熱推進システム 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：熱推進システム

1900年代以降、内燃機関が自動車の推進力の基本となってきたが、一層厳格化する排出規制に対応するため、熱効率の向上、システム最適化、ハイブリッド化、新しいネットゼロカーボン燃料の導入に重点的に取り組むことが求められている。

- 通常、正味熱効率として測定されるエンジン効率は、2017年に前回のTPSロードマップが発表されて以降、上昇を続けており、軽量車両では、2025年までに48%、2035年までに53%に達する見込みである。重量車両の場合、エンジン開発によって、2035年までに60%に達する可能性がある。
- 将来の熱推進システムは、より厳しい温室効果ガス（GhG）排出基準に対応し、またシステム全体の効率を高めるために、いくらかハイブリッド化が進むであろう。ネットゼロ燃料志向が高まる中、化石燃料からの急激な脱却が既に進行している。
- 軽量車両のイノベーションとしては、熱損失を減らすための先進的なコーティングや素材の使用、例えばリーンバーンや水噴射などによる、より効率の良い燃焼、さらには統合されたハイブリッドエンジンなどがある。
- 一方、重量車両の場合は、独自のデューティサイクルとパワートレイン構造があるため、廃熱回収や低温燃焼、さらに長期的には代替燃料使用への適応などからイノベーションが起きる可能性が高い。
- 内燃機関（ICE）の主な利点は、装置のリサイクル性の高さ、LCA負荷の低さ、そして再利用・再生産業が十分に成熟していることである。エンジンは既に世界中で、カーボンニュートラルな工場で製造されている。
- ICEの既知の製造システム、確立された材料供給、低コストの製造を活用できる、化石燃料に代わるサステナブルなネットゼロの代替燃料を見つけるために、大規模な研究が進められている。これらの燃料が、2020年のTPSロードマップの新項目となっており、長期的に温室効果ガス排出量と大気質に関する目標を達成するための鍵となる。
- 専門家を対象とした調査では、2035年までにICEとBEVのコストがほぼ同等となると予想され、その結果、既存の化石燃料から特にバイオ燃料や水素などの代替燃料などへの抜本的な転換が起こるとの見解が示されている。バイオ燃料やe燃料を含むいくつかの代替燃料については、現在のエンジンのまま、既存の燃料を部分的または完全に置き換えることができる。エンジンを改造すれば、より幅広い合成燃料の使用が可能となる。業界の専門家は、持続可能なネットゼロを実現する新しいICEアーキテクチャが近い将来実現すると確信している。
- リサイクル規制やライフサイクル全体の負荷への配慮が、分解・再生しやすい設計から、部品のリサイクルやより高効率の生産まで、サプライチェーン全体で幅広いアプローチを呼び起こしている。ネットゼロ燃料を使う新しい燃焼システムには、ライフサイクルの原則が組み込まれていることが重要である。

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。

クリス・ブレース教授

バース大学、APC Spoke

熱推進システムは、2040年に至るまで、またそれ以降も技術の最先端に留まり続けるでしょう。エンジンが当面、重要でありつづけることはわかっていますが、エンジンで今後何を燃焼させるのかについてはまだよく分かりません。

ネットゼロを目指すには、燃料の脱炭素化を迅速に進める必要があります。今走っている車の燃料をまず脱炭素化することが大変重要です。また、全く新しいサステナブルな燃料を使用することで、さらなる進歩が可能になります。私たちはそのための、新しい高効率エンジンと推進システム技術を開発していきます。

私は、工学と科学が、クリーンで持続可能なモビリティの恩恵を世界中のより多くの人々にもたらすことができると自信を持っています。

ロブ・モーガン教授

ブライトン大学、APC Spoke

このロードマップは、2017年版とは異なり、ネットゼロ目標の実現にそったものとなっています。

サステナブル燃料への迅速な移行が非常に重要であることは、ロードマップ作成中に強く感じられました。パワートレインの将来的な要件に様々な影響を与え、また特に長距離貨物輸送のような「電動化が困難な分野」において、CO_2排出量を迅速かつ持続的に削減する大きなチャンスをもたらす、様々な燃料ソリューションがあります。

このロードマップは、産業界や学術界の幅広い専門家からの協力を得て作成されていますが、問題の難しさや複雑さにも関わらず素晴らしいコンセンサスを得ることができました。

