燃料電池
ロードマップ 2020

解説レポート

2021年2月 | 第1版

DISCLAIMER: Translations of any materials into languages other than English are intended solely as a convenience to the non-English-reading public and are not legally binding. We have attempted to provide an accurate translation of the original material in English, but due to the nuances in translating to a foreign language, slight differences may exist. This translation is supplied to you on the understanding you have accepted this disclaimer and no liability is accepted by the APC for the use of the translation by you or any other party if the translation is found to contain inaccuracies.

免責事項:　本資料の英語以外の言語への翻訳は、英語を読まない方の便宜を図ることのみを目的としており、法的拘束力はありません。APCは、英語の原文を正確に翻訳するよう努めていますが、微妙なニュアンスが含まれるため、外国語へ翻訳する際には若干の違いが生じる場合があります。この翻訳は、お客様がこの免責事項に同意したという前提で提供されており、不正確な部分があることが判明した場合でも、お客様またはその他の関係者による当翻訳の使用について、APCは一切の責任を負わないものとします。

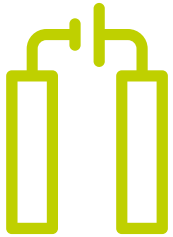
automotive council UK

ADVANCED PROPULSION CENTRE UK

概要：燃料電池

ニッチからメインストリームへ

- この５年間、世界中で15000台の燃料電池電気自動車（FCEV）が販売され、そのうちの7500台は2019年に販売された。販売は主にアジアブランドである現代自動車の Nexo、トヨタの Mirai、そしてホンダの Clarityで占められている。2030年までに中国におけるFCEVの販売は100万台、日本では80万台に到達すると予測されている。
- 運輸部門における脱炭素化が推進される中でFCEVはBEV（バッテリー電気自動車）の代替として提示され、特定の使用事例でのシステム効率性については業界内で最高クラスの内燃エンジンに対しても競争力を持つものである。
- 自動車用アプリケーションとして一般的に使われる燃料電池にはプロトン交換膜燃料電池（PEMFC）と固体電解質型燃料電池（SOFC）のふたつの主要なテクノロジーがある。



国際的活動の増加

- メルセデス、BMWなど欧州OEMは F-Cell や Hydrogen7 などの実証を経て燃料電池技術をポートフォリオの中に取り込むことを再検討しはじめている。BMW は昨年のフランクフルトモーターショーで i Hydrogen NEXT コンセプトモデルを発表した。乗用車を超えて重量物運搬車両セクターでは長距離運転における電池重量の増加を避けるためにFCEV技術開発の活発なプロジェクトが行われている。現代自動車の XCIENT燃料電池トラックや2020年4月に発表されたボルボトラックとダイムラーの合弁会社は大型重量車両アプリケーション用の燃料電池システムを製造販売する計画をたてている。
- 運輸部門における燃料電池市場は水素によって動作するイオン交換膜燃料電池（PEMFC）が中心となっているが、幅広い用途に使うことのできる固体酸化物燃料電池（SOFC）のような既存の市販燃料を用いた燃料電池技術もある。このロードマップの中ではPEMFCとSOFC両方の性能指標を示し、技術の進化を図表として見ることができるようにしている。
- 現在の燃料電池車は、中型乗用車としても6万ドルから8万ドルと値段が高く、燃料供給のインフラの整備が乏しく（水素は最も一般的な燃料にもかかわらず沿道での給油設備が不足している）、そして他のパワートレインに対して競争力を持つためにシステム効率性を向上させていかなければならないといった主要な課題がある。コスト、効率性、耐久性を組み合わせた価値を提供していくことがこの将来有望な技術の重要な目標である。

用語については本報告書巻末の用語集を参照。

前書きと謝辞

APCはこのロードマップ作成、出版にあたり産業界、学術界より幅広いご支援を頂きましたことにお礼申し上げます。

また、この度英国自動車協議会（UK Automotive Council）よりプロダクトとテクノロジーロードマップの刷新の委託、また継続的なサポートを頂きましたことにも感謝申し上げます。

さらに、このロードマップの作成にあたりBEIS（英国政府ビジネス、エネルギー、産業戦略省）より多大なご協力を頂きましたことに合わせてお礼申し上げます。

ネヴィル・ジャクソン

英国自動車協議会
（UK Automotive Council）

この度APC(英国先端推進システム技術センター)が自動車業界と密接に協力して策定した「2020年自動車推進力テクノロジーロードマップ」を皆様と共有させていただけることを大変嬉しく思っております。

これらのロードマップの中では自動車を脱炭素でより持続可能なものにするための重要な将来の目標、またその達成に向かって最も有望な道筋をまとめており、今後の技術開発、特に共同開発の焦点を絞る際の重要な手段として役立てて頂けるものと確信しております。

ロードマップは英国自動車協議会（UK Automotive Council）が策定したものを、2017年にAPCがさらに発展させましたが、昨今の英国政府による2050年カーボンニュートラル目標の発表、その達成の緊急性などを鑑み、今回新たに刷新されることとなりました。推進力技術の変化のスピードはこの数年急速に加速しており、電気自動車の適用も増加、電池の価格も以前の予測より早く下がってきています。また、燃料電池のようなゼロエミッション技術が飛躍的ペースで成熟化、水素を含むクリーンな燃料が化石燃料の代替として現れてきています。

しかし、変化のスピードを加速させていくために乗り越えなければならない大きな課題もあります。研究開発と商用化に力を入れ、リーズナブルな価格の商品を市場にだし、消費者にとって魅力的なものとしていかなければなりません。この「2020年テクノロジーロードマップ」は自動車業界専門家へのアンケート・調査から得られた専門家の間でほぼ一致した見解をもとに、将来の自動車推進力目標、テクノロジー、時間軸を提供しています。

