年目標との対比から、120 での伝導率を示しているが、55~125 の範囲(湿度 12%RH 以上)で、この目標を満たすものとする。上限温度に関しては、動力性能要件において、電解質の温度が冷却水出口温度 120 よりも 3 程度上がるとの図 2.5.3-7 および図 2.5.3-10 に示すシミュレーション結果を加味し、シミュレーションの誤差を考慮して 2 のマージンを考慮して 125 と設定したものであり、下限温度に関しては、先述の通常走行時(冷却水出口温度 70 付近、図 2.2.3-4 参照)での燃費確保を念頭に、この条件での空気極入口温度を 55 と想定し、設定したものである。なおさらなる低温領域でのプロトン伝導率に関しては、今後の検討課題と考える。

湿度に関しては、図 2.5.3-7 および図 2.5.3-10 の湿度分布から、湿度が空気極入口の 12 %を下回らないことに基
づき設定した。

2：GDL と流路の構造との組み合わせで決まる特性値。

3：現行の NEDO 事業の進捗と今後の改良の余地を鑑みて 2022 年度の解説書時点の値から更新した。

4：第二世代 MIRAI の MEA を用いた実測値、解析結果。(FC-Cubic 測定)

5：触媒：田中貴金属 TEC10V30E、カソード触媒担持量：0.2mg-Pt/cm²、アノード触媒担持量：0.1mg-Pt/cm²、
アイオノマ：Chemours Nafion™ D2020、I/C:1.0、電解質膜：Chemours Nafion™ NR211、GDL：SGL-
CARBON SIGRACET® 22BB からなる MEA で測定した値。(FC-Cubic 測定)

6：メーカー公表値 <https://www.sglcarbon.com/en/markets-solutions/material/sigracet-fuel-cell-components/>

2.5.4 主要材料コストの見通し

2.3.1 節で説明したとおり、HDV 用 FC スタックのコスト目標は 0.45 万円/kW と提案したが、
スタックを構成する主要部材（触媒層、電解質膜、GDL）のコスト見通しについて、SA 社の FC
スタックのコスト内訳、および国内 OEM へのアンケート調査に基づいて検討した。ただし、こ
れらの値はスタックの性能・耐久目標を達成したときの想定コストであり、スタックのコスト目
標を達成するための要求値ではない。ベースとなる主要部材の前提条件は表 2.3.1-2 に示す SA 社
の内容となっており、これをもとに表 2.3.1-3 の NEDO 技術目標に対して、以下の条件で主要部
材の想定コストを試算した。

- 材料使用量の低減：Pt 目付量低減および PEM の薄膜化で材料コスト低減を想定、その他の
部材はセル面積あたりの同一コストを仮定
- 製造工程：各部材の製造工程は SA 社の前提条件と同一と仮定
- 耐久性：Pt 目付量は 50,000 時間耐久を前提とした目付量、電解質膜・GDL・セパレータ・
シールなど他の主要部材のコスト増加の影響は未考慮
- 為替レートは 2021 年頃の 110 円/ドル

を条件として、2030 年頃、2035 年頃および 2040 年頃の主要部材のコストの見通しを表 2.5.4-1
に示す。

表 2.5.4-1 スタック主要部材のコスト目安

	単位	SA 2030	NEDO 2030	NEDO 2035	NEDO 2040
ライン原単位	台/年	70,000	70,000	80,000	100,000
触媒層 (触媒インク + 塗工)	円/m ²	29,000	26,900	24,100	16,600
電解質膜	円/m ²	5,100	7,000	4,900	4,500
GDL	円/m ²	2,400	3,800	3,600	3,400

触媒層については、米国の 2030 年の Pt 目付量 (0.35g/cm²) に対して、NEDO では 2030 年
頃で 0.24g/cm²、2035 年頃で 0.22g/cm²、2040 年頃で 0.14g/cm² と低いため、単純に Pt コスト
比で考えるとさらに低コストを目指す考え方もありうるが、米国の電極触媒の前提材料が Pt/HSC
(High Surface area Carbon) と比較的安価である一方、材料目標の達成に向けては高活性触媒
や高酸素透過性アイオノマ、高耐久担体など新規材料とそれらに適した製造プロセスの採用によ

る材料・加工費のコスト増加も想定される。

電解質膜については、米国の補強材の前提として、これまで耐久性の観点で適用が難しいとされている、エーテル結合を有する安価な PPSU（ポリフェニルスルホン）を選択していることに対して、NEDO の目標値では、50,000 時間の耐久時間を達成するための材料、更なる薄膜化による高度な製造技術を前提としたコストを想定する必要がある。

GDL については、NEDO の目標値における出力密度が高いため、米国に比べてコスト要件は緩和されるが、コスト低減に向けては PAN 系繊維に替わる安価な原材料、製造プロセスの低コスト化を進める必要がある。

2.5.5 材料評価の考え方

MEA、セルに用いる材料の耐久性能については、実際の耐久時間まで走行して性能確認を行い、材料開発を進めることは時間的制約、必要な手間を考えると不可能であるため実際の耐久走行に相当する加速劣化試験条件を設定して性能確認を行うことが必要となる。

加速劣化試験法に関しても乗用車向けに下記の加速耐久手法が決められている。こちらの詳細の耐久手法についても「NEDO PEFC セル評価解析プロトコル」に詳細がまとめられている。

表 2.5.5-1 材料特性の測定方法

部位	評価手法
電解質膜	M-9(-3-1)高電位(OCV)保持試験方法
	M-11(-1-8)電解質膜の膨潤耐性評価方法(湿度サイクル試験)
電極触媒・電極触媒層	C-8(-3-3)電位サイクル(起動停止)試験方法
	C-9(-3-2)電位サイクル(負荷応答)試験方法
	C-10 水素欠乏に対する触媒耐性評価(アノード電位変動耐久) 1
	C-11 水素欠乏に対する触媒耐性評価(水電解耐久) 1

1：現在、測定手法について検討中、今後、追加予定。

ここで記載されている内容も評価手法と同様に乗用車向け以外には、想定される耐久条件が異なってくるため、温度や加湿条件等を商用車向けに見直しを行い、設定を行う必要がある。

商用車向けの加速劣化試験条件の設定は図 2.5.5-1 に示す手順で行う。

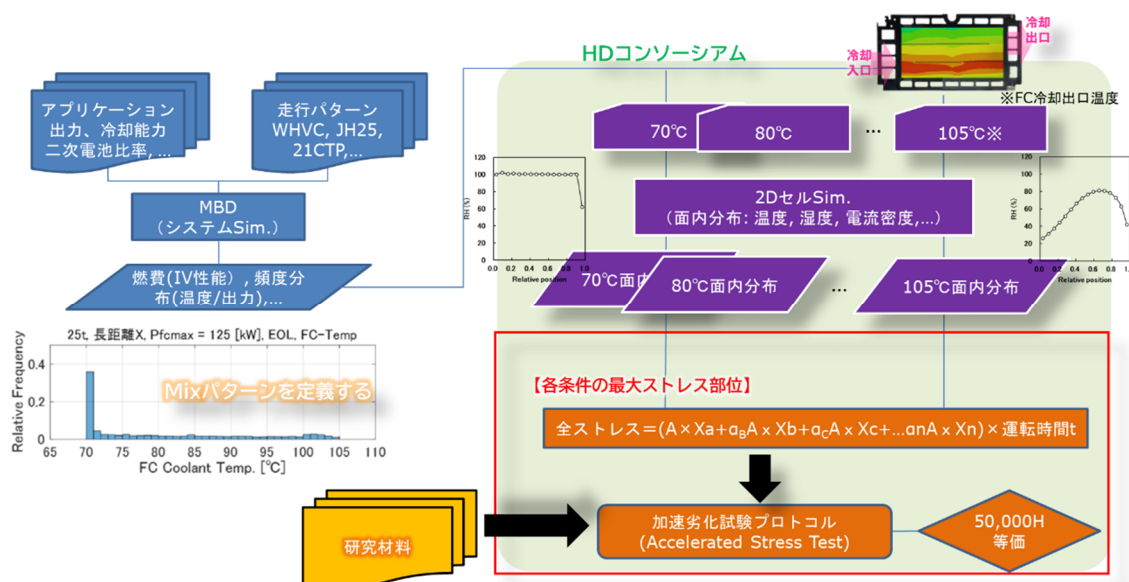


図 2.5.5-1 加速劣化試験条件の決め方のフロー

まず車や車以外のアプリケーションでの FC システムがどのような運転環境で使われるかの把握を行う。各アプリケーションでの FC の運転環境は、「2.2 要求 I-V 特性の検討」で説明されているように各アプリケーションでの要求性能等を満足する FC システムを想定し、そのシステムで各アプリケーションの運転モード条件での MBD シミュレーションを行うことにより推定できる。MEA、セルに用いる材料がそれぞれの運転環境にさらされる耐久時間の分布状態を示した温度環境が下図になる。

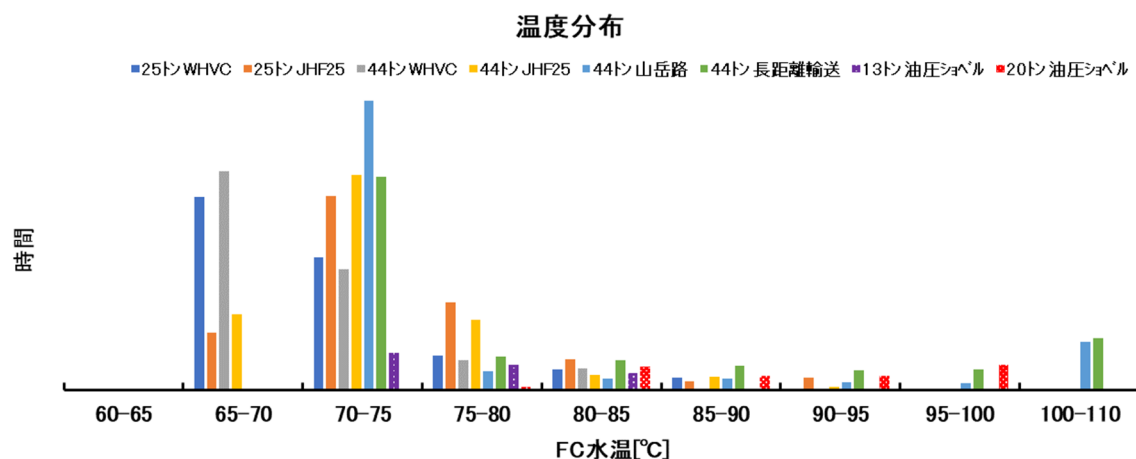


図 2.5.5-2 MBD シミュレーションから推定される FC システムの運転環境

湿度環境、電圧等の他の環境条件についても同様に耐久時間の分布状態として示すことができ、各アプリケーションで想定される FC システムの運転環境が推定できる。次に、求められた FC システムの運転環境の結果から、2.5.3 項で示したようにシミュレーション (2D-Sim.) を用いて FC セル面内でのそれぞれの位置での運転環境を推定することができ、セル面内での運転環境分布を求められる (図 2.5.3-3)。

各アプリケーションでの耐久性能劣化は、性能劣化因子（ストレス）について、セル面内での個々の運転環境でのストレスを要求される耐久時間分（例えば大型トラックでは 50,000 時間）積み上げた全ストレス（式）が加わったことによる性能劣化として見積れる。

$$\text{全ストレス} = (A \times X_a + \alpha_b \times X_b + \alpha_c \times X_c + \cdots + \alpha_n \times X_n) \times \text{運転時間}$$

$X_a, X_b, X_c, \cdots, X_n$ ：それぞれの運転条件の頻度

$\alpha_b, \alpha_c, \cdots, \alpha_n$ ：標準運転条件（式の場合は A 条件）に対する劣化係数

種々の運転環境において実際に MEA、セルに用いる材料がどの程度ストレスが加わり性能劣化するかは、小型単セルを用いて種々の運転条件で耐久実験を行いデータ取得することにより求める。それぞれの運転条件によるストレスは基準の標準運転条件に対する劣化係数を用いて表示できる。この実際に小型単セルで求めた実測のストレス量（あるいは劣化係数×標準条件でのストレス量）とシミュレーションで推定される個々の運転環境の頻度データを掛け合わせ、さらに要求される耐久の運転時間を掛けて実際の耐久時間後の FC の性能劣化の推定を行うことができる。推定される性能劣化が要求される耐久後の性能を満たしていれば、耐久性能を満足することになり、この耐久性能を満足するときの全ストレス量が劣化量のクライテリアとなる。このクライテリアは、実際の使用条件で要求される耐久時間で要求性能を満足できる劣化状態以下となる必要があり、実際に市場で適用されている FC で要求耐久時間相当の劣化試料でのストレスを求めることで得ることが可能である。加速劣化試験のクライテリアもこの実際の使用条件で要求されるストレスに対するクライテリアと同じ値を用いることになる。

加速劣化試験条件としては、劣化係数が高くかつ実験条件として安定的に実施可能な運転条件となる条件を選定し、耐久時間はこの加速条件によりストレス量がクライテリアに達するまでの時間として決めることになる。

電解質膜のストレス量としては分子量低下率を指標として、影響する因子としては温度、加湿条件、電流密度等になる。電極触媒のストレス量としては ECSA が指標として考えられ、影響する因子としては温度、電位変動幅、加湿条件等になる。今後、これらの因子等を振ってデータ蓄積を行い、加速耐久条件の選定を進めていく必要がある。

【評価の実例】

（１）性能耐久評価

前述の考え方を基に、出力性能の耐久評価を行った例を以下に示す。

トヨタ自動車第一世代 MIRAI の MEA をモデルとして検証を実施。同仕様の MEA による負荷応答サイクル試験（NEDO PEFC セル評価解析プロトコル C-9 -3-2）[1]の試験結果、及び 20 万 km 実走テスト終了後の MEA 解析より得られた電気化学的表面積（以下 ECSA）の値を図 2.5.5-3 に示す。

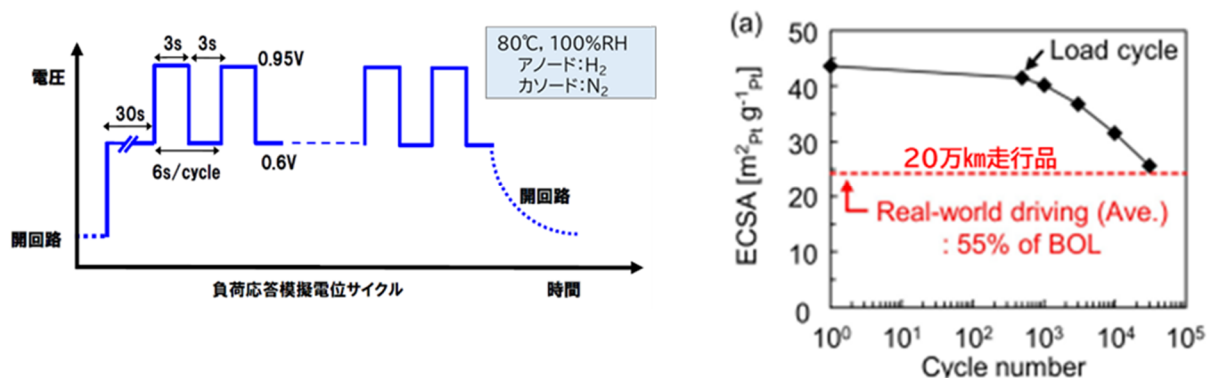


図 2.5.5-3 負荷応答サイクル試験と 20 万km実走行後の ECSA の関係

第一世代 MIRAI の MEA については不可逆的な劣化として空気極触媒の面積比活性の低下は小さく、ECSA 低下による質量活性の低下が主要因であることが示されている[2]。

2030 年頃目標 I-V 特性導出には、触媒劣化による I-V 特性低下を予測するシミュレーション[3]が用いられている。本シミュレーションから、材料の耐久目標となる EOL での ECSA と、負荷応答サイクル試験によるサイクル数を推定する。本計算で用いる触媒劣化モデルについては、現物との整合性を第一世代 MIRAI での 20 万 km 実走テスト終了後の ECSA 測定値と

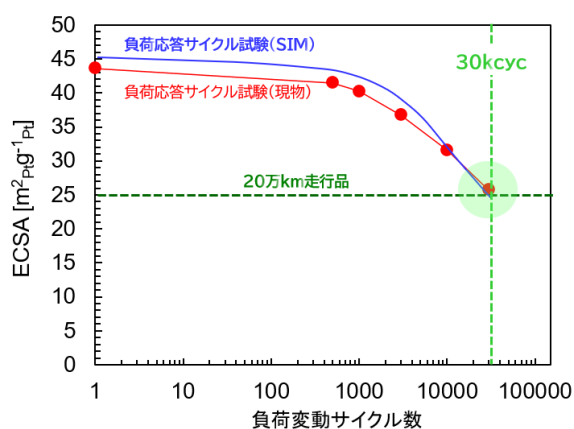


図 2.5.5-4 シミュレーションの検証結果

同ストレスを用いたシミュレーションによる ECSA 推定値が概ね整合することで確認している。更に、負荷応答サイクル試験でも評価結果とシミュレーション推定値の整合性を図 2.5.5-4 に示す通り確認した。

このシミュレーションを用い 2030 年頃の HDT の耐久条件である WHVC+起動停止モード 5 万時間走行後の I-V 特性に対応する ECSA と、同一 ECSA になるまでの負荷応答サイクル試験によるサイクル数を求めた。結果を図 2.5.5-5 に示す。

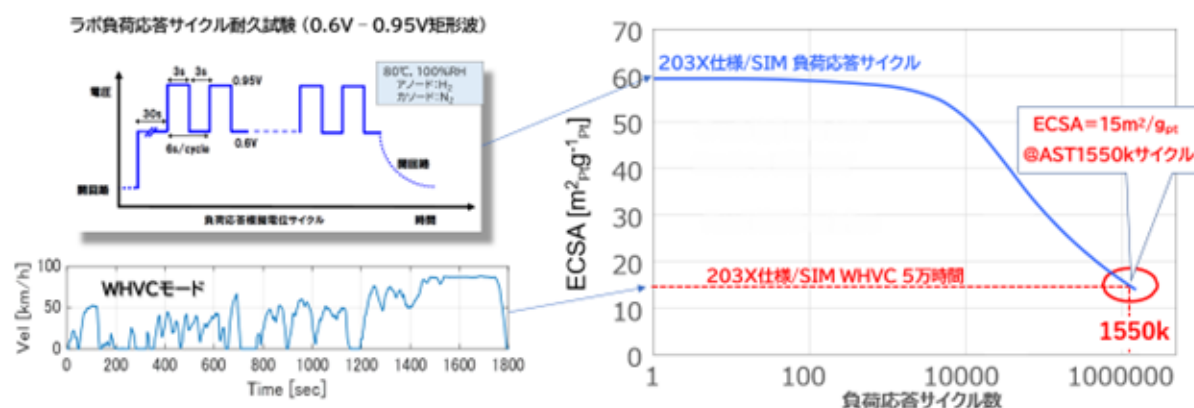


図 2.5.5-5 2030 年頃目標に対する負荷応答サイクル回数と ECSA の設定値

この結果から、2030 年頃の目標 I-V 特性を満たすために必要な触媒耐久目標は、「表 2.5.3-1 に示される主要材料の初期物性に対して、負荷応答サイクル試験条件で 1,550k サイクル後、ECSA $15\text{m}^2\text{Ptg}^{-1}\text{Pt}$ 以上を満たすこと」と求められた。なお、ECSA が $15\text{m}^2\text{Ptg}^{-1}\text{Pt}$ と比較的低い値で 2030 年頃の I-V 特性の要件を満たしていることは、2030 年頃の目標設定では高酸素透過性アイオノマの適用を前提としており、従来材 (Nafion 等) に比べて ECSA 低下による高電流密度での I-V 特性低下 (ガス拡散抵抗増加) が抑制されることが挙げられる。また、また、表 2.5.3-1 に示される通り GDL・流路のガス拡散抵抗目標から得られる低減効果が大いことも挙げられる。

以上から、性能耐久における評価として負荷応答サイクルを適用することは有効であり、2030 年頃の I-V 目標に対してはサイクル数 1,550k サイクル、ECSA の下限としては $15\text{m}^2\text{Ptg}^{-1}\text{Pt}$ を目標として評価を行うことで材料、MEA 仕様としての評価を行うことが可能である。

(2) 電解質膜耐久評価

電解質膜の耐久性評価としては、従来から膜材料単体でのフェントン試験やセル化しての OCV 試験、乾湿による機械応力、クリープ試験などが知られており、電解質膜を構成する高分子材料の化学的耐久性については過酸化水素生成に伴う OH ラジカルが発生と高分子構造の劣化反応を評価する手法が主流である。[1,4]

電解膜に求められる機能としてはセル性能として抵抗過電圧に寄与するプロトンの伝導、およびアノード/カソード間のガス分離等であるが、ガス分離機能については劣化/クロスリークに対する予測が難しく、OCV 試験等でも経時的に変化する排出水中の脱離フッ素濃度計測による評価、OCV 電圧変化による間接的な劣化評価が中心であった。これに対し MBD の考え方でも述べている通りフッ素系電解膜の分子量変化により劣化進行を直接評価する手法が提案されている。[5,6] 図 2.5.5-6 にラジカルによる劣化反応と分子量の変化についてイメージを示す。[7]

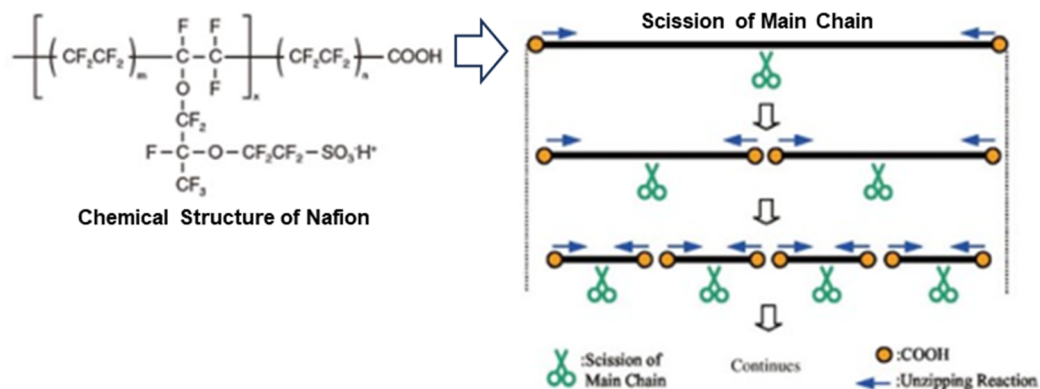


図 2.5.5-6 Nafion の分子構造と分子鎖切断のイメージ

電解膜を構成するフッ素系高分子材料 (Nafion 等) は OH ラジカルにより分子鎖の切断が発生し分子量の低下が発生する。この分子量変化を評価パラメータとすることで連続的な劣化挙動を確認し耐久性を予測することができると考えられるが、電解質膜の機能下限の定義についてはそれぞれのシステム制御方法、製品としての機能欠損の考え方が異なるため目標時間/物性下限の設定はアプリケーションによって異なる。よってここでは電解質膜材料開発のための耐久特性評価法を例示する。

電解質膜の材料評価にあたり、図 2.5.5-2 に示される各運転モードの中で高温頻度が高く劣化に対して影響度が高い山岳路モードでの 44t トラック運用を想定した条件（冷媒出口温度最高：105 @1.8A/cm²）を切り出し、テストセルでの 2,100 時間連続発電試験を行った。なお、本テストでは実機の冷媒出口温度 105 に対し、テストセル（JARI 標準セル）のセル温度を 115 と設定して実施した。供試 MEA は一般的な自動車用 MEA 仕様（Ce 添加フッ素系電解質膜、PtCo/C 触媒）を用いた。本試験条件の考え方について図 2.5.5-7 に示す。また、試験前後の電解質膜の分子量測定結果を図 2.5.5-8 に示す。

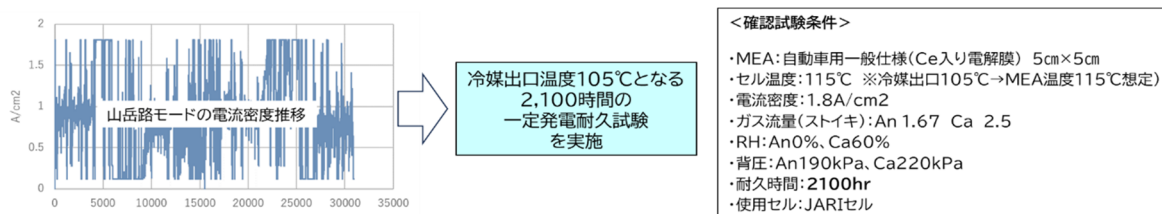


図 2.5.5-7 電解質膜劣化試験の考え方と試験条件

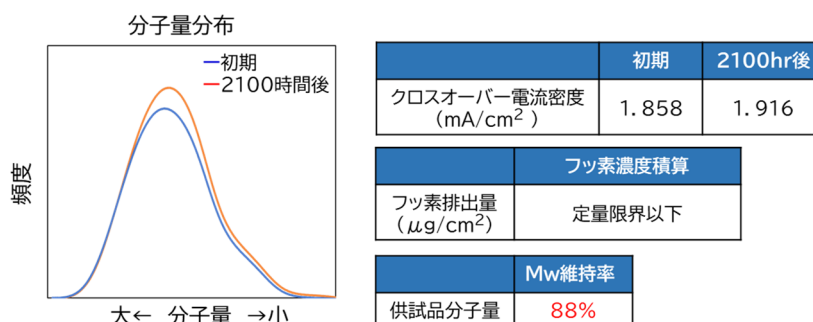


図 2.5.5-8 2,100hr 試験後の解析結果

2,100 時間後の分子量は初期に対して保持率 88%となるが、連続発電中のフッ素排出量の顕著な増加は見られず、LSV (Linear Sweep Voltammetry) 測定によるクロスオーバー電流にも変化は見られないことからガス遮断性は健全に保たれている事が分かる。

一方、同条件での劣化ストレスの積み上げによる劣化予測計算を行うための考え方と、計算結果を図 2.5.5-9 に示す。

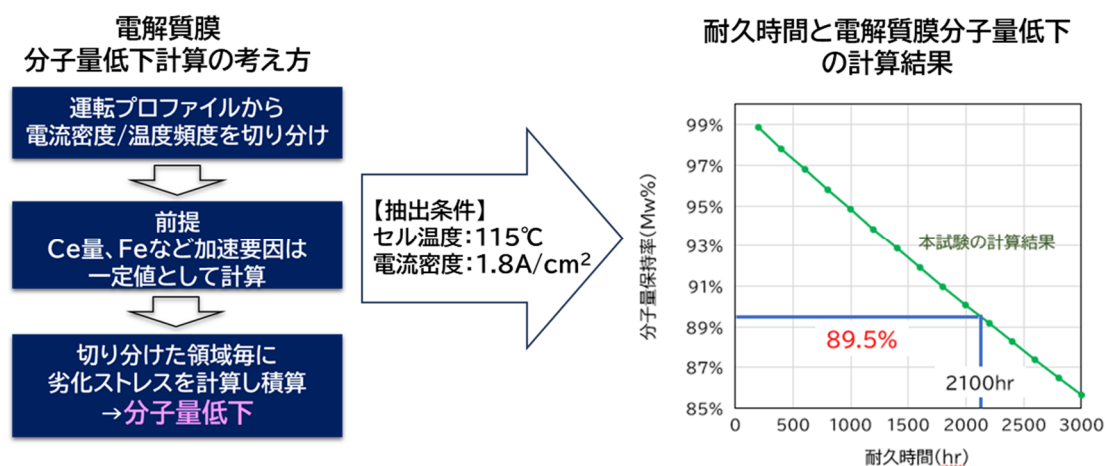


図 2.5.5-9 ストレス計算による電解質膜分子量低下の予測結果

本計算結果についても 2,100 時間経過時の分子量保持率は 89.5% となった。本計算ではラジカルクエンチャとしての Ce 濃度、コンタミなどの加速因子について一定値を用いているため、供試 MEA の状態と若干の相違があるが今回の試験結果と近い値となる。よって劣化ストレスの積算による劣化計算予測は、実際の劣化挙動をトレースできていると考えられる。

今後 HDV 等の長時間運用を前提としたアプリケーションに適用する材料評価を行う場合、耐久評価時間の長時間化や複雑化が懸案となるが、運転条件/頻度とストレスの関係から耐久性に対して支配的なストレスを切り出し評価することで加速試験が可能となる。

電解質膜としての耐久評価に関しては電解質材料の化学劣化に加え、スタック組み立て時の荷重、熱膨張や乾湿により発生する応力による機械的な劣化やクリープに関しても検討が必要である。これら機械的な劣化はアプリケーション毎の使用条件、セル/スタックの設計方針を反映した耐久試験も必要である。なお、本試験/劣化予測は現行のフッ素系電解質膜材料に関して検討・確認されたものであり、今後 炭化水素系電解膜など PFAS 規制に適合する材料開発にあたっては、劣化メカニズムを含めた新たな検討も必要である。

(参考文献)

- [1] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)
「NEDO PEFC セル評価解析プロトコル 2022 年 3 月版」
- [2] S. Katayama, “Analysis of MEA Degradation through FCV Real-World Driving Test”, The 63rd Battery Symposium in Japan, Fukuoka, Japan, Nov. 2022,
(The Committee of Battery Technology,) The Electrochemical Society of Japan.
- [3] T. Watanabe, M. Shibata, N. Fukaya, T. Nagai, T. Suzuki, Setting Development Targets for Fuel Cells and Systems for Heavy-Duty Trucks Using a Comprehensive Model-Based Approach, 242nd ECS Meeting, MA2022-02, 1468 (2022)
- [4] 燃料電池実用化推進協議会 (FCCJ)
「固体高分子形燃料電池の劣化機構解析と劣化現象の解明」
- [5] 平出篤志、中原章：“分子量に着目した燃料電池用高分子電解質膜の耐久評価”
Honda R&D Technical Review, Vol.30, No.2, p. 99-105
- [6] 平出篤志：“燃料電池用高分子電解質膜の化学劣化に対する寿命予測技術”
Honda R&D Technical Review, Vol.28, No.1, p. 45-53
- [7] Hommura, S., Kawahara, K., Shimohira, T., Teraoka, Y.: Development of a Method for Clarifying the Perfluorosulfonated Membrane Degradation Mechanism in a Fuel Cell Environment, J. Electrochem. Soc., 155(1), p. A29-A33, (2008)

2.6 FC 材料開発の方向性

2030 年、35 年および 40 年の FC 材料目標が 2.5.3 において提示されている。これらの FC 材料目標は従来の研究開発速度では到底達成を見込むことができないため、FC 材料の研究開発において従来の実験によるトライ & エラーの取り組みに加え、各種量子ビーム等の高度解析技術の活用、各種シミュレーションやトランススケールシミュレーション技術、マテリアルインフォマティクス(MI)、計測インフォマティクス(MEI)やプロセスインフォマティクス(PI)といった高速探索技術、実験の自動自律化等を促進しかつ有機的に連携することにより非常に大きく研究開発速度を向上させる必要がある。

2.6.1 PFAS 規制

2023 年 1 月 13 日に、欧州の 5 か国（デンマーク、ドイツ、オランダ、ノルウェー、スウェーデン）より、10,000 種以上の有機フッ化化合物(per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS)の製造、上市、使用に関する規制案が欧州化学品庁(European Chemical Agency, ECHA)へ提出された。また同年 3 月から 6 か月間のオープンコンサルテーションが行われ、各種企業や団体、個人から 5,642 のコメントが集まり、規制について専門家、リスク評価委員会、社会経済分析委員会での審議が行われる[1-3]。今後分野ごとに審議が行われ燃料電池が含まれるエネルギー分野での審議は 2024 年以降に開始される見込みである。その後 2 回目のコンサルテーションを経て、規制案に対する専門家委員会の最終意見が欧州委員会に提出される。欧州委員会により作成される規制法案が採択された後、定められた移行期間を経て規制が開始される（現在の規制案では 18 ヶ月の移行期間が提案されている）。固体高分子型燃料電池の主要部材である電解質膜(電解質・補強材)、シール材料、触媒層アイオノマ、拡散層の撥水材などのパーフルオロスルホン酸や PTFE などがこの PFAS 規制に該当している。燃料電池が含まれるエネルギー分野は提案国の一つであるオランダが規制案を作成し、電解質、補強材およびシール材については「規制施行時に技術的、経済的に実現可能な代替品が市場に存在しないが、PFAS 使用の分野が特定され開発が進んでいる」と考えられており、移行期間の 18 か月に加えて、猶予期間 5 年の適用が提案された[4]。代替材料の研究開発材料状況に応じては 12 年の猶予期間が正当化される可能性もある。ただしガス拡散層/マイクロポラス層の撥水材料に関しては情報が無い。過去に ECHA の審議でオープンコンサルテーションのコメントを受けて提案時点の規制案を撤廃・変更した事例(ビスフェノール A、PFHxA 等)もあり、燃料電池材料についても今後の審議により規制変更・撤廃や猶予期間変更はありうろと考えられる。

オープンコンサルテーションのコメントを受けた審議には時間がかかるため、今回の「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 -」の検討期間(~2025 年 2 月)において燃料電池材料に関する規制については審議中で規制決定に至らない期間になるとみられる。一方で規制決定がなされた場合の規制開始時期が 2032~2039 年となることが予想され、本ロードマップの対象となる期間に重なることになる。このため、本ロードマップについては PFAS 規制が施行される場合と撤廃される場合の両ケースに対応する技術開発が必要である。

(参考文献)

- [1] ECHA, ANNEX XV RESTRICTION REPORT, PROPOSAL FOR A RESTRICTION, SUBSTANCE NAME(S): Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs), 2023,
- [2] ECHA, ECHA publishes PFAS restriction proposal, 2023,
- [3] みずほリサーチ&テクノロジーズ, 「欧州における永遠の化学物質「PFAS」の規制案」, 2023 年 2 月
- [4] 日本フルオロケミカルプロダクト協議会, 「有機フッ素化合物(PFAS)規制の最新の動向」, 2023, (AGC(株)様ご提供)

2.6.2 2030 年頃に向けた材料開発

(1) 電極触媒

空気極触媒

-30 から 120°C の広範囲な作動条件に適応し、性能と耐久を両立させる触媒開発が重要である。中期的には HDV の要求性能に即した触媒活性と耐久性の更なる向上・新たな機能付与が必要と見込んでいる。従来の Pt 系ナノ粒子の原子配列制御（合金・スキン・コアシェル等）や形状制御（ナノワイヤ・ナノロッド・シート・連結等）は酸素還元に影響する反応分子種の表面吸着状態や電子状態を制御して律速反応を促進させている。これまでの多くの研究成果の積み上げにより触媒活性の向上に大きく貢献しており、今後は耐久性・触媒層設計・コストの観点など製品化を見据えた段階へフェーズシフトも視野に入れ、一部の先行研究を参考に作動条件下での安定性も加味しながら研究の加速が期待される。触媒活性の向上には組成、形態、修飾、相互作用の観点からの新たなアプローチも必要である。Pt 系ナノ粒子とカーボン等担体にて構成される触媒微粒子に第三の添加物を加えることは、表面吸着、電子状態、移動凝集等に作用して、性能・耐久の向上が見込まれる。多くの試みは高い電気化学的活性表面積の維持や、FC 環境下にて耐久性などの検証が必要であるものの、単に性能比較に留まらず性能向上の主要因と劣化抑制のメカニズム解明も並行して進め、新たなアイテムとして発展させるべきである。非貴金属触媒は Pt 使用量削減の観点も踏まえ、長いスパンで取り組む必要がある。Pt 系触媒が発展した理由はいくつかあるが、Pt の高活性、カーボンの高電気伝導性と高比表面積の有する微細構造の制御等が上げられる。つまり、必要な機能を各材料要素へ分離して個々に性能向上を図り、それらの接合界面と分散性を制御しつつ融合を図る思想も非貴金属触媒の開発には必要と思われる。近年では高活性を示す非貴金属材料等の報告もあり、それらに親和性のある担体と電気伝導性と化学的安定性に配慮しながら組み合わせるなど、これまでの知見も積極的に活用した挑戦的な試みも期待される。担体に関してはカーボンを中心に研究が進み、表面微細構造から凝集形態、表面結晶性から吸着特性まで詳細に検討され、移動体用途に必要な触媒活性と物質輸送特性をもつ触媒層の開発まで進んでいる。速度論的要素や局所的な電位変動、転極等によりカーボンの劣化速度は大きく異なるが、劣化を抑制する新しい機能の付与もしくは運転条件の明確化により、HDV 等にアプローチする必要がある。近年注目されている Pt ナノワイヤ・ナノロッドの活性向上要因が解明され、それらに適するカーボン微細構造を設計することも今後重要と思われる。非カーボン担体に関してはその化学的安定性、FC の作動環境下で安定な化学的組成・微細構造・合成条件などの議論が進みつつあり、種々の酸化物などの複合的な機能材料としての議論を踏まえて発展が求められる。電子伝導性、物質輸送特性、表面微細構造等、カーボンで具現化した重要な特性を非カーボン担体でもカバーすると共に、カーボン担体では求め難い機能（電子的相互作用・界面相互作用等）を積極的に利用した新たな触媒設計へ発展させる必要もある。

水素極触媒

水素極触媒には、-30 から 120°C の広い温度範囲で、高い水素酸化反応（HOR）活性と耐久性の両立が求められる。また、停止時には電解質膜を透過した O₂ によって空気電位付近になるため、耐酸化性も必要である。それらに加え、電解質膜の耐久性向上に資する新たな機能も重要視されている。電解質膜を化学劣化する OH や OOH などのラジカルは主に水素極で発生する。ま

ず、電解質膜を透過した O_2 が白金系水素極触媒上の吸着水素 H_{ad} と反応して H_2O_2 が生成し、これが金属イオン等と反応してラジカルが発生する。電解質膜の劣化抑制のためにラジカルクエンチ剤が膜に添加されているが、膜やアイオノマのプロトン伝導率の低下や空気極の性能低下が起こる。それゆえ、 H_2O_2 生成を抑制する水素極触媒や触媒層の開発が、電解質膜の耐久性と性能向上に重要である。これまでに Pt 合金触媒により H_2O_2 生成が抑制されることが報告されている。

天然ガス等を改質・精製した水素燃料には、極微量の CO (規制値< 0.2 ppm)、アンモニア (< 0.1 ppm) や H_2S (< 4 ppb) などの不純物が含まれている。水素極では、水素のみが消費されるため触媒層出口、特に燃料循環により不純物濃度が上昇する。触媒被毒を避けるために燃料パージを頻繁に行うと、燃料利用率が低下する。それゆえ、不純物耐性が高い触媒の開発が重要である。被毒作用が大きいのは吸着力が強い CO と H_2S である。吸着 CO の一部は電解質膜を透過する O_2 によって酸化除去されることも見出されているが、やはり高い被毒耐性、HOR 活性と耐酸化性を有する触媒開発が望ましい。なお、CO を水素電位付近の低い電位で酸化除去する能力は必ずしも必要ではなく、CO 吸着を弱められれば HOR 活性は維持できる。他方、白金系触媒に H_2S は S として吸着し、空気を導入しても酸化除去できない。HDV の水素使用総量は乗用車の約 40 倍と見積もられるので、S の蓄積を防ぐ対策として H_2S の吸着抑制や新しい除去法の開発が必要である。

触媒のロバスト性の観点から、燃料欠乏時の転極耐性も注目されている。セルを直列接続したスタックの一部で流路凍結などにより燃料欠乏が起こると、水素極では本来の HOR が進行する代わりに炭素担体の酸化が起こる (空気極よりも電位が高くなる：転極)。足場を失った Pt ナノ粒子は凝集・脱落する。ごく短時間の転極でも従来の Pt/C 触媒は致命的なダメージを受ける。そのため、燃料利用率を低くして転極を回避し、万一に備えて制御機器が組み込まれている。触媒に転極耐性があれば、効率の向上とシステムの簡略化による低コスト化が可能になる。

炭素担体の酸化を抑制するために、 $IrOx$ 等の酸素発生反応 (OER) 触媒添加の有効性が報告されている。しかし、水素製造用高分子形水電解の実用化に伴って、埋蔵量が希少な Ir 価格が急騰しており、Ir 使用量の極小化、Ir 代替 OER 触媒の開発、炭素以外の耐酸化性担体 (燃料欠乏時に無害な酸化反応が必要) の開発が進められている。