私自身、このプロジェクトに参加できたことを光栄に思っております。本ロードマップが、自動車セクターがクリーンで持続可能な未来を実現するための一助となることを願っております。

業界専門家オンライン調査所見2020

BEVとICEのコストが2035年までにほぼ同等レベルとなる可能性が高く、燃焼機関で用いられる燃料の抜本的な転換が進んでいる。

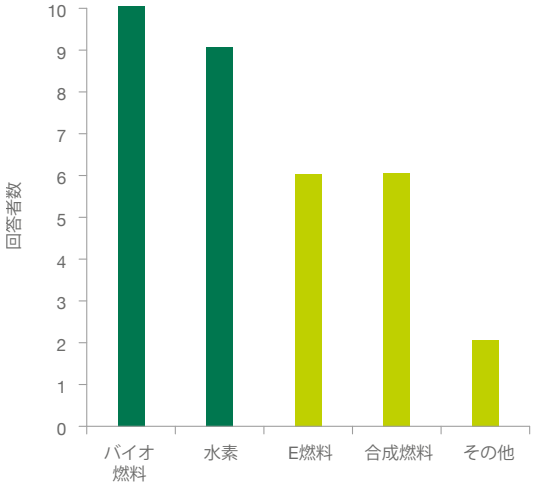
テクノロジー・アンケート調査の回答者

2020年9月にオンラインで実施されたテクノロジー・アンケート調査には、多様な業界スペシャリストが回答した。

- 技術コンサルティングサービス／サービスプロバイダー (22%)
- その他 (17%)
- 技術開発業者 (17%)
- 学術組織 (11%)
- 技術研究機関 (11%)
- 中小企業 (11%)
- 一次サプライヤー (11%)

2040年までにどの燃料が燃焼機関市場で中心的となると思われるか。

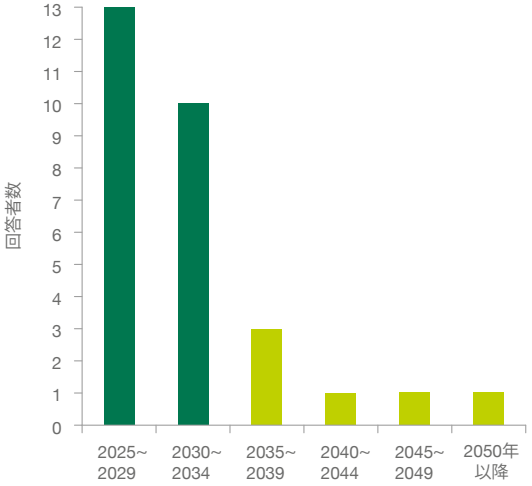
軽量車両の燃焼機関市場で2040年までに中心的となる可能性が最も高い燃料は、バイオ燃料と水素である。



注記：バイオ燃料は、バイオ廃棄物の供給に制約があるため、現在は大量供給できない。

BEVがICEと同等レベルのコストを達成するタイミングはいつか。

BEVがICEと同等レベルのコストを達成するタイミングは？という問いに、回答者の8割近くが2035年までに実現可能だと回答した。



注記：量産型小型乗用車では、これより早くコスト同等が実現する可能性がある。

軽量および重量車両別テクノロジー指標

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テクノロジー指標。

正味熱効率（BTE）

	2020	2025	2035
軽量車両	42%	48%	53%

	2020	2025	2035
重量車両	47%	55%	60%

注記：
- BTEはピーク正味熱効率を指す。
- BTEはエンジン効率の一般的な指標である。記載の値はクラス最高値。
- 1点のピークBTE値が表示されているが、車両効率は推進技術や製品アプリケーションによって異なり、実際の車両効率を正確に示すものではない。

推進要因となる温室効果ガスと大気質の規制

確定要因　予想要因

		2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	…
軽量車両	CO_2e 排出	95 g/km (NEDC)	-15% (WLTP)	乗用車 -37.5%、バン -31% (WLTP)	ネットゼロCO_2e およびLCAコンプライアンスを目指す				
	汚染と資源	ユーロ6d／EPA Tier 3	ユーロ7／EPA Tier 3	包括的な環境負荷規制（揮発性有機化合物、資源利用、土地利用）およびLCAコンプライアンス					
重量車両	CO_2e 排出	CO2: VECTO採用	CO2: -15%	CO2: -30%	ネットゼロCO2e およびLCAコンプライアンスを目指す				
	汚染と資源	ユーロ6／EPA 2015 NRE ステージ V	ユーロ7／EPA 2015 NRE ステージ V+	ユーロ7+／EPA 2015 MY27 NRE ステージ V++	包括的な環境負荷規制（揮発性有機化合物、資源利用、土地利用）とLCAコンプライアンス				