本レポートから得られる知見とテクノロジーの方向性をもとに、自動車業界全体が世界レベルのソリューションを加速させ、達成できるようにすることがこのレポートの目的であり、本ロードマップが将来のモビリティの課題に対処するための共同開発、また、運輸、オフ・ハイウェイ車両部門の更なる研究開発を推進するための重要な情報源となることを心より念願しております。

ロブ・モーガン教授

ブライトン大学

このロードマップは燃料電池についての膨大な国際的研究をもとに、道路交通においてこの技術を大規模展開するための課題と機会を簡潔にまとめたものです。また運輸部門の異なるセグメントからの商品要件や代替技術を同時に検証する、より広範囲に及ぶプロジェクトの一環として開発されたものです。このように俯瞰的に見ることによって基本的なコスト、耐久性、そして性能目標、また運輸セクターがカーボンニュートラルを達成するために燃料電池が他の技術とともに担う重要な役割についての新たな視点を提供するものです。

ダン・ブレット教授

ユニバーシティー・カレッジ・ロンドン（UCL）

進捗をベンチマークし、テクノロジーを進歩させ、技術成熟度を判断するためには定義化された時間枠の中で目標設定をしていくことが不可欠です。これは商業化への過程の重要な段階にある燃料電池のような進興技術については特に重要です。APCのアプローチは主要な国際的ロードマップから情報を引き出し、市場への普及を予測し、燃料電池のテクノロジーとコストの進化を合わせて紹介するものです。そして、目標を到達するために求められる重要な技術的進歩をその進化の行程に重ね合わせて紹介しています。

ナイジェル・ブランドン教授

インペリアルカレッジ・オブ・サイエンス
アンド・テクノロジー・ロンドン

運輸セクターを含む多くの分野で脱炭素化を進めるにつれ、燃料電池技術の担う重要な役割がより認識されるようになっています。このロードマップは軽量、重量燃料電池車の普及に欠かせない燃料電池コストの継続的低下と性能の向上を実現するための研究、イノベーションの優先順序を決定する手助けとなるでしょう。

軽量、重量車アプリケーションテクノロジー指標

自動車業界として量産車市場の競争環境において達成できる見込みの技術指標。全てのコストと性能測定基準は意欲的だが同じ技術に関連している。

		2020	2025	2035
軽量車両	$/kW（システム）	112	68	40
	$/kW（スタック）	70	40	20
	システム効率[1]（%）	60	65	70
	スタックの耐久性（時間）	5,000	6,000	8,000

		2020	2025	2035
重量車両	$/kW（システム）	455	195	80
	$/kW（スタック）	285	115	40
	システム効率*（%）	60	65	70
	スタック耐久性（時間）	15,000	22,000	30,000

		2020	2025	2035
水素貯蔵タンク[2]	車載水素貯蔵コスト（$/kg of H2）	470	365	200

注記：

- 全ての指標は米国エネルギー省、欧州燃料電池水素共同実施機構（FCH JU）、中国および日本の水素・燃料電池戦略協議会ロードマップ公表データから平均化データと容量補正数字をベースに策定されている。
- システム効率の値はPEMとSOFCにおいて定格負荷を与えた場合の値である。したがって燃料の効率性目標を示すものではなく、また、この値を使って燃料の効率性を比較することはできない。
- この指標ではある時点での効率が示されているが、実際の車両効率を正確に示すものではなく、使われている推進力テクノロジーとプロダクトアプリケーションによって異なる。

指標は下記のグローバルFCEV（燃料電池電気自動車）の生産台数をベースにしている。

2020	2025	2030	2035
15,000	50,000	750,000	> 3,000,000

1. PEM @25%定格負荷; SOFC @80%定格負荷　2. PEM 特定のテクノロジー

指標はコストおよび性能を通じて同じテクノロジーに関連している。

軽量、重量車アプリケーションテクノロジー指標

自動車業界として量産車市場の競争環境において達成できる見込みの技術指標。全てのコストと性能測定基準は意欲的だが同じ技術に関連している。

		2020	2025	2035
軽量車両	$/kW（システム）	112	68	40
	$/kW（スタック）	70	40	20
	システム効率[1]（%）	60	65	70
	スタックの耐久性（時間）	5,000	6,000	8,000

		2020	2025	2035
重量車両	$/kW（システム）	455	195	80
	$/kW（スタック）	285	115	40
	システム効率*（%）	60	65	70
	スタック耐久性（時間）	15,000	22,000	30,000

		2020	2025	2035
水素貯蔵タンク[2]	車載水素貯蔵コスト（$/kg of H2）	470	365	200

注記：

- 全ての指標は米国エネルギー省、欧州燃料電池水素共同実施機構（FCH JU）、中国および日本の水素・燃料電池戦略協議会ロードマップ公表データから平均化データと容量補正数字をベースに策定されている。
- システム効率の値はPEMとSOFCにおいて定格負荷を与えた場合の値である。したがって燃料の効率性目標を示すものではなく、また、この値を使って燃料の効率性を比較することはできない。
- この指標ではある時点での効率が示されているが、実際の車両効率を正確に示すものではなく、使われている推進力テクノロジーとプロダクトアプリケーションによって異なる。

指標は下記のグローバルFCEV（燃料電池電気自動車）の生産台数をベースにしている。

2020	2025	2030	2035
15,000	50,000	750,000	> 3,000,000

1. PEM @25%定格負荷; SOFC @80%定格負荷　2. PEM 特定のテクノロジー

コストと性能指標

量産車市場への適用につき、コスト、システム効率と耐久性が燃料電池の主要な測定基準として選択された。

		2020	2025	2035
軽量車両	1 $/kW（システム）	112	68	40
	2 $/kW（スタック）	70	40	20
	3 システム効率[1]（%）	60	65	70
	4 スタックの耐久性（時間）	5,000	6,000	8,000