(2) 電解質材料

電解質膜

電解質膜は、FC スタックの重要な構成要素であり、20% (ただし、氷点下環境は 0%) から 100% の相対湿度 (RH) 範囲、および -30 から 120°C の温度範囲で要求されるプロトン伝導性を実現し、かつ広範囲の作動条件に耐えうる耐久性が求められる。また、電解質膜のコストを考えると、膜の化学的耐久性、機械的耐久性に加え、膜の薄膜化も重要である。さらに、薄膜化は膜抵抗を決める重要な要因でもある。こうした課題を踏まえ、2030 年頃の目標に対応する電解質膜として以下の開発が求められる。

- () 電解質膜には、80 、80%RH の高加湿状態から、電解質膜面最高温度 120 、30%RH の低加湿状態においても要求されるプロトン伝導性を実現できる性能が求められる。
- () 電解質膜材料はフッ素系高分子、炭化水素系高分子などが考えられ、その膜には 10 μ m 以下の薄膜化が求められる。膜強度を高めて薄膜化を実現するには、補強層を組み込んだ電解質

膜を開発する必要がある。

- () 電解質膜には化学的耐久性（主にラジカルによる膜の破損）が求められる。化学的耐久性の向上には、ガスバリア性の高い膜の開発が必要である。さらに、ラジカルクエンチ剤を電解質膜に導入することは必須であり、ラジカルクエンチ剤導入後もプロトン伝導性が影響を受けない電解質膜を開発する必要がある。
 - () 電解質膜には機械的耐久性が求められる。膜には作動条件により変化する温度、湿度に対応できる弾性、剛性が求められる。
- さらに、2.2.2 項(6)の今後の課題で述べたように、2030 年以降については最高温度 120 をさらに超えた作動条件に対応することが必要である。
- () 電解質膜には、80 、80%RH の高加湿状態から、電解質膜面最高温度>120 、かつ極低加湿においても要求されるプロトン伝導性を実現できる性能が求められる。
 - () 電解質膜は 10 μ m 以下の薄膜化が求められるため、補強層を組み込んだ電解質膜を開発する必要がある。
 - () 電解質膜には化学的耐久性と機械的耐久性が求められる。

アイオノマ（電極用）

電極となる触媒層内には、触媒とカーボン担体以外に触媒等とのバインダとして、また電解質膜との接着性機能も担うアイオノマが必要である。

- () アイオノマは、電解質膜との接着性を考慮して、フッ素系高分子、炭化水素系高分子などが用いられている。
- () アイオノマには、従来の作動条件を満たしつつ、-30 から 120°C の広範囲な作動条件において、要求性能を満たすプロトン伝導性と酸素透過性、および Pt 系触媒への特異吸着の緩和が求められる。
- () アイオノマのプロトン伝導性、酸素透過性の向上は、アイオノマの使用量の最適化にもつながり、触媒表面の酸素輸送抵抗のみならず、触媒層の二次細孔内の酸素輸送抵抗（目標 10 s m⁻¹ 以下）、プロトン抵抗の低減にもつながる。
- () 触媒層全体への酸素拡散性向上のために、アイオノマの被覆形態の制御も求められている。
- () Pt 系触媒へのアイオノマの特異吸着は触媒活性に影響し、その程度は生成水・湿度により変化する。この影響の緩和にはアイオノマの直鎖及び側鎖の分子構造の工夫と共に、添加物の利用も重要である。今後導入が予想されるホスホン酸基でも特異吸着の影響が予想されており、FC の作動環境下での安定性も加味しつつ、その緩和を検討する必要がある。

(3) ガス拡散電極

高出力密度化を図る上で物質輸送性能の向上が不可欠である。そして I-V 特性の目標（@2030 年）を達成するためには、とりわけ GDL、MPL の酸素拡散抵抗の低減が必要となる。これらの部材は高酸性雰囲気では電子伝導性を保持する必要性から、主にカーボン多孔質体が用いられる。特に電解質膜や触媒層の安定保持のために高い剛性を有する必要があるため、GDL は炭素繊維から成る不織布構造が用いられる。また触媒層との良好な接触界面を有する必要があるため、MPL はカーボンブラックの粒子堆積構造が用いられている。拡散抵抗[s m⁻¹]は部材厚み[m]を多孔体の

有効酸素拡散係数[m²s⁻¹]で割った値であり、この有効拡散係数は空隙率の正のべき乗で表される。またこのべき指数は多孔体の幾何形状に依存する。すなわち各部材を() 薄くする、() 空隙率を上げる、() 幾何形状を工夫することが拡散抵抗低減に繋がる。しかし酸素輸送以外の機能(電子伝導、MEA の安定保持等)も GDL、MPL には求められており、つまり、如何にこれら他機能を損なうことなく()~()を進めることができるかが鍵となる。さらにリブ・チャンネル構造を有する流路を用いた場合、リブ部(GDL と接触する面)直下に酸素を拡散させる必要があるが、GDL の薄層化はこの均一拡散を妨げることに繋がる。以上より、GDL、MPL の酸素拡散抵抗の低減を進める上で、他機能の損失緩和を常に念頭に置く必要がある。ただし電解質膜や触媒層などの各部材の特性によって、GDL・MPL に求める要件は変わる可能性がある。また流路もエンジニアリングとして多様な形状が提案されており、これら他部材の組み合わせの上で、最適な GDL・MPL を検討する必要がある。なお多孔体の物質輸送性能の理論値は算出可能であるが、現状部材の酸素輸送性はその理論値よりも低く、つまり現状材料でも内部構造の工夫により、性能向上の余地はあると言える。そのためにも多孔構造が酸素拡散抵抗に及ぼす影響を明らかにすることも重要である。また触媒層も同様に酸素拡散抵抗(二次細孔内、触媒粒子近傍のアイオノマ内、多孔性担体内など)の低減が必要であるが、プロトン・電子輸送との両立に加え、電極触媒の有効利用率や安定性も考慮した構造設計が必要となる。

(4) MEA

(1) ~ (3) までの部材を組み合わせる MEA (Membrane Electrode Assembly) とする際にも、その製造や構造制御が極めて重要となる。触媒層は、インク調整、分散、混練、塗布、乾燥、圧着を経て形成されるが、その各製造工程に依存して内部の微細構造が変化する。そして物質輸送性や有効触媒表面を左右し、発電特性が大きく変わる。したがってこれらの各工程の現象解明や新たな製造工程の検討も必要である。また電解質膜、触媒層、ガス拡散層、その他シール部材の組み合わせによって、各部材の必要特性も変わる。例えば電解質膜の力学強度次第で、それをサポートする他部材の必要剛性も変化する。

2.6.3 2035 年頃に向けた材料開発

(1) 電極触媒

酸素極(カソード)触媒

広範囲な作動温度(-30°C から 125°C@膜面)に適応しつつ目標とする比活性(BOL:4630 A g⁻¹, HDV-EOL:1090 A g⁻¹, FCV-EOL:2270 A g⁻¹, @80°C,100%RH(@2035 年))と耐久性(HDV: 50000 時間、FCV:10000 時間(@2035 年))を両立する新たな酸素極(カソード)触媒の創出が必要である。研究者・技術者の知恵と努力により Pt 系ナノ粒子の原子配列・組成・形態・表面の制御が進み、目標(@2030 年)にアプローチする新たな触媒が生み出されつつある。それらに立脚しつつ、より多角的な視野にて研究・開発を加速的に進め、上記目標に到達した新触媒の創製が求められている。Pt 遷移金属合金にて発展した合金系触媒では、多種多様な元素を複数組み合わせつつその粒子径や表面構造(コア・スキン)の制御が進んでいる。計算化学や自動実験も併用して加速的に研究を進め、スケーリング側を打破するような新規性の高い触媒の創出が求められる。触媒最表面の原子配列制御、修飾物(有機物・イオン液体等)は、酸素還元活性の律速段階の促進やスル

ホン酸基の被毒抑制などへの寄与が大きい。幅広い電位幅にて安定を担保すると共に機能発現メカニズムを解明し、それら知見を材料設計へフィードバックすることで活性と耐久性の両立が期待される。金属 - 担体間の電子的な相互作用に起因する修飾効果も高機能化したカーボンや導電性非カーボン担体にて確認されており、Pt 系触媒粒子自体の形態制御（ワイヤー・ロッド）と共に、Pt 系触媒の活性と耐久性向上に大きく寄与する。多孔性/メソポーラス担体との併用などの諸課題を解決することで、大幅な触媒機能向上が期待される。なお、Pt の価格は地勢的要因や経済的要因等の影響を受けやすい。水素利用社会の発展と Pt 使用量の増加を鑑みると、より進んだリサイクル技術の確立も大切となる。更には、Pt 使用量削減や燃料電池の世界的かつ平等な普及の観点から、非貴金属触媒の開発はやや長期的視点に立ちながら進めるべきと考えられる。

水素極（アノード）触媒

水素極（アノード）触媒でも、広範囲な作動温度（ -30°C から 125°C ）にて利用できると共に、燃料電池内の耐久性に寄与する新機能の付与が求められている。ここ数年のシステムの進化により、移動体用途では、燃料欠乏時の転極や不純物に対する耐性よりアノードでのラジカル生成の抑制や、スカベンジング機能の付与が重要となりつつある。今後は、高温耐性、陽イオンの溶出の極限抑制、水管理、可能であればカソード及びアノードにて同一の触媒利用なども視野に検討を進めることが望ましい。

担体

担体に関してはカーボンの表面微細構造から微細構造までの検討が進み、移動体用途に必要な触媒活性と物質輸送特性の両立が進んでいる。メソポーラスカーボン等の高耐久化、各種カーボン担体へのアイオノマーの均一被覆、ガス輸送特性の向上は今後さらに重要になると予想される。非カーボン担体に関してはその化学的安定性、燃料電池の作動環境下で安定な化学的組成、物質輸送に有利な微細構造などの議論が進みつつある。電子伝導性、物質輸送特性、表面微細構造等、カーボンで具現化した重要な特性を非カーボン担体でもカバーすると共に、カーボン担体では求め難い機能（電子的相互作用・界面相互作用等）を積極的に利用した新たな触媒設計へ発展させる必要もある。

以上のように新規触媒探索には注目すべき機能とその背反となる影響を一体として検討する必要がある。マルチモーダル解析やオペランド解析は研究目標が高くなるにつれて一層重要なツールになる。更には、新規触媒の創出から、触媒インク・塗工・触媒層設計まで新たな知見が必要となる。それらの速やかな発展を実現するためにも、自動・自律実験及び MI などの積極的な導入、材料設計における課題とニーズの早期共有がこれまで以上に重要である。それら実現のため効率的な研究体制の構築が必須である。

（２）電解質材料

電解質膜

電解質膜には、13%（ただし、氷点下環境は 0%）から 100%の相対湿度（RH）範囲、および -30 から 125°C の温度範囲で要求されるプロトン伝導性を実現し、かつこの広範囲の作動条件におい

て 50,000 時間以上の耐久性が求められる。また、電解質膜のコストを考えると、膜の化学的耐久性、機械的耐久性に加え、膜の薄膜化も重要である。さらに、薄膜化は膜抵抗を決める重要な要因でもある。こうした課題を踏まえ、2035 年頃の目標として電解質膜には以下の開発が求められている。

- () 電解質膜には、80℃、80%RH の高加湿状態から、電解質膜面最高温度 125℃、13%RH の低加湿状態において、2035 年で要求されるプロトン伝導性を実現しなければならない。
- () 電解質膜材料はフッ素系高分子、炭化水素系高分子などが考えられ、その膜には 5 μ m 程度の薄膜化が求められる。膜強度を高めて薄膜化を実現するには、補強層を組み込んだ電解質膜の開発が必須である。また、薄膜では膜内の相分離状態が変化しプロトン伝導度が低下する可能性があることから、高分子の相分離挙動の制御が求められる。
- () 電解質膜には化学的耐久性（主にラジカルによる膜の破損）が求められる。化学的耐久性の向上には、ガスバリア性の高い膜の開発が必要である。さらに、ラジカルクエンチ剤を電解質膜に導入することも必須である。一般的に、ラジカルクエンチ剤を導入するとプロトン伝導性が低下するが、その影響を受け難い電解質膜を開発するか、あるいは伝導度を低下させないラジカルクエンチ剤を開発する必要がある。また、ラジカルクエンチ剤が膜内で安定的に保持されることも重要である。
- () 電解質膜には機械的耐久性が求められる。膜には作動条件により変化する温度、湿度に対応できる弾性、剛性が求められる。特に 100℃以上の高温状態で湿度が 30%RH を下回る場合、膜にはかなりの負荷がかかるため、そのような状態においても膜の機械的安定性を維持できる補強層の開発が不可欠である。最終的には、5 μ m 程度の薄膜で上述した条件を満たす補強層が必要となる。
- () 電解質膜材料、補強層、クエンチ剤、それぞれの材料で高性能化が求められているが、最終的にはこれら材料を全て複合化する必要があり、その複合膜でプロトン伝導性、ガスバリア性、膜耐久性の要求性能を満たす重要である。複合化する際の成膜条件の検討を行い、5 μ m 程度の薄膜化された複合膜を開発しなければならない。
- (vi) (v) で作製した複合膜は、Roll to Roll に展開できるような条件で成膜が検討されることが望ましい。

アイオノマ（電極用）

電極となる触媒層内には、触媒とカーボン担体以外に触媒等とのバインダとして、また電解質膜との接着性機能も担うアイオノマが必要である。

- () アイオノマは、電解質膜との接着性を考慮して、フッ素系高分子、炭化水素系高分子などが用いられている。
- () アイオノマには、従来の作動条件を満たしつつ、-30℃から 125℃の広範囲な作動条件において、要求性能を満たすプロトン伝導性と酸素透過性、および Pt 系触媒への特異吸着の緩和が求められる。特に高分子の酸素透過性はその構造に強く影響を受けるため、高分子構造と酸素透過性の相関を明らかにすることが重要である。

- () アイオノマのプロトン伝導性、酸素透過性の向上は、アイオノマの使用量の最適化にもつながり、触媒表面の酸素輸送抵抗のみならず、触媒層の二次細孔内の酸素輸送抵抗（目標 10 s m^{-1} 以下）、プロトン抵抗の低減にもつながる。
- () 触媒層全体への酸素拡散性向上のために、アイオノマの被覆形態の制御も求められている。
- () Pt 系触媒へのアイオノマの特異吸着は触媒活性に影響し、その程度は生成水・湿度により変化する。この影響の緩和にはアイオノマの直鎖及び側鎖の分子構造の工夫と共に、添加物の利用も重要である。今後導入が予想されるホスホン酸基でも特異吸着の影響が予想されており、燃料電池の作動環境下での安定性も加味しつつ、その緩和を検討する必要がある。

(3) ガス拡散電極

I-V 特性の目標（@2035 年）を達成するためには、物質輸送性能の向上が不可欠である。とりわけガス流路から触媒表面に至るまでの酸素輸送抵抗の低減が必要である。GDL の単体としての酸素輸送抵抗は目標数値が達成されつつある。一方で GDL は電子伝導と、MEA の安定保持の機能が求められており、今後の電子伝導抵抗の低減、電解質膜の薄膜化による更なる機械強度の保持と酸素輸送抵抗低減を両立させることが求められる。一方酸素は GDL に対して必ずしも面垂直方向に拡散するわけではなく、用いられるガス流路構造に依存して、その拡散面やその角度、距離が変化する。一般的なりブ・チャネル構造を有する流路の場合、リブ部直下の触媒層への酸素供給が不足し、その分 GDL の正味の酸素輸送抵抗の増大となる。GDL を薄層化した場合に、その効果はより顕著になる。したがって GDL と流路構造を合わせて最適な構造を検討する必要がある。その一つの案として GDL と流路が一体化した多孔体流路も検討されている。GDL フリー（自立 MPL）についても、GDL の輸送抵抗を取り除く効果として有効ではあるが、機械強度の保持とリブ直下への酸素供給の問題は同様であり、それらの両立が課題である。なお多孔体の物質輸送性能の理論値は算出可能であるが、現状部材の酸素輸送性はその理論値よりも低く、つまり現状材料でも内部構造の工夫により、性能向上の余地はあると言える。そのためにも多孔構造が酸素拡散抵抗に及ぼす影響を明らかにすることも重要である。なお GDL と接触するセパレータ面も、電子伝導を考えた場合、耐腐食性を考慮しつつ接触抵抗の低減を実現する必要があり、多孔体である GDL の接触変形との組み合わせとして、それも課題である。以上の課題をより高い電流密度環境下で解決しなければならないが、酸素輸送、機械強度保持に加えて、熱・電子伝導と水管理もより一層重要となるため、解析技術・計算科学において、これらのマルチフィジックスの現象を明らかにし、また各種 DX 技術と連携し、最適条件・最適構造探索を高速に行う必要がある。

(4) MEA

物質輸送抵抗は流路と GDL だけが支配的ではなく、触媒層内部の輸送抵抗も低減する必要がある。特にアイオノマ内とその近傍の酸素輸送抵抗が大きく、高酸素透過性のアイオノマが求められる。また触媒界面の輸送抵抗（界面抵抗）が顕著であることも示唆されており、その要因解明と低減が必要である。さらに触媒担体として中空状のものをを用いた場合、その内部の酸素輸送、プロトン輸送も考慮する必要がある。その際に担体細孔内部の形態や気液相状態を明らかにする必要がある、その解明として、マルチモーダル解析やオペランド解析などの各種計測計算技術の

高度化が不可欠である。一方(1)~(3)までの部材を組み合わせる MEA(Membrane Electrode Assembly) とする際にも、その製造や構造制御が極めて重要となる。触媒層は、インク調整、分散、混練、塗布、乾燥、圧着を経て形成されるが、その各製造工程に依存して内部の微細構造が変化する。そして物質輸送性や有効触媒表面を左右し、発電特性が大きく変わる。したがってこれらの各工程の現象解明や新たな製造工程の検討も必要である。その点で今後、各種プロセスを対象にした内部現象理解のためのシミュレーター開発(モデル駆動) と、最適条件探索を高速に進めるためのプロセスインフォマティクスと自動自律実験の連携技術構築(データ駆動) の双方向の取り組みを進める必要がある。また電解質膜、触媒層、ガス拡散層、その他シール部材の組み合わせによって、各部材の必要特性も変わる。例えば電解質膜の力学強度次第で、それをサポートする他部材の必要剛性も変化する。このようにトランススケールの現象解明を行うためのオペランド計測技術・計算科学の技術開発が必要であり、またそれらを統合したモデル駆動の設計支援の基盤構築が必要である。これにより各種材料の特性を最大限発揮するセル・システム開発を高速に行うことが可能となる。さらに触媒活性について、理想環境である RDE で計測したものと比較して、MEA として計測した値は大きく減少するため、担体を骨格とした空隙構造、アイオノマの被覆形態など、触媒層構造の設計工夫が課題である。また DX 技術を活用してこれらの劣化予測を進めることで、長期安定性を考慮した新規触媒層・MEA の開発を進めることが可能となる。

(5) シール材料

普及期に向けた次世代シール開発として廉価、高速に生産でき、かつ高耐久性、高温化、コンパクト設計を実現できるセルシール構造が必要となる。また、燃料電池シール技術は開発プロセスでの重大課題発生頻度も高く、リークなどの不具合現象を正しく捉えられる高度なシール解析の基盤解析技術を育てることでリッチな開発環境を構築していく意義も大きい。

シール材料部材は燃料電池セル積層枚数分の材料、工程が必要となり、燃料電池スタックに占める材料コスト比率も依然として高い。また、燃料電池環境は、酸性、液水、氷点下から高温までの動作環境と樹脂、ゴム材料にとって厳しい環境であり、極めて透過性の高い水素ガスを長期にわたりシール気密性を保持する機能が要求される。シール材料の生産工程においてもゴム加硫成形に代表される生産時のサイクルタイムが長く、高速生産に向けたボトルネック工程となっている。普及期に向けた高速セル生産速度を実現させるためには、材料、工法での革新的ブレイクスルーが必要となってくる。普及期に向けては燃料電池の高温動作化が求められており、シール材料も過渡的に 125 ~ 130 °C 環境となるなど、シール材料への機能要求も高まると予想される。

また、寿命予測、加速評価法の確立など耐久信頼性を短期間の開発サイクル内で検証できるモノサシも必要となる。

一方で、接着接合界面の挙動については未だに学術的に未解明なことも多く、特に高い長期信頼性が求められるシール機能には学術的な現象解明による原理原則に基づく品質確保も必要不可欠となってくる。ミクロ構造の in Situ による観察技術、界面分析技術とシミュレーションとの同定による原理解明のニーズも非常に高い。

燃料電池で培ったシール技術の水電解システムなど他のアプリケーションへの応用の期待も高まっている。

(6) セパレータ・表面処理

セパレータは集電・排水・ガス分配機能を有するプレートであり、重要なセル構成部品である。特に集電機能はスタック出力に直結するために、低い電気抵抗(接触抵抗)の維持が重要である。

また、燃料電池スタックに占めるセパレータ基材・表面処理・(流路成型)のコスト比率は高く、30年目標120円/枚の達成および35年に向けた更なるコスト低減の為に、材料・プロセスの開発が重要となる。接触抵抗、コスト目標達成に向けた有力なセパレータ基材の一つはステンレスである。作動環境下において、腐食し、鉄イオンが溶出すると電解質膜を被毒するために高いバリア性を持つ表面処理が求められる。また、表面処理自体も作動環境下で劣化し、接触抵抗が上昇しないことが求められるが、35年に向けては、作動温度高温化に伴い、より厳しい使用方となるため、耐久性向上とコスト低減を両立できる技術のブレイクスルーが必要である。腐食、劣化を検討する上で、生成水中のフッ素の有無は重要な因子となりうるので、開発においては、PFAS規制対応の電解質膜材料開発の動向とリンクして検討を進める必要がある。

コスト目標達成に向けてはセパレータ基材・表面処理に加えて、流路成形プロセスも重要であり、高生産性、コンパクトで安価な設備・プロセスの開発が必要である。

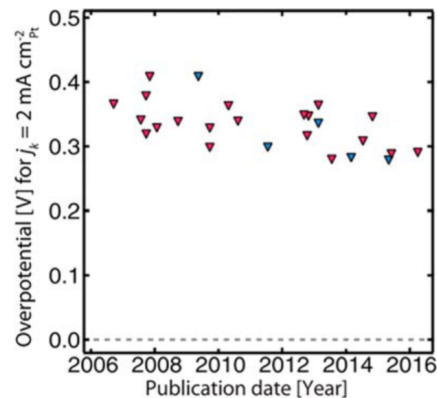


図 2.6.4-1 カソード触媒の開発と過電圧の推移

Kulkarni, A., Siahrostami, S., Patel, A., & Nørskov, J. K. (2018). Understanding Catalytic Activity Trends in the Oxygen Reduction Reaction. In *Chemical Reviews* (Vol. 118, Issue 5, pp. 2302–2312).

2.6.4 2040 年頃に向けた材料開発

(1) 材料開発の方向性の考え方

本ロードマップは、現行システムの着実な性能向上を目的として 2030 年頃を目標に進められる各開発とは別に、2040 年頃を目標にして飛躍的な性能向上を成し遂げる可能性の候補を現時点で示すものである。非常に高い目標値であることは疑いようがない事実であり、それを達成する可能性がある材料系の考え方を示すものであり、個々の材料を選定する意味合いはない。各材料研究者が科学的な根拠を示しながら、新たな候補を含めて選択肢が洗練されていくことが望ましい。

まず、大きな性能向上を成し遂げるために着目すべき幹となる材料系について整理を行う。前項までに記載した過電圧分離と主要物性目標から、材料開発の方向性の基本的な考え方について記載する。繰り返しになるが、要求 I-V 特性を満たすための物性は現状の材料特性と性能向上速度を考えると、外挿直線上に無い非常に高い目標値と言える。発電特性の伸びしろという観点では、カソード触媒の取り分が大きく、全過電圧の中で圧倒的なロスの原因であることが示された(図 2.6.2-2)。

カソード触媒の性能は 2006 年～2016 年にかけて 10 年で 100mV 程度のペースでの過電圧低減が報告されていたが、その速度は鈍化して頭打ちになってきている(図 2.6.4-1)。最近、この頭

打ちを脱したという報告例もあるものの、その回避策が明確ではない2023年初頭の現時点では、カソード触媒の活性のみにデバイス性能の向上を求めることはリスクが高いと考えられる。このような前提で、システム全体としてのバランスを見直し、前項に記載のようにデバイスの作動環境を調整することで他の材料へも一定の要求を分散させている。

その作動環境の調整として、発電温度の上昇が1つの方針であり、触媒活性への非常に高い要求を低減できると期待できる。反応促進という面だけではなく、水の沸点を超えた低湿度での作動が想定されるため、液水が関係する現象について大きく変化する。例えば触媒表面での水の脱離現象やプロトン溶媒和が大きく変化し、イオン伝導体の開発にはメカニズムの観点からも整理をすることが望ましい。このような前提では、電解質膜の開発もカソード触媒と同等の重要性を有しており、ここでは、カソード触媒と電解質膜の2つが目標値を達成するための最重要材料として扱う。

これら最重要材料を含む各部材の有機的な連携で性能を発揮する燃料電池においてはガス拡散電極などの他の部材や、MEAの構造なども大切な検討項目であることは疑いようがない事実である。しかし、研究開発の流れを考えると、触媒や電解質膜の開発に強く依存するものであるため、これらの部材については特定の材料ではなく、開発を促進する共通基盤技術をまずは醸成すべきと考えられる。例えば、触媒層の計測・解析技術、シミュレーション技術や最適化技術は、新触媒材料を製品へ迅速に繋げるために重要な共通技術であり益々重要になっていくと考えられる。

(2) 材料開発の加速手段や取り組み方法

研究開発において、知的好奇心に基づく研究(キュリオシティ・ドリブン型)と出口を目指した目的志向型研究の大別ができるが、燃料電池研究は基本的には後者である。その活動の中で、前者の取り組みも否定はすべきではないが、産業に繋げるロードマップという性質上、想定できる骨子は目的志向型研究を強く意識すべきである。一方で、長期的な視点でブレイクスルーが必要であるため、基礎研究についても涵養する環境も必要である。

前項に記載したように、これまでの技術推移の延長線では到達が容易ではない目標を限られた時間と予算で達成する必要がある。それゆえに、個々の活動だけではなく、国内の開発が加速可能な基盤技術や共通基盤の整備が益々と重要になる。現在、様々な分野でDXの波が押し寄せており、社会的・技術的な変革が起こりつつある。研究開発の分野でも、自動化を超えた自律化や高速計算などデジタル空間の有効利用が次々と提案されてきており、例えば創薬の分野での競争が著しい[1-3]。触媒材料にもその展開が検討されてきており、協働ロボットが人間の代わりに実験を行う研究が提案され、無人実験という注目すべき大きな流れとなっている[4]。

このような技術革新が進む中で、研究計画の考え方も変えるのが自然である。敢えて馴染みのない言い回しで書くと、今後の研究開発においては、これまでは境界を意識してこなかったパラメータ空間の端までを意識した探索が主軸となると考えられる。平たく言えば、検討するパラメータを研究者の直感や経験のみに頼った選択ではなく、データ科学などに基づいて科学的に効率的に探索することが求められる。可能な全ての探索の組み合わせを分母に取り、研究期間で検討可能な数を分子に取った探索範囲の割合を意識した計画が必須である。効率化・加速化は探索数(分子)の増加や探索範囲(分母)の効率的な絞り込みといった視点で整理できる。各材料系に

よって、どのようなアプローチで加速化ができるかを意識しつつ、可能な全ての組み合わせの中から最適な解を導くための手法が必要である。

例えば、複数の検討パラメータを探索する必要がある複雑な材料系では、検討パラメータが爆発的に増えてしまい、宝探しのになりがちである。組成、処理温度、酸処理の3つを各10点について検討するだけでも1,000通りの場合の数があるわけである。このような材料を2つ用いるハイブリッド材料ともなれば、百万通りを超える場合の数が生じるため、全体を見ると散発的な検討しか既存の検討の方法では難しい。それを解決するために、計算科学などによるスクリーニング技術[5]や、マテリアルズ・インフォマティクス(MI)による探索の支援技術[6]、高速実験技術による検討数の飛躍的な増加[7-11]が必要である。さらに、限られた時間の中で検討数を飛躍的に増やすための自動計測・解析技術が必須であり、その開発との連携を適切な時期に可能にすることも今後の鍵と言える。

このように材料開発に大きな変化が必要であることは疑いようがない事実であり、研究開発の連続性の中でも、人材という観点では、早めに国内に情報共有をし、教育環境を整える必要がある。2023年現在で、先を見据えた材料開発の方向性を示すことは、それぞれの研究での知見を中長期的な視点で研究開発を行う上で重要な意味を持ち、特に今後の研究開発を先導するような若手の研究者の挑戦を後押しすることに繋がると期待する。

次項以降に各材料についての目標設定の考え方の詳細を記載し、カテゴリーに分けて材料研究の可能性を記述し、闇雲な宝探しに終始しないよう、戦略的にその可能性を高めるための基盤技術や考え方の例を示す。

(3) カソード触媒材料

カソード触媒への要求は、1桁以上の活性の向上であり、70 mV以上の過電圧低減を目指す必要がある。それに加えて耐久性の向上も必要であるが、耐久性の科学的な予測が現時点では難しいため、活性に焦点を当てて記載する。上述のように、今後の科学技術の向上に伴って、材料系の選定の議論は洗練されていくことが望ましい。

上記の高い目標値を達成するには、現行の開発方針と考え方を大きく変える必要がある。これまでの研究開発による活性向上は、世界中での精力的な研究により現在に至る成果が得られているが、カソード触媒の理想的な活性を達成するには至っていない[12]。ともすれば目標値の達成は理論的に不可能かのように思えてしまう状況であるが、昨今の理論予測の研究から、触媒材料の原子・分子スケールでの理解が進み、可能性のある触媒表面の予測が提案されてきている。

酸素分子の四電子還元反応は、端的に言えば、中間体も含めて含酸素種の吸着エネルギーが支配するものであり、似たような中間体の吸着エネルギーは独立には制御しにくく、ある中間体の

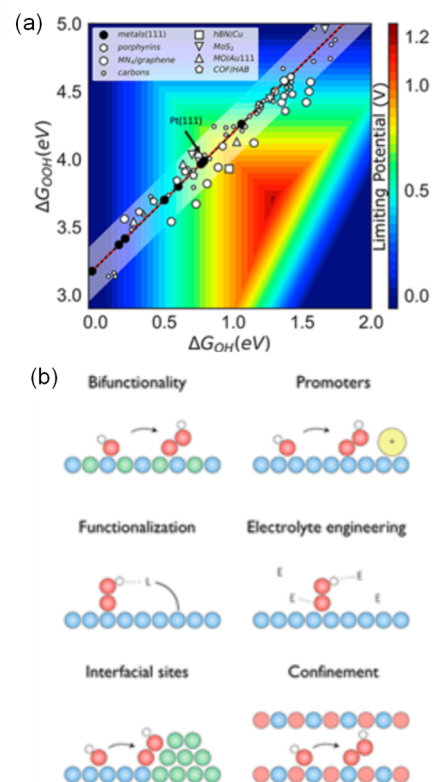


図 2.6.4-2 ORR 触媒の2次元ボルケーノプロット(a)とスケーリング則の回避策案(b)

Kulkarni, A., Siahrostami, S., Patel, A., & Nørskov, J. K. (2018). Understanding Catalytic Activity Trends in the Oxygen Reduction Reaction. In *Chemical Reviews* (Vol. 118, Issue 5, pp. 2302–2312).

吸着を強くすれば、他も強くなってしまい、最適な状態を得にくいというのが理論予測で理解されてきた状態である。広い読者に感覚を掴んでもらうために大雑把な記述ではあるが、この支配をスケーリング則と呼び、様々な触媒系での理解と脱却が提案されてきている[13]。酸素還元触媒については、図 2.6.4-2a に示すように、ほとんどの触媒が中間体の吸着エネルギーを独立に制御できず、直線関係にのってしまい、理想的な状態である赤い部分に無いことが分かる。前項で記載したカソード触媒の性能向上の頭打ちの原因は、このスケーリング則によると考えられている。

スケーリング則からの脱却方法としては図 2.6.4-2b に示すように、触媒表面や吸着中間体の状態を柔軟に調整可能な周囲の環境構築が提案されている[14]。実際にいくつかの触媒でスケーリング則の脱却が報告されているものの、その証明や理解はこれからの課題と言える。例えば、 Fe_2O_3 の表面 Fe 原子の一部を Pt 原子で置換した触媒で $14.9 \text{ A mg}^{-1}_{\text{Pt}}$ (0.95 V vs RHE) という既存の触媒を遙かに凌駕する活性が報告されている[15]。しかし、追試に成功したという報告が 2023 年 2 月現在では見られないため、この例を過度に扱うことは現状では適切ではなく、今後も注視していく必要がある結果である。

このような背景から、スケーリング則を脱する触媒の研究活動としては、技術レベルやアプローチの整理という点で 4 つのカテゴリーに分類を行った。あくまで現時点で可能性のある材料系の候補を 4 つ示すに過ぎず、今後の科学技術で追加や洗練化が望ましい。いずれのカテゴリーについても、研究開発の時間的コストの管理がこれまで以上に必要であり、本項(2)で記載したような加速する基盤が必要と考えられる。

現行原理の極限の貴金属触媒の開発

貴金属結晶表面を用いた現行原理の触媒は、歴史も長く、近年は計算化学、高度計測、合成の 3 つの柱が成熟してきており、科学的な理解を伴った開発が進められている[16]。現行原理内での最高の質量活性は、理想的な Pt 触媒表面を単原子層で実現することである。つまり、Pt 単原子層を形成して十分な比表面積を確保しつつ、適切な結晶歪を付与することでボルケーノプロットの頂点を得ることである。最近では、Pt と遷移金属との規則化合金における Pt-Pt 距離の変化を利用した触媒の研究が盛んに行われている[17-20]。前項 2.6.2 の予測において、全てが理想的に得られた場合には、システム要求を満たす目標値に近くなる(2.6.3 項記載参照、約 68 倍の質量活性 vs 第二世代 MIRAI)。

この現行の Pt 材料の更なる進化でスケーリング則を脱するという方向性は、国内の現有設備や研究者の経験や知識の連続性という観点からも最も自然な検討内容である。例えば、図 2.6.4-2b の考え方に沿って言えば、現在も検討が進められている Pt 触媒の電解質側の修飾で電気二重層や表面の吸着構造を変化させることで[21-24]、現行原理の限界を超える余地がある。

ハイブリッド材料によるヘテロ界面サイトの開発

上記の貴金属触媒の検討では、活性サイトは貴金属結晶の表面であり、通常は原子が最密パッキングした結晶の安定な面が使われる。より積極的にスケーリング則を脱する狙いをもった研究課題として、異種材料との界面を用いる検討が考えられる。単純な例としては、国内でも研究が進められているカーボンアロイと白金合金のハイブリッドであり、PtCo ナノ粒子と $\text{Co-N}_x\text{-C}_y$ のコンポジットで高い活性と耐久性が報告されている[25]。また、Pt 合金と酸化スズの界面を用い

た検討でもスケーリング則からの脱却の可能性が報告されている[26]。これらの材料では異種界面を用いるため、貴金属表面に比べると活性点密度が低くなる可能性はあるものの、活性の向上幅を考えると現状では致命的な課題とは言えない。

今後、組み合わせの可能性を発見することを目的とした論文が多く報告されると予想されるため、技術動向の調査は慎重に行う必要がある。質量活性を得るための明確な指針を持ちながら、産業応用に繋がる材料系の見極めが必要な分野とも言える。材料合成目線で考えると、ハイブリッド材料は現行技術同士の組み合わせであり、新規参入の敷居が低く、検討しやすいエンジニアリング技術であるため、多くの材料探索が世界中で行われると考えられる。試料調整の観点では自動・自律実験のエンジニアリング技術との相性が良いと考えられる。また、どのように活性サイト密度を向上するか設計には、活性サイトを突き止める必要があり、材料中の極一部の可能性がある活性サイトの計測・解析技術が1つのブレイクスルーとなりえる分野である。

超低白金触媒の開発

上記の貴金属触媒はナノ粒子という形状であり、例えば 2.4 nm の Pt 触媒では約 30%の原子が表面にあり、それ以外の Pt 原子は結晶粒子を形作る土台に使われている。担体に担持する場合は、この割合はさらに低下し、貴金属の原子ベースの使用率は必ずしも高くはない。このような流れから、貴金属結晶の表面を使わずに、原子や分子レベルで貴金属を操作し、全ての原子を触媒活性サイトとして利用する研究が不均一触媒の分野で研究されている。

特に近年では、単原子触媒として世界中で材料が合成されている[12]。例えば、冒頭にも記載したように酸化鉄の特異な結晶面の Fe 原子の一部を Pt 原子で置換することで、Fe 原子と Pt 原子の間に酸素分子が丁度良く吸着できるサイトが形成され、極めて高い酸素還元活性が報告されている[15]。この例は酸化鉄を利用していることもあり、耐酸性は低く、現行の固体高分子形での利用は難しいと考えられるが、理想的な活性サイトの形成技術としては期待ができる。

母相と置換元素の組み合わせは無数に存在するため、計算での予測技術も重要になっている。例えば、アナターゼ相チタニアの表面 Ti 原子を Pd や Rh で置換することで、スケーリング則を脱する高い酸素還元活性が得られる可能性が予測されている[27]。あくまでも吸着サイトの計算予測であり、触媒としての耐久性や電子伝導性を含めた検証が必要であり、計算と実験の両方から高速で検証する技術も益々と重要になっていくと考えられる。

非貴金属触媒の開発

貴金属は溶解しにくく、電気伝導性があり、遷移元素特有とも言える触媒活性があるため、電極触媒としては極めて開発しやすい材料である。しかし、上記のように原子・分子レベルで分散した状態では、これら貴金属の特徴の多くは失われ、あるいは変化し、全く別の物質とも言える状態になる。そのため、貴金属以外の元素を触媒活性サイトとして利用する研究も国内外で行われている。例えば、国内で長年研究されている酸化物触媒や、カーボンアロイ触媒が挙げられる。非貴金属という視点での開発が主だったが、理想的な活性サイトの形成し、白金を凌駕する視点での開発が必要である。

上記の超低白金触媒と同様に、貴金属結晶表面を用いないため、全く異なる活性サイトの形成が可能である。理想的な活性サイトについての議論も様々な視点から行われており、中でも理論

予測の研究では、Cytochrom c 酸化酵素の酸素還元活性は理想的な状態である可能性が予測されている[28]。酵素の車載用燃料電池への応用は、活性サイト密度、電子伝導性、耐久性のいずれも現実的ではないかもしれないが、活性サイトおよびそこへの電子供給という視点で重要な視点を与えてくれる研究である。計算技術やデータを用いたインフォマティクス技術などの進展により、燃料電池に最適な活性サイトの予測が期待される。

(4) 電解質膜材料

電解質膜材料では、特にイオン伝導メカニズムについて、どのような想定で何を狙うのかを明確にした開発が必要である。この1文だけでも電解質膜の研究者にとっては重たい意味を持つかもしれないが、革新的な材料開発のために間口を広げる意図として示している。プロトン伝導体の研究の歴史は長く、イオンを粒子として扱う古典的な伝導現象についての基礎学理は30年以上前に確立されていると言える状況である[29]。例えば、酸素原子間をプロトンが水素結合を介して移動する場合、酸素原子間の距離が約2.7 ~ 2.95 程度であることが望ましいことが分かっており[30]、新たなプロトン伝導体の伝統的な設計指針の1つとなっている。

電解質膜として利用可能なマクロな視点での固体材料に限ってみると、伝導メカニズムの違いから、オキソニウムカチオン（水和プロトン）としての伝導体と無水プロトン伝導体とに大別することができる[29]。前者は固体マトリックス中の液相をプロトンが随伴水を伴いながら移動することで、活性化エネルギーが低い特徴を有する。Nafion を含む固体高分子はこちらの分類に属する。後者は固体中でプロトンが安定に存在可能なサイト間をホッピングしながら移動するため、活性化エネルギーが高く、プロトンのみを輸送可能という特徴がある。ゼオライトやプロトン置換 アルミナなどは、含水は必要であるが、随伴水を伴わない伝導という意味では、燃料電池応用の視点ではこの分類に属する[31,32]。