軽量および重量車両別テクノロジー指標

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テクノロジー指標。

テクノロジー指標
2020年にこれらがロードマップの目標に置き換わり、これから進む方向性と、このテクノロジーのクラス最高の性能を測定するアプローチを示す。

正味熱効率（BTE）

	2020	2025	2035
軽量車両	42%	48%	53%

	2020	2025	2035
重量車両	47%	55%	60%

正味熱効率（BTE）
軽量車両と重量車両では、デューティサイクルも技術の選択肢も異なるため、分けて指標を提示した。

推進要因となる温室効果ガスと大気質の規制

確定要因　予想要因

軽量車両	CO_2e 排出	95 g/km (NEDC)	-15% (WLTP)	乗用車 -37.5%、バン -31% (WLTP)	ネットゼロCO_2e およびLCAコンプライアンスを目指す
	汚染と資源	ユーロ6d／EPA Tier 3	ユーロ7／EPA Tier 3	包括的な環境負荷規制（揮発性有機化合物、資源利用、土地利用）およびLCAコンプライアンス	
重量車両	CO_2e 排出	CO2: VECTO採用	CO2: -15%	CO2: -30%	ネットゼロCO2e およびLCAコンプライアンスを目指す
	汚染と資源	ユーロ6／EPA 2015 NRE ステージ V	ユーロ7／EPA 2015 NRE ステージ V+	ユーロ7+／EPA 2015 MY27 NRE ステージ V++	包括的な環境負荷規制（揮発性有機化合物、資源利用、土地利用）とLCAコンプライアンス

推進要因となる規制
CO_2排出、汚染、資源に関する規制の進化が、TPSロードマップに示されている。これらが燃焼機関技術の開発と実装に大きく影響する。

一般注釈

エンジンを最適な一点にあわせてチューニングをするなどの方法で、ピークBTEを高めることは可能だが、我々が本当に欲している「正味」デューティサイクル効率の向上を実現するには非実用的である。

システム効率の定量化には平均的ドライブサイクルのBTE値が望ましいが、入手できなかったため、ピークBTEを、開発と革新の軌道を示すものとして提示した。

予測は、APCが開催したワークショップで業界のシニアエキスパートが提示したものを基にしている。

軽量および重量車両別テクノロジー指標

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テクノロジー指標。

正味熱効率（BTE）

	2020	2025	2035
軽量車両	42%	48%	53%

	2020	2025	2035
重量車両	47%	55%	60%

軽量車両

提示されている燃費要件を達成するためには、エンジンが、与えられている燃料エネルギーをより効率的に使えるようにしなければならない。どれほどエンジンの効率が良くても、燃料エネルギーのかなりの部分が、排気や冷却水の流れの中で失われる。

通常、正味熱効率（BTE）として測定されるエンジン効率は、2017年に前回のTPSロードマップが発表されて以降、向上を続けており、2026年までには、標準的な4ストロークでBTE 48～50%を達成すると見られ、有機ランキンサイクルの原理を適用すれば、さらにBTE 52%まで高まる可能性がある。現在の商用エンジンは、42%以上のピークBTEを実現する能力を持つ。

重量車両

重量車両のパワートレイン効率は引き続き向上する。廃熱回収や斬新なエンジンコンセプトによる著しい進歩が期待される。

例えば、圧縮仕事を減少させる水噴射技術をベースに、ユーロ7排出基準と極超低エミッション規制（SULEV）へのコンプライアンスを実現し、2026年までにBTE 55%を目指す大型貨物車の製造プログラムなどがある。エンジン開発業者の中には、ORCや気筒休止などの高効率原理を加えることで、2030年までにBTE 60%の実現を目指しているところもある。