1 システムコスト

燃料貯蔵とデリバリーシステムを除くスタック、補助装置、バランスオブシステムを含む燃料電池システム全体のコスト。

市場導入促進のために大幅なコスト削減が必要。

2 スタックコスト

システムコストとスタックコストは直線的にマップ化ができないためシステムコストとは別に提供されている。スタックは化学物質を電気に変換する主要ユニットである。燃料電池への関心が高まる中で大幅なコスト削減が求められる。

3 システム効率

燃料電池は高いシステム効率能力を持つがこれを燃費としてとらえることはできない。現実の運転サイクルとドライブライン効率が全体の性能に影響を与える。したがってここに示される値は定格負荷の数字である。（最大出力能力に対する典型的なトルクデマンド）。PEMは@25% SOFC @80%の定格負荷である。

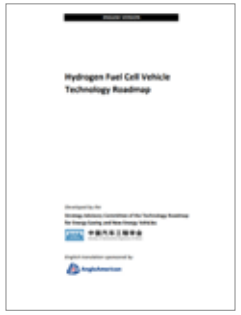
4 スタック耐久性

燃料電池がオーバーホールのためのサービス摩耗限度を超えず信頼性能を持って機能する時間の予測。これはエンジンの一般的な測定基準でありよくTBO（オーバーホール間隔）と呼ばれる。

US Department of Energy

EU Fuel Cells & Hyrogen JU

China



Japan

指標の値の設定

燃料電池は車両ベンチマークデータが限られた中で急速に成熟しているテクノロジーである。私たちはここに示されるような米国エネルギー省（DoE）、欧州燃料電池水素共同実施機構（FCH JU）、そして中国、日本の戦略協議会ロードマップの幅広い研究の主要な性能指標を使うアプローチをとっている。

各報告書の燃料電池の需要また生産についての予測はさまざまである。本報告書では以下のように調整予測生産台数を使った。

指標は下記のグローバルFCEV（燃料電池電気自動車）の生産台数をベースにしている。

2020	2025	2030	2035
15,000	50,000	750,000	> 3,000,000

テクノロジー指標

1 システムコスト

重量車両と軽量車両のシステムと設計は大きく異なる。重量車両のデューティサイクル、使用事例、バランスオブシステムは重量車両独自のものである。量産車市場導入達成のためには大幅なコスト削減が求められる。

2 スタックコスト

デューティサイクルと電力需要要件が重量車両では異なるため、重量車両専用の燃料電池設計が求められる。その結果、軽量車両よりも指標は高くなっている。しかし、コスト削減の軌道については燃料電池の運送利用への関心が高まる中で同じような軌道になると期待される。

3 システム効率

燃料電池は高いシステム効率能力を持つがこれを燃費の参照としてみることはできない。現実の運転サイクルとドライブライン効率が全体の性能に影響を与える。したがってここに示される値は定格負荷の数字である。(最大出力能力に対する典型的なトルクデマンド)。PEM は@25% SOFC @80%の定格負荷である。

4 スタック耐久性

燃料電池がオーバーホールのためのサービス摩耗限度を超えず信頼性能を持って機能する時間の予測。フリートは使用率が高く、TCO(総保有コスト)に競争力を持たせなければならないため LD(軽量車両)より値が高くなる。

		2020	2025	2035
重量車両	1 $/kW(システム)	455	195	80
	2 $/kW(スタック)	285	115	40
	3 システム効率*(%)	60	65	70
	4 スタック耐久性(時間)	15,000	22,000	30,000

US Department of Energy

EU Fuel Cells & Hyrogen JU

China

Japan

指標の値の設定

燃料電池は車両ベンチマークデータが限られた中で急速に成熟しているテクノロジーである。私たちはここに示されるようなDoE(米国エネルギー省)、欧州燃料電池水素共同実施機構(FCH JU)、燃料電池と水素の共同事業、そして中国、日本の戦略協議会ロードマップの幅広い研究の主要な性能指標を使うアプローチをとっている。

各報告書の燃料電池の需要また生産についての予測はさまざまである。本報告書では以下のように調整予測生産台数を使った。

指標は下記のグローバルFCEV(燃料電池電気自動車)の生産台数をベースにしている。

2020	2025	2030	2035
15,000	50,000	750,000	> 3,000,000

軽量、重量車アプリケーションテクノロジー指標

自動車業界として量産車市場の競争環境において達成できる見込みの技術指標。全てのコストと性能測定基準は意欲的だが同じ技術に関連している。

		2020	2025	2035
軽量車両	$/kW（システム）	112	68	40
	$/kW（スタック）	70	40	20
	システム効率[1]（%）	60	65	70
	スタックの耐久性（時間）	5,000	6,000	8,000

		2020	2025	2035
重量車両	$/kW（システム）	455	195	80
	$/kW（スタック）	285	115	40
	システム効率*（%）	60	65	70
	スタック耐久性（時間）	15,000	22,000	30,000

		2020	2025	2035
水素貯蔵タンク[2]	車載水素貯蔵コスト（$/kg of H2）	470	365	200

水素貯蔵タンク

これはPEM燃料電池のみに関わるテクノロジー指標である。水素はエネルギー密度体積が低いため貯蔵することが難しい。自動車の水素タンクには 350 bar（5,000 psi）と700 bar（10,000 psi）の圧縮水素が使われるが、そのためには CFRP のようなかなり強度の高い材料を使用しなければならず、また圧縮タンクの大幅な補強をしなければならない。その結果重量増加とコストが高くなるという欠点がある。

車載水素貯蔵コスト

水素貯蔵コストはPEM燃料電池システムの大部分を占めるものである。ここに示した値は主に米国エネルギー省のUS-Driveおよび欧州燃料電池水素共同実施機構の報告書の数字を示した。