これら固体イオン伝導体を燃料電池の電解質膜にするためには、イオン伝導性以外にも必要な要素は多い。電解質膜材料に求められる基本特性は、「選択的イオン伝導性」と「長期の安定性」である。前者は、2つの電極間で発電反応に関与するイオン、現行システムであればプロトンのみを伝導し、それ以外の分子やイオンや電子の輸送を遮断することが必要である。現実的には「成膜可能かどうか」もイオン伝導体としての基礎研究から燃料電池の研究へと移行する重要な因子となっている。

また、材料全体を考えた場合、水酸化物イオン伝導体を用いたアニオン交換膜形燃料電池の可能性も排除すべきではない。特に触媒材料の元素選択の幅が広がり、2.6.4(3)で記載したように、アルカリ性では非常に高い活性が報告されている。米国や中国でのアニオン交換膜の研究例や投資が目立つが、耐久性と伝導性ともにプロトン交換膜には及ばないのが現状であり、ゲームチェンジャー材料としての研究投資と理解できる。同様に、今後の水素社会の様々な検討の中で、水素ではなく、より高エネルギー密度の燃料を用いる場合、ヒドリドや酸化物イオンなど別の化学種の伝導も車載用燃料電池応用の可能性はあるため、広い視野での情報収集と柔軟な見直しは必要である。

現状では、高分子電解質を成膜したプロトン交換膜が現行システムの要求を満たす材料であるが、2.6.3で示したように、電解質膜については、120 以上（スタック出口冷却水温度 120 + 5 程度）の環境での作動が必要になり、さらにイオン抵抗の低減が求められている。このような

視点で、イオン伝導メカニズムを意識しつつ、可能性のある研究開発の方向性について以下に示す。

随伴水を伴う膜の高度化

上述のように機械的強度などを保持するマトリックス内に形成する水相を用いてイオン輸送を行うタイプの材料であり、比較的成膜性に優れた材料が作りやすい。現行のパーフルオロカーボン材料の電解質膜は成膜性が高く、膜としての機械的強度が高く、車載用サイズであっても均質性に優れた成膜が可能になった技術の結晶とも言える材料系である。しかし、選択性には原理的な限界があり、化学的な耐久性も十分ではないため、ラジカルクエンチャや補強膜の検討も必要であるため、総合的な開発が必要である。

水和プロトンの熱運動に起因する伝導メカニズムにおいては、材料の違いによる差は限定的であり、イオン抵抗を減らすためには2つのアプローチが存在すると考えられる。1つ目はイオン濃度の増大であり、水和エネルギーに起因する膨潤が起こり、ゲル状物質ではない固体材料の場合、体積変化に限界があるため材料の機械的強度との背反となる[33]。また、膨潤してしまう場合はガス遮蔽性との背反にもなる。2つ目はイオン伝導距離の短縮化であり、イオン伝導パスの屈曲性の低減や薄膜化により可能になる。薄膜化も機械的強度とガス遮蔽性との背反になる。薄膜化によって両電極間の水の非平衡状態は緩和されやすく、また、電解質膜が水和プロトンを維持するために保水性を有するため、高温作動には厚膜時よりも適している可能性がある。このように、イオン抵抗の低減について、薄膜化がシステム全体として考えた場合も適したアプローチと言える。

作動温度からの要求を整理すると、100℃以上の動作を目論む場合、液水の沸点以上でも水を安定に保持する材料設計が現行材料の開発の延長として自然な内容と考えられる。さらに溶出しないう別溶媒や分子で、触媒被毒に繋がらないものを用いることも安定なプロトン輸送の1つの解決策と考えられる。

随伴水を伴わない材料の膜化技術の検討

現行の高分子電解質とは異なり、随伴水が無く、水分子の移動が電極間で存在しなくなるため、システム全体としての水管理が大きく異なることになる可能性がある。水の沸点での不連続な特性変化が回避でき、薄膜による燃料クロスリークも回避できる可能性がある材料である。このタイプのイオン伝導体に関しては、基礎研究は多いが、膜化が難しく、基礎研究の論文が大半である。例えば、固体イオン伝導体の分野では、無水プロトン伝導体は盛んに研究された分野であり、 CsHSO_4 などの分子の局所的な運動を利用した高速イオン伝導体が知られているが、室温での伝導率が高くなく、それを薄膜化で補うには機械的強度が充分ではない[34]。固体中の移送の選択制は高いものの、無機固体結晶であるため、粒界による選択制の低下や膜化が難しい。

このため、固体高分子膜が長年の中心的な存在であり、現状での最良の選択であることは間違いない。一方で、近年のプロトン伝導の研究では、プロトンの量子性を用いた研究が進展している[35]。この区分の材料では、プロトンのみを選択的に透過させることが可能と言われており、基礎科学的な視点では究極の篩技術として研究が進められている。このような量子篩効果を用いたプロトンの選択的透過はグラフェンや六方晶窒化ホウ素ナノシートでの報告例があり、分子レベ

ルの薄膜での分離が可能になる技術である[35,36]。燃料電池への応用の視点では、電子のトンネル伝導が防げる範囲の分子レベルの薄膜でも、ガス遮蔽性とプロトン伝導性が確保できる可能性があり、粒界制御などの分子・ナノレベルでの物質操作による材料創生技術が必要になる。このような分子膜を利用した電解質膜の研究が活発になると考えられる。

このタイプの電解質膜は新たな学理に根差した部分が強く、基礎研究から応用までの幅広い支援が必要である。また、膜電極接合体全体の設計や加湿システムに変化をもたらす可能性があり、材料の検討と、その後のシステム最適化が材料研究者への負荷が少なくなるように国費プロジェクトとして明確な指針をもって進められるのが望ましい。

アニオン交換膜

アニオン交換膜形燃料電池では、非貴金属触媒が利用できるため、コスト面でのメリットが大きい。アニオン交換基と溶存 CO₂ によって生じる炭酸イオンが、水酸化物イオンの伝導を妨害してしまい、ガスの純度管理などのコストは避けられない可能性がある[33]。しかし、電極触媒に耐酸性を求めるプロトン交換膜と異なり、触媒などの他の材料の選択が全く異なるため、ゲームチェンジ材料となりえるため、システム全体としてのメリットとデメリットを検討しつつ、可能性は検討し続けるべきである。

固体高分子膜に限らず、水酸化物イオン伝導膜の研究は基礎研究に関する学術論文ベースでは盛んである。プロトン伝導膜と同様に機械的強度の向上が鍵であり、現状ではプロトン伝導膜よりイオン伝導率が低く（約 1/3 ~ 1/2）、さらに薄膜化が難しい材料である[33]。高分子膜では、プロトンに比べ質量の大きな水酸化物イオンの移動が必要であり、現行のメカニズムでは活性化エネルギーが高く、プロトン伝導膜よりも抵抗が大きい。また、第四級アンモニウムを水酸化物イオンの対カチオンとする高分子を用いる場合では、改善はされてきているものの、その化学的安定性の低さが長年の課題として残っている。

高分子膜の研究は、燃料電池を目的としたアニオン交換膜として現在も主たるものと考えられるが、無機ナノシートを用いたアニオン交換膜の研究例も学術論文では存在する。例えば、層状複水酸化物から得たナノシート材料で層間と粒界を用いた伝導体の研究例がある[37,38]。これら新材料の研究は、燃料電池用途のみではなく、水電解の分野での利用も含めた広い応用が見込まれるため、開発の相乗的な加速が可能である。国内では、これらの分野のどの領域での開発を軸とするかの調整も重要である。

（５）他の材料・部材

上述の主要材料以外にも燃料電池を動作させるために必須な部材は多く、それらも大切であるが、研究開発のロードマップを考え、時間軸で各項目の依存関係を見たときには、主要材料の特徴に大きく依存する材料や部材の検討はプロジェクトとして俯瞰した調整が必要である。

（参考文献）

- [1] S. Steiner, J. Wolf, S. Glatzel, A. Andreou, J. M. Granda, G. Keenan, T. Hinkley, G. Aragon-Camarasa, P. J. Kitson, D. Angelone, L. Cronin, Organic synthesis in a modular robotic system driven by a chemical programming language. *Science*. **363**, 1–126 (2019).

- [2] C. W. Coley, D. A. Thomas, J. A. M. Lummiss, J. N. Jaworski, C. P. Breen, V. Schultz, T. Hart, J. S. Fishman, L. Rogers, H. Gao, R. W. Hicklin, P. P. Plehiers, J. Byington, J. S. Piotti, W. H. Green, A. John Hart, T. F. Jamison, K. F. Jensen, A robotic platform for flow synthesis of organic compounds informed by AI planning. *Science*. **365** (2019), doi:10.1126/science.aax1566.
- [3] A. Adamo, R. L. Beingessner, M. Behnam, J. Chen, T. F. Jamison, K. F. Jensen, J. C. M. Monbaliu, A. S. Myerson, E. M. Revalor, D. R. Snead, T. Stelzer, N. Weeranoppanant, S. Y. Wong, P. Zhang, On-demand continuous-flow production of pharmaceuticals in a compact, reconfigurable system. *Science*. **352**, 61–67 (2016).
- [4] B. Burger, P. M. Maffettone, V. V. Gusev, C. M. Aitchison, Y. Bai, X. Wang, X. Li, B. M. Alston, B. Li, R. Clowes, N. Rankin, B. Harris, R. S. Sprick, A. I. Cooper, A mobile robotic chemist. *Nature*. **583**, 237–241 (2020).
- [5] S. H. Jang, Y. Tateyama, R. Jalem, High-Throughput Data-Driven Prediction of Stable High-Performance Na-Ion Sulfide Solid Electrolytes. *Adv. Funct. Mater.* (2022), doi:10.1002/adfm.202206036.
- [6] M. Zhong, K. Tran, Y. Min, C. Wang, Z. Wang, C. T. Dinh, P. De Luna, Z. Yu, A. S. Rasouli, P. Brodersen, S. Sun, O. Voznyy, C. S. Tan, M. Askerka, F. Che, M. Liu, A. Seifitokaldani, Y. Pang, S. C. Lo, A. Ip, Z. Ulissi, E. H. Sargent, Accelerated discovery of CO₂ electrocatalysts using active machine learning. *Nature*. **581**, 178–183 (2020).
- [7] M. M. Noack, G. S. Doerk, R. Li, J. K. Streit, R. A. Vaia, K. G. Yager, M. Fukuto, Autonomous materials discovery driven by Gaussian process regression with inhomogeneous measurement noise and anisotropic kernels. *Sci. Rep.* **10** (2020), doi:10.1038/s41598-020-74394-1.
- [8] S. Ament, M. Amsler, D. R. Sutherland, M. C. Chang, D. Guevarra, A. B. Connolly, J. M. Gregoire, M. O. Thompson, C. P. Gomes, R. B. Van Dover, Autonomous materials synthesis via hierarchical active learning of nonequilibrium phase diagrams. *Sci. Adv.* **7**, 4930 (2021).
- [9] J. H. Montoya, K. T. Winther, R. A. Flores, T. Bligaard, J. S. Hummelshøj, M. Aykol, Autonomous intelligent agents for accelerated materials discovery. *Chem. Sci.* **11**, 8517–8532 (2020).
- [10] S. Sun, N. T. P. Hartono, Z. D. Ren, F. Oviedo, A. M. Buscemi, M. Layurova, D. X. Chen, T. Ogunfunmi, J. Thapa, S. Ramasamy, C. Settens, B. L. DeCost, A. G. Kusne, Z. Liu, S. I. P. Tian, I. M. Peters, J. P. Correa-Baena, T. Buonassisi, Accelerated Development of Perovskite-Inspired Materials via High-Throughput Synthesis and Machine-Learning Diagnosis. *Joule*. **3**, 1437–1451 (2019).
- [11] P. Nikolaev, D. Hooper, N. Perea-López, M. Terrones, B. Maruyama, Discovery of wall-selective carbon nanotube growth conditions via automated experimentation. *ACS Nano*. **8**, 10214–10222 (2014).
- [12] X. Wang, Z. Li, Y. Qu, T. Yuan, W. Wang, Y. Wu, Y. Li, Review of Metal Catalysts for Oxygen Reduction Reaction: From Nanoscale Engineering to Atomic Design. *Chem.* **5** (2019), pp. 1486–1511.
- [13] A. Kulkarni, S. Siahrostami, A. Patel, J. K. Nørskov, Understanding Catalytic Activity Trends in the Oxygen Reduction Reaction. *Chem. Rev.* **118** (2018), pp. 2302–2312.
- [14] J. H. Montoya, L. C. Seitz, P. Chakthranont, A. Vojvodic, T. F. Jaramillo, J. K. Nørskov, Materials for solar fuels and chemicals. *Nat. Mater.* **16**, 70–81 (2016).
- [15] R. Gao, J. Wang, Z. F. Huang, R. Zhang, W. Wang, L. Pan, J. Zhang, W. Zhu, X. Zhang, C. Shi, J. Lim, J. J. Zou, Pt/Fe₂O₃ with Pt–Fe pair sites as a catalyst for oxygen reduction with ultralow Pt loading. *Nat.*

Energy. **6**, 614–623 (2021).

- [16] V. R. Stamenkovic, B. Fowler, B. S. Mun, G. Wang, P. N. Ross, C. A. Lucas, N. M. Markovic, Improved oxygen reduction activity on Pt₃Ni(111) via increased surface site availability. *Science*. **315**, 493–497 (2007).
- [17] Q. Li, L. Wu, G. Wu, D. Su, H. Lv, S. Zhang, W. Zhu, A. Casimir, H. Zhu, A. Mendoza-Garcia, S. Sun, New Approach to Fully Ordered fct-FePt Nanoparticles for Much Enhanced Electrocatalysis in Acid. *Nano Lett.* **15**, 2468–2473 (2015).
- [18] L. Bu, N. Zhang, S. Guo, X. Zhang, J. Li, J. Yao, T. Wu, G. Lu, J. Y. Ma, D. Su, X. Huang, Biaxially strained PtPb/Pt core/shell nanoplate boosts oxygen reduction catalysis. *Science*. **354**, 1410–1414 (2016).
- [19] J. Li, Z. Xi, Y. T. Pan, J. S. Spendelow, P. N. Duchesne, D. Su, Q. Li, C. Yu, Z. Yin, B. Shen, Y. S. Kim, P. Zhang, S. Sun, Fe Stabilization by Intermetallic L10-FePt and Pt Catalysis Enhancement in L10-FePt/Pt Nanoparticles for Efficient Oxygen Reduction Reaction in Fuel Cells. *J. Am. Chem. Soc.* **140**, 2926–2932 (2018).
- [20] J. Li, S. Sharma, X. Liu, Y. T. Pan, J. S. Spendelow, M. Chi, Y. Jia, P. Zhang, D. A. Cullen, Z. Xi, H. Lin, Z. Yin, B. Shen, M. Muzzio, C. Yu, Y. S. Kim, A. A. Peterson, K. L. More, H. Zhu, S. Sun, Hard-Magnet L10-CoPt Nanoparticles Advance Fuel Cell Catalysis. *Joule*. **3**, 124–135 (2019).
- [21] T. Kumeda, H. Tajiri, O. Sakata, N. Hoshi, M. Nakamura, Effect of hydrophobic cations on the oxygen reduction reaction on single crystal platinum electrodes. *Nat. Commun.* **9** (2018), doi:10.1038/s41467-018-06917-4.
- [22] B. Genorio, D. Strmcnik, R. Subbaraman, D. Tripkovic, G. Karapetrov, V. R. Stamenkovic, S. Pejovnik, N. M. Markovic, Selective catalysts for the hydrogen oxidation and oxygen reduction reactions by patterning of platinum with calix[4]arene molecules. *Nat. Mater.* (2010), doi:10.1038/NMAT2883.
- [23] D. Y. Chung, S. W. Jun, G. Yoon, S. G. Kwon, D. Y. Shin, P. Seo, J. M. Yoo, H. Shin, Y. H. Chung, H. Kim, B. S. Mun, K. S. Lee, N. S. Lee, S. J. Yoo, D. H. Lim, K. Kang, Y. E. Sung, T. Hyeon, Highly Durable and Active PtFe Nanocatalyst for Electrochemical Oxygen Reduction Reaction. *J. Am. Chem. Soc.* **137**, 15478–15485 (2015).
- [24] X. Zhu, X. Tan, K. H. Wu, S. C. Haw, C. W. Pao, B. J. Su, J. Jiang, S. C. Smith, J. M. Chen, R. Amal, X. Lu, Intrinsic ORR Activity Enhancement of Pt Atomic Sites by Engineering the d-Band Center via Local Coordination Tuning. *Angew. Chemie Int. Ed.* **60**, 21911–21917 (2021).
- [25] L. Chong, J. Wen, J. Kubal, F. G. Sen, J. Zou, J. Greeley, M. Chan, H. Barkholtz, W. Ding, D.-J. Liu, “Ultralow-loading platinum-cobalt fuel cell catalysts derived from imidazolate frameworks,” (available at <https://www.science.org>).
- [26] X. Shen, T. Nagai, F. Yang, L. Q. Zhou, Y. Pan, L. Yao, D. Wu, Y. S. Liu, J. Feng, J. Guo, H. Jia, Z. Peng, Dual-Site Cascade Oxygen Reduction Mechanism on SnOx/Pt-Cu-Ni for Promoting Reaction Kinetics. *J. Am. Chem. Soc.* **141**, 9463–9467 (2019).
- [27] Y. Yamamoto, S. Kasamatsu, O. Sugino, Scaling Relation of Oxygen Reduction Reaction Intermediates at Defective TiO₂ Surfaces. *J. Phys. Chem. C*. **123**, 19486–19492 (2019).
- [28] C. H. Kjaergaard, J. Rossmeisl, J. K. Nørskov, Enzymatic versus inorganic oxygen reduction catalysts: Comparison of the energy levels in a free-energy scheme. *Inorg. Chem.* **49**, 3567–3572 (2010).

- [29] P. Colomban, (*Symbols*) *Proton conductors Solids, membranes and gels-materials and devices* (Cambridge online, 2014).
- [30] A. Potier, *1 The hydrogen bond and chemical parameters favouring proton mobility in solids* (Cambridge online, 2014).
- [31] P. Colomban, (*Index*) *Proton conductors Solids, membranes and gels materials and devices* (2014).
- [32] S. Tominaka, A. K. Cheetham, Intrinsic and extrinsic proton conductivity in metal-organic frameworks †. *RSC Adv.* **4** (2014), doi:10.1039/c4ra11472f.
- [33] S. Gottesfeld, D. R. Dekel, M. Page, C. Bae, Y. Yan, P. Zelenay, Y. S. Kim, Anion exchange membrane fuel cells: Current status and remaining challenges. *J. Power Sources.* **375**, 170–184 (2018).
- [34] P. Colomban, A. Novak, in *Proton Conductors: Solids, Membranes and Gels - Materials and Devices*, P. Colomban, Ed. (Cambridge University Press, Cambridge, 2014), pp. 165–182.
- [35] S. Hu, M. Lozada-Hidalgo, F. C. Wang, A. Mishchenko, F. Schedin, R. R. Nair, E. W. Hill, D. W. Boukhvalov, M. I. Katsnelson, R. A. W. Dryfe, I. V. Grigorieva, H. A. Wu, A. K. Geim, Proton transport through one-atom-thick crystals. *Nature.* **516**, 227–230 (2014).
- [36] Y. Jiang, J. Ma, C. Yang, S. Hu, One-Atom-Thick Crystals as Emerging Proton Sieves. *J. Phys. Chem. Lett.* **2021. 12**, 47 (2022).
- [37] K. Tadanaga, Y. Furukawa, A. Hayashi, M. Tatsumisago, Direct ethanol fuel cell using hydrotalcite clay as a hydroxide ion conductive electrolyte. *Adv. Mater.* **22**, 4401–4404 (2010).
- [38] P. Sun, R. Ma, X. Bai, K. Wang, H. Zhu, T. Sasaki, “Single-layer nanosheets with exceptionally high and anisotropic hydroxyl ion conductivity,” (available at <https://www.science.org>).

2.6.5 評価・解析技術

(1) 材料・プロセス探索加速のための DX 技術

2.6.3 および 2.6.4 の材料設計指針で述べたように、2035 年目標および 2040 年目標達成シナリオでは、従来の性能を大幅に向上させる触媒・電解質膜・アイオノマなどの革新的な材料が必要とされている。材料探索の範囲が大幅に広がり、また、運転条件の拡大に伴う性能の追従性、および、耐久特性との両立など様々な開発要素を伴う材料開発の速度を向上させるためには、材料探索高速化や開発期間の短縮が必要となる。従来の労働集約型の試行錯誤による材料開発では開発速度の高速化は限定的であるため、マテリアルズ・インフォマティクス (MI) を用いた材料設計指針の提示に基づく開発が必要となる。従来、性能設計やプロセス最適化に用いる説明変数データについて、各計測法で別々に取得していたため、データ取得に時間がかかる、データの信頼性が低いなどの問題が生じた。今後、計測のフィジカル空間での効率化については、同一試料の構造および電子構造データを同時にマルチモーダルでの取得、計測のロボティクス利用などを活用した計測インフォマティクスの活用が必要となる。触媒開発についての DX 技術活用例を図 2.6.5-1 に示す。触媒の自動合成と、粉末 X 線回折 (XRD)、X 線吸収分光 (XAFS)、小角 X 線散乱 (SAXS)、高エネルギー X 線回折・二体相関関数解析 (PDF) などの既存の解析ツールのプラットフォーム化を組み合わせる。階層的構造情報のロボティクス利用による高速取得可能なシステムの開発によるフィジカル空間での情報取得の効率化と、触媒性能を教師データとして用いたバーチャル空間での最適触媒構造の迅速決定がなされる。

こうした DX 技術によって強化された高度解析技術やマルチモーダル計測・解析技術は、触媒開発のほか、電解質膜の開発、触媒層構造の最適化、温度・湿度などの使用環境に合わせた最適化、セパレータやシール材料、開発工程における課題解決など、適切な計測システムのデザインにより幅広く適用することが期待される。

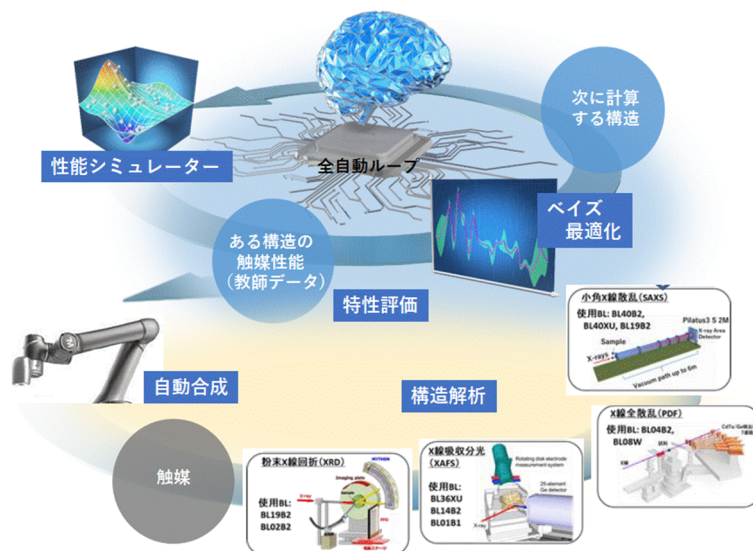


図 2.6.5-1 DX 技術を用いた触媒開発の高速化

材料の高度化に加えて、それらを用いた燃料電池の作製プロセスの高度化も同時に行う必要がある。現在の燃料電池作製プロセスは、触媒の調合・混練、塗工・乾燥、成型、接着などの多くの過程から構成されている。燃料電池の量産化に伴い、このプロセスの最適化を迅速に行い、高速化をはかることは、コスト低減に直結する。図 2.6.5-2 に示すように、一般的な分析・計測装置に加えて、様々なプロセス過程の状態をリアルタイムで計測するマルチモーダル operando 解析により把握し、データ科学を活用することにより、プロセスの制御因子を明らかにして最適なプロセスを設計することが出来る。

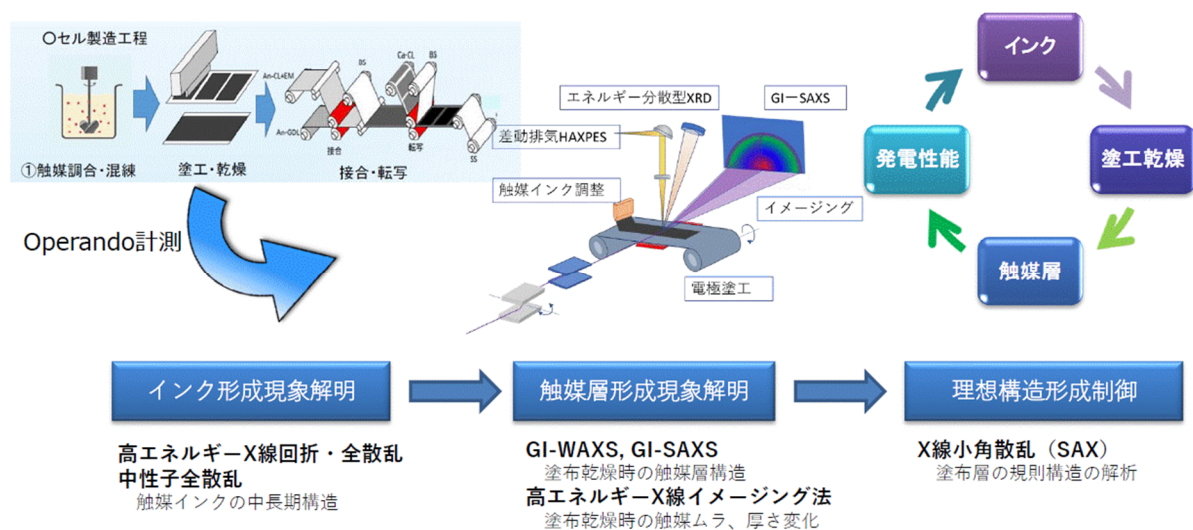


図 2.6.5-2 燃料電池の作製プロセスの DX 技術を用いた高度化

(2) 現象・機構解明(高度解析)

燃料電池の中では反応に伴い、触媒界面における電荷移動、マイクロメートルオーダーの触媒層における反応分布、数十マイクロメートル以上の空間スケールでのセルやスタックにおける反応分布や水分分布と、様々な空間・時間分布を有する反応の階層構造が存在する。従って後述のように様々な解析手法を組み合わせることが必要となる。さらに、2040 年目標達成シナリオで目指す材料の探索・開発に向けて、機能発現の根幹を見極めたり、複雑な構造・プロセスを可視化したりする高度な現象手法・機構解明を行う高度解析の活用が必須である。2040 年シナリオで目標となる材料は、現在の材料技術からは不連続な点にあり、触媒や電解質膜などの材料は、既存材料とは異なる構造を持ち、異なる原理で機能すると想定される。さらに、これらの新材料を用いた燃料電池を構成するために、材料を構成する原子分子レベルの構造・反応解析のみならず、界面・触媒層、MEA、セル、スタック、製品に至るマルチ時空間スケールの構造解析と各々の階層を支配する現象スケールをつなぐトランススケール解析を網羅的に可視化する包括的な解析の実装が望まれる。

触媒や電解質膜材料における現象・機構を解明するには、単一原子レベルでの現象解析が求められる、計測感度・精度の飛躍的な向上が必要である。計測感度・精度の向上は、放射光 X 線の輝度や中性子線のフラックス、電子線の加速電圧のようなプローブの改良、検出器の高性能化といったハードウェア等のフィジカルの改良といった側面と DX を活用したスペクトル・画像解析等のバーチャルな性能向上という二つの側面から進むと期待される。触媒における反応解析や電解質膜における水・プロトン・酸素の移動現象などの解析には *operando* 計測・解析の実現など計測環境の整備が欠かせない。触媒や電解質膜単体の性能に加えて、触媒担体やアイオノマとともに触媒層・MEA を形成する際に、その状態での現象を解析し性能を最適化するために、複合的な構造や要因に対する マルチモーダル解析や、触媒層・MEA 内の階層構造・反応分布を含めた性能を評価する マルチ・トランススケール解析が必要となる。マルチモーダル解析は、複数の構成要素・性能支配要因が存在する際に、その構成要素に対して感度が高くなる計測を選択し、複数の構造パラメータをもとに、全体の性能を最適化するための解析である。既存(あるいは新規)の解析手法のプラットフォーム化により実現される。トランススケール解析は、大視野/高分解能解析のようなコストの高い計測となるため、計測の高速化・効率化、自動・自律計測が必要になる。高感度・高精度、オペランド環境下で取得された大量データをデータベース化し、活用する DX 化を推進するインフラの整備も必要である。

高度計測においては、測定対象に対して最も感度が高いエネルギーをもつプローブを選択し、その応答を解析することで構造や現象を把握する。硬 X 線から軟 X 線領域の X 線を用いる放射光解析、電氣的に中性な特徴を持つ中性子線解析、電子をプローブとして高い空間分解能をもつ電子顕微鏡解析・電子分光、ラマン・赤外・テラヘルツ分光を利用する振動分光[1]、電磁波を利用する核磁気共鳴、電子スピン共鳴、ナノプローブを利用する走査プローブ顕微鏡など[2,3]、多様な材料・現象からなる PEFC の解析においては、多様な解析技術を総合的に活用することが望まれる。

また、PEFC 向けに開発された解析技術は、その他の燃料電池系や水素製造技術として有望な水電解技術の現象・プロセス解析とも共通点が多く、それらへの適用も有効である。とりわけ、大規模な投資が必要な量子ビーム系解析技術については、共通化した技術開発が望ましい。



図 2.6.5-3 現象・機構解明のための解析ツール

(参考文献)

- [1] T. Morimoto, M. Nagai, Y. Minowa, M. Ashida, Y. Yokotani, Y. Okuyama, Y. Kani, Microscopic ion migration in solid electrolytes revealed by terahertz time-domain spectroscopy. *Nat Commun* **10**, 2662 (2019).
- [2] T. Motegi, K. Yoshimura, Y. Zhao, A. Hiroki, Y. Maekawa, Direct Observation and Semiquantitative Analysis of Hierarchical Structures in Graft-Type Polymer Electrolyte Membranes Using the AFM Technique. *Macromolecules* **54** (9), 4128-413 (2021)
- [3] R. Kempaiah, G. Vasudevamurthy, A. S ubramanian, Scanning probe microscopy based characterization of battery materials, interfaces, and processes. *Nano Energy* **65** 103925 (2019)

【量子ビーム解析技術】

国内には、世界でも最高レベルの性能を誇る先端大型放射光施設（SPring-8）、大強度陽子加速器施設（J-PARC）などの放射光および中性子実験施設が稼働しており、主として高輝度軟 X 線を扱う 3GeV 先端放射光施設（NanoTerasu）が 2024 年から稼働している。各大型実験施設においては、今後数年のうちに大規模なアップグレードが実施、または、計画されており、ビーム強度においては、世界トップの実験施設として、我が国の解析における大幅な国際競争力の強化につながるものとして期待されている。ビーム強度の大幅な増強や新たな高性能検出器や新たな計測技術の導入により、operando（実動作下、燃料電池の場合は発電状態で）計測、DX 化も含めた計測・解析手法の飛躍的向上が期待される。SPring-8 で利用可能な硬 X 線、NanoTerasu で利用可能な軟 X 線、J-PARC で利用される中性子は異なる性質をもち、マルチスケールの高度な現象解析をカバーするため、相補的な活用が期待され、3 つの施設で取得されるデータを DX 技術によりつなぎ、統合的に活用することが我が国の強みとなる。



SPring-8		ナノテラス	J-PARC
線源	放射光X線		中性子線
	高エネルギー領域(硬X線)	低エネルギー領域(軟X線)	
対象	構造 セルイメージング プロセス技術	化学結合 長時間・高空間分解能 新原理材料開発	構造・分子運動 大視野イメージング 材料・部品開発
技術 (手法二重例)	高エネルギーX線回折・全散乱 雰囲気制御下の触媒および触媒担体の 中長期構造	軟X線XAFS 燃料電池反応進行時の触媒上の酸素種の 電子構造・局所構造	中性子イメージング 燃料電池作動状態でのフルサイズセルの 水/氷分布状態
	X線小角散乱(SAX) 雰囲気制御下の電解質の macroscale の 規則構造の解析	高分解能軟X線RIXS 雰囲気制御下の触媒および触媒担体の 酸素種の電子構造・局所構造	中性子小角散乱(SANS)/反射率(NR) アイオノマ/電解質膜、接合界面のナノスケール 構造
	GI-WAXS, GI-SAXS 雰囲気制御下のアイオノマの構造、配向性	高分解能軟X線タイコグラフィ 触媒層中のカーボン担体、アイオノマの三次元構 造	中性子弾性散乱(QENS) 触媒層/電解質膜の水・プロトンの分子運動 (拡散・振動・回転)
組織・人材	産業界と連結 ダイナミックな体制運営 予算		

図 2.6.5-4 国内の量子ビーム施設とその特徴

主に NanoTerasu で利用可能な軟 X 線(低エネルギー)は、表面構造や化学結合に敏感なため、化学結合状態の解析や高空間分解能イメージングに適しており、接着界面やセパレータ表面処理解析のような現産業課題への対応、35 年目標である高温運転時の現象解析や劣化解析による耐久性向上課題への適用、2040 年目標である新原理材料の開発への適用が期待される。特に、軟 X 線 XAFS、高分解能 RIXS、AP(Ambient pressure)-PES は、NanoTerasu で実現される高輝度軟 X 線の活用で、大幅に時間・空間分解能が向上する。2040 年目標でのカソード触媒開発において、スケーリング則からの脱却の重要性が示されているが、そのためには触媒反応機構をより定量的に解明する必要がある。燃料電池反応は酸素や水等の含酸素分子が関与する反応であり、触媒界面での酸素の振る舞いを直接解析することが望まれる。酸素の軌道を直接的に観察する手法に XAFS や XES がある。XAFS では酸素の非占有 $2p$ 軌道の電子状態を知ることができ、RIXS では占有 $2p$ 軌道の電子状態を知ることができる。これらの酸素の吸収端(電子軌道)の情報とシミュレーションとの連携により反応機構の解明がすすむことが期待される。NanoTerasu では、コヒーレンスの高い光源が得られるので、タイコグラフィのような空間分解能が高いイメージングにより、触媒反応や電解質膜における現象解析を、単一原子レベルから可能になると期待される。

SPring-8 では、硬 X 線(高エネルギー)領域における各種計測の適用が既に活発に行われている。硬 X 線は、高い物質透過性を持ち、回折(X 線回折、反射率) 散乱(小角散乱、全散乱、コンプトン散乱) 分光(吸収・発光分光・光電子分光) イメージングなど多くの X 線解析技術の適用が可能である。既に DX 技術との連携の際に述べているが、これらの多くの既存の解析ツールのプラットフォーム化が望まれる。今後、*operando* 計測も含めた材料の構造解析、セルイメージング、プロセス解析への適用が可能である。実材料・電極レベルで多様な解析が可能なることから、単一材料の解析はもちろん可能であるが、担持された触媒やアイオノマで被覆された触媒層など、不均一な分布をもつ材料のマルチモーダル解析へ展開が可能である。また、触媒インクの乾燥過程のような触媒層形成プロセスにおける多成分系の複雑な構造・現象解析への適用も期待される。こうした計測は、多様な条件下でのデータを取得し、MI・PI と連動させることで活用さ

れることになる。そのために、DX と連動した専用の計測装置、合成装置を備えた専用ビームライン化もひとつの選択肢と考えられる。

中性子は水素を含む材料・部品の解析に威力を発揮する。中性子は原子番号の小さな水素に敏感なため、燃料電池の出力性能を左右する水の動的挙動や、プロトン伝導の解析、アイオノマの被覆・析出状態の解析に有用である。また、中性子は電荷を持たないため物質に対する透過率が高く、非破壊で繰り返し評価できることから、セルのレベルでの *operando* 測定が可能となる。燃料電池に応用されている解析手法の概要を下図に示す。これらの手法は、燃料電池におけるプロトン伝導、ガス輸送、水輸送等の物質輸送に関する有用な情報を提供する。

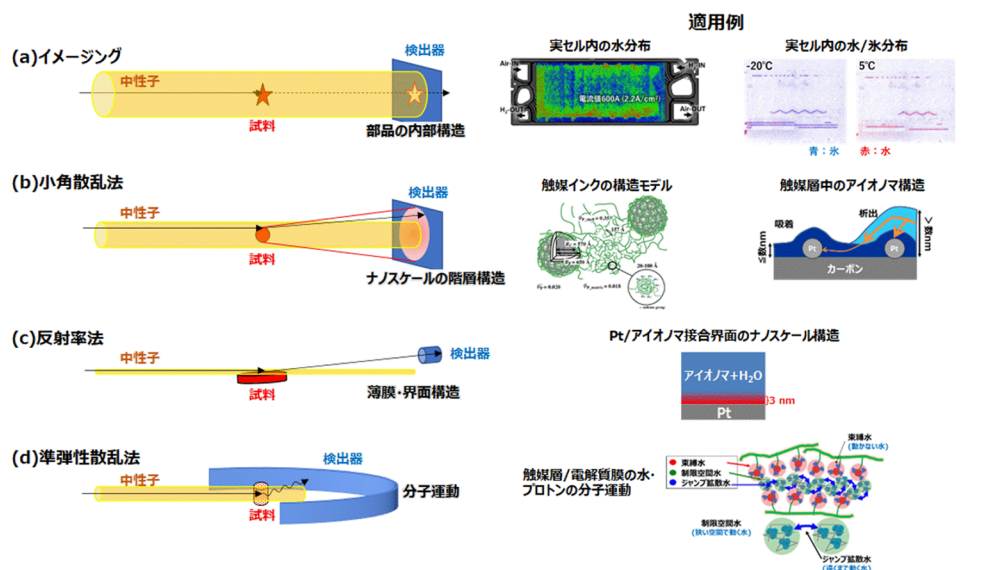


図 2.6.5-5 中性子による材料・部品の各種解析手法と適用例

中性子イメージングは試料の透過像を観測する技術であり、X 線イメージングと比較すると、透過率が軽元素にも敏感であるため、金属中の有機物等の軽元素を可視化する際に優位である。そのため金属セパレータで締結された燃料電池セル内において、発電により生成した水分分布の解析に用いることができる。また、一般的に、中性子イメージングは放射光 X 線イメージングに比べ、大視野観察が可能であり、部品をそのまま非破壊で内部状態を観察できる。MLF (J-PARC) の RADEN ビームライン (BL22) において、トヨタ自動車の第 2 世代 MIRAI の実機セルサイズ (約 300 cm²) の水の挙動を可視化することに成功している[4]。

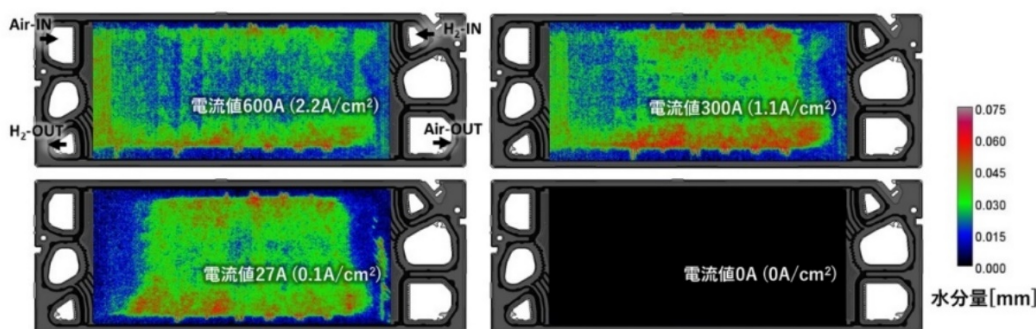


図 2.6.5-6 中性子イメージングによる水の挙動の可視化[4]

エネルギー分析型のイメージングを適用した場合、分子の運動性の違いから液水よりも氷の方が、透過率が数%高いため、液水と氷とを区別することができる [5]。燃料電池は、氷点下においても起動・運転されるため、内部での氷の生成部位や生成機構の解明は、実装における重要な課題である。最近、氷点下での発電条件下における液水・氷の分布解析、および始動模擬条件下における水(相識別はしていない)の挙動解析が実施されているが[6]、その他の中性子をプローブとした技術として、小角中性子散乱法(SANS)を用いた触媒インクやアイオノマ構造などのナノスケールの階層構造評価[7,8]、中性子反射率法(NR)を用いたアイオノマ薄膜の構造解析[9]、中性子準弾性散乱法(QENS)を用いたアイオノマ中のプロトン伝導解析 [10]などのさらなる適用が期待される。

J-PARC での中性子イメージングによる大視野観察と、SPring-8 での放射光イメージングによる高分解能観察を組み合わせることで、燃料電池内部における現象をさらに深く理解することが可能である。例えば、J-PARC での実機セルの観察と、SPring-8 での小型セルの観察において、それぞれのセルの運転条件を揃えたところ、実機セルの上流から下流までの液水分布の変化を、小型セルで再現できることが報告された[11]。これは実機セルの面内方向数十 cm に渡り形成される巨視的な液水分布を、セルの面直方向数百 μm における微視的な水の挙動で解釈できることを意味する。このように、中性子イメージングと放射光イメージングを相補的に利用することで、燃料電池内部における水の挙動を包括的に理解できることが期待される。

水素製造技術として有望視されている水電解セルは、燃料電池と類似の構成部材を多く有するため、これまで説明した燃料電池の解析技術の応用が可能である。PEM 型水電解を例にすると、プロセス解析による酸素極側触媒層における Ir の担持量低減、Operando 中性子イメージングによる多孔質部材内部の気泡詰まりの解析などが期待される。

燃料電池および水電解の解析を加速・発展させるためには、既存のビームラインの有効活用だけでなく、ビームラインの新設が必要である。現状のビームラインのイメージングでは、時間・空間分解能の制限により、実用条件下での解析が難しいため、開発に直結する指針を得ることが困難である。また、既存のビームラインはハッチ内容積が小さいため、触媒インクの調合・塗布装置を用いた Operando でのプロセス解析は困難である。ビーム強度が向上した燃料電池・水電解を専用とするビームラインが新設されれば、世界トップの *operando* 測定技術と、ビームタイムが確保されることで、日本が弱いとされる実装への加速が期待される。なお、米国では、DOE 主導で 2002 年に、燃料電池専用のビームライン(NIF)が建設されており、現在、様々な水素関連の解析に用いられている[12]。

(参考文献)

- [4] https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101558.html
- [5] Y. Higuchi, D. Setoyama, K. Isegawa, Y. Tsuchikawa, Y. Matsumoto, J. Parker, T. Shinohara, Y. Nagai, Pulsed neutron imaging for differentiation of ice and liquid water towards fuel cell vehicle applications. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **23** (2), 1062-1071 (2021).