吸蔵システム、金属水素化物、また化学再生システムなど異なった貯蔵技術もベンチマーク報告に反映された。貯蔵コストは求められる水素 1 kg あたりのコストを米ドルで示している。

水素の値段（燃料供給）

1 kgあたりの水素の値段は供給とインフラ開発に伴って進化し続けている。これらは市場の需要と供給、また自治体のインセンティブによって牽引されるためロードマップ指標リストには含まれていない。現在（2020年）の推定では平均料金は $14/kg（カリフォルニア州は $16/kg）となっている。

しかし水素の値段は急速に下がる可能性が高く普及と関心の高まりに伴い2035年までには$4~6/kgまで低下し、EUでは $3/kg まで下がるのではないかという予測もある。

ロードマップ2020

燃料電池

テクノロジー ロードマップ

2020年~2035年のテクノロジー指標は報告書の初めのページを参照。

automotive council UK

ADVANCED PROPULSION CENTRE UK

本ロードマップは、グローバル自動車業界の量産車市場普及向け推進力技術予測を現時点でのスナップショット形式で表現したものである。特定のアプリケーション向けの技術については地域ごとに異なる。

黄緑色: 量産市場アプリケーション用のSOFC専用技術

深緑色の矢印: 一般的またはPEM – 当該技術は量産市場アプリケーションとして使われている。この期間中に、著しい技術革新が期待される。

濃い緑に白の矢印:移行期: 「移行」とは市場からフェーズアウト(段階的廃止)されるという意味ではなく、R&Dの焦点の変化を表す。

点線で囲まれた矢印: 市場の成熟期一技術が成熟期に到達。技術のフェーズアウト、代替技術の普及まで市場での適用継続が予想される。

		2020	2025	2030	2035	2040	…
燃料電池スタック		低 PGM 触媒、低コスト耐久性膜		>120℃作動温度に対応できる膜材料		高い出力効率性 PGM と燃料効率	
		耐久性最適化バイポーラープレートとコーティング		コストとHV 製造を最適化するプレート		新バイポーラープレート材	
		より高い伝導性と低コストの電極とGDL			GDLの代替材となる新電極技術		
		市販燃料に許容性を持つ素材			低温作動温度<450℃で動くセル		
バランス オブ システム	熱システム	コンパクトで効率性の高いヒートエクスチェンジャー		統合熱管理システム			
			低温始動性サポート(電池、熱エネルギー貯蔵、熱慣性の向上)				
			熱効率:排熱リカバリー、リフォーマー、ヒートエクスチェンジャー		低コスト、低エネルギ熱管理		
	パワーと補助装置管理	セル耐久性のための劣化管理		スタックの寿命向上のための内蔵セル診断、管理、自己修正			
		寄生損失の削減と局所エネルギー需要管理		補助装置電力の合理化、ハイブリッド電池システム内の統合、コスト最適化			
		高効率 DC ブースト		高圧電力配給ユニットとインバーターとのDC-DC統合			
	空気と液体のハンドリング	耐久性、コスト向上したブローワー、コンプレッサー、ターボエクスパンダー			低コストで耐久性高いエアコンプレッサーとフィルター		
		性能とコスト改善のための液体ハンドリング、水管理		次世代液体管理とラジエーターの小容量化			
燃料 貯蔵と管理	貯蔵と燃料	軽量、低コストの CFRP水素タンク	高容量、低コスト、長寿命CFRP水素タンク		スペース、新素材、寿命に合わせた改善タンク設計		
				極低温と液化水素タンク	液化と固体(例:水素化物)貯蔵の増加		
		複数燃料許容性のある SOFC	低炭素ミックス燃料用のSOFC		ネットゼロ燃料用のSOFC		
	デリバリー	水素燃料品質、ポンプ、コネクター、レギュレーター、バルブ、ノズルの改善		車載水素洗浄、液化水素システム、固体デリバリーシステム			
		小型化、より効率的な燃料リフォーマーシステム			ネットゼロ燃料に適合するデリバリーシステム		
コントロール システム			効率性、寿命、耐久性向上のための車載診断とモデル予測コントロール			AI 自己学習コントロール	
		性能と耐久性向上のための内部センサーとソフトウェア		量産車市場用に標準化、調和したコントロールシステム			
ライフサイクル		環境に焦点をあてたプロセス(例:MEA と触媒製造)		高価材料(例:白金、CFRP)の効率的回収		LCAに焦点をあてたバリューチェーン	
		ネットゼロと分解設計	高度な脱炭素化、エネルギー効率の高い製造とリサイクル			CO_2 排出ネットゼロ生産システム	

主なテクノロジーテーマ

ロードマップ2020
燃料電池

テクノロジー ロードマップ

燃料電池スタック

燃料電池スタックはスタックの全ての構成要素を網羅している。PEMFCにおいては基本的にバイポーラープレート（電極）、MEA（膜、コーティング、ガス拡散層（GDL）と触媒から構成される膜・電極一体構造）、絶縁体とエンドプレートである。SOFCはセル構造が異なるため、SOFC特有の情報は別途提供している。セル構造は平面、または管状構造にアノード、カソードと電解質アセンブリーとして構成される。

バランス オブ システム

- 熱システム
- パワーと補助装置管理
- 空気と液体のハンドリング

バランスオブシステムとは自動車のデューティーサイクルのエネルギーを提供し管理するために必要なすべての燃料電池のサポート部品と周辺補助システムをさす。

熱システム：ヒートエクスチェンジャーと統合熱管理システムがシステム効率の改善を牽引するものとなる。SOFCは排熱回収、低音始動熱サポートとリフォーマーがロードマップの主要なテーマである。

出力と補助装置管理：効率性向上のためのセル管理、DCブースト技術、パワーアーキテクチャおよびバランスオブシステム全体の管理。

空気と液体のハンドリング：ブローワー、加湿器、コンプレッサー、ターボエクスパンダーおよび水管理システムは耐久性、コスト、サイズの改善の機会を与える。

燃料 貯蔵と管理

- 貯蔵と燃料
- デリバリー

貯蔵と燃料：PEMFCとSOFCでは異なった燃料が考えられる。PEMFCの水素貯蔵の進化とSOFCのネットゼロ市販燃料の導入はロードマップ上で別々に示されている。

デリバリー：PEMFCの場合は水素の品質と車載貯蔵の変化に伴って、ポンプ、コネクター、レギュレーター、バルブ、ノズルを適合する必要性がある。リフォーマーと燃料デリバリーシステムはSOFCのネットゼロ燃料に採用する中で開発される。

コントロール システム

コントロールシステム：新型センサー、ソフトウェアの進化、車載診断、およびモデルの予測コントロールは燃料コスト、性能、耐久性向上のために必須である。

ライフサイクル

ライフサイクルには燃料電池部品と生産プロセスに関わるエネルギー強度、LCA（ライフサイクル評価）負荷、リソース消費およびバリューチェーンのリサイクル性が含まれる。

2020 2025 2030 2035 2040

燃料電池スタック

燃料電池のコスト、効率性、耐久性向上のためにスタックに使用される材料全ての開発が重要である。

ロードマップ2020
燃料電池

テクノロジー ロードマップ

燃料電池スタック

1. 低 PGM 触媒、低コスト耐久性膜 → >120℃作動温度に対応できる膜材料 → 高い出力効率性 PGM と燃料効率
2. 耐久性最適化バイポーラープレートとコーティング → コストとHV 製造を最適化するプレート → 新バイポーラープレート材
3. より高い伝導性と低コストの電極とGDL → GDLの代替材となる新電極技術
4. 市販燃料に許容性を持つ素材 → 低温作動温度<450℃で動くセル

バランス オブ システム
- 熱システム
- パワーと補助装置管理
- 空気と液体のハンドリング

燃料 貯蔵と管理
- 貯蔵と燃料
- デリバリー

コントロール システム

ライフサイクル

2020 2025 2030 2035 2040

1 白金グループ金属と膜材料

MEA性能向上のためPGMをにPEMFCに使用することは高価となる。したがってコスト削減が掲げられる中、PGM使用はシステムあたり~30g から6~9gへと大幅に削減される可能性が高い。

PEMFCの作動温度は通常60~80℃だがエネルギー変換の効率性向上のために120℃以上にすることが可能である。

低コスト／高性能PGM、またはPGMフリーカソードは、製造や、カソードでのイオノマー統合、そして伝達ロスといった課題を乗り越えることによってセルコストを変革する可能性を持っている。

2 バイポーラープレートとコーティング

バイポーラープレートは均一的に燃料ガスと空気を分配しセル同士の電流を伝導し、有効面積から熱を除き、さらにガスと冷却の漏洩を防ぐといった機能を持つ主要部品である。

プレートはセル全体を通しての熱伝達を向上するために導電性をもち、高い化学的耐性をもち、伝熱性を持たなければならない。

コストを下げ、耐久性の最適化をするために材料、コーティング、大量生産技術の更なる開発が必要。

3 電極とガス拡散層イノベーション

MEAの一部であるGDLは通常、密な配列のカーボン・ファイバーからできており電流の集積のための導電経路を提供する多孔質材料である。反応伝達、熱または水の除去、機械的サポート、錆防止の機能も併せ持っている。

低温かつ低エネルギー消費で製造することのできる全く新しい柔軟で厚さを低減、また低コストで高性能のGDLの開発が行われている。

4 SOFCのセル材料

カソードとアノードは通常多孔質セラミック材、厚い酸化物イオン伝導性セラミック電極から作られている。これを脱炭素、ブレンド、およびネットゼロといったさまざまな燃料に適用するためには燃料とセル技術の最適化が必要となる。性能と耐久性を持つ低コストな電極の代替材料が鍵となる。

長期的にはSOFCを現在の（600℃）より低温で作動することができればエネルギー需要を削減、その結果燃料電池使用に関わるエネルギーコストを削減することができる。新しく開発されたナノスケール電極構造は作動温度を350℃まで低下することができることが紹介されている。

バランスオブシステム

全体的な熱効率の高い正確な作動温度を達成し、維持するためには燃料電池の熱システム全体の改善が求められる。

燃料電池スタック

「**バランスオブシステム**」は一般的に「バランスオブプラント」と呼ばれることもあるが、燃料のプロセス、再形成、熱管理、空気ハンドリング、水管理および電力コンディショニングを行う。完全な燃料電池が機能し、電力を継続的に供給するために必要なものである。

バランス オブ システム

- 熱システム
- パワーと補助装置管理
- 空気と液体のハンドリング

1. コンパクトで効率性の高いヒートエクスチェンジャー → 統合熱管理システム
2. 低温始動性サポート（電池、熱エネルギー貯蔵、熱慣性の向上）
3. 熱効率：排熱リカバリー、リフォーマー、ヒートエクスチェンジャー → 低コスト、低エネルギ熱管理

燃料 貯蔵と管理

- 貯蔵と燃料
- デリバリー

コントロール システム

ライフサイクル

2020 2025 2030 2035 2040

1 熱管理の改善

燃料電池を正しい温度で維持することは不可欠である。燃料電池の種類によって最適温度はPEMFCでは80℃から特定の高温SOFCでは1000℃までと広い範囲にわたる。設計温度からの逸脱は効率性を低下させる可能性がある。温度は熱源、放熱、冷却システムの組み合わせによって維持される。