- [6] Y. Higuchi, W. Yoshimune, S. Kato, S. Hibi, D. Setoyama, K. Isegawa, Y. Matsumoto, H. Hayashida, H. Nozaki, M. Harada, N. Fukaya, T. Suzuki, T. Shinohara, Y. Nagai. Experimental visualization of water/ice phase distribution at cold start for practical-sized polymer electrolyte fuel cells. *Commun Eng* 3, 33 (2024).
- [7] B. Loppinet, G. Gebel, C. Williams, Small-Angle Scattering Study of Perfluorosulfonated Ionomer Solutions. *J. Phys. Chem. B*, **101** (10), 1884-1892 (1997).
- [8] M. Harada, H. Kadoura, S. Takata, H. Iwase, S. Kajiya, T. Suzuki, N. Hasegawa, A. Shinohara, S. Kato, Equation Elucidating the Catalyst-Layer Proton Conductivity in a Polymer Electrolyte Fuel Cell Based on the Ionomer Distribution Determined Using Small-Angle Neutron Scattering. *ACS Appl Mater Interfaces* 2023, 15 (36), 42594-42602.
- [9] K. Ito, M. Harada, N. Yamada., K. Kudo, H. Aok, T. Kanaya, Water Distribution in Nafion Thin Films on Hydrophilic and Hydrophobic Carbon Substrates. *Langmuir*, **36** (43), 12830-12837 (2020).
- [10] K. Ito, T. Yamada, A. Shinohara, S. Takata, Y. Kawakita, Dynamics of Water in a Catalyst Layer of a Fuel Cell by Quasielastic Neutron Scattering. *J. Phys. Chem. C.*, **125**, 21645–21652 (2021)
- [11] W. Yoshimune, Y. Higuchi, A. Kato, S. Hibi, S. Yamaguchi, Y. Matsumoto, H. Hayashida, H. Nozaki, T. Shinohara, S. Kato, 3D Water Management in Polymer Electrolyte Fuel Cells toward Fuel Cell Electric Vehicles. *ACS Energy Lett*, 8 (8), 3485- 3487 (2023).
- [12] <https://physics.nist.gov/MajResFac/NIF/>

【電子顕微鏡技術】

電子顕微鏡解析は、オングストローム～ナノサイズに形成可能な電子線をプローブとし、高い分解能を持つ局所構造解析が特徴である。2040 年目標で想定されるシングルアトムサイトを含む触媒、ヘテロ界面を活用した新機能触媒の開発や新たなプロトン・水などの輸送機構を含む電解質膜の解析には、欠かせない解析ツールの一つとして期待される。電子ビーム形成技術や検出器感度の向上、機械学習等を用いることで分解能の向上は著しく、原子像の直接観察、原子レベルでの元素識別、化学状態計測が可能になりつつある[13-15]。

触媒反応機構や電解質膜における物質輸送の解析に向けては、触媒・担体へのアイオノマ被覆構造、アイオノマ分散状態、アイオノマ・電解質膜の高分子ナノ構造などの直接的な観察など、電子線照射ダメージを低減しながら、含水状態など燃料電池動作環境に近い状態計測可能なクライオ電子顕微鏡の活用[16]が期待される。触媒の合成、反応時の挙動などの直接的な観察に向けた *operando* 電子顕微鏡の開発も検討が進んでいる[17,18]。

開発される触媒の性能を最適化するための触媒層構造、MEA 構造、流路設計等についても、先端で電子顕微鏡を量子ビーム計測と相補的に活用することが期待される。3D-TEM による担体上（内部も含む）触媒やアイオノマの分散状態の 3 次元可視化[19-21]、クライオ電子顕微鏡を用いた触媒インクや触媒層の 3 次元可視化[22]は、クライオ TEM による触媒や担体上のアイオノマ被覆状態の可視化、クライオ SEM による乾燥過程の観察[23]、超低加速電圧 SEM によるアイオノマ識別など、画像解析技術の発展とともに急速に活用が進んでいる。また、大量に画像データを取得し特徴量解析から、構造と性能の相関を調べる DX への取り組みも始まっている[24]。

(参考文献)

- [13] S. Dai, Y. Hou, M. Onoue, S. Zhang, W. Gao, X. Yan, G. W. Graham, R. Wu, X. Pan, Revealing Surface Elemental Composition and Dynamic Processes Involved in Facet-Dependent Oxidation of Pt₃Co Nanoparticles via in Situ Transmission Electron Microscopy. *Nano Lett.* **17** (8), 4683-4688 (2017)
- [14] J. Li, H. Yin, X. Li, E. Okunishi, Y. Shen, J. He, Z. Tang, W. Wang, E. Yücelen, C. Li, Y. Gong, L. Gu, S. Miao, L. Liu, J. Luo, Y. Ding, Surface evolution of a Pt-Pd-Au electrocatalyst for stable oxygen reduction. *Nat Energy* **2**, 17111 (2017).
- [15] S. Bals, B. Goris, L. Liz-Marzán, G. Van Tendeloo, Three-Dimensional Characterization of Noble-Metal Nanoparticles and their Assemblies by Electron Tomography *Angew. Chem. Int. Ed.* **53**, 10600-10610 (2014)
- [16] J. Shimanuki, S. Takahashi, H. Tohma, A. Ohma, A. Ishihara, Y. Ito, Y. Nishino, A. Miyazawa, Microstructural observation of fuel cell catalyst inks by Cryo-SEM and Cryo-TEM. *Microscopy*, **66**, 204-208 (2017)
- [17] T. Altantzis, I. Lobato, A. De Backer, A. Béché, Y. Zhang, S. Basak, M. Porcu, Q. Xu, A. Sánchez-Iglesias, L. M. Liz-Marzán, G. Van Tendeloo, S. Van Aert, S. Bals, Three-Dimensional Quantification of the Facet Evolution of Pt Nanoparticles in a Variable Gaseous Environment. *Nano Letters* **19** (1), 477-481 (2019)
- [18] S. Dai, Y. You, S. Zhang, W. Cai, M. Xu, L. Xie, R. Wu, G. W. Graham, X. Pan, In situ atomic-scale observation of oxygen-driven core-shell formation in Pt₃Co nanoparticles. *Nat. Commun.* **8**, 204 (2017).
- [19] M. Lopez-Haro, L. Guétaz, T. Printemps, A. Morin, S. Escribano, P.-H. Jouneau, P. Bayle-Guillemaud, F. Chandezon & G. Gebel, Three-dimensional analysis of Nafion layers in fuel cell electrodes. *Nat. Commun.* **5**, 5229 (2014).
- [20] M. Ko, E. Padgett, V. Yarlagadda, A. Kongkanand, D. Muller, Revealing the Nanostructure of Mesoporous Fuel Cell Catalyst Supports for Durable, High-Power Performance. *J. Electrochem. Soc.* **168** 024512 (2021)
- [21] R. Girod, T. Lazaridis, H.A. Gasteiger, et al. Three-dimensional nanoimaging of fuel cell catalyst layers. *Nat Catal* **6**, 383-391 (2023).
- [22] J. Shimanuki, H. Imai, Y. Ito, Y. Nishino, A. Miyazawa, Microstructural observation of the swollen catalyst layers of fuel cells by cryo-TEM. *Microscopy*, (2022)
- [23] J. Shimanuki, S. Takahashi, H. Tohma, A. Ohma, A. Ishihara, Y. Ito, Y. Nishino, A. Miyazawa, Microstructural observation of the swollen catalyst layers of fuel cells by cryo-TEM. *Microscopy*, **66**, 204-208 (2017)
- [24] H. Yu, M. J. Zachman, K. S. Reeves, J. Park, N. Kariuki, L. Hu, R. Mukundan, K. Neyerlin, D. Myers, D. Cullen, Tracking Nanoparticle Degradation across Fuel Cell Electrodes by Automated Analytical Electron Microscopy. *ACS Nano* **16**, 12083-12094 (2022)

(3) 現象・機構解明 (計算科学)

計算科学は、物理・化学現象をモデル化し計算機上でシミュレーションすることで、実験のみでは困難な現象・機構の相互、材料の特性や製品の性能を向上する方針を提示することができる。

また、こうして構築されたモデルを未踏領域へと外挿して適用することにより、新たな材料や製品の性能を予測することもできる。こうした観点から計算科学は、最先端のサイエンスや産業競争力の強化に不可欠な研究手法である。

PEFC の研究開発においても計算科学は重要な役割を担っており、触媒・電解質のナノスケール構造における反応機構の解明や物性予測、触媒層・GDL 等のメゾスケールの不規則多孔体構造に起因した物質移動特性の予測、これらの材料・部材の特性に基づくセル・スタック性能予測、さらには各アプリケーションの実運転モードに対する FC システムの予測など、材料・部材開発、スタック・システム設計に活用するシーンは多岐に亘る。図 2.6.5-7 に PEFC のシミュレーション技術を時空間スケールで整理したイメージを示す。空間スケールは触媒の nm からスタック・システムの m オーダー、時間スケールとしては反応機構の ps オーダーからアプリケーションの実運転の hour オーダーと幅広い時空間スケールに及ぶ。

こうしたシミュレーション技術の基盤として、現行の NEDO 事業においては、電解質膜の化学・機械劣化予測、製造プロセスからの触媒層構造の予測、電極構造からセルまでのマルチスケール発電性能予測、モデルベースの PEFC システム予測など、PEFC の長寿命化・高性能化達成のための設計シミュレーション技術の開発が進行中である。

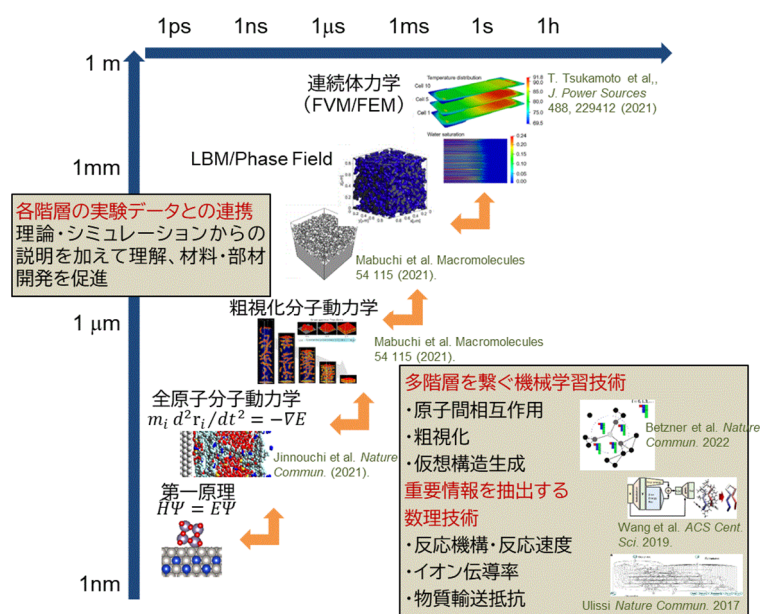


図 2.6.5-7 PEFC におけるトランススケールシミュレーション技術

計算科学のもう一つの重要な役割として、図 2.6.5-8 に示すように、触媒の活性や安定性、電解質材料のイオン伝導度などを高速に予測し、これらのデータを蓄積し、データベースから効率的かつ自動的に有望な材料を探索するハイスループットスクリーニング技術が挙げられる。原理・原則に基づき、現象の要点をおさえたモデルを構築し、実験・解析と比較検証することにより、高速かつ高精度に所望の物性を予測し材料をスクリーニングできるようになると期待される。

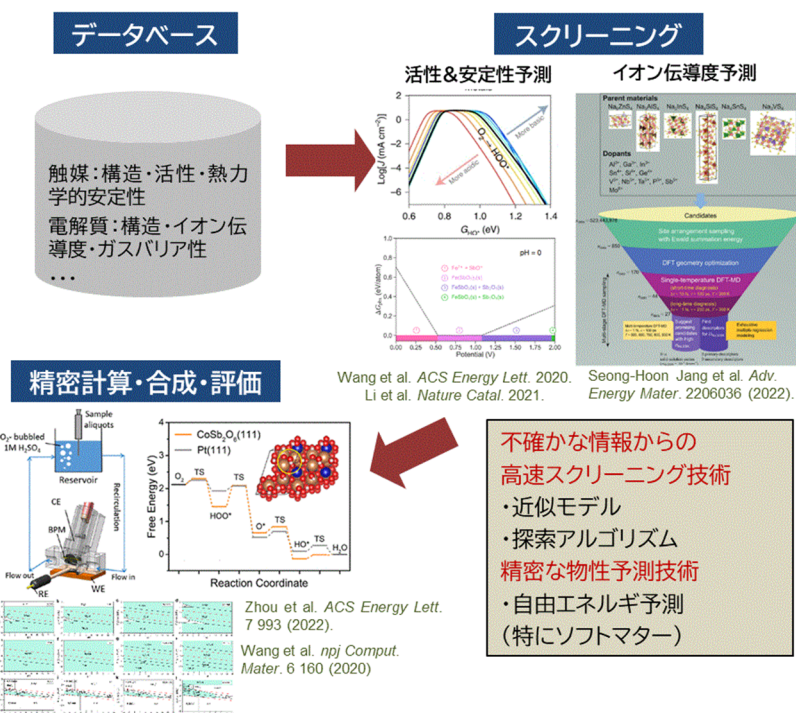


図 2.6.5-8 ハイスループット材料探索技術

このように幅広い時空間スケールを繋ぎ、材料レベルの新原理・研究開発の方向性を見出しつつ、PEFC の性能・劣化を予測するトランススケールシミュレーション技術、広範な新材料探索を実現するハイスループットスクリーニング技術の双方において重要なことは、図 2.6.5-9 に示すように、モデルならびに予測の妥当性を検証するための実験・解析との密接な連携である。また、このような計算科学技術を具現化する上で鍵となるのが、高精度化・高速化によるシミュレーションを適用できる時空間スケール・現象の拡大、シミュレーションの加速やデータから有用な情報を抽出するための機械学習・インフォマティクス・データベースの構築であり、世界では半年で情勢が変化するほどのスピードでアルゴリズム開発とプラットフォーム整備が進んでいる。こうした中核技術の構築と継続的な高度化が PEFC の開発競争力の維持に向けて急務である。

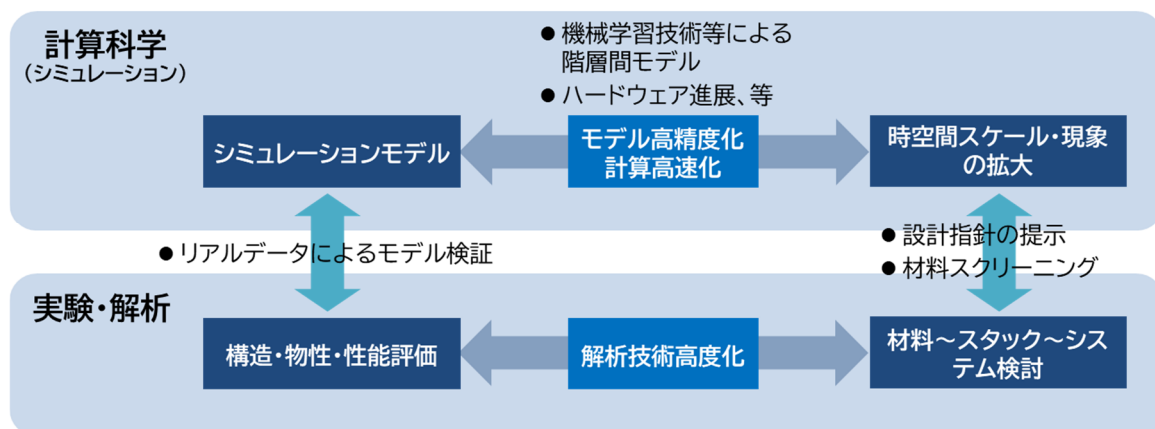


図 2.6.5-9 シミュレーションと実験・解析との連携

触媒・電解質材料における計算科学

表 2.5.3-6、表 2.5.3-7 のとおり、電解質のプロトン伝導率とカソード触媒の酸素還元活性との格段の向上は必須の課題である。加えて、HDV 向けの長い寿命を担保できる材料の耐久性が求められる。2.6.2 で触れたとおり、現行材料を極限的に進化させた形態と不連続的な革新材料との両者の研究開発が必要とされ、計算科学には、その方向性を示す新しい原理や材料の提示、そしてそれらが示す限界の予測が求められる。こうした目的に対して、量子化学・第一原理計算や分子動力学シミュレーション (MD) 等の原子スケールの材料シミュレーション技術[1-4]は有力な手段である。またこれらのシミュレーションを加速したり[5-13]、シミュレーションから得られる情報をメソ・マクロスケールのシミュレーションに受け渡すことで実験と比較可能な定量情報を得たり[14-16]、シミュレーションから得られる結果あるいはそれを取りまとめたデータベースを構築して、データ駆動的に材料をスクリーニングする計算科学・インフォマティクスのアプローチ[17-21]は有望であり、既に世界中で、計算技術の研究開発が活発に行われている。

触媒材料を例に、計算科学・インフォマティクスに期待される展望と求められる技術を示す。既往の触媒の酸素還元反応活性は、図 2.6.5-10a に示す Volcano plot で整理される[1,4]。これは同図 b に示す酸素還元反応の反応中間体の生成速度 (例えば OOH 生成速度) と除去速度 (例えば OH 除去速度) とに背反関係があるためとされる。OOH を安定化する活性点は、OH も安定化するため、両者の速度に背反が生じるとの概念であり、これが現行触媒の活性の限界を決定する[1,4]。実用的な触媒材料を実現する上で忘れてはならないもう一つの重要事項は、活性と耐久性との背反関係である。これは現状の確立された触媒の高活性化手段である Pt の合金化・コアシェル化が、Pt よりも溶出しやすい元素の導入に依存しているためである。2040 年頃の触媒活性目標を実現する手段は二つに大別される。一つは、図 2.6.5-10a の Volcano plot の枠組みの中で、安定な材料を組み合わせ、触媒と OH・OOH との結合力を最適化する Pt 単原子層等の比表面積が究極的に大きい材料を探索するアプローチ である (図 2.6.5-10a のオレンジの矢印、図 2.6.5-10d の例 1 のようなアプローチ)。これは従来の合金・コアシェル材料探索で長年、取り組まれてきたアプローチであるが、無数にある材料のバリエーションが検討され尽くしたとは言えず、継続して取り組まれるべきアプローチ と言える。もう一つは、OH・OOH の安定性を独立して制御することにより、既存の Volcano plot の制約を超えるアプローチである (例えば図 2.6.5-10a の赤の矢印、図 2.6.5-10d の例 2 のようなアプローチ)。例えば、ヘテロ界面、修飾物、電解質等により、特定の分子のみを安定化するテイラーメードな活性点の創生がこれに当たる[4]。なお後者のアプローチも、安定な材料の組み合わせで実現しなければならないことは言うまでもない。

いずれのアプローチにおいても、稼働環境下での活性サイトの安定性・活性を予測、反応機構を解明、個別の材料群の限界を提示する計算技術の開発が重要と考えられる。これを実現する上で有望と考えられる計算技術として、例えば図 2.6.5-11a に示すように、既往の知見をデータベース化し、データから有望な材料構造を予測し、これらの安定性・活性をハイスループットで評価し、その結果をデータベースに登録する、といったサイクルを自律的に行うプラットフォームが挙げられる。こうしたプラットフォームを構築するためには、データベースに蓄えられた安定性・活性との隠れたパターンを抽出しモデル化するインフォマティクス技術[5-7,22-30]、見出されたパターンから有望な新しい構造を自動生成する技術[31-35]、与えられた構造から高速に安定性・活性を評価する技術[5-11,19,20,36]が必要となる。現在も、このようなデータ駆動の材料探索プラ

ットフォーム構築を目指した活発な研究開発が世界中で行われており、図 2.6.5-11b に示すように、データベースのデータ点数と論文中の評価点数とは年々、増え続けている[4,17-20,37]。他方、こうした既存の評価解析技術の自律化・高速化に加えて、新しい原理を発見する上で、従来の計算技術では難しい複雑な材料系を対象とできるよう、計算技術を高度化することも重要である。従来の計算技術は主に、真空あるいは水中の結晶表面等の理想的な触媒表面を評価対象としてきた。これらの解析から、Volcano plot[4]が得られた訳であるが、図 2.6.5-10d のように Volcano plot を超える原理を発見するには、ヘテロ界面、表面修飾、電解質といった、これまで考慮されてこなかったより複雑な材料を評価できるようにならなければならない。ここで重要な技術と考えられるのが、機械学習や量子コンピューティングといった新規計算技術による高速・高精度計算技術である。図 2.6.5-11c の、機械学習を分子シミュレーションに応用する機械学習力場による分子動力学計算の速度・精度の進展に見られるように、こうした新技術も目まぐるしく進化しており[38]、従来の計算技術では不可能であった、電解液中のヘテロ界面の活性予測のような困難な問題が、解析対象として視野に入るようになってきた[10,11]（このようなシミュレーション技術の高度化については次頁以降もう少し詳しく述べる）。以上のデータ駆動型・自律的材料探索技術と複雑材料系の物性予測技術とは電解質においても重要であり、こうした技術を着実に発展させることが新原理を発見し、限界を明示する上で鍵となる。加えて、これらの計算技術の妥当性を担保する上で、実験・解析との密な連携が必要であることは言うまでもない。本解説書でも述べる通り、実験においても自律化が格段に進化し、得られるデータ量が数桁多くなると予想されている。このように計算・実験双方から提示されるこれまでにない量のデータを系統的に比較・検証し、計算科学の妥当性を検証しつつ、新しい材料・原理を提示することが求められる。

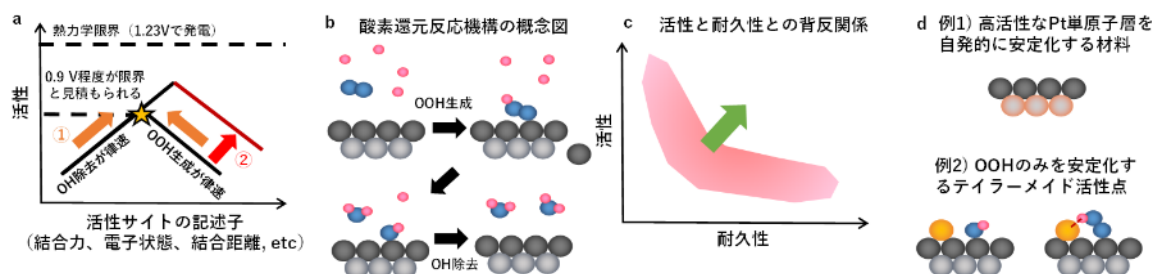


図 2.6.5-10 触媒材料の活性と安定性を向上するアプローチの考え方

アプローチ①：

- 材料構造と安定性・活性との間の隠れたパターンを紐解く解析
- データベース中の既存構造から有望な新構造を自動生成
- 材料の安定性・活性を予測するハイスループット計算
- 上記を支えるデータベース構築

アプローチ②：

- 電解質/ヘテロ界面サイトの活性予測技術
- 複合界面の全反応速度予測技術
- これらを支える高速・高精度計算技術（機械学習・量子コンピューティング等）

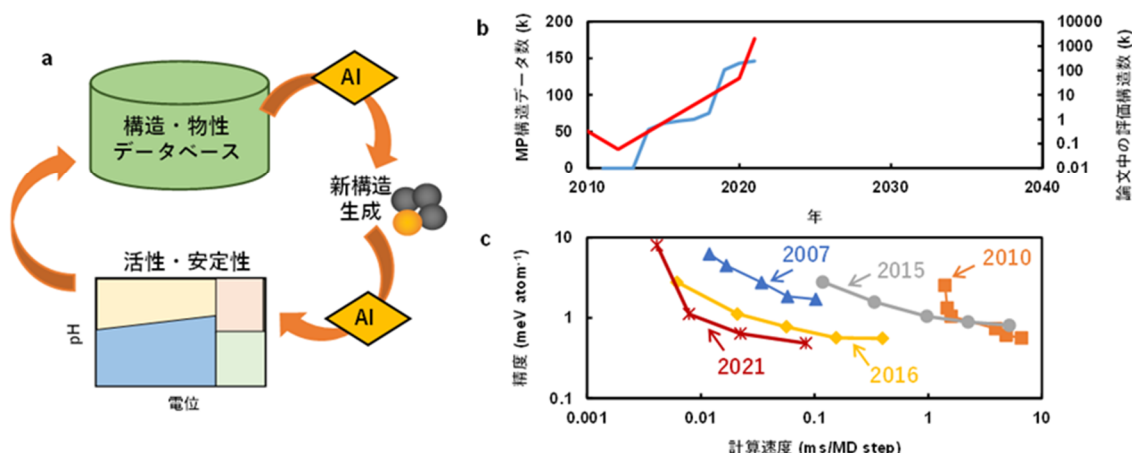


図 2.6.5-11 図 2.6.5-10 のアプローチ ・ を実現する上で重要と考えられる計算技術。b は Materials Project の公開情報[17]および各種文献[1, 19, 21]よりデータ取得。c は文献[38]よりデータ取得

以下では、Volcano plot を超えるためのシミュレーション技術の高度化について、現状と課題をもう少し詳しく述べる。Volcano plot の枠組みはそもそも、研究者の物理化学的直感をもとに単純化、理想化されたモデルに対する解析から導出された。これを超えるためには、電池動作中の触媒において、原子スケールで何がどうなっているのか、どのような素反応が電極反応を構成しているのかを、なるべく仮定を置かずにシミュレーションし、そこで得られた理解をもとに材料設計指針を探るというアプローチが重要となる。計算科学の見地からはこちらのほうが王道的アプローチと言えそうだが、PEFC の電極触媒開発においては Volcano plot ほどのインパクトが得られていない。その理由、および解決に向けた取組について以下に述べる。

【量子化学計算・第一原理計算の高精度化】量子化学計算や第一原理計算では、実用的な計算モデルサイズに対応するため、様々な近似が用いられている。室温付近の化学反応を定量的に議論するためには 1 kcal/mol 程度のいわゆる「化学的精度」が必要となるが、第一原理計算で現在用いられている密度汎関数近似ではこの精度に到達できていない。これを実現する実用的な近似手法の開発が求められている。例えば最近では、小分子の超高精度な波動関数計算データに対する機械学習によって汎関数近似の高精度化を図る方法が検討されている[39,40]。このような研究によってもたらされる高精度化は、トランススケールシミュレーション技術の開発と合わせて粗視化 MD、フェーズフィールド (PF)、格子ボルツマン法 (LBM) 等のマクロ階層のシミュレーションの高精度化をももたらすと期待される。

【定電位】電極反応の進みややすさは、電極触媒自体の構造や、反応物および生成物の分布、電気二重層など、電位によって変調を受ける反応場全体の構造に依存する。従って、電極反応が起きている触媒をシミュレーションするためにはまず、実験の電極平衡に対応した反応場を用意す

る必要がある。しかし、通常の粒子数一定の分子動力学シミュレーションでは、今シミュレーションしている状況がどのくらいの電位に対応するかを知る術はそもそもない。これを解決するための方策として、電解質の分子統計モデル[41,42]や、化学ポテンシャル一定のもとでの粒子数変化を考慮可能なモンテカルロシミュレーション[43-47]との組み合わせが有望であると考えられる。このようにして電極平衡に対応する反応場が規定されると、マーカス理論などに基づく微視的運動論による正確な電流密度計算への展開も可能になる。近年のシミュレーション加速技術[5-13]や計算機科学の進展と組み合わせることで、電位を規定した平衡状態の電極反応場におけるマイクロ秒、サブマイクロメートルスケールの「全部入り」シミュレーションを実現することは、10～20年のタイムスケールではチャレンジングだが不可能ではない重要課題であろう。

【準安定状態・データ同化】一方、そもそも触媒材料は準安定状態を凍結して機能を引き出しており、触媒形成プロセスをまるごとシミュレーションできない限り、計算だけで触媒の構造を再現するのは無理である。そして、触媒形成は分から時間単位のプロセスであり、最長でもミリ秒までを守備範囲とする分子動力学計算からのアプローチは現実的ではない。欠陥を有する酸化物材料のような、高温焼成時の平衡状態が凍結されているような材料の場合は、ダイナミクスを無視して平衡状態の構造を直接探索するモンテカルロ法が有用であろう[48]。しかしこれは特殊なケースで、実触媒の構造は特定の温度の平衡状態と関連付けることは一般的にはできない。そこで期待されるのが、実験とのデータ同化である。現在様々なマイクロメートルからナノメートルスケールの実験プローブの高度化が進んでおり（現象・機構解明（解析）の記載を参照）、実験だけで原子スケールの触媒構造を完全に再構成できないにしても、様々な手がかりが得られるようになる。この部分的な情報とシミュレーションを組み合わせるデータ同化[49,50]によって構造モデルを構築する手法の高度化、一般化が必要となるであろう。また、マクロスケールの電気化学測定データとミクロな電流密度シミュレーションを結びつけて微視的構造を明らかにするといったような、マクロスコピックなプローブに対応するデータ同化手法の開発も求められる。

【次元削減】「全部入り」原子スケールシミュレーションが実現したとして問題となるのが、そこからどのようにして応用の効く知識、あるいは活性に相關する記述子を引き出すかである。これはシミュレーションが複雑化、大規模化すればするほど難しくなっていく課題である。多数の粒子の一見不規則な軌跡からいかにして次元削減を行い、解釈可能な反応座標を引き出すのかについての研究はまだ始まったばかりであり[51,52]、その進展が望まれる。原子スケールのシミュレーション結果を、動的モンテカルロ法のような原子スケール描像を維持したメゾスケール計算やマイクロキネティクスモデル[53-55]に展開するためにも不可欠な要素技術である。

【耐久性】触媒や電解質の性能に加えて重要な要求要件として、耐久性が挙げられる。先述のとおり、機能材料は準安定状態をうまく凍結して機能を引き出しているわけで、この準安定状態が崩れていく様子、すなわち熱力学的平衡状態への緩和について知見を提供することも、計算科学に求められている。この点で、通常の分子動力学法では考慮できるタイムスケールと劣化速度との間に大きなギャップがある。一方、モンテカルロ法では考慮する自由度に対する熱平衡状態を高速に計算可能で、劣化によって行き着く先自体の情報は得られる可能性があるが、タイムスケールの情報は失われてしまう。劣化に繋がる素過程が想定できるのであれば、分子動力学法を基盤とした様々なレアイベントサンプリング手法がすでに考案されており[56,57]、材料設計による素過程のレート変化はある程度シミュレーション可能である。素過程に関する手がかりを得るた

めには、長時間にわたる変化を追跡できるようなナノスケール実験プローブの開発に期待したい。また、劣化に繋がる未知のレイイベントを効率的に探索するような計算手法開発[58]も望まれる。

部材・製品・システムレベルにおける計算科学技術

表 2.5.3-7 のとおり、電解質のプロトン伝導率とカソード触媒の酸素還元活性との格段の向上は必須の課題である一方、触媒層や GDL・MPL およびセパレータを含むガス拡散抵抗も 2030 年の目標値と同レベルであるが、これらの部材は限界に近い設計が必須である。さらに、2040 年に向けた触媒・電解質に対する触媒層の在り方（担体・アイオノマ構造、表面濡れ性等）も変わる可能性があり、それに伴い GDL・MPL やセパレータの構造・機械特性を含めてセル・スタック性能への影響を予測し、部材の最適化を加速するシミュレーション、さらには FCV および HDV のスタック性能・耐久性の要求に対してボトルネックとなる材料・部材特性と条件を迅速に抽出するための MBD（Model Based Development）による FC システムシミュレーションが鍵であり、メソ・マクロスケールにおける反応場と物質移動、伝熱、流体力学、構造力学、制御など、化学工学、機械工学等のエンジニアリング領域の知見を結集した技術開発が求められる。

メソ・マクロスケールにおけるシミュレーションの概念を図 2.6.5-12 に示す。触媒インク・触媒層形成プロセスの現象解析に基づく構造、液水挙動を考慮した触媒層、MPL および GDL の物質移動特性、セパレータ構造（流路形状）とセル・スタックの性能、さらに FC システムの予測まで時空間スケールの横断的に連結したモデリング・シミュレーション技術の高度化が必須である。前述の通り、触媒・電解質膜の材料によって、触媒層や GDL・MPL に求められる要件が変わる可能性があり、2.5.3 で説明したように、MPL、GDL の酸素拡散抵抗の低減に加え、触媒層内の酸素・プロトンおよび電子の物質輸送性能と電気化学反応に寄与する有効触媒表面の最適化が重要である。セパレータもセル・スタック性能向上に向けた多様な形状が提案されており、他の部材の構造との組み合わせも考える必要がある。

さらに、メソ・マクロスケールの性能・耐久性の影響因子として液水の存在が挙げられる。MPL、GDL の細孔内およびセパレータ流路内の液水滞留による酸素拡散の低下は性能に影響し、セパレータからの金属イオン溶出による電解質膜劣化への影響も受ける。さらに、上述のように触媒・電解質の新材料によっては触媒層自体の濡れ方が変わる可能性もある。2030 年および 2040 年の FC システム目標ではスタック冷却水出口の最高温度がそれぞれ 105、120 で、電解質膜面温度はさらに 5 ～ 10 程度高いために液水が存在しない状態となりうるが、低負荷運転（通常の運転モードで大半を占める）や負荷変動時および氷点下起動時は液水が存在する。このため、性能・耐久性向上へのセル内の液水の構造・挙動と物質移動への影響の解明については継続して取り組むべき課題であり、気液二相あるいは気液固三相シミュレーションの期待は大きく、これらは水電解セルの気泡挙動解析にも共通した基盤技術となる。こうした混相流シミュレーションは LBM、PF や CFD の適用が活発であるが[59-62]、今後は、基材構造および表面濡れ性や相変化などの計算精度の向上、機械学習等を活用した計算高速化[63-65]の手法などの更なる技術開発が期待される。

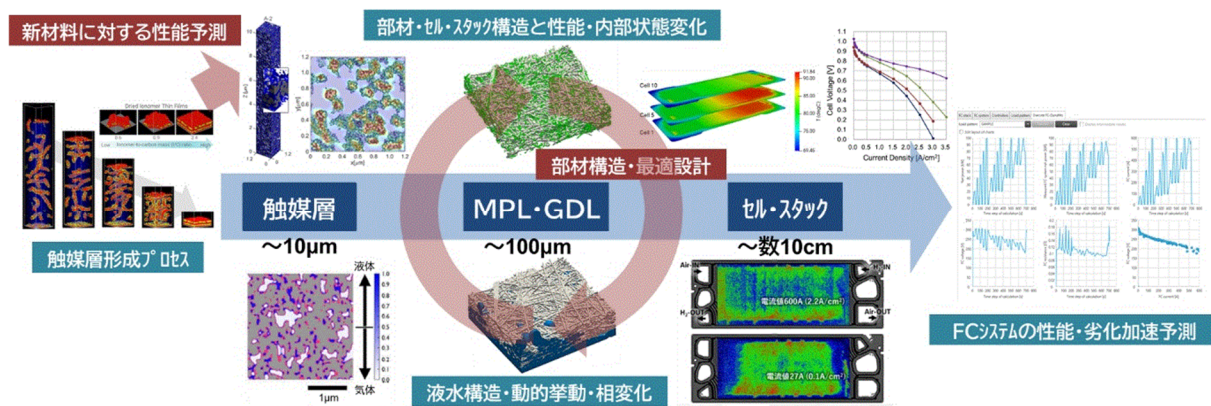


図 2.6.5-12 PEMFC におけるメソ・マクロスケールシミュレーション

(参考文献)

- [1] Nørskov et al., *J. Phys. Chem. B* **108**, 17886 (2004).
- [2] Rossmeisl et al., *J. Phys. Chem. B* **110**, 21833 (2006).
- [3] Muhammady et al., *J. Phys. Chem. C* **126**, 15662 (2022).
- [4] Kulkarni et al., *Chem. Rev.* **118**, 2302 (2018).
- [5] Behler and Parrinello, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 146401 (2007).
- [6] Bartók et al., *Phys. Rev. Lett.* **104**, 136403 (2010).
- [7] Shapeev, *Multiscale Modeling & Simulation* **14**, 1153 (2016).
- [8] Jinnouchi et al., *Phys. Rev. B* **100**, 014105 (2019).
- [9] Batzner et al., *Nature Commun.* **13**, 2453 (2022).
- [10] Vandermause et al., *Nature Commun.* **13**, 5183 (2022).
- [11] Mikkelsen et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **24**, 9885 (2022).
- [12] Jinnouchi et al., *J. Chem. Phys.* **154**, 094107 (2021).
- [13] Jinnouchi et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **24**, 15522 (2022).
- [14] Hansen et al., *J. Phys. Chem. C* **118**, 6706 (2014).
- [15] Medford et al., *Catal. Lett.* **145**, 794 (2015).
- [16] Nagai and Okazaki, *J. Chem. Phys.* **157**, 054502 (2022).
- [17] <https://materialsproject.org/>; Jain et al., *APL Materials* **1**, 011002 (2013).
- [18] <https://opencatalystproject.org/>
- [19] Wang et al., *ACS Energy Lett.* **5**, 2905 (2020).
- [20] Kalhara et al., *ACS Energy Lett.* **5**, 3778 (2020).
- [21] Lee and Jinnouchi, *J. Phys. Chem. C* **125**, 16963 (2021).
- [22] Drautz, *Phys. Rev. B* **99**, 014104 (2019).
- [23] De et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18**, 13754 (2016).
- [24] Bartók et al., *Sci. Adv.* **3**, e1701816 (2017).
- [25] Huang and Lilienfeld, *Chem. Rev.* **121**, 10001 (2021).
- [26] Deringer et al., *Chem. Rev.* **121**, 10073 (2021).
- [27] Darby et al., *npj Comput. Mater.* **8**, 166 (2022).

- [28] Willatt et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20**, 29661 (2018).
- [29] Mahoney and Drineas, *PNAS* **106**, 697 (2009).
- [30] Imbalzano et al., *J. Chem. Phys.* **148**, 241730 (2018).
- [31] Oganov and Glass, *J. Chem. Phys.* **124**, 244704 (2006).
- [32] O'Boyle et al., *J. Cheminformatics* **3**, 33 (2011).
- [33] Curtarolo et al., *Phys. Rev. Lett.* **91**, 135503 (2003).
- [34] Fischer et al., *Nature Mater.* **5**, 641 (2006).
- [35] Wang et al., *Phys. Rev. B* **82**, 094116 (2010).
- [36] Patel et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **21**, 35323 (2019).
- [37] Greeley et al., *Nature Materials* **5**, 909 (2006).
- [38] Lysogorskiy et al., *npj Comput. Mater.* **7**, 97 (2021).
- [39] Nagai et al., *npj Comput. Mater.* **6**, 43 (2020)
- [40] Kulik et al., *Electron. Struct.* **4**, 023004 (2022)
- [41] Nishihara and Ohtani, *Phys. Rev. B* **96**, 115429 (2017).
- [42] Haruyama et al., *Phys. Rev. Mater.* **2**, 095801 (2018).
- [43] Takenaka et al., *J. Phys. Chem. C* **118**, 10874 (2014).
- [44] Suzuki and Nagaoka, *J. Chem. Phys.* **146**, 204102 (2017).
- [45] Kasamatsu and Sugino, *J. Phys.: Condens. Matter* **31**, 085901 (2019).
- [46] Kasamatsu et al., *J. Chem. Phys.* **157**, 104114 (2022).
- [47] Nagai and Okazaki, *J. Chem. Phys.* **157**, 054502 (2022).
- [48] Kasamatsu et al., *J. Mater. Chem. A* **8**, 12674 (2020).
- [49] Adachi et al., *Comput. Phys. Commun.* **241**, 92 (2019).
- [50] Gereben and Pusztai, *J. Non-Cryst. Solids* **407**, 213 (2015).
- [51] Mendels et al., *J. Phys. Chem. Lett.* **9**, 2776 (2018).
- [52] Bonati et al., *J. Phys. Chem. Lett.* **11**, 2998 (2020).
- [53] Henkelman and Jónsson, *J. Chem. Phys.* **115**, 9657 (2001).
- [54] Stamatakis and Vlachos, *ACS Catal.* **2**, 2648 (2012).
- [55] Reuter, *Catalysis. Lett.* **146**, 541 (2016).
- [56] Valsson et al., *Annu. Rev. Phys. Chem.* **67**, 159 (2016).
- [57] Sprik et al., *J. Chem. Phys.* **109**, 7737 (1998).
- [58] Hirai and Jinnouchi, *RSC Adv.* **12**, 23274 (2022).
- [59] Shimpalee et al, *J. Electrochem. Soc.* **166**(8), F534 (2019).
- [60] Niblett et al., *J. Power Sources* **555**, 232383 (2023).
- [61] Tardy et al., *Int. Heat and Mass Trans.* **145**, 118720 (2019).
- [62] Zhou et al., *J. Power Sources* **437**, 226933 (2019).
- [63] Vinuesa et al., *Nature Comput. Sci.* **2**, 358 (2022),
- [64] Wang et al., *J. Comput. Phys.* **466**, 111419 (2022).
- [65] Qiu et al., *Phys. of Fluids* **34**, 052109 (2022).

(4) ロードマップ目標に即した MEA 評価手法の整備

本ロードマップ目標に即した材料の研究開発を実施していくうえで、各種ロードマップ目標を適切に MEA として評価する条件を制定する必要がある。特に図 2.5.3-6 等で示されているフルサイズのセルの 120 等高温発電性能を 1cm² 等のテストピースで評価する条件、また HDV で求められる 50000 時間の耐久を短縮評価する触媒・膜材料の加速耐久条件・クライテリア等を策定し材料研究における統一した評価指標として活用していくことが必要である。これには燃料電池評価、耐久評価を軸としてシミュレーション技術や解析技術による材料の劣化状態を予測・検証し適宜更新していくことも必要である。

更に燃料電池材料を簡便にスクリーニングできる手法(ガス拡散電極評価法、電極評価法等)を構築して、燃料電池ベンチなどが無くても燃料電池材料の研究開発に参画しやすい手法を広めていくことも求められている。

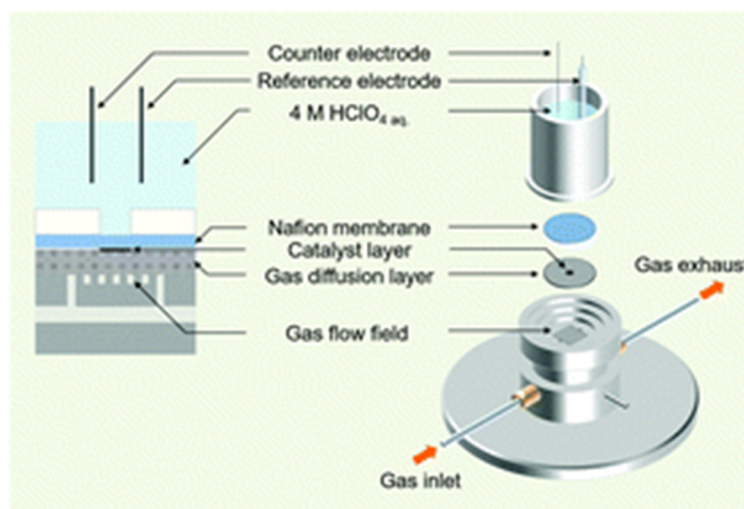


図 2.6.5-13 ガス拡散電極測定手法

出展: <https://pubs.rsc.org/en/journals/journal/ee>

2.6.6 人材育成

前節までに技術革新による 2040 年頃までの達成シナリオを整理してきたが、目標達成においては研究開発を担う人材の育成も重要な観点であり、本節では人材育成についての考え方を整理する。

技術革新による 2040 年目標達成に必要な人材としては、現状技術の究極や原理原則を追求することでイノベーションを実現する研究者、個別の要素技術を融合しセルやスタックとしての性能目標を達成する研究者・技術者などが必要となると考えられるが、何よりも燃料電池分野における研究者をいかに確保するかが第一の課題である。図 2.6.6-1 に示す通り、主要国において博士号取得者数が減少傾向にあるのは日本のみであり、図 2.6.6-2 や図 2.6.6-3 に示す通り燃料電池分野における論文掲載件数や特許出願件数においても燃料電池研究における日本の優位性が相対的に低下している傾向の中で、研究人材をいかに確保するかが喫緊の課題であると言える。

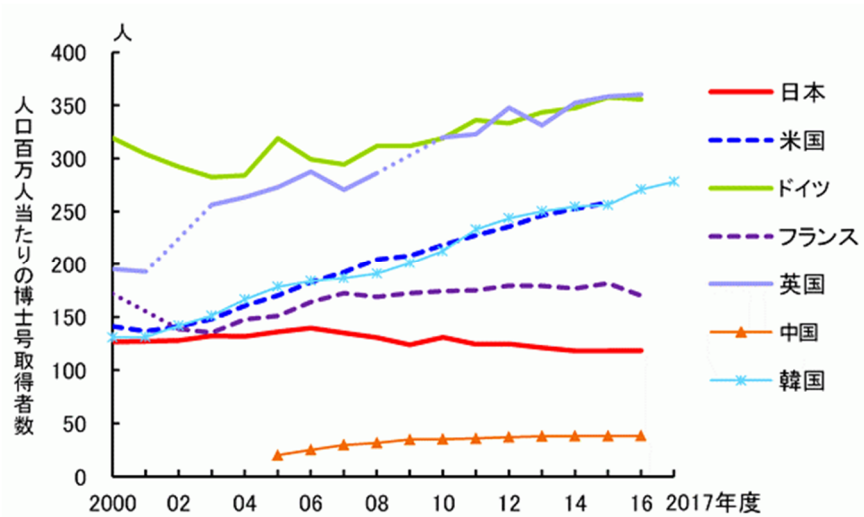


図 2.6.6-1 人口百万人当たりの博士号取得者数の国際比較 [1]

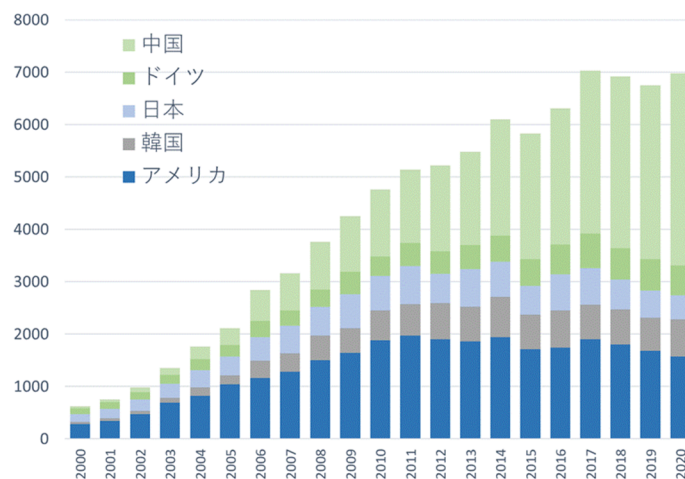


図 2.6.6-2 燃料電池関係の論文数推移の国際比較 [2]

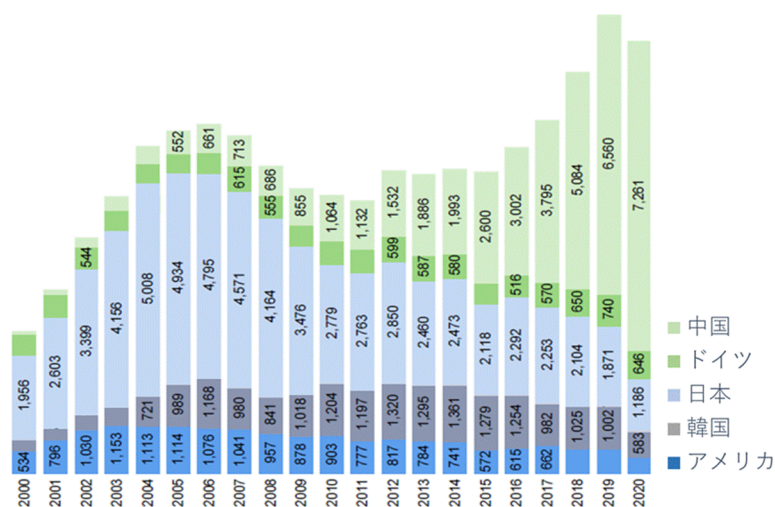


図 2.6.6-3 燃料電池関係（輸送分野）の特許出願件数の国際比較 [3]

燃料電池分野における研究人材の確保には短期的ではなく中長期的視点で考える、すなわち若手の研究人材をいかに増やし、いかに燃料電池に興味を持ってもらい研究に継続的に取り組んでもらえるかが重要な観点であり、以下に示す方策を産官学が一体となり検討することが望まれる。

- 高校/学士/修士課程の若い時期から水素や燃料電池に触れる機会の創出
- 博士課程や博士取得後の異分野経験などを含めた研究人材のキャリアパスの整備
- 博士取得後の雇用機会の確保
- 海外研究機関との連携や国際人材流動・還流

燃料電池の性能向上には 2.5 節、2.6 節で示した通り、電解質膜・空気極触媒層・燃料極触媒層・空気極流路/GDL・燃料極流路/GDL・セパレータなど専門分野の異なる多くの個別構成要素それぞれの特性を向上させるだけでなく、これらの個別構成要素を組合せ、発電という機能をいかに設計していくかも重要であり、材料・電気化学・分析解析・計算機科学・化学工学・プロセス・流体・伝熱・機械工学といった複数の専門野融合によるチーム型研究を進める仕組みと、バックキャストで俯瞰的・統合的なチームマネジメントができるプログラムダイレクタの育成も重要な課題と考える。この俯瞰的・統合的な考え方ができる人材の育成のためにも、前述した研究人材のキャリアパス整備にあたって、博士課程や博士取得後の異分野経験は効果的と考える。

また日本の特徴として人材流動性の低さが挙げられる。例えば図 2.6.6-4 に示す通り、日本の理系博士課程修了者は 58%が大学に就職し民間企業等に就職したのは 36%であるのに対し、米国の博士課程修了者の雇用先は民間企業等が 56%であり日本とは対照的である。産官学一体となって活動した本ロードマップの検討を通じて、トラック・船舶・鉄道・建機・産業機器・農機といった産業界における製品開発・燃料電池システム研究開発とアカデミアにおける材料研究をシームレスに繋ぐことが極めて重要であることを再認識したが、産官学での人材のフレキシブルな流動も以下の観点から人材育成に対して有効と考える（図 2.6.6-5）。

- 学から産（サバティカル）：開発現場のリアルな技術課題の理解、製品・システム目線感覚の学び
- 産から学（社会人博士）：産業界知見のアカデミアへの伝承、研究者としての学びなおし
- 産学連携のクロスアポイントメント：知恵や設備の有効活用による研究加速

日本と米国の博士課程就職者の就職先

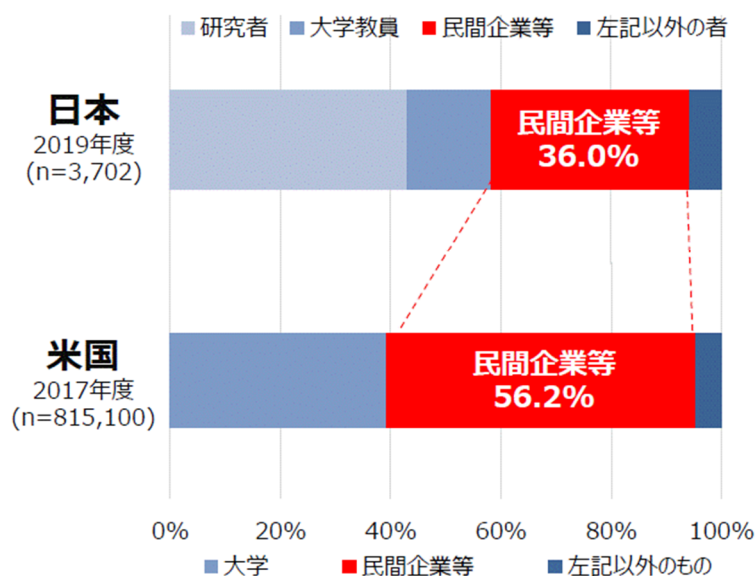


図 2.6.6-4 日本と米国の博士課程就職者の就職先 [4]

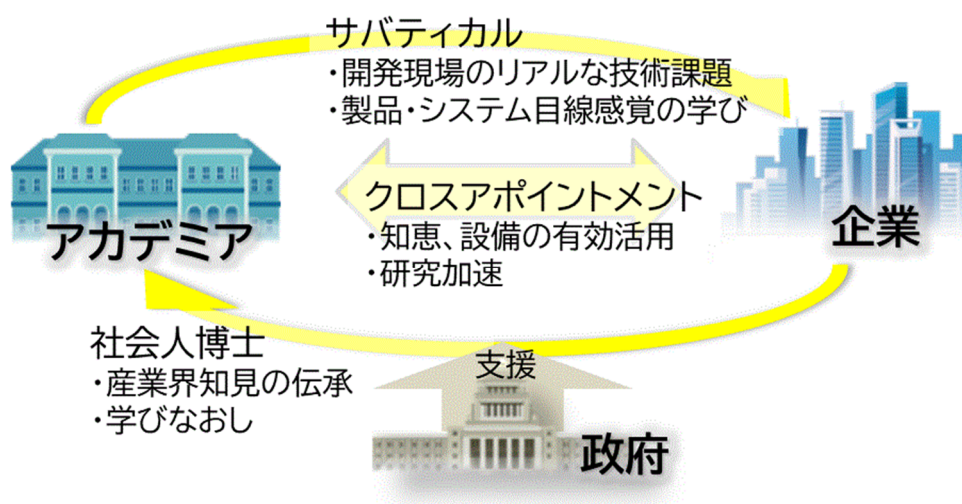


図 2.6.6-5 産官学連携・人材流動による研究者育成

(参考文献)

- [1] 科学技術・学術政策研究所 “学位取得者の国際比較”, 2019
https://www.nistep.go.jp/sti_indicator/2021/RM311_34.html
- [2] Google Scholar より当社作成
- [3] World Intellectual Property Organization “Patent Landscape Report, Hydrogen fuel cells in transportation, 2022”より当社作成
- [4] 経済産業省 第2回未来人材会議, 2022

2.7 FC 生産技術

2.7.1 生産能力の推移予測とライン原単位の考え方

経済産業省 (METI)「水素・燃料電池戦略ロードマップ」[1]における目標として、FCV の累積普及目標 80 万台 (2030 年) が提示された。この目標を達成するためには、今後、国内の燃料電池スタックの製造能力を段階的に拡大してゆく必要がある。図 2.7.1-1 に、2030 年までに生産量を最小限 20 万台/年とするシナリオを置いた。累積普及台数は、2030 年時点で約 80 万台到達が見通せる生産規模を設定した。本検討では、20 万台/年を念頭に、目標とするタクトタイムの検討を行った。

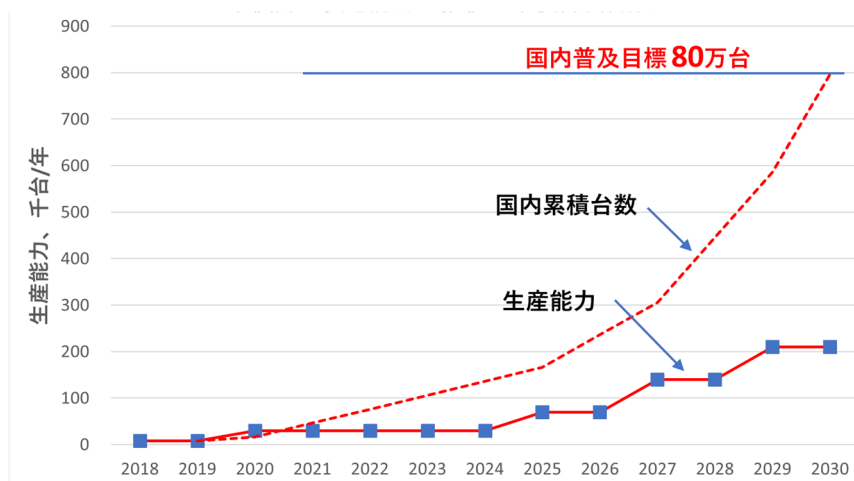


図 2.7.1-1 生産能力推移予測と累積普及台数 (試算)

2030 年頃の生産規模を想定することにより生産速度目標を設定し、生産技術的な課題を明確にする狙いである。

工場建設の計画は、個社の事業計画によるものであり、あくまで国の普及目標を達成するために必要な生産能力を逆算したものである。背景として、FC 市場が順調に成長していくことが前提である。図 2.7.1-2 に直近の各国のプロジェクトにおける 2030 年頃の FC の生産計画をプロットした。ドイツ、フランスおよび韓国も 2030 年で、年産 20 万台以上の生産規模を想定している。

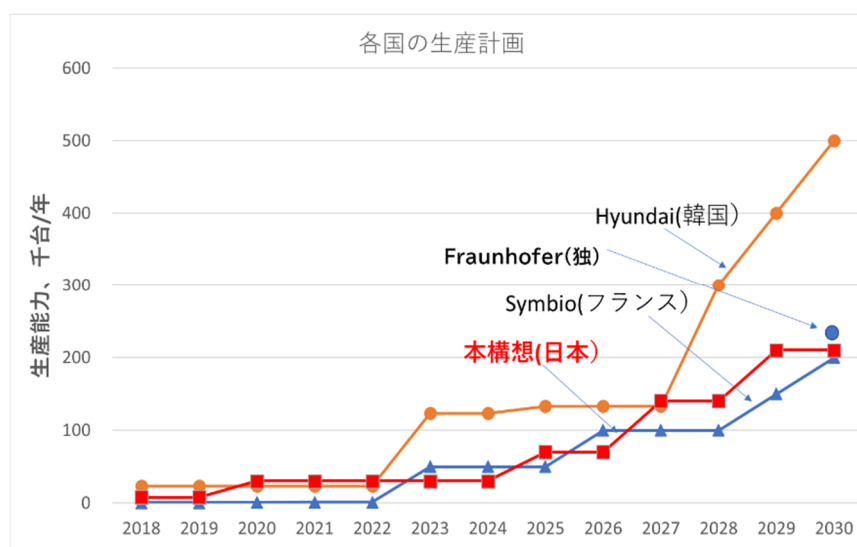


図 2.7.1-2 各国の燃料電池スタックの生産計画

2023 年 6 月に水素社会の早期実現に向けた国家の意志を表すものとして水素基本戦略が発表された[2]。その中では FCV について、2030 年までに乗用車換算で 80 万台程度（水素消費量 8 万トン/年程度）の普及を目指すとされている。水素消費量換算の目標値のため、乗用車よりも多くの水素需要が見込まれる商用車であれば、80 万台よりも少ない台数でも目標達成が可能であり、その場合国内の普及に対する必要な生産能力は年産 20 万台よりも小さくなる。但し、FCV は海外への輸出も想定され、海外マーケット獲得のために必要な製造能力を獲得するという観点からは、図 2.7.1-2 のように 2030 年に年産 20 万台程度の生産能力が必要と考えられるため、本ロードマップの目標値は 2030 年に年産 20 万台程度とした。

ここで、年産 20 万台には、FCV に HDV の生産量を加算した生産量を想定している。当面 FCV 生産ラインで、HDV のセル・スタックの作り分けを行う前提とした。ロードマップに示したように、HDV の本格普及は 2030 年以降と予想される。参考値として、現状の 2030 年の市場規模（海外含む）は 25 トントラックが数万台/年、44 トントラックが数千台/年となっており、セルの生産数量の HDV の占める割合は小さい（表 2.1.1-1）。当面は、HDV 専用工場を建設せず、FCV の生産ラインで作り分けをする方が、コスト的に有利となる。可能な限り部品の仕様は統一し、耐熱温度、耐久仕様が異なる HDV 仕様の電極のみ作り分け、その他の工程は FCV と同じラインでセル・スタックを製造することによりコストアップを最小限に抑えることが可能と思われる。

2030 年から 2035 年には、2030 年時点の製造能力が維持されながら徐々に製造効率が改善されるとともに増設により製造能力が向上すると仮定した。図 2.7.1-3 に 2035 年までの生産能力推移予測と累積普及台数の試算を示した。生産能力は 2035 年には 34 万台となる推移予測である。普及予測としては 2035 年に 200 万台程度となる。これは生産能力から積算された数値であり、製造規模が拡大することを見込んで推測した値であるが、FCV と水素ステーションの普及に向けたシナリオ（FCCJ, 2016）[3]の目標値（2040 年に 300 万台から 600 万台）、IEA “Net Zero by 2050” [4]における運輸部門の水素消費量の増加分（2030 年から 2050 年にかけて約 7 倍増加）などの関連する目標値や予測値を満たすものである。

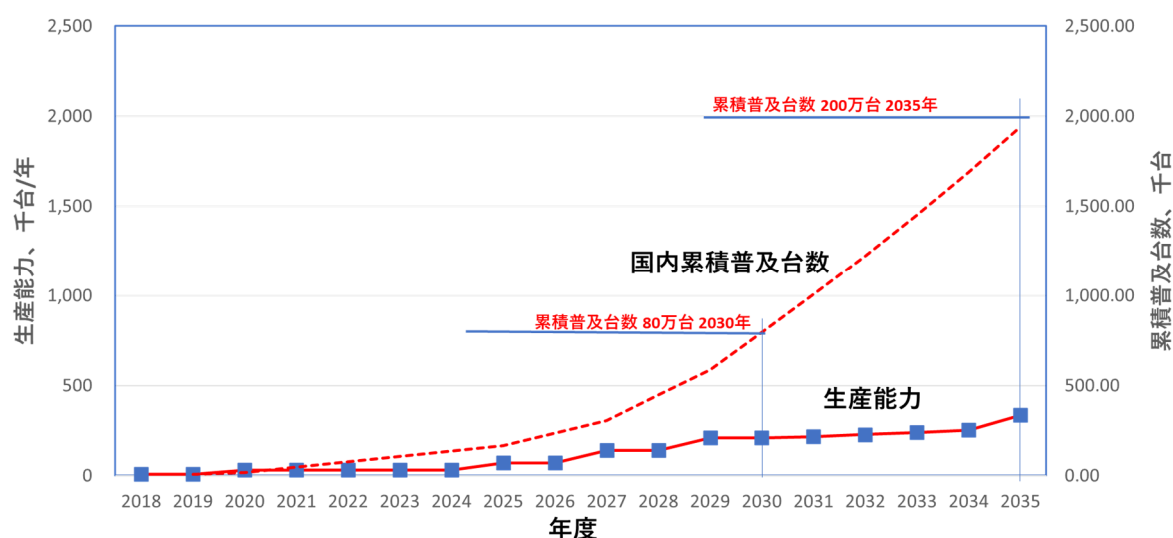


図 2.7.1-3 2035 年までの生産能力推移予測と累積普及台数（試算）

2.7.2 生産速度の目標とタクトタイムの考え方

2030 年のタクトタイム (TT) の目安は、枚葉工程 0.5 秒/セル、連続工程 13m/分とおいた。

セル面積 273cm²、330 セルの仕様のスタックを年産 7 万台規模 (月 6,000 台) の製造工場 で 2 直体制の前提で枚葉工程と連続工程のライン速度の試算値に近い値とした。

試算前提が異なれば、セルサイズ、セル数、歩留まりにより TT は幅をもつ。現状の 2 倍から 4 倍の生産性となるので厳しめの目標値を置いている。後述する加工コストの目標を達成するためには、設備コスト低減もさることながら、生産性をアップする方が、加工費低減の効果が大きい。

ラインの規模を小さくすると、TT は大きくなり生産技術的には楽になるが、加工費は増大する傾向にある。一方、ライン原単位を 10 万台規模に大きくしても枚葉工程の生産速度の限界を超えると結局各工程で複列化して量産の効果は得にくくなる。TT は、0.5 秒程度が妥当と思われる。

図 2.7.2-1 のように、各国のプロジェクトの想定サイクルタイムも、0.5 ~ 1.0 秒/セルを想定されている。想定されるライン当たりの生産規模、一日当たりの稼働時間によって TT は異なる。

2035 年の TT の目安は、枚葉工程 0.4 秒/セル、連続工程 15m/分とおいた。試算方法 2030 年の試算方法と同一で、スタックを年産 8 万台規模 (月 7,000 台) の製造工場を想定した。2030 年から 2035 年にかけて製造効率を改善し、月 6,000 台規模から 7,000 台規模へと拡大することで、用地確保などの投資コストを抑えて製造能力を拡大するシナリオである。また、2035 年には新たに 1 か所工場が建設されることを想定している。

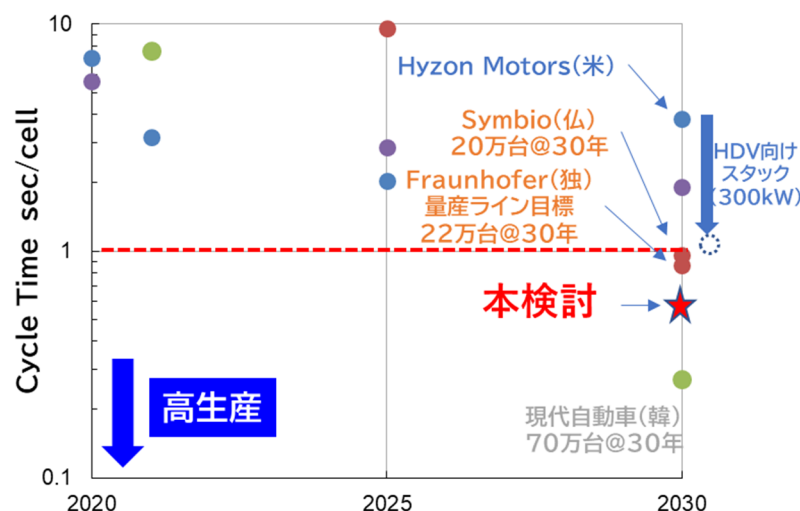


図 2.7.2-1 各国プロジェクトの目標サイクルタイム

2.7.3 スタックコスト目標 材料コストと加工費

METI の水素・燃料電池戦略目標および DOE 試算を前提に FC システムコストおよび FC スタックコストの目標値を表 2.7.3-1 のように定めた。2030 年以降にも継続的にコストを低減していく必要があり、2040 年頃にはコンペ相当の価格を目指す。

図 2.7.3-1 に DOE 試算の現状と将来コストの目標値を示す。本検討では、この試算結果をもとに材料および加工費の低減目標を提示した。コスト目標達成のために、材料コストおよび加工費ともに 70% 程度の削減が必要であり、厳しい目標設定となっている。触媒、アイオノマ、電解質膜、GDL、BPP の材料コスト低減とともに、製造設備の生産性、スペース効率の向上、工程の短縮、工程の削減を図り全体の設備投資の低減を図る取り組みが必要である。

表 2.7.3-2 には DOE のコスト目標値を示している。表 2.7.3-1 の目標値は表 2.7.3-2 の DOE targets を参考に決められたものであるが、DOE においては 2050 年にかけて更なるコスト低減が目標とされている。HDV における DOE Ultimate target を満たすように 2035 年以降の加工費・材料費のコスト低減目標を設定した。

表 2.7.3-1 FC システム / スタック目標値

項目	目標値 (2030)	備考
FCV FCシステムコスト [万円/kW]	0.4 2.3.1 項参照	2030 年以降も更なるコスト低減を追求し、2040 年頃にコンベ相当を目指す。
FCV FCスタックコスト [万円/kW]	0.2 2.3.1 項参照	
HDV FCシステムコスト [万円/kW] 44 トントラックを想定	0.9 2.3.1 項参照	2030 年以降も更なるコスト低減を追求し、2040 年頃にコンベ相当を目指す。 ● コスト以外の目標値 ✓ 耐久時間 50000 時間 2.2.2 項参照 ✓ Pt 目付量 0.24mg/cm ² 2.5.1 項参照 ✓ FC システム体積出力密度 2030 年頃 0.6 [kW/L] 2035 年頃 0.75 [kW/L], 2040 年頃 0.8 [kW/L] 2.3.2 項大型トラック参照
HDV FCスタックコスト [万円/kW] 44 トントラックを想定	0.45 2.3.1 項参照	

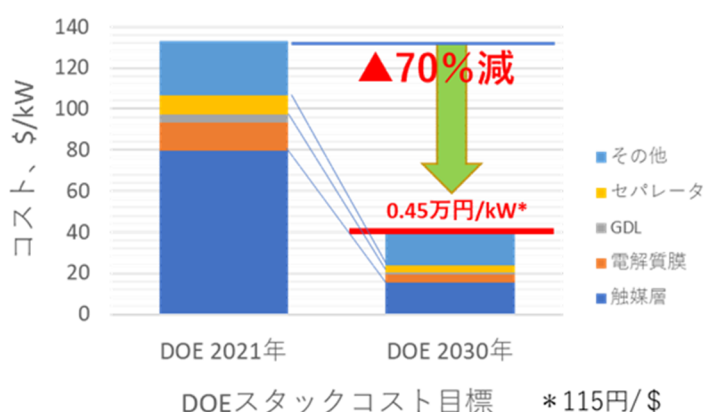


図 2.7.3-1 DOE 試算によるスタック目標コスト 1

1 NEDO 燃料電池技術開発ロードマップ - HDV 用燃料電池ロードマップ (解説書)

表 2.7.3-2 DOE のコスト目標値 2

	Units (2016\$)	DOE Targets	DOE Ultimate Target
Cost of LDV FC Power Systems	\$/kW _{net}	40 (2025)	30
Cost of HDV FC Power Systems	\$/kW _{net}	80 (2030)	60 (2050)

2 Brian D. James, Strategic Analysis Inc., "Fuel Cell Cost and Performance Analysis 2022", DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting Presentation

表 2.7.3-3 にこれまでの、生産技術目標をフェーズ毎にまとめた。将来の生産ラインを検討する上では LCA を考慮したモノづくりを行う必要があることは言うまでもない。工場で消費するエネルギーをグリーンエネルギーにすべて置き換える前提とした。合わせて、有機溶媒等の揮発成分の低減、副資材の削減・リサイクル、発電検査における水素の消費低減などの取組が重要である。

表 2.7.3-3 FC 生産技術目標一覧

	現在	2025 年頃	2030 年頃	2035 年頃	2040 年頃
普及シナリオ (HDV)	国内 数百台		欧州 10 万台、国内数万台		グローバル 1500 万台 2
HDV コスト目標			FC システム 0.9 万円/kW 1 FC スタック 0.45 万円/kW	更なるコスト低減	コンベ相当 (数値検討中)
普及シナリオ (FCV)	国内 7,500 台		国内 80 万台相当 3	国内 200 万台相当 (推定) 8	国内 300-600 万台 4
FCV コスト目標			FC システム 0.4 万円/kW) 1 FC スタック 0.2 万円/kW	更なるコスト低減	コンベ相当 (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	21 万台/年	32 万台/年	50 万 ~ 120 万台/年
ライン原単位 (想定規模)	2,500 台/月	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	10,000 台/月 × 複数か所
生産速度 (タクトタイム)		枚葉工程 1 秒/セル 6 連続工程 6m/分 7	0.5 秒/セル 6 15m/分 7	0.4 秒/セル 6 19m/分 7	0.33 秒/セル 6 25m/分 7
加工費低減目標 材料費低減目標	100% 100%		▲70% 5 ▲70%	▲72% 5 ▲72%	▲74% 5 ▲74%
工場の消費エネルギーグリーン化	50%程度		80%		100%達成

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ハイシナリオでは 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 250cm²、20 日稼働、2 直生産および生産数量 (台/月) よりタクトタイムを試算

7 試算の仮定 電極面積 250cm²、幅 320×130 で*3 稼働条件で製造した場合、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

(参考文献)

[1] 経済産業省, 「水素・燃料電池戦略ロードマップ」

[2] 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, 「水素基本戦略」(2023/6)

[3] 燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）, 「FCVと水素ステーションの普及に向けたシナリオ」(2016/3)

[4] IEA, “Net Zero by 2050” (2021/5)

2.7.4 優先開発工程と工程進化・革新方針

本ロードマップのFC生産技術において、今後技術開発を進める必要性の高い工程を優先開発工程とし、優先開発工程の開発の方向性を工程進化・革新方針として定める。工程進化・革新方針は具体的な開発目標は置かず、方向性を共有することを目的とする。本ロードマップの優先開発課題と工程進化・革新方針を参考とし、技術開発者がそれぞれの目標を設定することを想定する。

優先開発工程を抽出するにあたり、前提となる目標値と目標仕様を表2.7.4-1にまとめた。コスト目標を達成するためにコストを低減していくことが目的であり、KPIとしては加工費、材料費の低減目標を設定している。また、コスト低減と同時に達成すべき製造の目標値として、目標仕様（製造）を設定した。今後の燃料電池の市場規模拡大に伴い、製造規模を拡大していく必要があることから、1拠点当たりの製造量とタクトタイムを設定している。加工精度として、触媒層塗工 $\pm 0.5\text{mm}$ 、張り合わせ位置精度 $\pm 0.5\text{mm}$ があるが、これは現状として達成できているレベルと同等かそれ以上の精度であり、目標仕様として設定した。

表 2.7.4-1 コスト目標値と目標仕様（製造）

	2030 年	2035 年
コスト目標値 (KPI)	HDV システム 0.9 万円/kW HDV スタック 0.45 万円/kW FCV システム 0.4 万円/kW FCV スタック 0.2 万円/kW (加工費 70%) (材料費 70%)	HDV システム 更なるコスト低減 HDV スタック 更なるコスト低減 FCV システム 更なるコスト低減 FCV スタック 更なるコスト低減 (加工費 72%) (材料費 72%)
目標仕様（製造）	製造量: 国内で約 20 万台、1 拠点当たりの製造量は約 7 万台/year 製造速度: 1 拠点当たりのタクトタイムは枚葉工程 0.5 秒/cell、ロール工程 15m/分 加工精度: 触媒層塗工 $\pm 0.5\text{mm}$ 、張り合わせ位置精度 $\pm 0.5\text{mm}$	製造量: 国内で約 34 万台、1 拠点当たりの製造量は約 8 万台/year 製造速度: 1 拠点当たりのタクトタイムは枚葉工程 0.4 秒/cell、ロール工程 19m/分 加工精度: 触媒層塗工 $\pm 0.5\text{mm}$ 、張り合わせ位置精度 $\pm 0.5\text{mm}$

コスト低減に取り組むべき工程を確認するため、米国 Strategic Analysis 社の FC スタックコスト試算（図 2.3.1-3）をみると、スタックコストに占める主要部材（触媒層、BPP、電解質膜、GDL、MEA ガスケット）の割合が大きく、全体の約 80%となっている。また、同じ試算結果を基に、2023 年から 2030 年のコスト低減、3 万台/年から 7 万台/年へ製造量を増加したときのコスト低減について、ウォーターフォール図を作成した（図 2.7.4-1）。材料費の低減率が高く、生産技術においても材料費を低減させるための技術（高性能化や新規材料導入加速）の重要性が示唆されている。加工費についても低減が想定されており、工程の改善や省略、及び工程の高速化や設備利用率の向上などが、加工費低減に重要である。また、これらの開発のための原理解明等も課題である。生産技術開発とコストダウンの関係について、図中に追記して示した。

同様に米国 Strategic Analysis 社の FC スタックコスト試算における、工程ごとの加工費の内訳を図 2.7.4-2 に示す。BPP 加工、電解質膜成形、触媒合成、触媒層成形などの各部材の製造工

程、MEA 化・セル化・スタック化といった組み立て工程、エージング工程などが加工費の主要因となっていると推定されている。また、各工程に検査工程が含まれており、検査工程も大きなコスト要因となっている。

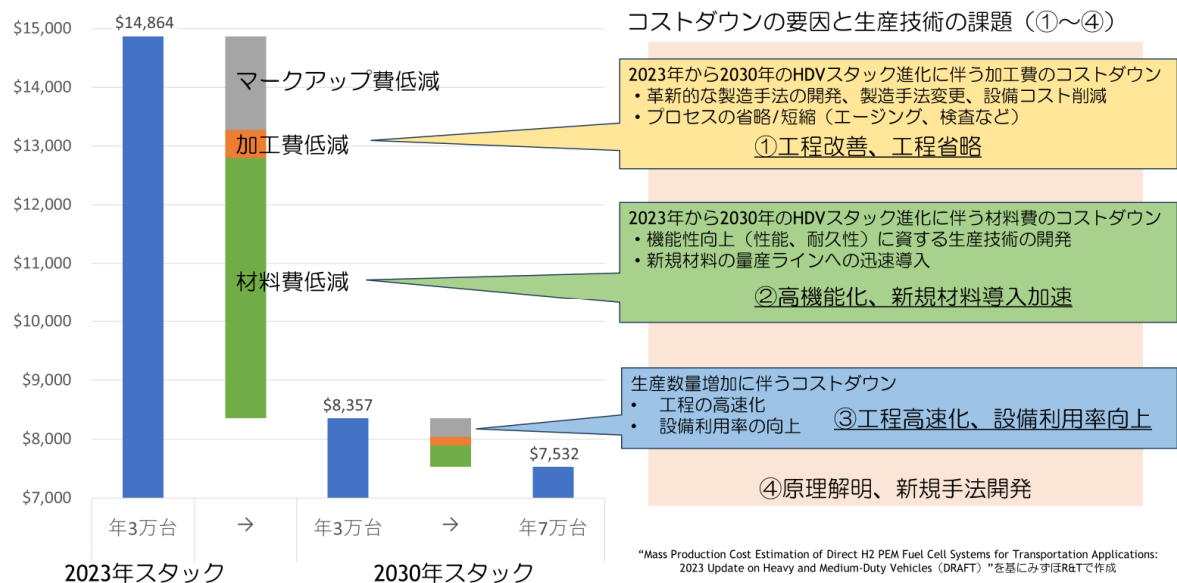


図 2.7.4-1 米国 Strategic Analysis 社の FC スタックコスト試算のウォーターフォール図。図中の記述は各コストダウン要因と生産技術課題の対応