先進ヒートエクスチェンジャー、冷却経路、再循環熱システムおよびコンデンサーは全て効率的で低コストのソリューションを開発する選択肢の組み合わせを提供する。

燃料電池システムを車両熱システムと統合することは部品のシナジーを生み出す利点はあるが実現は困難である。

2 SOFCの低温始動サポート

中、高温（600~1000℃）で作動する場合、SOFC燃料は外部改質や金属触媒の必要がなく燃料電池自体の中で直接燃料改質される。

セルをこの温度にするためにはセルが自給できる状態になるまでの始動時に電力、熱源が必要となる。したがってSOFCは関連電池供給と組み合わせられることが多い。

熱を供給し、伝達する車載エネルギー貯蔵ソリューションを持つことはSOFCシステム全体の効率性の向上に貢献する。

3 SOFCの熱効率

排熱リカバリーとサロゲート熱源（例：車両から）を含むヒートエクスチェンジャーやリフォーマーの改善等により代替熱供給システムと車載管理をすることは全体システムのエネルギー効率の向上とコストセーブに貢献する。

現在利用することができる低コスト、低温（500~600℃）SOFCスタックは業界標準セラミックの代わりに酸化セリウムガドリニウム（CGO）を使用している。このことによってステンレススチールを電極でのセラミックをサポートするために使うことができる。

バランスオブシステム

セル管理の改善と補助装置システムの合理化の余地がある。出力管理と既存車載システムのより緊密なインテグレーションによってロスおよびコストを削減することができる。

燃料電池スタック

バランス オブ システム
- 熱システム
- パワーと補助装置管理
- 空気と液体のハンドリング

燃料 貯蔵と管理
- 貯蔵と燃料
- デリバリー

コントロール システム

ライフサイクル

1. セル耐久性のための劣化管理 → スタックの寿命向上のための内蔵セル診断、管理、自己修正
2. 寄生損失の削減と局所エネルギー需要管理 → 補助装置電力の合理化、ハイブリッド電池システム内の統合、コスト最適化
3. 高効率 DC ブースト → 高圧電力配給ユニットとインバーターとのDC-DC統合

2020 2025 2030 2035 2040

1 劣化とセル管理

燃料電池は性能と耐久性の達成のためにさまざまな作動条件が求められる。セル検証の設計と試験を改善することはセルの寿命を向上させる設計の意思決定を助けるものとなる。長期的には内蔵型セル計測およびソフトウェア管理の技術改革をすることによって、リフォーマーとMEA構成部品のバランスに対処し、セル寿命を延ばすことができる。

2 ロスの削減と電力の合理化

燃料電池スタックは継続的な電力の供給のためにさまざまな補助装置システムを必要とする。その中には送風機、圧縮機、フィルターシステム、水管理、ヒートエクスチェンジャー、タンクコンディショニングシステム等が含まれる。これらの補助装置は同時に電力を消費する。これらの補助装置システムのロスを最小化することはシステム全体の効率化を高めることになる。

将来、部品の合理化、燃料電池アーキの簡易化をすることによって莫大なコスト削減ができる。例えば、共通電力管理機能を車載電池やその他の車両パワーシステムに集約することができる。

3 高効率化のためのDCブーストとインテグレーション

燃料電池は電池システムより低い様々な出力電圧を有するためDC–DCコンバーターが必要である。高効率のパワーエレクトロニクスコンバーターはロスを軽減するために必須である。

車載パワーエレクトロニクスシステムは統合が可能である。例えば、燃料電池 DC–DC コンバーターを推進力システムの高圧送信ユニットと統合することができる。システムの数を減らすことは潜在的なロスを低減することだけでなくコスト改善にもつながる。

バランスオブシステム

軽量でよりコンパクトで信頼性の高いスタックの達成のために厳しい要件に対応するための空気ハンドリングシステム専用設計および液体ハンドリングシステムの改善が求められる。

燃料電池スタック

バランス オブ システム
- 熱システム
- パワーと補助装置管理
- 空気と液体のハンドリング

1. 耐久性、コスト向上したブローワー、コンプレッサー、ターボエクスパンダー → 低コストで耐久性高いエアコンプレッサーとフィルター
2. 性能とコスト改善のための液体ハンドリング、水管理 → 次世代液体管理とラジエーターの小容量化

燃料 貯蔵と管理
- 貯蔵と燃料
- デリバリー

コントロール システム

ライフサイクル

1 空気ハンドリングシステムのより優れた設計

市販品のコンプレッサーや加湿装置は自動車用燃料電池アプリケーションに必ずしも適するとは限らない。高効率を達成するためにはコンプレッサーの内蔵圧縮率が燃料電池の作動圧縮にできる限り近いことが求められる。

空気ハンドリングシステムによってスタックのサイズと体積が決定される。最適化したシステムを使えばスタックを軽量でよりコンパクトにすることができ、その結果、補助装置のサポートも少なくすることができる。

燃料電池がより広く採用されていくことに伴い、空気圧縮およびろ過システムの信頼性、耐久性、コスト削減にも取り組んでいかなければならない。

2 液体ハンドリングシステムの向上

PEMFCでは固体高分子電解質膜が常に湿潤状態でなければならない。したがって、水の蒸発と同時に水の生成が行われなければならない。水の蒸発速度が早すぎると膜が乾いてしまい、全体の抵抗が増加する。そして亀裂が生じてしまう。逆に水の蒸発が遅すぎると電極が水浸しになり、反応物質が触媒に到達できず反応が止まる。低圧で作動する軽量で低容積のスタックは、膜の湿潤に必要な水の量を軽減するためシンプルでより安価なシステムとなる。

統合直噴水システムは操作性、低電力消費、またコンパクトであることから空気の加湿に有用である。

水はSOFC型燃料電池反応の一般的副産物であり、管理が必要である。次世代システムではヒートエクスチェンジャーをより小型にできる可能性がある。燃料電池の普及が進むにつれ、これらは重大な閉ループ技術、コスト安定化、設計の変化につながる。

2020 2025 2030 2035 2040

燃料貯蔵と管理

新しいタンク素材と気体水素に代わる液体、または固体水素はよりシンプルなデリバリーと貯蔵を提供することができる。市販燃料を使用するSOFCはネットゼロカーボン燃料への移行が課題である。

燃料電池スタック

バランス オブ システム
- 熱システム
- パワーと補助装置管理
- 空気と液体のハンドリング

燃料 貯蔵と管理
- 貯蔵と燃料
- デリバリー

コントロール システム

ライフサイクル

1 水素貯蔵用のCFRP タンク

PEMFCの場合、専用特別水素タンクが必要である。これは高圧タンクで現在 350 bar（5,000 psi）から700 bar（10,000 psi）に移行しているところだが製造コストが高い。強度が高いことからCFRPが最も一般的な素材の選択だが高価である。CFRP製造に関わる労働力および工場のエネルギー使用も高い。大量供給のためには低コスト、高耐久性の水素タンクが必要である。

メーカーは、長期的にはタンクに新素材を適用できるようになり、その結果水素を気体で貯蔵する必要がなくなり、車両の空間に合わせた造形など、斬新なタンクの設計も可能になると考えている。

2 液体水素と固体水素

PEM車載燃料デリバリーシステムにおいては2030年までには極低温液体貯蔵が導入される可能性がある。液体は気体よりも貯蔵、デリバリーがしやすいが極低温での貯蔵が必要である。

気体水素のもうひとつの代替は固体水素である。気体水素を親水素形成金属、合金、または金属間化合物と逆反応させることによって形成される金属水素化物はいくつかのエンドユーザーアプリケーションにおいて特に有望であった。金属水素化物を使用することにより高体積水素密度と簡素化した貯蔵が可能になる。

3 SOFCの燃料

SOFCは市販燃料を使用するため燃料貯蔵については有利である。燃料電池はかなりの高温で稼働するため燃料はアノードの中で自己改質が行われる。SOFCは現在従来型のタンク技術を使っている。

脱炭素化に向かう中で燃料選択は益々重要になってきており、SOFCもネットゼロカーボン燃料への移行、およびデリバリー、リフォーマーシステムについても適応させることが求められている。

1	軽量、低コストの CFRP水素タンク	高容量、低コスト、長寿命CFRP水素タンク	スペース、新素材、寿命に合わせた改善タンク設計
2		極低温と液化水素タンク	液化と固体（例：水素化物）貯蔵の増加
3	複数燃料許容性のある SOFC	低炭素ミックス燃料用のSOFC	ネットゼロ燃料用のSOFC

2020 2025 2030 2035 2040

燃料貯蔵と管理

水素、ネットゼロサステナブル燃料どちらの場合も車載燃料デリバリーシステムを改良することによってセル性能を向上させバランスオブシステムへのデマンドを低減することができる。

ロードマップ2020
燃料電池

テクノロジー ロードマップ

燃料電池スタック

バランス オブ システム
- 熱システム
- パワーと補助装置管理
- 空気と液体のハンドリング

燃料 貯蔵と管理
- 貯蔵と燃料
- デリバリー

コントロール システム

ライフサイクル

1 PEMFCの水素供給

スタックは供給される水素の純度に敏感なため、燃料電池に供給される水素の品質は特に重要である。さまざまなバランスオブシステムが燃料を洗浄し、循環させ、整えるために配置されエネルギー転換、システムコストに直接影響している。水素の品質（純度）の向上はポンプ、レギュレータ、コネクター、バルブ、ノズルの改善にもつながっていく。

長期的には液体と固体水素は水素の洗浄、コンディショニング、スタックへのデリバリーの変更へとつながっていく。

2 SOFCの複数燃料のデリバリー

燃料デリバリーシステムは不純物の除去、セルへの効率的な燃料供給についての問題を解決しないと性能と寿命に悪影響を及ぼすリスクがある。

炭素が形成されるとスタックが機能しなくなってしまうが燃料をスタックの稼働温度まで直接引き上げることによって炭素の形成を防ぐことができる。

より小型で効率性の高い燃料リフォーマーシステムはバランスオブシステムへのデマンドを軽減することになりコストも削減することができるという追加の利点もある。

長期的には、SOFC燃料デリバリーシステムは脱炭素化のためのネットゼロサステナブル燃料ソースに適応しなければならない。

1 水素燃料品質、ポンプ、コネクター、レギュレーター、バルブ、ノズルの改善 → 車載水素洗浄、液化水素システム、固体デリバリーシステム

2 小型化、より効率的な燃料リフォーマーシステム → ネットゼロ燃料に適合するデリバリーシステム

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040

コントロールシステム

商業化をサポートするためには一貫性のある規制、規範、基準が必要にはなるが、センサー、予測コントロール、複雑なモデルベースコントロールをより幅広く適用すれば、セル効率、耐久性、寿命を向上することができる。

燃料電池スタック

バランス オブ システム
- 熱システム
- パワーと補助装置管理
- 空気と液体のハンドリング

燃料 貯蔵と管理
- 貯蔵と燃料
- デリバリー

1

モデル予測コントロールとAI

電力と補助装置管理をよりスマートにすることで燃料消費の効率性はすでに改善されて来ている。車載診断（センサーによる支援）、予測コントロール（事前警告、サービススケジュールの計画）や複雑なモデルベース管理（複数のシステム要素を考慮に入れる）を適用することで、セル効率性、耐久性を高め、製品寿命を延ばすことができる。

長期的には、AIの予測、機械学習テクノロジーがより幅広く利用されるようになり、意思決定をサポートすると同時にスタックの性能と健全性を高めることになる。これらのツールは市販アプリケーションで利用される前に大規模な開発と安全性試験が求められる。