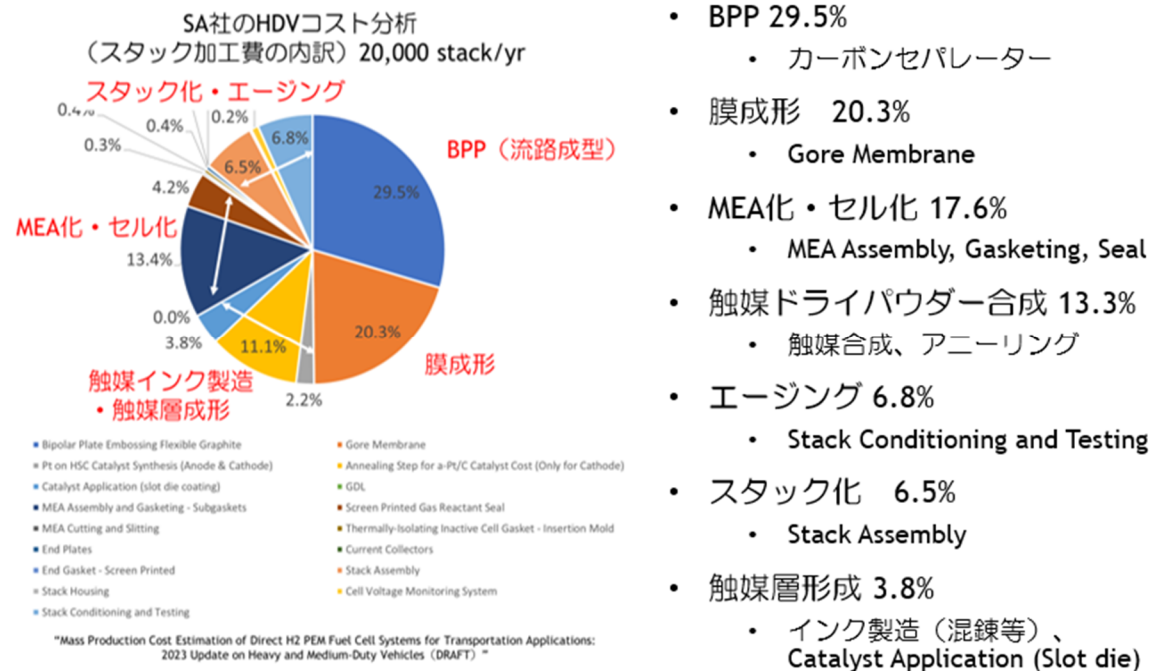


図 2.7.4-2 米国 Strategic Analysis 社の FC スタックコスト試算におけるスタック加工費の内訳

これらのことから、コストの主要因となっているのは主要部材 (触媒層、BPP、電解質膜、GDL、MEA ガasket) の材料費・加工費、及び MEA 化・セル化・スタック化などの組み立

て工程やエージングの加工費であると想定される。これらの工程は触媒や電解質膜などの材料製造工程、CCM や BPP などの燃料電池の部材製造工程、MEA 化・セル化・スタック化などの部材の組み立て工程、エージングなどの仕上げ・調整工程に分類できる。ここで、本ロードマップの生産技術においては、部材製造工程以降の工程を検討対象とし、優先開発工程を表 2.7.4-2 に抽出した。検討対象外とした工程にも、膜成形、触媒合成、GDL 製造などコストの大きなものがあり、コスト低減が重要な課題であるため、特にコストとして大きな電解質膜成形について、優先開発工程と合わせてコスト低減の方向性を整理した。

表 2.7.4-2 優先開発工程

工程	ターゲット
触媒調合・触媒塗布乾燥・MPL 塗布乾燥	材料費、加工費
MEA 化・セル化・スタック化	主に加工費
流路形成・表面処理	材料費、加工費
エージング	加工費
品質検査	加工費

優先開発工程の加工費・材料費を削減していくためには様々な方針が考えられる。例えば、工程を自動化することで加工費を下げる、高速化することで加工費を下げる、高性能化することで必要な材料を削減して材料費を下げる、などが挙げられる。製造原価構成と工程進化・革新の方向性の例を表 2.7.4-3 に示した。

表 2.7.4-3 製造原価構成と工程進化・革新の方向性の例

製造原価構成			工程進化・革新の方向性の例
材料費	直接材料費	素材費、購入部品費 など	・歩留りを向上する、機能を向上する
			・材料を変える、材料を減らす
			・部品を安くする、部品をなくす、部品を統合する
加工費	間接材料費	補助材料費、消耗性工具費 など	・補助材料を減らす、補助材料をなくす
			・消耗性工具の寿命を延ばす
	労務費	直接労務費	・人員を削減する(工程の自動化など)
		間接労務費	・人員を削減する
	経費	直接経費	・外注加工、特殊検査などを削減する
		間接経費	・加工時間を短くする、加工の前後時間を短くする
			・工程を少なくする、工程をなくす
			・設備を安くする、特殊建屋空間を減らす
			・エネルギーを削減する

一方で、各工程には特有の課題（コスト低減のボトルネック）があり、これを解決することが今後の開発の方向性となる。例えばプレス機械は型費が高くプレス回数で概ね寿命が決まるので、コスト低減には耐久性を上げる必要がある、MEA 化・セル化は自動化度合いが低く、量産時にコスト低減するためには自動・高速化が必要である、などが挙げられる。これらの各優先開発工程のボトルネックを有識者へのヒアリング等から整理し、ボトルネックを解消する方向性を工程進化・革新方針として表 2.7.4-4 に示した。また、合わせて電解質膜成形の工程進化・革新方針を表 2.7.4-5 に示した。

表 2.7.4-4 優先開発工程の工程進化・革新方針

工程	ターゲット	工程改善により期待する効果 (括弧内は目標年)	手段(括弧内は目標値)
触媒調合 触媒塗布乾燥 MPL 塗布乾燥	加工費削減	乾燥工程のエネルギー費削減、減価償却費削減(2030 年)	触媒インク・GDL+MPL ペーストの乾燥工程高速化、工程時間短縮、乾燥条件の最適化(目標値:乾燥エネルギー - 70%)
		脱泡混練工程のエネルギー費削減、減価償却費削減(2030 年)	インク製造の連続処理化、工程時間短縮 脱泡混練時間の短縮(目標値:従来法比 70%)
		抜き取り検査工程の労務費削減(2030 年)	抜き取り検査レス化(検査のインライン化)
		乾燥工程のエネルギー費、減価償却費の大幅な削減(2035 年)	革新的なドライ塗工工法(静電スプレー塗工等)の導入(目標値:乾燥エネルギー 90%)、工程時間短縮
	材料費削減	触媒層高性能化による素材費、購入部品費削減(2030 年) 高性能化により単位出力当たりの必要な材料が減少	最適化マイクロ構造触媒層を実現する混練/塗工方法の導入
		歩留り向上による素材費、購入部品費削減(2030 年)	塗工における Pt 歩留り向上 (目標値:Pt 歩留 > 98%)
		低コスト・高性能材料の使用による素材費、購入部品費削減(2035 年)	混練における Pt 歩留り向上 (目標値:Pt 歩留 > 99.9%) 革新的な触媒インクの迅速導入(工程の原理解明、加工条件の自動最適化)
補足:ドライ工程化には、材料改良と乾燥高速化の両面のアプローチが必要。ドライ化のため触媒インクの固形分濃度を増やしても、効率良く混ぜ、塗工時の乾燥プロセス(レーザーや熱風)によらず早く乾燥することが求められる。また、レーザーによる高速乾燥は装置コスト増加の可能性がある、全体としての低コスト化を検討する必要がある。			
MEA 化 セル化 スタック化	加工費削減	接着工程の減価償却費削減(2030 年)	高速硬化接着剤の使用による接着時間の短縮 耐久性とのトレードオフがあるため、高耐久かつ接着時間の短縮が必要 高速塗布工法の開発による工程の高速化

			工程の間接動作時間の短縮
		把持・搬送・裁断の減価償却費削減(2030年)	把持・搬送・位置決め・裁断の高精度高速化、工程時間の短縮(目標値:位置精度±0.5mm@50m/分、搬送加工費・裁断加工費従来法比 70%)
			但し、位置精度は一般的な工程の数値。裁断や積層の順序など組み立て設計の仕様により必要な精度は異なる。
		補助材料費の削減(2030年)	MEA 材料の保護フィルム削減・レス化 裁断時余剰材料の最小化、再利用
		接着工程の減価償却費の大幅な削減(2035年)	接着剤のシート化など革新的な接着工法による工程の更なる高速化、工程時間短縮
		検査設備の減価償却費の削減(2035年)	カメラなど検査設備の簡素化、代替手法の開発、工程時間短縮
流路形成 表面処理	加工費削減	プレス加工の減価償却費削減(2030年)	型(消耗性工具)の高耐久化、低荷重プレス化(目標値:型費用従来法比 70%) 多段成形から一発成形へ変更
		流路形成設備の減価償却費の更なる削減(2035年)	プレス加工から印刷・3D プリンター等への置き換え
		表面処理のエネルギー費削減、減価償却費削減(2030年)	表面処理工程の高速化による時間短縮(目標値:10秒/枚) 表面処理の低真空化(電力消費量従来法比 80%)、 表面処理の連続化
		表面処理の更なるエネルギー費削減、減価償却費削減(2035年)	表面処理工程の更なる高速化による時間短縮(目標値:8秒/枚) 表面処理の非真空化(電力消費量従来法比 85%)、 表面処理の連続化
	材料費削減	高性能化・高耐久化によるセパレータの素材費削減(2030年)	ファインピッチ化可能なプレス加工手法の導入 高性能・高耐久性のための表面処理技術手法の導入
		更なる高性能化によるセパレータの素材費削減(2035年)	ファインピッチ化可能な印刷・3D プリント手法の導入
		低コスト材料の使用によるセパレータの素材費削減(2035年)	低コスト材料+表面処理による材料代替 低コスト材料の導入加速

	補足：表面処理は実施せず、表面処理レスによるコスト低減も考えられる。一方で、表面処理を品質良く欠陥レスで実施することが可能であれば、被膜を薄くし、検査も不要とすることでコスト低減が可能となる。セパレータ材料と表面処理の組み合わせから、コストを最小にする検討が必要である。		
エー ジ ン グ	加工費 削減	エーシング設備の減価償却費、 補助剤費削減(2030 年)	エーシング時間短縮(目標値:5 分以内) 水素使用量削減(目標値:従来法比 80%)
		エーシング工程のレス化により 更なる減価償却費、補助剤費削 減(2035 年)	オンボードエーシングの実現(目標値:エーシング 0 分) 初回起動時の運転モードの開発が必要
品質検 査	材料費 削減	検査設備の減価償却費の削減 (2030 年)	検査項目の削減(目標値:検査項目従来法比 70%)
			検査の連続化による検査時間の削減(リーク検査時間 従来法比 70%)
			検査の高速化による検査時間の削減(金属異物検査な ど)
			検査の手法の変更による低コスト設備化(X 線検査の振 動・音波検査代替など)
			検査設備の高寿命化(X 線シンチレータなど)
補足：検査技術の進化、加工のモニター化技術の進化の両面のアプローチが重要。加工技術のモニター化により、リアルタイムで製造プロセスを監視・制御し、欠陥を未然に防ぎ、結果として品質検査の負担を軽減する。それにより非効率な検査工程を簡略することも可能となる。センサ技術の高度化や AI によるデータ解析と異常予測、フィードバック制御などが必要である。また、その際、検査データの大容量化が考えられ、圧縮保存や通信技術の高度化も必要である。			

表 2.7.4-5 電解質膜成形の工程進化・革新方針

工程	ターゲ ット	工程改善により期待する効果 (括弧内は目標年)	手段(括弧内は目標値)
電解質膜 成形	加工費 削減	電解質膜加工設備減価償却費、労務費 等の削減	検査の最適化、工程の自動化などの工程改良 需要量の拡大、仕様の統一(標準化)などに よる設備投資コストの低下
	材料費 削減	材料使用量減少による材料費削減	薄膜化による性能向上 薄膜化による材料使用量の削減
		低コスト材料の使用による材料費削 減	イオン交換樹脂などの材料の低コスト化 低コスト材料への材料代替

2.7.5 生産技術課題

図 2.7.5-1 に、一般的な FC 製造ライン工程を示す。また、図 2.7.5-2 には重ねて現状の技術課題を示した。現状では、高価な材料のロスが大きく、電極の塗工工程、セル化工程、セパレータ加工、表面処理の加工時及びエージング工程に長時間を要している。このまま生産規模を増やしても膨大な設備投資と工場スペースを要することになる。

前述のようにコスト目標を達成するためには、高価な材料の歩留まりを上げ、工程全体の大幅な生産性の向上を図る必要がある。各工程において工法の技術革新が求められる。

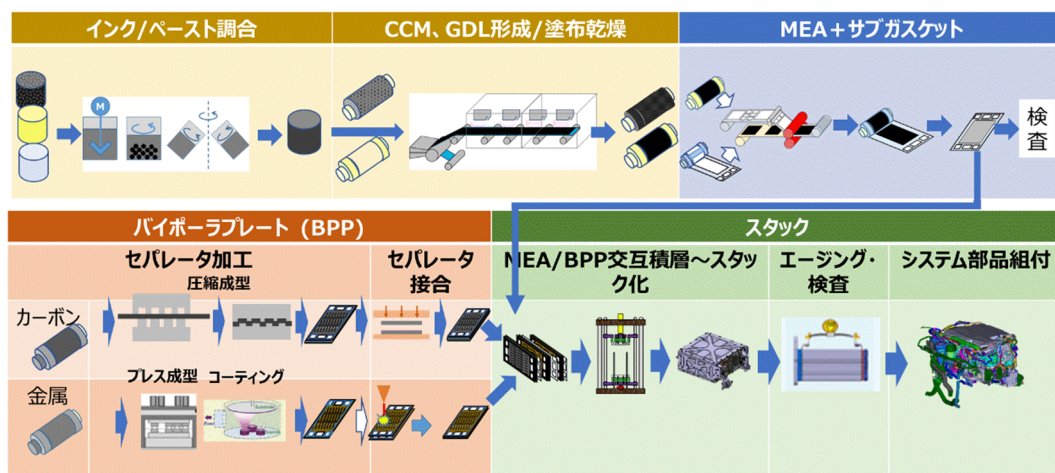


図 2.7.5-1 燃料電池スタック生産工程

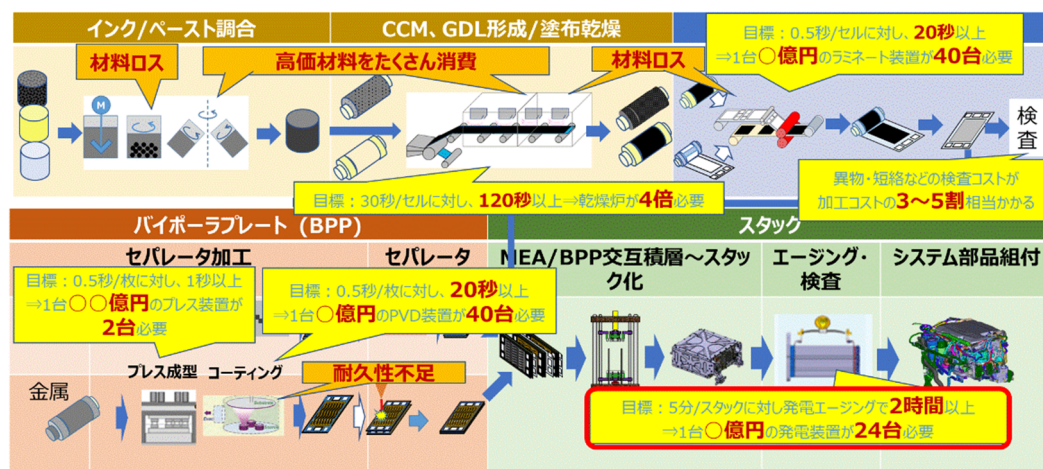


図 2.7.5-2 燃料電池スタック生産工程 現状と課題

主要工程ごとの 2030 年、2035 年頃における生産技術の開発の方向性を (1) ~ (6) に示した。表 2.7.5-1 に工程ごとの具体的取り組み課題をフェーズ毎にまとめて示した。

(1) 触媒調合塗工乾燥工程 MPL 調合塗工乾燥工程

本工程は、セル・スタックの性能を決める重要な工程であるが、良好な触媒を製造するための各種製造条件を最適化するため、従来はカン・コツに頼って試行錯誤を繰り返したり、膨大なプロセスパラメータの組合せを総当たりで実験を行ったりしており、膨大な費用と時

間がかかっていた。また、本工程で用いる触媒金属、電解質材料は高価な材料だが、現状では最適な場所に必要最小限の材料が配置されているような理想的なミクロ構造になっているとは言えず、コストダウン実現のためには、より理想に近いミクロ構造を追求し、高価な材料の歩留を向上する取り組みが必要である。さらに、この工程を高速化しようとしたときには触媒インク・GDL+MPLペーストの乾燥工程がネックとなっており、乾燥工程は必要とする設備投資もエネルギー量も大きいため、乾燥時間を短縮することができる工法を開発することが大きな課題となっている。

2030年の社会実装に向けては、現在の触媒金属、触媒担体、電解質材料を用いた触媒インクに対して上記課題を解決するような技術を成立させることを目指す。まず、プロセス・インフォマティクス技術（以降PI技術）を開発し、プロセス中の各種パラメータと燃料電池性能を紐づけて分析することでそれらの関係性を明らかにする。これら明らかになった関係性のメカニズムを解明するためには、触媒インク性状や触媒層ミクロ構造をナノレベルで詳細に把握することができるよう各種見える化技術（放射光を用いた解析技術など）が必要である。このような活動を通して、理想構造により近い触媒層構造を実現し、従来にない性能・コストを実現させる。また、それらを生産する際の品質維持のために必要なインラインのインク物性計測技術にも取り組む必要がある。また、触媒インク・GDL+MPLペーストの乾燥工程の高速化についてはインク・ペーストの溶媒比率の最適化や炉内の製品や熱風流路の最適化などについてもPIを用いて開発期間を短縮しながら推進する必要がある。

2035年の社会実装に向けては、2030年前後には革新的な触媒金属、触媒担体、電解質材料などの新しい触媒インク材料や、乾燥時間を大幅に低減できるとされている静電スプレー塗工などの革新的な塗工工法が実験室レベルでは成立してくることが予想されるので、それらの新材料・新工法に対応するための構えを用意しておく必要がある。具体的には、上述したPI技術に加えて、さまざまな新材料・新工法を用いたときの塗工・乾燥プロセス中の触媒層内のミクロ構造をシミュレータ上で予測することで実験手番を大幅に低減できるようなシミュレーション技術の開発が必要である。また、電解質膜については現状よりもさらに薄くなることが予想されているので、そのような極薄電解質膜を高速でロール流動させるような製造技術開発についても取り組んでいく。

（２）MEA化・セル化工程

本工程は、セル・スタック内のシールの信頼性・耐久性を確保する重要な工程である。シール部に用いられる接着剤には高い耐久性と十分な接着強度が求められ、また、接着剤中には触媒を被毒するような揮発成分や溶出成分を極力含まないようにする必要がある。また、本工程には接着剤の塗布や硬化のような時間がかかってしまうものが多く、生産性向上の障害となっている。また、本工程で取り扱う部材はいずれも薄くて柔らかい部材であるため、その把持・搬送・位置決めなどの難しさも時間がかかってしまう要因となっている。

2030年の社会実装に向けては、接着工程の高速化と接着強度を両立するような接着剤や触媒被毒物質を含まない接着剤の材料開発が必要であり、工法としても、上記のような新規接着剤材料に対応するための工法開発や、低コスト化実現のための高速接着剤塗布工法、高速で接着剤を固める硬化工法の開発が必要である。高速接着剤塗布工法の具体的な例としては、

現状の枚葉生産からロール to ロール生産に移行することを想定し、動いている部材の上にディスペンサで接着剤を塗布する方式などが考えられる。高速で接着剤を固める硬化工法の具体的な例としては、高速で熱硬化させるための新しい加熱方法や、短時間で光硬化材を硬化させることができる新しい UV 光及びその照射方法、さらには接着に加熱等の処理が不要な常温接着などが考えられる。また、薄く柔らかい材料を高速で把持・搬送するウェブハンドリング技術や高速で貼り合せするコンバーティング技術の開発も必要である。具体的にはロール to ロールで流れている基材の上に高精度に貼り合せを行う技術や、リニア搬送や浮上ウェブ搬送などの最新の高速搬送技術などが考えられる。さらにこれらのウェブハンドリングについてのシミュレーション技術は確立しておらず、ウェブハンドリングなどの搬送を含む工場全体のデジタルツイン技術も開発していくことで製造効率が向上する可能性がある。

2035 年の社会実装に向けては、更なる高速化を実現するような技術開発に取り組む。例えば接着剤をシート化してそれを送りながら貼り合せただけでシール部が完成するなど、革新的な工法の開発が期待されている。また、高速化が進むとそれに伴って位置合わせのためのカメラ検査などのセンシング技術が必要になってくる。カメラが増えたりより高い解像度が必要になったりすると、コストアップにつながってしまうため、可能な限りカメラ検査の工程を簡素化する方法の検討が必要である。画像以外の情報から位置のずれを予測するような技術の開発も必要であると考えられる。

(3) パイポラー流路形成工程

流路の形状・パターンが、燃料、酸化剤ガスの供給、発電分布、排水性に大きく影響する。今後さらなる性能向上を図るため、流路は、ファインピッチ化していくものと予想される。適用する基材に適した、加工技術、表面処理技術、親水化技術等を総合的に選定することにより、セパレータの機能とスタックの耐久性を確保することが可能となる。

2030 年頃に向けては、微細パターンの高速加工のため従来のプレス加工の高度化と 3D プリンターなどの次世代技術の開発が並行してすすむと予想される。

一般的に移動体用スタックでは、金属箔を精密にプレス加工して流路を形成する。一枚あたりの成形コストは型費と型寿命で決まり、量産効果があまり期待できない。今後は、プレス成形加重の低減や潤滑の改善により型寿命を伸ばす取り組みと多段成形から一発成型にするなどの取り組みでプレス型費の低減を図る必要がある。また、プレスによるファインピッチ化を図るための技術として、超塑性流動加工技術などの適用などが考えられる。

さらに微細な流路を形成するためには、プレスによらない加工技術（導電材料の印刷、3D プリンター等）の開発を並行して進める必要がある。金属材料の伸びの制約により山溝ピッチには限界があるが、導電性材料のパターン印刷技術によって 1 mm ピッチ以下微細流路が形成可能となると思われる。

セパレータ基材と表面処理との組み合わせにおいて、通常はプレス加工後に枚葉で表面処理が行われる。連続表面処理後のプレス加工が可能な技術が実現すれば、生産性と加工コストの低減が見込める。また、メタル基材とカーボン複合材料との組み合わせなど高耐食性材料が利用される場合、これらの材料に対応する流路加工技術の確立も必要である。

さらに 2035 年頃に向けては、プレス以外の流路形成技術が実用化される可能性がある。印刷、3D プリンター等のプレスによらない技術の実用化開発が期待される。これらの技術はプレス成形に比べて成形コストが低く流路の微細化が容易であるが、加工精度や生産性が課題であり、量産に向けた高速化の技術開発が必要である。

(4) 表面処理

今後、HDV では、耐久 5 万時間が要求される。金属セパレータの基材と導電性表面処理においては、さらなる耐腐食性、低接触抵抗の機能維持が求められる。現在、SUS 基材あるいはチタン基材へのカーボンの薄膜コーティング(PVD、CVD 等)の適用が検討されているが、高真空プロセスであるためにコストアップの要因となっている。低真空 CVD 等の採用、高価な真空装置を用いない表面処理技術の探索が必要である。例えば、半導体デバイス製造に適用される原紙層堆積法(ALD)も量産が可能であれば適用の可能性があると思われる。

2030 年頃に向けては、耐食コート層の耐食性、導電性の確保はもとより、接着部材との接着性や接着力を維持することが必要である。一般的に接着力を維持するためには、界面への液水の侵入を防ぐ必要があるため耐食コート層は、緻密な構造であることが求められる。また、接着面の高接着性・高耐久化や電気抵抗の低減を目的に表面処理による親撥水性や表面エネルギーの制御技術の向上が必要である。

今後、低コスト・高ハンドリング性の基材の利用も考えられるが、耐食性が低いことが課題となると予想される。耐食コートの表面欠陥が存在すると電池環境では孔食が短時間に進行する。このため、表面欠陥の無い処理層を形成する技術開発が必要となる。また、基材や接着剤の変更に伴い表面処理の条件も変わるため、各材料に合わせた開発も必要である。

2035 年以降では、表面処理も高速化、連続処理化を目指した開発が必要となる。例えば、高真空を必要としないプラズマ表面処理は、従来の高真空表面処理に比べて運用コストが低いと考えられる。また、高速化のためロール to ロールプロセスの採用を検討するとき、取り扱いが容易な低真空の表面処理技術は優位となると考えられる。

表面処理技術の開発には、基材や接着剤の変更に伴う表面処理の変更、開発が継続的に必要である。ここでも、セパレータ基材・加工技術と表面処理選定を総合的に検討し、結果的に生産性向上、コスト低減につなげる開発が必要である。

(5) エージング

エージングは、スタック組付け後、発電検査装置を用いて発電することによりセル中の電解質を湿潤させてプロトン抵抗を下げるプロセスと触媒表面に付着したコンタミ成分を洗浄除去するプロセスを同時に行う工程である。触媒を被毒する成分は FC 製造工程において多数あり、それぞれの影響を把握しておく必要がある。触媒活性に強く影響する成分は使用しないか、回避する発生源対策が必要である。接着剤由来成分、樹脂シート、金属基材の汚れ、製造機械由来等がある。ワークの加熱によっても被毒が加速されることもある。材料選定および加工条件の事前の検討が必要である。

通常、エージング処理には、数 10 分から数時間を要するため多大なコストを要する。月 6,000 台規模の生産ラインにおいては、タクトタイムは、約 3 分/台となるのでエージングに

60 分かかるとすると 100kW 級の発電検査装置が 20 台必要となり多大な設備投資、多大な燃料、電力が必要になる。

2030 年頃にむけては、エージング時間を 5 分以内と置き、コンタミ付着要因の特定や電解質湿潤メカニズム解明を図りつつ、エージング処理時間の短縮、発電検査時の水素消費低減につながる効率的な手法を開発して、エージング工程のコストを低減する以下のような取り組みを継続する。

- コンタミの付着、脱離メカニズムの解明のための基礎的研究開発の推進
- 効果的なコンタミのクリーニング手法の確立（電位変動＋低電圧保持等）
- 触媒層コンタミの防止手法の確立（触媒機能に影響する接着剤由来の成分使用の回避等）
- アイオノマ、電解質膜の湿潤メカニズムの解明
- 予備湿潤などの効果的な湿潤手法の確立

コンタミの低減については単一の成分を対象としておらず、すべてのコンタミ成分を対象としている。また、新規の材料を用いることで新たなコンタミ成分が発生する可能性があり、コンタミ低減のための汎用的な手法や考え方を確立することが重要である。

2035 年以降には、コンタミ低減・プロトンパス形成手法が確立することによりエージング工程のレス化が期待される。大幅な設備投資の削減が可能となるためコスト削減に大きく寄与できる。究極は、エージング時間を 5 分以下として、オンボード（完成車の試運転）でのエージングを可能としたい。

（ 6 ）品質検査

現状の燃料電池の生産工程内には、MEA 中の金属異物検査、短絡検査、リーク検査（セル、スタック、出荷前）、スタック発電検査、目視検査など様々な検査工程があり、加工コストの 3 割～5 割が検査コストとなっている。今後、生産性を上げるためには検査工程の高速化、簡素化・レス化を推進する。また、現状の枚葉工程の品質検査については、間欠動作を低減や連続工程化による高効率化の推進が必要である。

2030 年の社会実装に向けては、MEA 中の金属異物検査の高速化やリーク検査の高速化など、現状工程の検査コストを低減するための技術開発に取り組む。セルのリーク検査工程について具体的には、現状の枚葉生産からロール to ロール生産に移行することを想定して、セルを移動させながら検査できるような技術開発などが考えられる。またリークの要因を押さえることでリーク検査をレス化していくことを考えたとき、接着剤が決められた部位に塗れているかの X 線検査やその代替としての振動・音波検査などが挙げられる。また、X 線を用いる場合、X 線シンチレータは交換費用が高いため高寿命化の開発が必要だと考える。

2035 年の社会実装に向けては、今後の燃料電池の進化にともない必要となる検査技術の開発に取り組む。バイポーラプレートは今後安価な材料に表面処理を実施して耐久性を担保する方向で研究が進められているので、表面処理のナノレベルの欠陥を高速かつインラインで検出できるような低コスト検査技術の開発を進めておく必要がある。

表 2.7.5-1 工程ごとの取り組み課題

工程	シーズの確立	要素技術開発	実用化技術開発
触媒調合 触媒塗工乾燥 MPL 塗工乾燥	<ul style="list-style-type: none"> ・計測・定量技術探索 (アイオノ分散状態、触媒インク構造、インクの静的・動的特性) ・触媒インクの塗工乾燥条件への PI 適用手法の確立 ・触媒調合・新塗工技術への PI 適用手法の確立 ・乾燥レス化技術の探索 ・新規材料に対応するプロセスシミュレーション技術の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・インク物性計測技術の確立 (インライン) ・連続インク製造技術の確立 ・触媒インク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 ・乾燥レス化技術の確立 ・極薄電解質膜のロール搬送技術の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥レス化技術の高速化 ・極薄触媒層のロール搬送技術の高速化 ・新規触媒インクの塗工技術の高速化
MEA 化・セル化	<ul style="list-style-type: none"> ・シール性検査プロトコルの確立 ・ウェバハンドリング技術の探索、コンバーティング技術の改良 ・MEA 化・セル化への PI 適用手法の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・界面接合の高速化と高接着性の両立技術の確立 ・新規シール材料の成形技術の確立 ・加圧加熱工法の高度化 ・高速ハンドリングの確立 ・高速把持位置決め技術の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・新規シール材を活用した MEA 化工程の高速化 ・位置決めの高速度、高精度化 ・コンバ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	<ul style="list-style-type: none"> ・微細パターン流路形成技術適用手法の探索 	<ul style="list-style-type: none"> ・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の確立 ・スクリーン印刷等の高速化技術の確立 ・メタル+カーボン等の高耐蝕材料・表面処理後材料の加工技術の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・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高速化
表面処理	<ul style="list-style-type: none"> ・低真空表面処理技術の探索 	<ul style="list-style-type: none"> ・低真空表面処理技術の確立 ・低コスト・高ハンドリング基材の導電性・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・親撥水性・の制御技術の向上 ・表面処理の高耐久・低抵抗化 	<ul style="list-style-type: none"> ・ロール to ロール高速表面処理技術の確立
エージング	<ul style="list-style-type: none"> ・電解質湿潤過程の原理解明 ・コンタミ成分の分析手法の探索 ・触媒コンタミ成分の付着要因の特定 ・予備湿潤技術の確立 ・コンタミ付着形態観測技術の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・触媒クリーニング手法の確立 ・低コンタミ材料を活用したエージング技術の確立 ・コンタミ物質の付着防止技術の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・オンボードエージングプロトコルの確立
品質検査	<ul style="list-style-type: none"> ・異物金属検査方法の探索 ・表面欠陥検出技術の探索 	<ul style="list-style-type: none"> ・高速異物金属検査技術の確立 ・リー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 ・表面処理のナノ欠陥検出技術の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・塗布膜厚測定の高速度化 ・塗布欠陥検出の高速度化 ・極薄電解質膜のヨレ・シワ検出の高速度化 ・表面処理のナノ欠陥検出技術の高速度化

2.8 水素貯蔵技術

2.8.1 技術開発課題（高圧水素）

（１）コスト低減＋質量貯蔵密度向上

【革新材料】

高強度炭素繊維

現在主流である PAN 系繊維を原料（前駆体）とする炭素繊維の機械的強度を維持しつつ、原料コスト、焼成エネルギーの削減による低コスト化が可能な革新炭素繊維の開発が進められており、その進捗が待たれる。

この革新低コスト炭素繊維は 2025~30 年の間に汎用グレードの繊維強度を達成するとともに、2040 年に向けては、高圧水素タンクでの炭素繊維使用量の更なる削減を狙い、同革新炭素繊維のコストレベルを維持しつつ、更なる構造改良による 7 GPa を超える高強度化につなげる。

CNT 等の超高強度炭素材料についても、複数の使用法が想定される。例として、母材に分散させて強化材・配向材として使用する、撚糸状に連続繊維化して使用する、などが挙げられるが、現時点では炭素繊維の高強度化に対する具体的な適用法は得られておらず、また量産性向上などによる低コスト化も必要であり、更なる研究が必要な領域と考える。

高機能マトリックス樹脂

現在、高圧タンク用マトリックス樹脂としては、機械的強度および化学的耐性に優れ、また、寸法収縮率が小さい熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂が広く採用されている。一方、近年欧州を中心に、熱可塑性樹脂の研究が盛んに行われている。リサイクル性や高靱性化、高圧タンクの硬化工程の短縮化等、熱硬化性樹脂とは異なる特性の活用を狙ったものである。FRP 複合材料におけるマトリックス樹脂の基本機能としては、化学安定性、耐熱性、低収縮性などが求められる一方、繊維 樹脂界面接着強度や亀裂進展抑制機能など、FRP 疲労破壊特性に影響する物性面での未解明部分が多い。加えて、CFRP 疲労破壊要因の一つと考えるボイド生成に係る炭素繊維束への高い樹脂含浸性など、工法に係る特性への要望も多く、高圧水素タンク用 CFRP マトリックス樹脂の開発指針の確立が急務である。

【革新タンク構造・工法・材料】

炭素繊維使用量低減構造＋生産技術

図 2.4.1-1 に示したように現行の FW 構造/製法の CFRP 製高圧タンクでは、約 2/3 の炭素繊維に引張強度余裕があることが知られている。

2023 年、2024 年にそれぞれ改定予定の GTR13 及び UN R134 の新規制（初期破裂安全率の 2.25→2.0 への適正化）に適合する為に、構成部品形状の適正化や製造バラツキの低減を含む最適な CFRP 積層構成を産学で明らかにする。

また今後、現在主流の熱硬化樹脂に対して硬化工程を廃止でき、生産性を大幅に向上させられる可能性があり、更にリサイクル面でも炭素繊維の分離に利点があるとされる熱可塑性 CFRP の開発への期待が高まっている。CFRP 強度や耐衝撃性、耐熱性に優れた樹脂材料の開発と、樹脂の性状に合わせた成形工法（FW 又は ATP）を双方セットにて開発することが必要である。

CFRP 製高圧タンクを構成する炭素繊維の使用量（コスト）を低減するため、タンク内の、炭素繊維の強度余裕分布を極力均等にするよう、従来のFW構造の枠を超えた繊維配置の自由度が高いタンク構造の検討が始まっている。必然的に発生するCFRPの不連続部の構造設計が重要であり、従来一体であったCFRP構造体を分割体で構成する概念により、適材適所に異なる素材を使用することも可能となり、マルチロードパス・マルチマテリアルの構想も取り入れることができる。

この設計思想を実現する工法としては、多給糸・ブレードイングなどの新しいCFRP連続繊維の積層方法に加え、ドーム部（鏡部）を部分的に補強するためのチョップドテープやUDテープからのプリフォームもその代表例であり、積層方法の探求が必要な分野でもある。しかしながら、圧力容器に限らずCFRP複合材料製品の工法開発は、国内勢に対して海外メーカーおよび研究機関での検討が先行している。水素貯蔵容器の工法研究については、海外機関との情報交換を含めて継続的な検討も必要である。

ガスバリア構造 + 生産技術

現状のCFRP製高圧タンクは、ガスバリア機能をライナーのみが受け持つ設計が殆どである。

一方、強度を受け持つCFRP構造にガスバリア機能を持たせたType5容器や、薄膜ライナーをCFRPと一体化したタンクの仕様提案が、欧州を中心に既に始まっている。このコンセプトでは、部品を統合または最小化することができ、コスト低減および質量貯蔵密度の向上に加え、Type4タンクが不得意とした体積貯蔵密度の向上も期待できる。ライナーレス化の構想は、ロケット用液体水素タンクで先行しているが、充填放出を繰返す乗用・商用車用途では耐久性等を慎重に検討する必要がある。

海外に遅れることなく、且つ確実なガスバリアを実現するため、CFRPのガスバリア理論の解明及び薄膜/塗工ライナー用材料・製法の開発に着手する必要がある。水素貯蔵容器の設計・製造において、シミュレーション技術と製造データ・評価データを連携したMI（マテリアルズ・インフォマティクス）、PI（プロセス・インフォマティクス）技術を構築することで、効率的な設計・製造パラメータの同定、設計の高度化や新設計の実現、適正な安全率の導出、品質向上の実現を期待する。また、今後の水素貯蔵容器の開発においては、設計・製造のみを対象にするだけではなく、長期使用（検査・修理含む）やリユース・リサイクルのフェーズまでを考慮した循環型経済を見据えた取り組みが必要である。長期使用やリサイクル（循環配慮設計）においてもデジタルデータ連携技術やDX技術の活用が必須である。

今回のロードマップでは、製造・長期使用・リサイクルを対象としたDXの研究～実証までをアジャイルに進めるイメージを表現したが、水素貯蔵システムに必要なDX技術への落とし込みがさらに必要である。水素貯蔵システムDXのロードマップについては、今後も継続した議論が必要である。

（２）低コスト仕様タンク

【応力分担材の低コスト化】

マルチマテリアル・マルチロードパス設計

圧力容器に作用する荷重の一部を、軸力部材などで分担するマルチロードパス構造が注目を集

めている。シリンダ部は内圧荷重により軸方向と周方向の荷重を 1 : 2 で負担することになるが、マルチロードパス構造では、主に軸方向荷重を負担する軸力部材と、主に周方向荷重を負担するシリンダ部材とに役割を分担する。従来の圧力容器のシリンダ部の荷重比が変わるため、シリンダ部の炭素繊維巻き角や積層構成が変化すると共に、軸力部材は炭素繊維の一方向材を使用するなど、炭素繊維をより有効に利用する構造とすることができる。両部材の接続部（ハウジング部）は安価な金属などを使用することで、高価な炭素繊維使用量を大幅に低減する構造となるが、軽量化にはデメリットとなることから、マルチロードパス構造の有効性を、試作等を通じて検証する必要がある。また、マルチロードパス構造はマルチマテリアル化も重要な研究要素であり、その接合やシール方法なども開発する必要がある。

タンクシステム構造の最適化設計

タンク自体の低コスト化に加え、タンクシステムを総合的に最適化する検討もコスト低減には必要である。水素を出し入れするバルブ類の低コスト化には、弁体などの構造設計に加え、構造部材として使用可能な金属類の選定や極低温でも使用可能な水素シール構造や材料、また低コストで信頼性の高い圧力リリーフ機構なども重要となる。また、複数のタンクを連結・併用するシステムを想定したマニホールド構造やバルブ・センサー類の位置なども最適化が必要となり、また搭載方法によってはタンクシステム自体の強度/剛性などが必要になるため、開発の早期着手が待たれる。

マルチロードパス構造の究極の形態は、車体構造とのインテグラル化であるが、現状、水素貯蔵容器は認証部品である為、製品としての設計自由度などの得失を含めて継続的に検討する必要がある。