2

性能と耐久性のためのセンサーとソフトウェア

オプティカルまたケミカルセンサーは燃料の割合やセル材料の健全性の管理をするためにすでに燃料電池に利用されている。ソフトウエアの進歩によってより多くのデータを利用できるようになり修正の意思決定や、将来的には予測的行動を行うことにより、セル寿命を延長したり、サービススケジュールの改善をすることが可能になる。

電気自動車のコントロールシステムの標準化は一般的になってきているが、燃料電池システムの仕様は欠如しており、一般的なEVの仕様のみ存在している。

HarmonHy はEUが資金拠出をして、水素、燃料電池規制、規範、基準（RCS）についてのグローバルレベルでの活動を評価する特別支援イニシアチブで、各国間でのギャップはすでに確認され、国ごとのRCSが一致しない可能性が出てきている。これらは対処されつつあるが、メーカーは燃料電池の商業化を推進するためさらに対策を講じるように要求している。

コントロール システム

1. 効率性、寿命、耐久性向上のための車載診断とモデル予測コントロール → AI 自己学習コントロール
2. 性能と耐久性向上のための内部センサーとソフトウェア → 量産車市場用に標準化、調和したコントロールシステム

ライフサイクル

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040

ライフサイクル

膜・電極一体構造（MEA）のような燃料電池の主要部品は環境的に管理することが難しく、製造過程で大量のエネルギーを消費する。燃料電池電気自動車（FCEV）台数の増加に伴い、負荷を最小化するため、LCAに重点を置くと同時に、新たなエネルギー効率を高めるアプローチ（エネルギー源も含む）が必要となる。

ロードマップ2020
燃料電池

テクノロジー ロードマップ

燃料電池スタック

バランス オブ システム
- 熱システム
- パワーと補助装置管理
- 空気と液体のハンドリング

燃料 貯蔵と管理
- 貯蔵と燃料
- デリバリー

コントロール システム

1

材料、プロセスとLCAフォーカス

触媒を含むMEAの製造は複雑性が高くまた高価でシステムコスト全体の35~45%を占めている。

MEAはポリマー電解質膜、触媒層、ガス拡散層で構成されている。自動車業界で使用されている膜はポリマー鎖を作るために通常ペルフルオロスルホン酸から出来ている。これらのプロセスは環境的に管理することが難しく、また大量のエネルギーを用いる（触媒インクは膜にダイコーティングプロセスで塗布されるが、触媒コーティングされた膜とシートは130℃、200~350 kPa で高温プレスされなければならない）。したがって、化学的、そしてエネルギー効率に焦点をあてることが求められる。

長期的には、効率的で経済的に成り立つリカバリープロセスのためには、CFRPや白金のような主要なスタック材料の閉ループ循環バリューチェーンが必要となる。より多くの燃料電池が市場に進出してくるにあたり、ICE触媒やバッテリー金属などのLCAへの焦点が増大する。

2

高エネルギ効率製造とネットゼロ生産システム

生産工場でのエネルギー消費もカーボンフットプリントと関連する。生産プロセスにおけるエネルギー使用の削減とカーボンニュートラル達成はOEMにとっての共通の長期的目標である。

これは分解しやすいスタックの設計、開発、および「原材料から廃棄まで」を通じて管理する改善リサイクルプロセス、さらに「原材料から次の原材料」の環境改善を含む。

長期的にはセルと化学サプライチェーンのトータル環境負荷がさらに監視されていくようになる。これにはMEAのエネルギー強度、バイポーラプレートとスタック生産そしてVOCや水の消費のような環境負荷も含む。これによって新しいエネルギーの市販化や資源効率の高い燃料電池システムの生産を促すことになると考えられる。

ライフサイクル

1. 環境に焦点をあてたプロセス（例：MEA と触媒製造） → 高価材料（例：白金、CFRP）の効率的回収 → LCAに焦点をあてたバリューチェーン
2. ネットゼロと分解設計 → 高度な脱炭素化、エネルギー効率の高い製造とリサイクル → CO_2 排出ネットゼロ生産システム

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040

用語集

略語	説明
AI	人工知能。通常人間の知能を必要とするタスクを行うことができるスマートマシンとアルゴリズム。
CFRP	炭素繊維強化プラスチック合成物。
FCEV	燃料電気自動車。
FCH JU	燃料電池水素共同実施機構。欧州において燃料電池と水素の研究、テクノロジー開発、実証実験活動を支援する官民合同イニシアチブ。
GDL	ガス拡散層。
LCA	ライフサイクルアセスメント。プロダクトをライフサイクルの全ての段階での環境負荷を評価すること（例：原料採掘から始まり、加工、製造、使用、そして最終的なリサイクル、廃棄まで）。
MEA	膜（コーティング、ガス拡散層、触媒）、絶縁体、エンドプレートから構成される膜・電極一体構造。
PEMFC	プロトン交換膜燃料電池。
PGM	白金（プラチナ）グループ金属。
RCS	規則、基準、標準（Regulations, codes and standardsの短縮形）。
SOFC	固体酸化物燃料電池。
TBO	オーバーホール間隔。
TCO	総所有コスト。
VOC	揮発性有機化合物とはさまざまな化学物質で人間の健康に長期的な影響を与えるものもある。

本報告書の作成にあたりSpell Creative社、Mindraft社にはデザイン、執筆への協力、またBMG Research社にはAPCに代わり自動車業界ロードマップアンケート調査の実施、支援を頂きましたことに厚く御礼申し上げます。

APCがまとめた自動車業界のコンセンサスロードマップ

2020刷新ロードマップの参画サマリー

ロードマップ刷新に参画した会社の分布

109の業界組織、団体がワークショップ、インタビューに参加

38の業界組織、団体がオンライン形式によるアンケート調査に参加

合計参画数：147自動車業界組織、団体

世界中の企業の参加によりグローバル観点を提供

イングランド	スウェーデン
ウェールズ	スコットランド
オーストリア	ドイツ
オランダ	ベルギー
シンガポール	日本
スイス	米国