（３）安全率・認証試験条件等適正化

過去、高圧タンクの安全率は、検査方法の進歩、材料の品質向上、そして設計と運用における経験の蓄積を背景に、段階的に軽減されてきた経緯がある。

タンクの安全率やシリーズ試験に代表される認証試験内容は、実タンクの使用条件を反映した design by test の思想にて決定されているが、現行の規格で設計され、設計寿命を終えて回収された乗用車用高圧タンクの破裂圧は、使用初期の状態からほとんど低下しておらず [1]、さらなる合理化の余地があることが明らかになってきている。また、認証試験については、シリーズ試験を構成する各試験の必要性や、それらを一括で実施する意義が問われてはじめている。FEA を使用した複合圧力タンクの設計が高度化してきていることから、これまで design by test で行っていた設計の一部を design by analysis に変更できる可能性も示唆されている。また、各国で高圧タンクに対する SHM の適用などの検討が急速にすすめられており、SHM を適用した際の安全率の考え方、SHM の適用を前提とした場合の高圧タンクの設計方法および健全性保証の方法などの確立が急務となっている。さらに、圧力タンクの安全率の設定にあたり、これまでの決定論的な方法に加えて確率論的な方法も提案されはじめている。本状況を鑑み、今後は産学官が連携して上述した様々な新しい考え方をとりいれ、安全率と認証試験の条件を科学的根拠に基づいて最適化することを追求する。

【タンク損傷のモデル化】

複合材料科学の分野では、CFRP 積層板の疲労・損傷メカニズムを把握する為に、様々なテストピースを用いた検証が実施され、また、それらの結果を基に、幾つかの CFRP の疲労モデルが提案されている。一方、実際の高圧タンクの疲労データが少ない中では、タンクの破壊挙動とテストピースの損傷破壊挙動との関連付けができていないことが課題でもあった。高圧タンクの実使用後あるいは認証試験後の損傷状態を把握し、タンクの損傷メカニズムを理論構築することは、認証試験内容の適正化と CFRP 積層構造の最適化、構成材料の新規開発に直接つながるだけでなく、損傷の進展予測を可能にする。この進展予測法と非破壊検査法が確立すれば、非破壊検査の結果をベースにタンクの余寿命を推定できるようになり、タンクの健全性保証の方法をより効率的で柔軟なものへと変更できることが期待できる。

【SHM、DX 技術の使用を前提とした安全率の適正化】

機械と建築物を構成する部材のうち、高い信頼性が求められる強度部材の疲労・損傷状態の把握に、Structural Health Monitoring（以降 SHM）が導入されはじめている。代表的な SHM としては、構造体のひずみ変化を光ファイバ等で In-Situ モニタリングする技術が挙げられる。一方、乗用車用高圧タンクに対する SHM 技術は世界各国で検討されはじめているものの、計測した結果をタンクの健全性保証に結び付ける手段、さらには SHM の使用を前提とした場合のタンクの最適な設計方法は確立していない。これらが確立できればタンクの安全率を科学的根拠に基づきながらより最適化できる可能性が高いが、例えば、これまでの決定論的な方法に変えて確率論的な方法の導入を検討すること、SHM による損傷の検出確率の把握をすること、SHM で検出可能な損傷モードと寸法をふまえた損傷許容設計法を確立すること、モニタリングシステムとタンク周辺機器とを連携される技術（DX 技術）を開発することなどが急務である。

【水素貯蔵に関する国際技術基準の適正化】

自動車に搭載する水素貯蔵容器および附属品は、高圧ガス保安法の容器保安規則に基づき事前に部品認可を取得する必要がある。この認可取得のためには、法で定められた安全基準や生産の適合性を立証する必要があるが、これらの必要要件は国連の世界技術基準（以下 GTR13）および相互認証規則（以下 UN R134）で国際的に統一された規則に基づき規定されている。

一方で、これら GTR13 や UN R134 に規定される試験は、そのデータ取得のために 6 か月以上の期間を有し（それに準じて認証コストが増大）今後普及拡大が期待される HDV に搭載される大容量容器では試験期間とコストの更なる増大が見込まれ、FCV 開発の大きな制約となっている。このため、GTR13 および UN R134 の認証試験法の適正化により、試験期間および試験コストの大幅削減が産業界から強く求められているが、長い歴史を持つ現行試験法を見直すには様々な技術課題があり、適正化時の安全性を確固たるエビデンスに基づいていかに立証できるかが、今後の大きな研究課題になっている。尚、この認証試験法の適正化は、自動車産業のみならず、同様の水素貯蔵システムを搭載する他のモビリティ（産業車両、鉄道、船舶、等）への波及効果があり、水素燃料を使用するモビリティ産業全体に寄与する非常に重要な将来課題と認識され、そのための研究と実証試験データの取得開始が期待されている。

現時点適正化が特に期待される試験とその方向性の案を以下に示す。尚下記は、水素容器の現

行シリーズ試験にある個別試験ごとの適正化をイメージするが、並行してシリーズ試験をパレル試験化して全体試験期間を削減することも研究課題と考えられる。

液圧シリーズ試験

- ・ 落下試験削除（CFRP 使用量削減による部品コスト削減）
- ・ 高温静圧試験削除または実容器を使用しない代替試験化（試験期間大幅短縮）

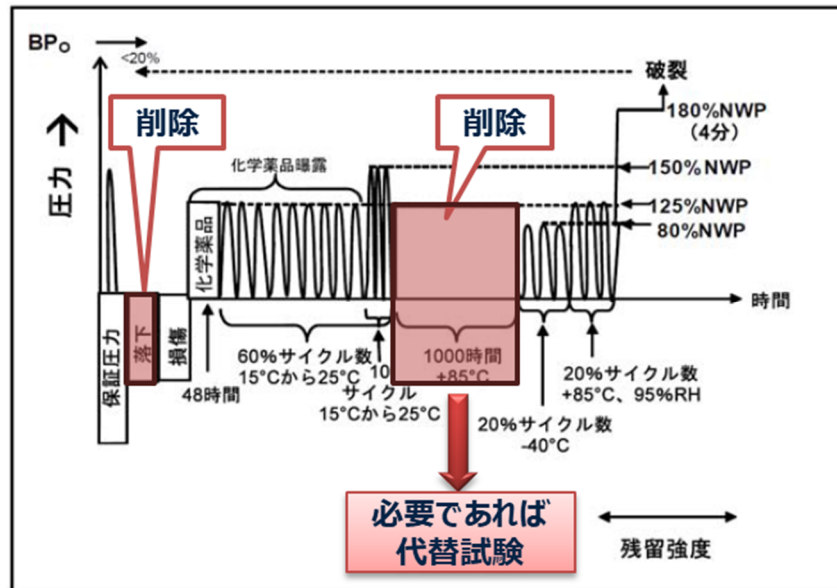


図 2.8.1-1 Verification test for performance durability (hydraulic)

ガスシリーズ試験

- ・ 各試験を実容器を使用しない試験で代替することによるガスシリーズ試験の削除（試験期間大幅短縮）

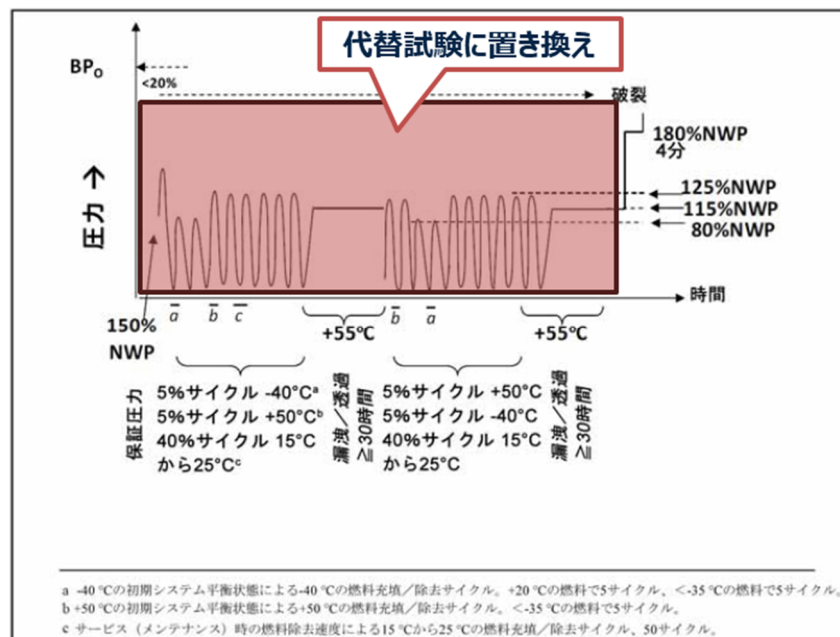


図 2.8.1-2 Verification Test for Expected On-Road Performance (Pneumatic/hydraulic)

(参考文献)

- [2] GTR13 Phase2 前文参照 (<https://unece.org/sites/default/files/2022-09/ECE-TRANS-WP.29-GRSP-2022-16e.docx> P.23)

(4) 環境負荷低減

【長寿命化】

高圧水素タンクを長期間使うための設計・修理・修復技術として、従来の FRP 材料や循環素材の長寿命化開発も重要であるが、自己修復性樹脂の導入など、様々な新技術の適用が期待される。材料自体が自動検知性能や自己修復機能を有するスマート材料の基礎研究はいくつか事例があるが (Science and Technology of Advanced Materials, 22, 2021, p.532-541, 成形加工 第 32 巻 第 7 号 2020、p252-253.) 高圧水素タンクを想定した材料研究が今後必要になる。将来構想としては、CFRP 用マトリックス樹脂やライナーに、自己修復性や自動検知性を有するスマート材料を適用することで、検査や修復を自動・自律化することも候補技術として考えられる。

直近の課題としては、CFRP における疲労損傷が、多くの場合、マトリックス樹脂の損傷に起因するトランスバースクラックと CFRP 積層間の層間剝離の進展特性に依存すると考えられるため、両破壊モードの抑制に繋がる新規マトリックス樹脂の研究が待たれる。

【タンクの再活用】

市場で使用した高圧水素タンクを廃棄することなく他の車両に転載することで利用し続けることも、環境負荷低減に繋がる重要な手段と考えられる。一部の産業機械分野では、水素充填頻度の高さから、建設機械自体が設計寿命を迎える前に新しい貯蔵容器に取り換えるニーズが高まるとされる。貯蔵容器の転載については、フォークリフト等産業車両用水素タンクや天然ガスタンクでは既に転載が運用可能な状態であることに対し、高圧水素タンク分野では、転載の事例が認められない。

本事実を鑑み、高圧水素タンク容器の転載による利用継続に向け、使用中タンクが転載利用可能かの判断技術・管理技術の確立が必須となる。加えて、ユーザーの実運用をサポートする貯蔵容器の転載マニュアル等の作成も急がれる。

(参考文献)

- [1] 日本産業車両協会規格 JIVAS-F32 : 2020 「燃料電池産業車両用電源ユニットの転載に関する安全ガイドライン」
[2] 日本ガス協会 : 2022 「圧縮天然ガス自動車燃料装置用 容器及び附属品転載マニュアル」

【CFRP 製タンクの資源循環技術】

CFRP 複合材料を用いた部品から炭素繊維を取り出すリサイクル技術として、現状様々な方法が検討されている。しかしながら、CFRP 製タンクから炭素繊維を連続繊維の状態で、初期強度を維持しながら、回収することは難易度が高く、世界的にも実用化された事例は殆ど認められない。

今後、タンクからタンクへの水平リサイクルを最終目標として想定した場合、タンクから連続炭素繊維を強度低下なく回収する為に、硬化したタンクから CFRP を分離する技術に加え、CFRP

のマトリックス樹脂を、炭素繊維にダメージを与えることなく分離・回収する技術が求められる。特に前者は、高圧タンク特有の課題であり、タンク設計時に CFRP をタンクから分離・回収しやすい材料や積層構造を採用する必要性も大きい。現在議論がなされてる欧州 ELV 規制においても、マトリックス樹脂の回収について言及されており、本分野でのブレークスルーとなり得る技術への要望は高まっている。一例として、タンクの構造を従来の連続炭素繊維ではなく、有限長を前提とした構造設計や CFRP 成形技術の開発等の新たな取り組みも必要となる。カーディング技術等を用いた繊維束成形技術の確立とそれらを用いたタンク成形技術の検討も、水平リサイクルのし易さの観点からは重要である。

サーキュラーエコノミーを考慮すると、炭素繊維のみに限らずマトリックス樹脂やライナー樹脂の再利用化を含めた資源循環可能な新規高分子材料研究への取り組みがますます求められる。現在、マトリックス樹脂に採用されている熱硬化性樹脂（エポキシ樹脂）を低エネルギーで分解できる新たな分子構造の提案や、結合交換性の動的共有結合を有する樹脂（ビトリマー）の採用に加え、ライナー材料である熱可塑性樹脂では、水平リサイクルを前提とした材料選択・材料改良が早期に解決されるべき課題である。

【GX・カーボンニュートラル】

昨今の環境負荷低減への社会要望に対応する為に、高圧タンクの主要構成材料である FRP 向け炭素繊維およびマトリックス樹脂のカーボンニュートラル化が必須の状況である。カーボンニュートラル化に向けては、炭素繊維の原料となる前駆体材料自身のカーボンニュートラル化が必要であり、植物由来原料や座礁資源等を活用する有望技術の可能性検証が待たれる。更に、前駆体材料を炭素繊維に加工する際の低エネルギー化も併せて重要である。

現在、高圧水素タンク向けの高強度繊維として、ほとんど炭素繊維（一部ガラス繊維）が用いられる一方、高分子材料あるいは他の無機材料の検証事例は殆ど無い。カーボンニュートラル化を目的とした際、これまで機能、コストの両面から検討対象外になってきた炭素繊維以外の高強度繊維の可能性を改めて見直すことが必要となる。加えて、LCA をはじめとする環境負荷の定量化や、強度発現メカニズムの解明、高圧水素タンク使用環境下での機械的・化学的安定性等の多岐に渡る課題の明確化など、基礎研究を含めた開発が必要である。

（５）利便性向上

【水素 St.の利便性向上】

現在主流の Type4 タンクに水素を高速充填・供給する際、断熱膨張・圧縮に基づくタンク内温度変化が問題となり、実運用上、充填・供給速度の制限に繋がっている。水素充填時には、短時間での水素充填を達成するため、充填前に水素温度を-40℃にプレクールした後、タンクに充填する対策が成されており、水素ステーションコストの増加を招き、高圧水素タンクの利便性低下（普及拡大の妨げ）を招いている。また水素供給時には、極低温地域で車輛等を利用する際に水素供給によるタンク内温度低下により出力が制限され、最悪水素が供給できなくなり車輛への利便性低下を招いている。

本背景から、高圧タンクの利便性向上のアイテムとして、高圧タンク自体の放熱性や蓄熱性の大幅な向上が求められる。本技術が開発できれば、水素充填時は短時間充填においてもタンク内

温度の上昇を抑えることができ、結果としてプレクール温度を高くすることができステーションコストの低減につながる。また水素供給時においても、タンク内温度低下が緩和され、極低温地域での車輛運用の制限が無くなり、水素を利用した車輛の普及につなげることができる。ただし、高压タンク自体の放熱性や蓄熱性の大幅向上について、根本的な解決策は見出されていないのが現状である。

今後、タンクの熱マネジメントを想定したタンク構成材料の変更に加え、放熱・蓄熱機能を持つ部品をタンクに追加する（BOP：Balance of Plant 部品としても可）等、現行タンクの仕様に囚われない発想が期待される。

【車両搭載性】

車両に代表されるモビリティへの高压水素タンク搭載時の課題として、搭載効率の低さが挙げられる。高压水素を保持するタンクの基本形状は円筒であり、ある程度のタンク搭載空間を確保する必要があり、現在 ICE 車で実現する搭載効率実現の妨げとなっている。

本課題の解決法として、細径タンクを複数本束ねて床下に敷き詰めるコンフォーマブルタンク化のコンセプトや、従来の円筒形状とは異なる扁平（異形）タンク等、野心的な開発が進められている。これらの新コンセプトタンクは、現状上市にはつながっておらず、従来の円筒形状タンクにはない構造および工法の技術課題に加え、車両への搭載部品や BOP の新たな開発も必要と考えられる。

今後、様々なモビリティでの活用を想定した際、各々のニーズ全てを満足する個別タンクの提供は実現困難となる可能性がある。その場合は、タンクのサイズをある程度、乾電池同様に規格化することも一案と考えられ、産官学を巻き込んだ議論が求められる。

（６）タンクパスポートへの将来対応

資源循環やカーボンニュートラルの観点から、前項（５）でも言及した使用中タンクの長期利用や再利用・転用の検討が必要である。使用材料や製造条件などの製品のトレーサビリティを追うだけでなく、どういう状況で使用され、余寿命や残留強度など、使用中のタンクの性能を推定するデータがあることで、長期利用、修理判断、再利用・転用の際に役立つだけでなく、どの状態のタンクが市場にあるかなどマテリアルフローをデジタルで管理・可視化することができれば、資源循環社会における新たな産業基盤となる。タンクの余寿命、修復性能、再成形後の特性などを推定する DX 技術をタンクパスポートと連携することで、単なるトレーサビリティ情報だけではない、付加価値の高い情報を含むタンクパスポートシステムの実現が期待できる。資源循環社会における新たな産業基盤 DX が求められる。

2.8.2 技術開発課題（液体水素）

極低温流体を移動体用燃料として利用するためには、社会受容性を含め多岐にわたる共通基盤の整備とともに、用途に応じたニーズ・仕様の見極めが必用であり、運用面と応用面の観点から課題を検討した。

(1) 運用面の課題

【極低温に対する対応】

液体水素の大気圧下での沸点は-253 と非常に低温であり、わずかな入熱でも蒸発（ボイルオフ）してしまうため、車載タンクの断熱性能を高める必要がある。また、車載タンクに用いられる材料や加工方法も熱収縮や低温脆性、水素適合性を考慮する必要がある。特に、複合材タンクの場合は、配管等の接合部において金属と CFRP との膨張差による剥離が問題となるため、極低温で金属材料と適合する接着剤の開発が必要となる。さらに、真空断熱施工されていない部分に液体水素が流通する場合、周囲の空気を液化して液体空気（液体酸素）を生成し、着火源があると燃焼を促進する可能性があることから注意が必要である。

【圧力物性に対する対応】

液体水素は飽和圧力が高いほど飽和密度が小さくなるという特徴がある。そのため車載タンクの運転圧力は低い方が搭載できる液体水素量が増加し液体水素のメリットが大きくなる。このため、車載タンクの運転圧力を低くできる液体水素ポンプによる FC 等への水素供給方法の開発が有用である。また、限られたメリットを最大化するためには、車載タンクの断熱性能向上とコンパクト化・軽量化の両立が重要である。

【計装・補機類に対する対応】

液体水素は他の液化燃料に比べ密度や粘性が小さく、車載タンク内の液体水素量の計測や挙動観察が困難である。静電容量式や超電導式の液面計も開発がすすめられているが、移動体での実用化にはより高いハードルがあるものと思われる。また、バルブや安全弁などの補機類も極低温流体に対して適切に作動する信頼性の確保が重要である。なお、これらの計装・補機類も車載タンクに設置すると入熱源となるため、断熱性能の観点からも注意が必要である。

【充填に対する対応（sLH₂ 技術）】

液体水素を車載タンクに充填するためには、貯槽側よりも車載タンクの圧力を低くする必要があり、一般的には充填するタンク内の残ガスを放出しながら液体水素を充填する。現在、この充填時の放出口スを低減させるため、sLH₂（Subcooled Liquid Hydrogen）充填技術が期待されている。充填時に過冷却した LH₂ を容器の上部から容器内に噴霧することで再液化を促進する考えである。容器内に増えた BOG を再液化で減少させるとともに、容器内圧力を低下させる効果がある。ただし、効率的な充填を行うために車載タンク内の液化・蒸発挙動や充填時の挙動を解明するとともに、実機レベルでの実験検証が必要である。特にインフラ側に小型で伝熱の少ない液体水素ポンプの開発が重要である。

【タンクの断熱】

液体水素タンクシステムの断熱には、まず、真空度を安定的に維持することが重要である。特に、振動が厳しい環境や天候が悪い環境での運用では、真空度の劣化が生じやすい。このため、真空度の劣化をモニタリングする計測機器を開発・導入し、対策を講じる必要がある。設計段階での溶接箇所の削減は、真空漏れのリスクを抑えるのに有効な手段である。また、入熱が生じや

すいと考えられるノズル部には、対応策の検討が必要である。伝熱性の低い PTFE 系樹脂でのコーティングにより熱伝導を抑制できる可能性があるが、その実現性は未確認である。さらに、ノズル部以外にも入熱が大きい箇所を特定し、対策を講じる必要がある。入熱箇所の特定には、シミュレーションと実機のセンシングを組み合わせた熱流束解析が有効である。

【安全性】

液体水素タンクシステムを安全に使用するためには、モビリティ搭載タンクに想定される負荷に対して、適切な安全性評価法を開発し、普及に向けては国の政策とリンクして国際基準調和活動を実施する必要がある。日本から基準案を提案する場合には具体的な計画に基づき仕様を明確化した上で、破裂防止、耐久性、衝突・火災安全等を検討する必要がある。さらに、ステークホルダーに対する過剰な要求とならないよう、安全性と低コストを両立する評価基準の適正化適正な評価基準とする必要がある。また液体水素車載タンクの安全性評価を検討するには、自動車等の使用環境負荷を加えた実証検討が必要であるが、日本にはそれらを一貫して実施可能な適切な設備がほとんど無いことから、大型トラックに関しては解析等の代替手段の検討や、既存設備の増強、新たに必要な評価設備の整備について検討する必要がある。

【利便性（ホールドタイム）の目標達成に対する課題】

2.4.2 項に記したように貯蔵性（質量貯蔵密度）の向上と利便性（ホールドタイム）の両立は最重要課題であり、液体水素アカデミア WG において目標達成に向けた取り組みが議論された。液体水素は LNG に比べて温度域が低く、潜熱が小さいため、熱侵入に対して敏感であり、モビリティの燃料システムでは積極的かつ追加的な対応が求められる。

このため、本ロードマップでは従来の取り組みである 断熱強化（断熱・蓄冷・冷凍）に加え、新たな取り組みとして 熱マネジメント（蒸発抑制・能動的熱マネジメントによる圧力制御・成層化制御等）および 運用性向上（無害化・一時貯蔵・電力への変換）を追加し、以下のように課題を整理した。

断熱強化

LNG で実施された支配的な熱流束の定量的解析を液体水素タンクにも適用し、輻射熱シールド・蓄冷・磁気冷凍などの技術シーズの応用可能性を検討する。また、低熱伝導率の内槽保持構造の開発を進め、入熱の低減を図る。

熱マネジメント（蒸発抑制・能動的熱マネジメントによる圧力制御・成層化制御等）

貯槽への熱侵入により液体水素の一部が加熱されると、浮力によって液面付近に温度成層（温度境界層）が形成される。これにより相平衡に従って蒸発が進行し、液面温度に対応する飽和蒸気圧まで貯槽圧力が上昇する。サブクール液が残存していても、圧力が規定値に達すると放圧（ベント）による損失が発生する。

一成分二相系の蒸発を抑制し適切な圧力制御を実現するためには、相平衡を考慮しつつ貯槽内の温度分布を適切に把握することが必要である。水素より低沸点のヘリウムによる加圧や冷凍は、コストや重量の観点から選択が難しい。そのため、液温の均一化を促進する混合、液温成層を破壊するバブリング、蒸気相を冷却するスプレーなど、相平衡と流動現象を活用し

た熱マネジメント技術の構築が重要である。

これらの技術は極低温流体マネジメント（CFM：Cryogenic Fluid Management）と呼ばれ、陸上・海上・航空・宇宙の分野に共通する基盤技術である。産業界は大学や研究機関と連携し、熱流動現象の物理的理解と各種機器の設計に繋がる予測手法の構築に取り組むことが求められる。

運用性向上（無害化・一時貯蔵・電力への変換）

BOG 水素は、適切に処理することで可燃性ガスとしてのリスクを低減できる。例えば、液体水素を燃料とする乗用車 BMW Hydrogen7 では、BOG を触媒燃焼させて水に無害化する「Boil off converter」の導入などの取り組みが行われている[1]。

LNG と同等の安全性を実現するためには、使用環境の調査、安全性評価手法の研究開発、基準化を含めた運用に関する幅広い技術開発が必要である。今後は海外との連携も含めた取り組みが期待される。

（２）応用面の課題

【トラック】

大型トラックをはじめとする商用車は、一台あたりの CO₂ 排出量が大きく、国内の運輸部門の CO₂ 排出量の約 4 割を占めているため、カーボンニュートラル実現に向けた重要な課題である[2]。電動化による CO₂ 削減が期待されているものの、グリーン成長戦略などではトラックの燃料選択（高圧水素、液体水素、電気）については検討の途上である。

大型トラックメーカーの取り組みとして、いすゞ自動車は「カーボンニュートラル車両拡大イメージ」を発表しており、2050 年のカーボンニュートラル達成に向けて、2040 年頃までに新車販売の 100%を電動車や脱炭素燃料車とし、その内燃料電池車の割合を約 30%とする計画を示している[3, 4]。しかし、航続距離についての具体的な目標は設定されていない。そのため、航続距離（＝水素貯蔵密度）の目標検討については、物流現場からの期待を基に検討を行った。

日本物流団体連合会による第 3 回「カーボンニュートラルに向けた自動車政策検討会」の報告資料では、商用車の航続距離について「最小でも 500 km/日は必要（理想は 1,000 km/日）」との記載があり、航続距離の延長を望む声が強い。2.1.8.（３）項の検討結果も踏まえ、1 充填当たりの航続距離 1,000 km 以上を液体水素燃料へのニーズとして目標を検討した。

目標達成に向けては、軽量化と利便性の両立を図るため、材料とシステムの両面での研究開発が必要である。ホールドタイム拡大に向けてボイルオフ圧力を高める技術や、充填時の蒸発損失低減のために充填圧力を高める技術が検討されているが、それに伴う質量増を避けるため、材料の CFRP 化をはじめとする高強度化による軽量化を検討する。特に、極低温下での CFRP の強度保証に関する評価技術の確立や、断熱層の真空度維持・管理についての対応が求められる。また、sLH₂ 充填など液体水素インフラに関する課題は本ロードマップのスコープ外であるが、超臨界・気液混相流体の挙動把握などの課題があるため、基礎研究テーマとしてロードマップに記載した。

さらに、軽量化目標や利便性目標以外にも、大型トラック特有の要件について、ステークホルダー・アカデミア WG と議論を行った。以下に結論を示す。

まず、真空断熱構造に関しては、現在の LNG 容器の槽間距離である 25 mm～35 mm 程度から

の縮小を目指す。ただし、輻射熱の影響については、定量的な解析を通じて詳細な確認が必要である。また、ベーキング時間の短縮を図るため、多層断熱材 (MLI) の耐熱温度を現行の 80 から 120 に向上させる。さらに、真空度の目標として、初期の真空度を 10^{-3}Pa から 10^{-2}Pa に緩和し、経時後も 10^{-1}Pa を維持する方針とした。溶接時における MLI の焼けや損傷を防止するため、溶接温度の厳密な管理や溶接位置の適切な選定、十分な離隔距離の確保も必要である。

次に、支持構造や配管からの熱侵入低減が重要な課題として挙げられた。熱伝導を LNG 容器の半分以下とすることを目標とする。ただし、UNR110 の衝突時要件を満たし、膨張・収縮に耐える構造設計が必要である。

タンクサイズの検討では、断熱性を確保するために高圧水素タンクよりも大型化が必要であることが明らかになった。トラクタタイプでの実現可能性が高く、キャブバック横置き搭載の場合、搭載スペースは直径 700 mm ~ 800 mm (800 mm 以上も検討の価値あり) タンクの長さは 1,500 ~ 1,600 mm、補機類を含めた全長は 2,000 mm 以内を想定している。一方、床下搭載の場合は直径 600 mm 以下に抑える必要があり、断熱性能に不利である。カーゴトラックに関しては、床面の高さが 1 m 前後の低床車が多く、最低地上高の制約から直径の確保が難しい。物流の合理化や電動化等に向けた取り組みの動向を受けて、トラックの全長規制や重量規制の見直しが進行中であり [5]、全長が 1m 程度延長される可能性がある。これにより、タンクの断熱性確保がより容易になることが期待される。

法規に関する考慮として、液体水素と LNG の違いを十分に踏まえ、現実的な解決策を見出す必要がある。具体的には、LNG のホールドタイムが 5 日 (UNR110) であるのに対し、水素は外部に可燃性ガスを放出しない点で、同等以上の性能を目指すべきである。また、気体水素と液体水素の取り扱いに関する考え方が混乱しないよう、明確な整理が求められる。

【航空機】

航空機分野では、2021 年 10 月に IATA (国際航空運送協会) 2022 年 10 月に ICAO (国際民間航空機関) において、2050 年のカーボンニュートラル目標が合意された。日本においても、2022 年 7 月に ICAO にて、国際航空分野で 2050 年までにカーボンニュートラルを達成することが公式に宣言され、脱炭素化に向けた取り組みが活発化している。脱炭素化に向けた技術として、SAF (持続可能な航空燃料) 電動化、水素燃料電池、水素燃焼技術の導入が考えられている。その中で、水素を燃料とする航空機においては、水素燃料電池が 2025 年以降、コピューター機 (9 ~ 50 席、60 分未満のフライト) リージョナル機 (50 ~ 100 席、30 ~ 90 分のフライト) を中心に導入され、水素燃焼技術は 2035 年以降に中小型機 (100 ~ 250 席、45 ~ 150 分のフライト) を中心に導入が検討されている [6]。

グリーンイノベーション基金事業「次世代航空機の開発プロジェクト」において、水素航空機向けの液化水素燃料貯蔵タンクの開発が進められている。貯蔵密度の目標は、ケロシン燃料と同等のエネルギーを確保するために 33 wt% (タンク重量についても貯蔵水素燃料の 2 倍以下の重量を目標) と設定されている [7]。また、軽量化だけでなく、耐空性審査要領や米 FAA、欧州 EASA の航空機安全規格への適合、断熱性能の確保、水素に対する材料の適合性、極低温環境域での適合性、気密性・液密性の確保なども考慮して設計が進められている [8]。

断熱性能に関しては、地上用の液化水素貯蔵タンクで 0.06 %/日、液化水素運搬船タンクで

0.3 %/日というボイルオフ率の報告例 [9]がある。しかし、水素航空機では液化水素を燃料として使用するため、経済性と安全性を考慮した断熱性能のタンクが求められている。例えば、機体の駐機期間を 10 日間と仮定し、その期間中でもタンク内の液化水素が枯渇しないようにするため、最低限の断熱性能目標を 8 %/日として断熱構造が検討されている [8]。材料に関しては、軽量化が求められるため、地上用の液化水素貯蔵タンクで使用されるステンレス材ではなく、アルミニウムや複合材料などの比強度の高い材料の使用が検討されている。

今後は NEDO の航空宇宙部・水素アンモニア部の協力を得て、宇宙・航空・自動車などの分野間連携を検討・推進していく方針とする。

航空機分野では、燃料系の重量指標として Gravimetric Index (GI) が用いられる。GI の定義は、「燃料重量 (満載時) を、燃料供給系重量 (タンク + 補機) と燃料重量 (満載時) の和で割ったもの」であり、燃料と補機の質量を含む点が本ロードマップの定義とは異なる。混乱を避けるため、常に定義を明確にすることが重要である。

(参考文献)

- [1] F. Amaser, and G. Krainz, "Liquid Hydrogen Storage Systems Developed and Manufactured for the First Time for Customer Cars," SAE Technical Paper 2006-01-0432, 2006
<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2006-01-0432/>
- [2] 国土交通省 “運輸部門における二酸化炭素排出量”, 2024
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html
- [3] いすゞ自動車 “カーボンニュートラルへの取り組み”, 2021
https://www.isuzu.co.jp/company/investor/financial/results/assets/pdf/carbon_neutral.pdf
- [4] 鹿内和憲 “大型 LNG トラックの開発とカーボンニュートラルへの貢献について”, 2022
<https://www.mlit.go.jp/hokushin/content/000275464.pdf>
- [5] 国土交通省 “車両の電動化等に伴う大型化について”, 第 24 回物流小委員会, 2024 年 7 月 9 日
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001754339.pdf>
- [6] 経済産業省 “航空機産業をとりまく情勢と社会実装に向けた取り組み”, 2023 年 10 月 10 日
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/industrial_restructuring/pdf/020_04_00.pdf
- [7] NEDO ニュースリリース, 2021,
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101488.html
- [8] 平野他 “水素航空機 液化水素燃料タンク技術の開発”, 第 62 回飛行機シンポジウム, 2024 年 10 月
- [9] 川崎重工業 “液化水素貯蔵タンクの優れた断熱性能を証明”
https://www.khi.co.jp/news/detail/20231211_1.html

2.8.3 技術開発課題 (水素貯蔵材料システム)

高圧水素では原理上実現できない体積貯蔵密度の大幅な向上を可能とする技術として、水素貯蔵材料システムへの期待は大きい。従来の金属系の水素貯蔵材料 (水素吸蔵合金) は原子状水素を貯蔵できる特徴から、材料単体としては液体水素を凌駕する高い体積貯蔵密度を示すことが知られているが、一方、質量貯蔵密度は 10 ~ 30 g-H₂/kg 程度であり、表 2.4.3-6 で示した 2050 年の

仮目標の実現には最新の水素科学に基づくブレークスルーが求められる。そのためには、金属材料に加えて高分子材料や多様なナノ構造(低次元構造や多孔質構造など)からなる材料を対象に、水素圧力や温度などの外場条件を拡張した材料探索や高精度での材料特性評価、さらにはデータベースに基づくマテリアルズ・プロセスインフォマティクス(MI・PI)などの高度利用が不可欠となる。また、高密度水素化物の合成研究が先行する超伝導分野などとの大胆な分野融合も重要であろう。

これらの視点で、2050年仮目標の実現に向けた以下のような研究環境整備や技術開発が急務となる。

- 1) 水素圧力を拡張(100 MPa以上)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、確実かつ迅速な新規材料探索技術高度化
- 5) 社会実装を目指した充填プロトコルの設定や水素供給能力の向上、固体貯蔵材の利点を活かした小型化・形状自由度の高い容器(w/熱交換器)設計およびその量産技術の確立
- 6) 水素貯蔵材システム全体のリサイクル性やLCAの算出基準の確立

2.9 DX技術

先端分野の技術力は国の産業競争力の基盤であり、競争力を維持・向上させていくためには継続的な研究開発が必要である。水素・燃料電池技術が、SDGs・CNの文脈で世界的に急速に広がりを見せつつある中で、我が国が世界をリードし、我が国の産業に貢献していくためには、

- 1) 進化を敏感にとらえた魅力ある目標の設定
- 2) 世界に先駆け目標達成できる研究開発力

などが重要である。とりわけ、後者の研究開発力は容易に向上・維持できるものではなく、取り組みの継続・蓄積が必要である。しかしながら、表2.9-1に示すように我が国の研究開発人材や研究開発投資は、欧州・中国・米国に対して十分であるとは言えない。このような状況下で、競争力を維持・向上させるため、研究開発のDXが期待されている。

燃料電池・水素技術においても、研究開発のDXにより、世界に先駆けて開発力の強化(期間短縮、高度化)に結びつける必要があることから、本ロードマップにおいてもDX技術を取り上げた。DX推進のための基盤としては、データベース、データプラットフォーム、自動・自律実験拠点を、DX技術としてインフォマティクス(MI、PI、MEI)、自動・自律実験、計算技術・モデル化技術、自然言語処理を取り上げ、ロードマップに記載した。

表 2.9-1 研究開発人材・研究開発投資の国際比較

国・地域	研究開発人材	研究開発投資	水素・燃料電池関連動向
欧州	199 万人(2021 年)	49 兆円(2021 年)	グリーンディール産業計画、脱ロシア
中国	187 万人(2018 年)	48 兆円(2018 年)	水素エネルギー中長期発展計画
米国	149 万人(2020 年)	73 兆円(2021 年)	国家クリーン水素戦略
日本	70 万人(2022 年)	18 兆円(2021 年)	水素基本戦略

【出典】文部科学省 科学技術・学術政策研究所、科学技術指標 2023、調査資料-328、2023 年 8 月

2.9.1 目標設定について

本ロードマップでの DX 技術は、製品・システムの研究開発プロセスを変革し、加速化・効率化するために導入する技術と位置づけているが、導入後には標準的な研究開発の手段となるべきものである。FC スタック、生産技術、水素貯蔵システムで各々設定される目標の達成に資するもの、という観点からは各パートの目標を共有するが、DX 技術そのものの発展を促すため、DX 技術としての目標を設定することとした。

DX 技術としての目標は、FC スタック、生産技術、水素貯蔵システムの各パートの目標達成に向けて十分高い目標であることが必要であるが、現実的に到達し得るものであることも必要である。各パートからの要求水準や、現状の技術水準についてのベンチマークに基づいて、DX 技術全体として、次の目標とした。

- 燃料電池・水素産業分野の材料技術開発に、現時点の 20 倍以上の研究開発力をもたらす
- 2035 年の製品・システム目標に向け、2030 年時点で達成

研究開発の過程の中で DX 技術によって加速・効率化できる過程を図 2.9.1-1 に示す。材料探索・プロセス探索や、現象・機構解明の中でのタスクを加速・効率化し、研究者・開発者のリソースを創造的活動に集中させることで、研究開発力の向上を目指すものとしている。

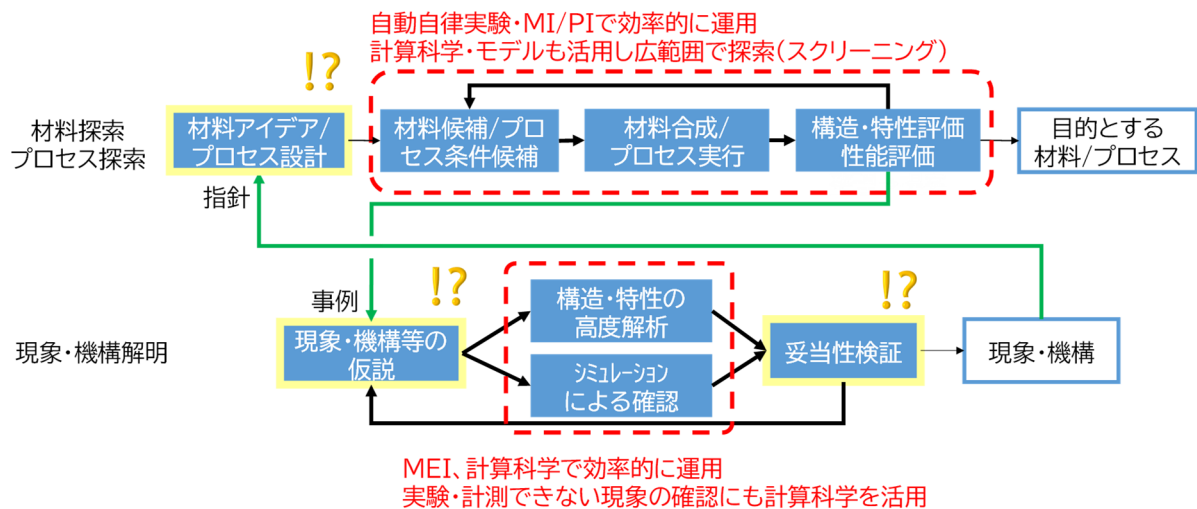


図 2.9.1-1 研究開発への DX 技術の活用による加速・効率化

各 DX 技術に対する加速・効率化の目安については、ベンチマーク情報などからの参考値として、MI・自動自律実験による材料探索速度を 20～100 倍（参考：図 2.9.1-2）、PI のプロセス条件の最適化の速度を 20～100 倍、MEI での高度解析の速度を 10～30 倍、自然言語処理でのデータ抽出にかかるコスト低減 1/100～1/250 などが挙げられる。これらの数値は DX の対象や目的・考慮する範囲に応じて変動するものであるため、目安としての認識が適切である。

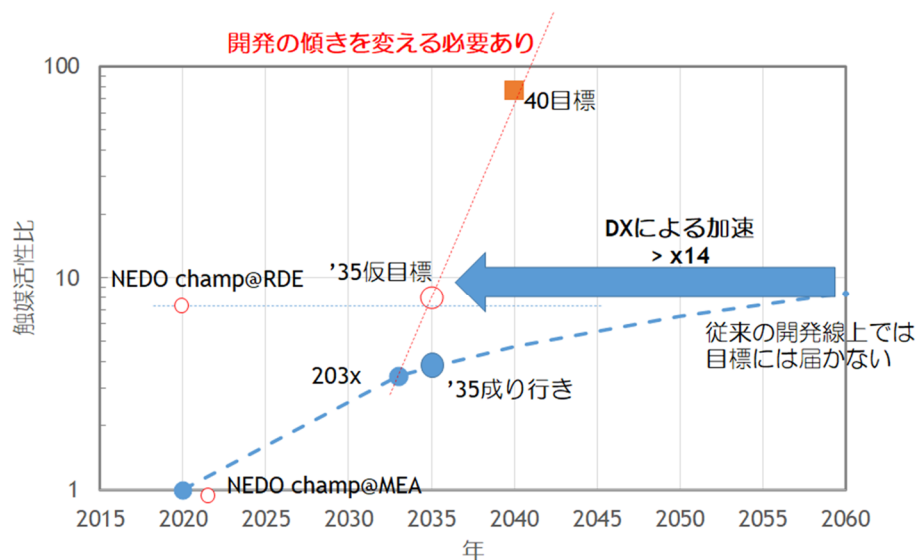


図 2.9.1-2 触媒活性の向上から要求される加速倍率

2.9.2 DX 推進に向けた基盤

DX 推進にあたって重要となる基盤として、データベース、データプラットフォーム、自動・自律実験拠点について述べる。

(1) データベース

DX を進めるにあたり最も重要なものがデータであり、燃料電池・水素技術開発においても同様である。研究開発の現場で生み出される様々なデータを分析し、アクションを検討し、実行・評価した結果をデータとしてフィードバックすることで、試行錯誤のサイクルを高速化・効率化し研究開発が加速される。高速化・効率化のためには、作成されたデータを限られた範囲での一時的な利用にとどめず、データベースとして蓄積して広範囲で永続的に活用することが、非常に重要になっている。

NEDO 事業により開発が進められている触媒、電解質など材料群の解析・計測データについては「NEDO PEFC データベース」への登録が進められており、材料の合成・評価の進展とともにデータが拡充される見込みとなっている。さらに、均質で大規模なデータを作成可能な計算物性データ、今後自動化・自律化により加速化される見込みの大型放射光施設による解析データ、自律実験により合成・評価が自動化・加速化される見込みの合成・評価データ、文献から抽出された材料・プロセスに係るデータの蓄積をすすめ、材料開発におけるデータ活用を標準的なものとしていくことが必要である。

データ収集・蓄積デジタル時代の産学連携の実現に向けては、ステークホルダー（顧客企業、開発協業先、環境価値創出に向けた協力企業など）とのデータ連携において、産学連携強化の視点でデータを階層的にカテゴライズしたうえで、企業 - 企業間、企業 - 大学・研究機関間で共有すべきデータの戦略的抽出と、その活用手法やルール整備等が重要となる。

共有すべきデータがブラックボックス化すべきか、適宜判断が必要であるが、データ共有階層においては、各社の秘匿領域に踏み込まない範囲内で、業界内に利用できる情報を戦略的に抽出する仕組みづくり、暗号化技術やプログラムを秘匿したまま計算できるセキュリティ技術の開発も必要となる[1]。

(参考文献)

[1] NEDO TSC Foresight「デジタル技術の活用によるマテリアル産業競争力強化に向けて」(2022)

(2) データプラットフォーム

データプラットフォーム構築の究極の目標は、燃料電池・水素技術開発に関連するあらゆるデータを集積し、開発に係る誰もが利用できるようにして、技術開発を行う上でデータの力を最大限に発揮することである。そのため DX を支える中核となるインフラとして位置付けられる。

データプラットフォームシステムは、一般的に、データを格納するストレージ、データを変換・加工する機能の他、収集したデータに意味を与え、セキュリティの確保、データ全体の統制、データ利用のためのインターフェースなどの機能を備えたシステムである。燃料電池・水素技術開発では、これらに加え、データ駆動型開発に向けた分析、機械学習・AI 等の機能を持たせたものとした。より具体的な機能としては、データベース(システム)、データ可視化、データ登録・管理、アクセス制御、機械学習ツール、機械学習モデル・モデル管理、メタデータの統合的管理(オントロジー)などの機能を備えるものである。

材料開発においては、データ駆動型開発を有効に機能させるためには、材料開発者が合成・評価したデータを漏らさず登録・集積しながら、開発者自らが日常的にデータや MI を活用して開発を進めることが必要である。また、部材やセル・スタックの中で機能させるため、材料には様々な物性・特性が求められており、異なる種類のデータを材料種で紐づけるようにするなど、統合的に利用できるようにすることも必要である。多種多様なデータを取り扱う必要がある場合には、データには当然のように欠落がありインフォーマティクスの適用が困難となることが往々にしてあるが、適切なメタデータの付与によりデータ間の紐づけを行うことは、インフォーマティクスの適用を行う上でも非常に重要である。

データプラットフォームシステムには、ユーザーがこれらを容易に行えるようにすることが求められており、NEDO 事業では「MIX プラットフォーム」として構築が進められている。データ作成・登録数の拡大と MI 解析の高精度化の好循環を生み出すため、継続的に、データ利用時の利便性の向上と MI 解析機能の向上を進める必要がある。また、コンピュータ上で仮想的に構築された開発対象モデル(デジタルツイン)をもとにして、様々な詳細度のシミュレーションだけでなく計測・測定データを活用しながら開発を進めることも必要であり、シミュレーションツール、解析モデル、入出力ファイル、構造モデル可視化ツールなどに対する対応も必要になる。

(3) 自動・自律実験拠点

燃料電池・水素技術開発は物理的な実体を対象とした技術の開発であるため、研究開発の中で実施される実験の自動・自律化は、DX として欠くことができない重要な要素である。この自動・自律実験は、世界的に注目されている現在進行中の研究分野であり、広く普及している汎用技術ではないことから、研究開発への適用に際しては、データ・情報だけでなく実体をとまなう様々な資源を集約し効率的・効果的に実施する必要がある。このためには、自動・自律実験のための拠点形成が有効であると考えられる。

表 2.9.2-1 自動・自律実験拠点形成のメリット・デメリット

	項目	内容
メリット	協働の必要性	<ul style="list-style-type: none"> 実験の自動自律化を行うためには、対象領域(材料)・ロボット・AIの研究者、プロセス装置・分析機器・評価装置・ロボットのメーカー、システムインテグレーターの協働が必要であり、さらに全体を監修できるスーパーバイザーも重要である。
	ノウハウの蓄積と共有	<ul style="list-style-type: none"> 実験の自動自律化への取り組みは多いとはいえ、ノウハウを蓄積して行く必要がある。また蓄積したノウハウを共有し、有効活用していくことも必要である。
	標準化	<ul style="list-style-type: none"> 自動自律実験の適用拡大のためには、サンプルホルダー、治具、ツール、データ、ソフトウェア、通信制御、評価法、運用法などの標準化も必要である。
	人材・企業の確保	<ul style="list-style-type: none"> 実験の自動自律化について経験のある研究者・企業が現状では多くないため、少数の人材・企業を有効に活用していく必要がある。 自動自律実験を本格的に稼働させる時には、装置の維持・運用を行う技術員が必要。これらの技術員は、自動自律装置についての一定水準の知識・スキルを持つ必要があるが、現状では、育成により確保していく必要がある。
	継続性	<ul style="list-style-type: none"> 2040年を見据えたとき少なくとも2035年ごろまで10年以上自動自律実験を継続する必要がある。継続的な人材の確保、設備の維持・更新や、そのための安定財源の確保、研究の評価基準の変化にも対応していく必要がある。
デメリット	装置利用タイミング	<ul style="list-style-type: none"> 研究者が必要と考える所望のタイミングで装置を使用することができない可能性がある。
	アクセス	<ul style="list-style-type: none"> 拠点から遠地となる研究者にとってはアクセスが不便になり、アクセスに時間がかかる。(リモートラボ化が進めば解消の可能性。)

拠点化のメリットとしては、自動・自律実験を実現するために必要な多様な知識・技術を持った関係者の協働により、ノウハウの蓄積・共有化が図られること、標準化により技術適用のハードルが下がること、育成により現状で不足している人材・企業を確保することができるようになること、これらにより自動・自律実験の継続的な利活用の体制が維持されることが挙げられる(表 2.9.2-1)。このような自動・自律実験の拠点形成と継続的な維持・運用を通して、燃料電池・水素技術開発が促進され、高い目標の達成に貢献するものと期待される。

2.9.3 インフォマティクス

(1) MI (マテリアルズ・インフォマティクス)

燃料電池システムの性能・耐久性向上のためには、セル・スタックや水素タンクを構成する材料の開発が必要である。特に、電極触媒、電解質、水素貯蔵材料などの材料特性を向上させることが重要であり、世界的な開発競争の中で、有望な材料を如何に速く効率的に探索・開発できるかが鍵となっている。このため、マテリアルズ・インフォマティクス(以下、MI)と呼ばれる分野の技術を燃料電池・水素分野の材料開発に適用し、材料の研究開発を劇的に加速することが期待されている。

材料開発は、対象とする材料の性質や材料が機能する際の現象とメカニズムなどの科学的な知見にもとづくアイデアや、専門家の経験によって蓄積されてきた知見に基づいて、材料を設計し、合成して、分析・評価するというサイクルで開発が進められる。この開発のサイクルは、試行錯誤の繰り返しを伴うものであり、人手で行う過程が特に律速となる。これらの過程を如何に高速化、効率化できるかが鍵となっている。

表 2.9.3-1 材料開発での MI の利用方法

項目	内容
特性・性能予測	<ul style="list-style-type: none"> 物理化学特性の予測 材料性能の予測
材料発見・設計	<ul style="list-style-type: none"> 候補リストからの選択 新規組成・分子構造の生成 既存材料の性能・特性を凌駕
現象の理解	<ul style="list-style-type: none"> 法則の定式化 支配的要因の抽出 分析を容易にする可視化
合成プロセス設計	<ul style="list-style-type: none"> 合成経路探索・逆合成 プロセス条件探索・最適化(1)
モデリングの高度化	<ul style="list-style-type: none"> 複雑な現象の代理モデル 高精度・低計算コスト
材料のキャラクタリゼーション	<ul style="list-style-type: none"> 分析装置で生成されるデータからの情報抽出(2)
知見抽出	<ul style="list-style-type: none"> 論文・特許文献からの知見抽出・整理(3)

1 対応する技術はプロセス・インフォマティクス (Process Informatics) に含まれる (2.9.3-(2)参照)。

2 対応する技術は計測インフォマティクス (Measurement informatics) に含まれる (2.9.3-(3)参照)。

3 自然言語処理 (Natural Language Processing) の技術が用いられる (2.9.6 参照)。

MI は、実測または理論計算による大量のデータに基づいて機械学習をはじめとする統計学・情報学的な手法により、材料性能の予測と所望の性能を持つ材料探索などを行うものである。大量のデータに基づく方法論であるため、MI を用いた材料開発はデータ駆動型材料開発とも呼ばれる。MI を材料開発に適用する効果については、例えば、精度の高い予測モデルができれば、膨大な組成や形態をとり得る材料のなかから有用な候補を高速かつ合理的に選別することが可能になる。さらに、実際に材料を合成して評価する過程を大幅に削減でき、開発の加速化につながる。

材料開発で想定されている MI の利用目的 ([1,2]参照) について、表 2.9.3-1 にまとめた。ここでは、特に手段・データ種などに限定せず、材料開発に資する様々な目的を含め整理した。また、材料開発への MI 適用を困難にしている要因と考えられている課題 ([1,2,3]参照) については、表 2.9.3-2 にまとめた。

表 2.9.3-2 材料開発への MI 適用の課題

項目	内容
多様なデータへの対応	<ul style="list-style-type: none"> 様々な材料種・異なるラボからのデータ 様々な物性・特性・分析手法などマルチモーダル 様々なフォーマット
小規模データへの対応	<ul style="list-style-type: none"> 実験データが少ない (<100) 広大な探索空間のなかのスパースデータ
サンプルバイアスの存在	<ul style="list-style-type: none"> 論文文化に向かない失敗データが欠如 (傾向の学習が難)
予測タスクの特徴	<ul style="list-style-type: none"> 飛びぬけた性能や新奇材料など「規格外」に強い関心 予測モデルの不確実性
データ統合指針策定	<ul style="list-style-type: none"> 網羅的、十分な情報量があり、柔軟性があるメタデータの定義
データ共有/知財保護	<ul style="list-style-type: none"> 共有による相乗効果の出現 知財保護のためクローズすることによるサイロ化
エコシステム構築	<ul style="list-style-type: none"> 多数の関係者が有用性を受け入れ、継続的にデータ蓄積・共有が行われる体制の構築
長期維持・管理コスト	<ul style="list-style-type: none"> DB・モデルバージョン管理・アクセス管理・データマネジメントなどインフラへの多大な投資

NEDO 事業では、MI の主要な目的 (表 2.9.3-1 参照) である、特性・性能予測、材料発見・設計、現象の理解の目的で、取り組みが行われている。MI はデータの規模が大きいほどより効果があると期待されているが、各々のラボで実際に合成して評価できる材料種数は限られる。今後自律実験により個々のラボで合成・評価する材料自体を増やしてデータの拡充をはかることで、予測の高精度化を進めていくことが必要となっている。

自律実験などにより合成・評価する材料を増やすことは必要であるが、一方で、潜在的な材料の候補の範囲は莫大であり、その中を探索するには計算や情報学の助けを必要とする。例えば、有機低分子について、経口医薬品に対する一般的な基準を満たす分子 (いわゆるケミカルスペース) に絞ったとしても 10^{60} 種程度あると見積もられているが、データベースに登録されている既知の低分子はわずか 10^9 種程度である[4]。このように材料の探索空間は広く、コンピュータ上での仮想的な材料の生成と計算によるスクリーニングを活用していく必要がある。

個別のラボで取得されたデータなどデータソースが異なるとデータの品質や値の傾向が異なり、またデータ取得に対する着眼点 (データ項目) が異なることもある。これらの多様なデータを統合的に利用するためには、標準化や欠測値の補完が必要になる。これを行う上では、幅広い範囲で均質なデータが利用できることが望ましく、計算データの作成と活用が期待される。

機械学習に対しては、データに適合した推論モデルを構築し、そのモデルを用いて推論に影響をあたえる要因分析を行うという利用方法も期待されている。触媒層での触媒機能発現や劣化などのような複雑な現象・対象に対して適用し、学理・現象の解明に貢献することで新たな探索や設計指針が得られれば、技術開発全体の加速化につながる。

MI 解析の精度向上にはデータベースの拡充が必要となり、データベースの連携、文献・特許等からの自然言語処理、大規模言語モデル等によるデータの抽出を行う、また実験で得られないデータをシミュレーション等の計算などを用いて拡充するなどの対応を行う事が必要となる。さらに生成 AI 等を用いた解析の高度化、メカニズム解析につながるデータ解析手法なども今後の検討項目として挙げられる。

以上の技術開発により集積・統合化されたデータを有効に活用して、有望材料の効率的な探索と発見を加速化していくことが必要である。

(参考文献)

- [1] Himanen, Lauri, et al. " Data driven materials science: status, challenges, and perspectives. " Advanced Science 6.21 (2019): 1900808.
- [2] Morgan, Dane, and Ryan Jacobs. "Opportunities and Challenges for Machine Learning in Materials Science." Annual Review of Materials Research 50.1 (2020).
- [3] Citrine Informatics Inc. "Challenges in Machine Learning for Materials and Chemicals - And how to overcome them." (2020)
- [4] Raymond, Jean-Louis. "The chemical space project." Accounts of Chemical Research 48.3 (2015): 722-730.

(2) PI (プロセス・インフォマティクス)

研究により開発された高性能な新材料を実社会で活用していくためには、性能を維持しつつも目標コストを達成できるよう、量産工程に適応、つまり、プロセスのスケールアップ、スピード

アップをさせる必要がある。燃料電池を製造する工程にはプロセスのパラメータが非常にたくさんあり、燃料電池スタックの製造工程を図 2.9.3-1 に示すが、例えば触媒インク調合工程だけを見ても、インクの配合比、各材料の投入順序、分散方式（超音波方式、薄膜旋回流方式、ディスク回転方式、加圧傾斜衝突方式）回転数・時間などの各種分散条件、分散時の保持温度、ろ過メッシュサイズ、脱泡方式、回転数・時間などの各種脱泡条件、消泡材の添加の有無・添加量、インク作成後インク塗工までの保管時間など、細かく考えると数えきれないほどである[1]。これらのプロセス条件を最適化するために、従来は、カン・コツに頼って試行錯誤を繰り返したり、膨大なプロセスパラメータの組合せを総当たりで実験を行ったりしており、膨大な費用と時間がかかっていた。これらのプロセス条件をデータ主導で最適化することがプロセス・インフォマティクス（以下、PI）の主な目的である。

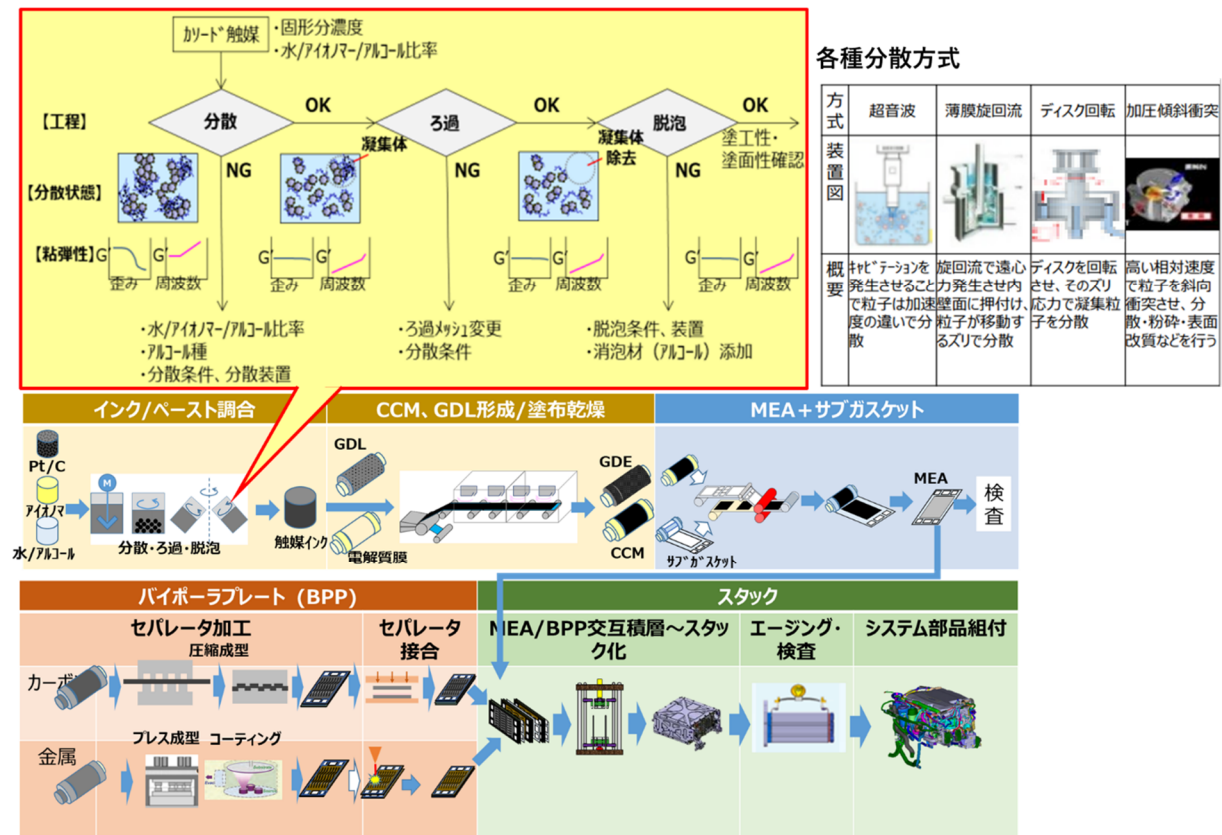


図 2.9.3-1 燃料電池スタックの製造工程

一般的に MI に比べると PI は難しいと考えられており、その主な理由はプロセスに関するデータがあまり蓄積されていないためだと言われている。MI で使うことができる材料の物性に関わるデータ蓄積は、例えば NIMS（物質・材料研究機構）の MatNavi という材料データベース群に様々な材料に関するデータが蓄積されているなど、世界中で進められているが、一方、プロセスに関する有用なデータベースは現在あまり多くない[2]。そのため、PI ではまず、「プロセスデータを蓄積すること」および「少ないデータでプロセスを最適化すること」が重要となる。

そこで現在～2030年頃を PI 活用実績創造期、2030年頃～2030年代後半を活用工程拡大期として、それぞれの時期に取り組むべき研究課題について以下のように整理した。

PI 活用実績創造期（現在～2030 年頃）

まずは、「インク調合工程」、「塗布乾燥工程」、「金属バイポーラプレートのコーティング工程」など、燃料電池の性能・耐久性への影響度も大きく、製造コストの割合も大きな工程に着目して、プロセスに関するデータを蓄積していくことを進める。プロセスに関するデータが蓄積されにくい原因のひとつにはプロセスデータ項目には定義が曖昧なものが多いことが挙げられる。例えば、インク調整工程において、薄膜旋回流方式の設備を用いて分散を行い、分散条件のひとつである「回転数」というデータを取得したとする。この「回転数」というデータは、超音波方式などの異なる方式を用いて分散を行った場合や、同じ薄膜旋回流方式であっても設備のサイズが変わったりただで、同じ土俵で扱うことのできないデータとなってしまうて使えないものになってしまう。ミクロな視点で見たときの、凝集した触媒粒子同士を引き離そうとする力がどれくらいかかっているかが、どのような方式・設備を用いても変わらない本質的な情報であり、そのような本質的な情報が残るようなデータ項目の定義をしっかりと決めてデータベースに蓄積していくことが必要である。例えば、設備の 3D モデルなどを「回転数データ」とともにデータベース上に保存し、データ活用時にシミュレータなどを活用することで本質的情報に変換して活用するといった仕組みが必要であると考え。それが、「**プロセスデータの定義の明確化**」である。

また、PI 活用の初期段階では、データベース内に大量のデータが蓄積されておらず、少数データで予測を行わなくてはならないため、少数データでの予測精度を向上させるスパースモデリング手法[3-7]など、「**データ解析技術の高度化**」の研究に取り組む必要がある。また、短期間で大量の良質データを取得するためには自動自律型の PI システムを構築することが望ましく、そのための「**PI 装置開発**」が必要になってくる。これは自律・自動化や計測インフォマティクスプロジェクトとも綿密な連携が必要であるが、それらのプロジェクトで開発されたものを PI システムに組み込むためには、PI システムが要求するサイクルタイムで動作させるための技術開発や、寸法制約内に収めるための技術開発など、PI 独自の要素技術開発が別途必要になってくると考える。これらの技術開発と並行して、「**開発した PI 技術を産業界で活用**」し、飛躍的な性能・耐久性の燃料電池を世の中に送り出す。

PI 活用工程拡大期（2030 年頃～2030 年代後半）

PI 活用を、既存工法のプロセス最適化に用いるだけでなく、将来の革新的な FC 製造工法に適用したり、水素タンクなどの他製品へ横展開をしていくために必要な技術開発に取り組む。例えば、工程の横展開にともない増加していくデータに対しては、「**データ蓄積・整理の高速化、自動自律化**」する技術が必要になってくると考える。また、扱うデータ量が増加することによって、生成 AI や量子アニーリングなどを用いて、**大量のデータを効率的に解析する技術**[8-9]や、すでに蓄積されている類似分野のデータを学習させることによって、新規の少数のデータで良い学習モデルを作成する転位学習の技術[10-13]など、PI 解析技術の高度化が必要になってくる。

（参考文献）

[1] 秋田靖浩 「FC 生産技術課題 1 MEA プロセス」(2022)

<https://www.chubu.meti.go.jp/b35innovation/meetupchubu/event/vol8.html>

[2] 岩崎悠真著 マテリアルズ・インフォマティクス 新日本印刷株式会社 (2022)

- [3] H. Numazawa et al. Experiment-Oriented Materials Informatics for Efficient Exploration of Design Strategy and New Compounds for High-Performance Organic Anodo. Adv Theory Simulations 2. 1900130 (2019)
- [4] N. Ishida et al. Quantifying Hole Transfer Yield from Perovskite to Polymer Layer: Statistical Correlation of Solar Cell Outputs with Kinetic and Energetic Properties. ACS photonics, 3, 1678-1688 (2016)
- [5] Y. Zhang et al. A Strategy to apply machine learning to small datasets in materials science. npj Comput. Matter. 4, 25 (2018)
- [6] G. R. Schleder et al. From DFT to machine learning: recent approaches to materials science- a review. J. Phys. Mater. 2, 032001 (2019)
- [7] L. M. Ghiringhelli et al. Big Data of Materials Science: Critical Role of the Descriptor. Phys. Rev. Lett. 114, 105503 (2015)
- [8] K. Kitai et al. Designing metamaterials with quantum annealing and factorization machines. Phys. Rev. Research 2, 013319 (2020)
- [9] S. Rendle. Factorization machines. in Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Data Mining, 995-1000 (2010)
- [10] S. J. Pan et al. A Survey of transfer Learning. IEEE Trans. Knowl. Data Eng. 22, 10, 1345-1359 (2010)
- [11] C. Tan et al. A Survey on Deep Transfer Learning. arXiv: 1808.01974 (2018)
- [12] S. Wu et al. Machine-learning-assisted discovery of polymers with high thermal conductivity using a molecular design algorithm. npj Comput. Mater. 5, 66 (2019)
- [13] H. Yamada et al. Predicting Materials Properties with Little Data Using Shotgun Transfer Learning. ACS Cent. Sci. 5, 10, 1717-1730 (2019)

(3) MEI (計測インフォマティクス)

計測インフォマティクス (MEasurement Informatics) は、情報学・統計学的手法により計測を高速化・高度化する技術である。専用の計測ハードウェア導入による効率化や、ロボティクスによる自動化に加えて、機械学習等の情報学的・データ駆動型アプローチにより、計測および解析の一連のプロセスである 計測 (計測条件パラメータの最適化を含む) 解析 (スペクトル解析や画像解析など) データ整理・判断・蓄積の各プロセスを、高速化、自動・自律化することで、MI や PI などのデータ解析に必要な大量データの収集を効率的に行うことが可能になる。また、計測ハードウェアの性能向上や計測データの品質向上を可能にするアルゴリズムの適用により、計測の時間・空間分解能を飛躍的に向上させたり、ノイズ / 大量のデータに埋もれた中から必要なデータを取り出したり、既存の計測では不可能な解析により解析を高度化することも期待される。微量の材料の計測や原子単位のきわめて希薄な活性点構造や電解質膜における原子レベルでの輸送現象の解析など、通常の計測では感度が低く観測が困難な計測対象や、実機のパラメータ計測のように筐体等の影響で十分なシグナルが得られない場合でも観測を可能にする。

計測高速化の例としては、機械学習を用いた計測条件の最適化 (プローブ強度、検出器感度、測定部位の選択など) [1]、ノイズ除去による S/N 改善をベースとした計測時間の短縮 [2]、ガウス過程回帰等による合理的な測定点削減 [3] などが報告されている。解析高速化の例としては、取得したスペクトルや画像データに対して、ディープニューラルネットワークを用いたノイズ除去や

スペクトル分離、画像認識、クラスタリングによるピーク分離・画像解析[4]、スパースモデリングによるピーク分離[5]、リートベルト解析など多変量の最適化[6]などが提案され、機械学習を用いた高速解析が可能になりつつある。取得した大量のスペクトル・画像等の解析データを整理して計測結果の良否を判断したり、データベース化したりするプロセスも多く時間を消費するが、取得データの特徴量抽出とクラスタリング・次元削減などの手法により、大幅な効率化が期待される。また、触媒層の構造や形成過程のような複数の要因を含むデータのマルチモーダル解析にも、機械学習の手法が活用されつつあり、今度さらなる高度化が期待される。

こうした MEI の手法は、多様な構造解析手法・イメージング手法によりマルチスケールの構造解析やオペランド計測が可能な先端大型放射光施設 SPring-8、3GeV 放射光施設 NanoTerasu、大強度陽子加速器施設 J-PARC や先端分析機器などに実装される計画である。また、データを統合的に活用することにより、新規触媒・電解質膜材料開発や材料合成プロセス、触媒層形成プロセス、シール・セパレータ材料の解析にも適用することで、MI や PI による材料・プロセス開発を加速したり、自動・自律実験の要素技術として活用されると期待される。さらに、上記放射光施設や中性子実験施設のアップグレードや新検出器の開発による計測技術の進歩、データ解析における新アルゴリズムの開発により継続的に技術開発が行われること、また、蓄積したデータを活用することにより継続的に MEI の技術が進歩することが期待される。

(参考文献)

- [1] Ueno, T., Ishibashi, H., Hino, H. et al. npj Comput Mater 7, 139 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41524-021-00606-5>
- [2] Saito, K., Yano, M., Hino, H. et al. Sci Rep 9, 1526 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37345-5>
- [3] Ueno, T., Hino, H., Hashimoto, A. et al. npj Comput Mater 4, 4 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41524-017-0057-4>
- [4] Baliyan, A., Imai, H. Sci Rep 9, 18241 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54770-2>
- [5] Ichiro Akai, Kazunori Iwamitsu, Yasuhiko Igarashi, Masato Okada, Hiroyuki Setoyama, Toshihiro Okajima and Yasuharu Hirai, Journal of the Physical Society of Japan, 87(7), 074003 (2018)
- [6] Ozaki, Y., Suzuki, Y., Hawai, T. et al. npj Comput Mater 6, 75 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41524-020-0330-9>

2.9.4 自動・自律実験

昨今の少子高齢化での研究者の不足が危惧され、コロナ禍における現場での研究開発活動が制限される中で、短時間で最大の研究開発の成果を出すことが求められている。

研究開発においてロボットによる自動化、AI・機械学習で材料の最適化を図る自律化を測る事で、短時間で最大の研究開発の成果を出す。

これまで諸外国で、バイオ・創薬の領域で自動・自律実験が推進されてきている。例えば、英リバプール大では、ロボットを用いて、8 日間で 688 回の実験を実施し、9 億 8100 万を超える候補を対象として、自律実験的に光触媒合成を行う事で触媒活性を 6 倍以上高めた結果も報告されている[1]。

自動・自律実験では AI は俯瞰的に物事を見て機械学習を行い、前の実験結果から次の条件を提

案する。人間では過去の経験、勘に制約を受けて行動する場合があるが、自動・自律実験では予想外の提案を行う事がある。このように、これまで探索出来ていなかった領域の材料の探索を効率的に行える物が自動・自律実験である。また、自動化を行うことで、人間が実験を行うことで、実験結果に、個人の実験スキルの影響を受けていたことに対し、均質なデータを揃える事が可能となり、MIでの解析により精度の高いデータを提供出来ることになる。

燃料電池を実用化し、広く普及させるためには、2040年の材料目標を達成させる必要がある。この2040年目標は諸外国と比べても高い目標であり、達成には材料の飛躍的な向上が求められる。材料探索では多くの素材の組み合わせ、新たな材料の創出が求められるが、これには多くの工数と時間を要することが予想される。自動・自律実験を材料探索に活用する事でこの探索を効率的に、短期間で行う事が可能となる。現在、セパレータ表面処理、触媒探索に自動・自律実験が適用されつつあるが、電解質膜、ガス拡散層、アイオノマ、ラジカルクエンチャ等のMEA材料、シール材、水素貯蔵材・高圧タンク材料、プロセス等にも適用の検討を推進していく事が必要と考えられる。

特に、材料目標達成に向けた課題解決の難易度が高いものの開発優先度を高く設定し、カソード触媒の合成および触媒層の作製工程、電解質膜の成膜工程、量産プロセスに適した触媒インクの調合工程等を優先課題とし、材料研究の自動化・自律化を進めることとした。

燃料電池の材料研究では、材料や部材ごとに異なる合成装置や評価装置を使用している。そのため、材料研究の加速化には、材料や部材ごとに実験の自動化が求められる。したがって、材料・部材ごとの汎用技術に基づき自動実験装置を構築し、その装置を他の材料研究者と共有することにより、実験の加速化につなげることが望まれる。将来的には、産業利用を前提として、企業での実用領域での活用を通じて、製品性能向上の加速化を図ることが必要である。

また、外部のロボット技術研究開発において、精度向上、センシング、柔軟性、ティーチング手法、生成AIの活用など、要素技術で優れたものが開発された際には、それらを自動・自律実験に適用しつつ、燃料電池の材料研究を進めていく。

(参考文献)

[1] Burger, Benjamin, et al. "A mobile robotic chemist." *Nature* 583.7815 (2020): 237-241.

2.9.5 計算技術・モデル化技術

物理的な実体を計算機上で仮想的に構築・再現する技術は、DXを進めるにあたり必要不可欠な技術である。燃料電池・水素に係る技術開発を加速化するためのDX技術として、計算科学によるシミュレーション、機械学習・AIなどによる情報学的手法をはじめ、量子計算技術を取り上げた。

シミュレーションは、数式で表される物理・化学的な法則に基づき対象物をモデル化し、材料・分子の物性・熱力学的性質や化学反応、構造物の機械的特性、気体・液体など流体の流れ場、伝熱現象、電磁気学などの現象の把握や要因の分析を行うための強力なツールである。

一定の精度・予測能力が担保されたシミュレーションを用い、実験ではコスト・資源制約により実現できないような大規模・広範囲な評価を代替することが必要である。例えば、触媒材料のバルクとしての熱力学的安定性の評価を第一原理計算により計算することが考えられる。このよ

うな燃料電池・水素の技術開発に向けた応用を進めるとともに、詳細な現象への対応に向けた基礎的な研究開発を継続して行くことも期待される。

機械学習・AIなどの情報学的手法は、データに基づいて対象物の特性・特徴を表現するモデルを構築することが可能な技術である。十分なデータがあることが前提となるが、物理・化学法則で表すことが難しい複雑な現象・未解明の現象や、要素・要因が分解できないような対象に対しても、モデル化やシミュレーションを行うことができる。

原理的解明や要素分解に基づくモデル化・技術開発が困難であるような対象について、モデルを用いた予測・シミュレーションや要因分析・相関関係の探索という活用の方向性が期待される。例としては、異なる時間・空間スケール階層の物理現象間の橋渡し（トランススケールシミュレーション）や、装置全体のモデル（デジタルツイン）の構築が考えられる。

また一般的に機械学習・AIによるモデルは、高精度な計算科学シミュレーションよりはかなり高速にシミュレーションを行うことが可能であるため、より高速に多くのケースについてシミュレーションを行うことも期待できる。例としては、第一原理計算に基づく様々な材料状態（表面、粒子）のエネルギーを計算して比較し、より安定な材料状態を探索することが考えられる。

量子計算（量子コンピューティング）は、量子力学の原理を計算に利用した計算技術であり、実用化への期待が高まっている。通常の計算機（量子計算機に対して古典計算機とよばれる）では、0、1の二値として表されるビットを計算に用いているが、量子計算では0、1の重ね合わせ状態をとる量子ビットにより計算を行う。

量子計算機にはゲート型と量子アニーラがある。ゲート型では量子アルゴリズムに基づいて量子ビットに対する演算を行うものであり、量子アニーラは指定する条件下でのイジングモデルの解として量子ビットの「最小エネルギー」状態を導出するものである。さらに量子計算機ではないが、量子アニーラと類似の処理によりイジングモデルの解を求める専用の古典計算機が開発されており、量子インスパイアードと呼ばれている。量子アニーラと量子インスパイアードをあわせてここではアニーラとする。

アニーラは、組合せ最適化問題を解くことに向いており、組合せ最適化が必要となる諸問題に適用できる可能性がある。問題のサイズの観点から実問題に適用できるような計算機の実機も利用可能になってきているが、適用にあたってはイジングモデルとして問題を定式化し、組合せの評価を単純な表式（イジングハミルトニアン）で書き下すことが必要になる。酸性条件での酸素発生反応の触媒の探索に適用された研究事例[1]もあり、MIへの適用に加え、さらに広範囲な材料空間からの所望の特性を持つ代替材料の高速探索技術への適用が期待される。

量子ゲート型は、汎用性が高い量子計算機であり、量子アルゴリズムにより様々な計算処理に対処できる可能性ある。現状実現されているのは誤り耐性機能がない計算機（NISQ: Noisy Intermediate-Scale Quantum device）であり、ノイズを含んだ計算結果の有効な活用方法について研究がおこなわれている。一方で誤り耐性を持った計算機（FTQC: Fault Tolerant Quantum Computer）は、実現には10年以上の時間を要するとみられているが、一度実現すると計算量・計算速度へのインパクトが極めて大きい。材料の量子化学計算において励起状態の精密なエネルギーを計算することで触媒反応などの詳細な検討が可能になるなど、高精度かつ高速な評価が可能になることが期待される。

(参考文献)

[1] Choubisa, Hitarth, et al. "Accelerated chemical space search using a quantum-inspired cluster expansion approach." Matter (2022).

2.9.6 自然言語処理 (NLP)

本章の冒頭に記したように、脱炭素に向け燃料電池・水素への関心が世界中で高まっており、日々その情勢がニュースとして配信されている。また、毎年膨大な数の論文・特許が公表され、その数はますます増加傾向にある。これらの情報は人が作成する文章（自然言語）で記述されているが、その膨大な量を人が読んで全体像を把握することは不可能であり、コンピュータによる自然言語処理（NLP : Natural Language Processing）の技術が必要になっている。

NLP により実現を目指すものとして、一般情報については、まず、膨大な情報のなかからベンチマークとなる重要な情報を取捨選択し人が読めるように整理すること、次いで、収集した情報から開発戦略の方針策定を支援することがあり、これらの技術開発が必要である。論文や特許などの技術文献に対しては、材料名やそれと紐づく物性値・性能指標、プロセス情報などを精度よく抜き出して（固有表現認識）整理することや、さらに進んで科学的・技術的な知見を整理・体系化する技術開発が必要である。整理・体系化された情報は、MI などのベース情報としての利用をはじめ、現象把握の仮説提示などへの活用が想定され、研究開発者をサポートしていくものになる。

これらを実現していくにあたっては、従来の自然言語処理モデル（図 2.9.6-1）に加えて、近年著しい発展を見せている大規模言語モデルの活用を図っていくことが必要である。

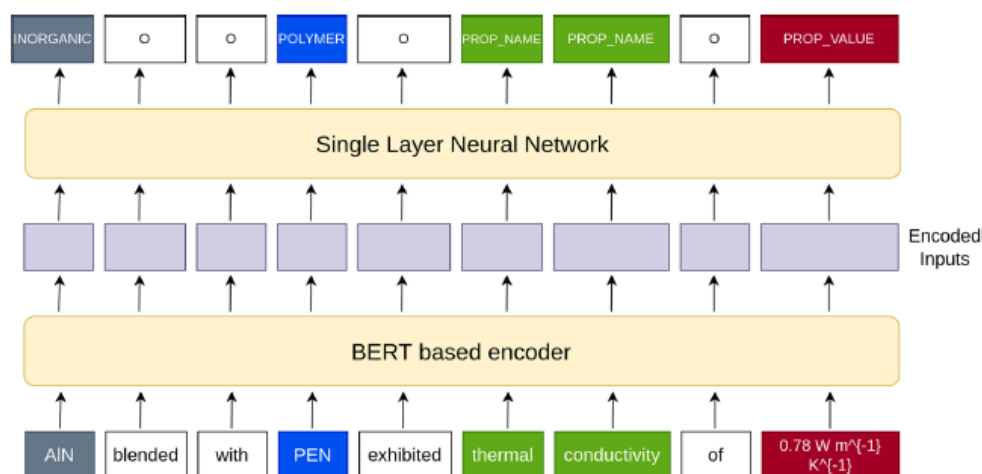


図 2.9.6-1 技術文献からの固有表現認識の例(参考文献[1])

文章[最下段]の各トークンを入力とし BERT に基づくエンコーダーにより文脈を埋め込み数値表現する[中段]。埋め込まれた数値表現から単層のニューラルネットワークにより各トークンのエンティティタイプ(「無機材料」、「ポリマー」、「物性の名前」、「物性の値」など)を出力する[最上段]。

(参考文献)

[1] Shetty, Pranav, et al. "A general-purpose material property data extraction pipeline from large polymer corpora using natural language processing." npj Computational Materials 9.1 (2023): 52.