				車 -37.5%、バン -31% (WLTP)	
				包括的な環境負荷規制（揮発性有機化合物、資源利用、土地利用）およびLCAコンプライアンス	
重量車両	CO_2e 排出	CO2: VECTO採用	CO2: -15%	CO2: -30%	ネットゼロCO2e およびLCAコンプライアンスを目指す
	汚染と資源	ユーロ6／EPA 2015 NRE ステージ V	ユーロ7／EPA 2015 NRE ステージ V+	ユーロ7+／EPA 2015 MY27 NRE ステージ V++	包括的な環境負荷規制（揮発性有機化合物、資源利用、土地利用）とLCAコンプライアンス

一般注釈

GhGの確定推進要因と予測推進要因が、CO_2e（二酸化炭素換算）のセクションに記載されている。どのような量、種類の温室効果ガスでも、同等の地球温暖化の影響をもたらすCO_2の量としてCO_2e が表記されている。

NEDC：1997年に更新された新欧州ドライビングサイクル（New European Driving Cycle）は、乗用車（小型トラックと商用車を除く）のエンジン排気レベルと燃費を評価するものである。

WLTP：乗用車等の国際調和排出ガス・燃費試験法（Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Procedure）は、従来型の車、ハイブリッド車の汚染物質レベル、CO_2の排出レベル、燃費及びフル電気自動車の航続距離について、国際的に調和のとれた標準試験方法を定めるものである。

軽量車両

指標は、欧州委員会の自動車およびバン（小型商用車）のCO_2排出性能基準（2020年以降）の規制文書から引用した。ロードマップでは、乗用車とバンの基準を分けて示した。

空気、水、土地、生物、原材料など、各種の天然資源問題が自動車製造において重要性を増していることから、汚染と資源を別のカテゴリーとして示した。

軽量車両向けのユーロ6d基準が、2020年1月以降に型式認証を受けるすべての新車に適用されているが、これには窒素酸化物（NOx）の実走行排ガス要件が組み込まれている。Tier3基準とは、環境保護庁（EPA）が採択した、カリフォルニア州のLEV III基準にほぼ沿った燃料および車両基準のことで、2017年から2025年にかけて段階的に導入される。ガソリンに含まれる硫黄分の規制も引き締められる。このカテゴリーでは、天然資源に関する規制がますます厳しくなり、より包括的になることが予想される。

重量車両

重量車両にも、GhGや汚染物質削減への同様のアプローチが求められている。VECTOは、欧州委員会が開発した新しいシミュレーションツールで、車両総重量が3.5トンを超える大型車（トラック、路線バス、長距離バス）のCO_2排出量と燃料消費を割り出すのに用いられる。

日本や米国などの他の地域では、軽量車両と同じような、燃費やCO_2の基準が設けられている。例えば日本では、2025年までにトラックの燃費を2015年比で平均11.9%改善させることが義務付けられている。

新しい特殊車両のエンジン（カテゴリーNRE）を対象とする欧州の排出ガス基準には、ステージI～Vと呼ばれる段階的に厳しくなる基準がある。ステージV規制では、粒子状物質の排出量に新たな上限が設けられた。PN上限値は、対象となるすべてのエンジンカテゴリーにおいて、ウォールフロー型微粒子捕集フィルターのような高効率の微粒子制御技術が確実に採用されるように設定されている。さらにその他の諸規制に加え、ステージV規制では、いくつかのエンジンカテゴリーの質量ベースのPM上限値が0.025g/kWhから0.015g/kWhへと厳しくなった。

2035年以降、重量車両とオフハイウェイ車両の基準が徐々に厳しくなることが予想される。

推進要因となる温室効果ガスと大気質の規制

軽量車両	CO_2e 排出	95 g/km (NEDC)	-15% (WLTP)	乗用車 -37.5%、バン -31% (WLTP)	ネットゼロCO_2e およびLCAコンプライアンスを目指す
	汚染と資源	ユーロ6d／EPA Tier 3	ユーロ7／EPA Tier 3	包括的な環境負荷規制（揮発性有機化合物、資源利用、土地利用）およびLCAコンプライアンス	
重量車両	CO_2e 排出	CO2: VECTO採用	CO2: -15%	CO2: -30%	ネットゼロCO2e およびLCAコンプライアンスを目指す
	汚染と資源	ユーロ6／EPA 2015 NRE ステージ V	ユーロ7／EPA 2015 NRE ステージ V+	ユーロ7+／EPA 2015 MY27 NRE ステージ V++	包括的な環境負荷規制（揮発性有機化合物、資源利用、土地利用）とLCAコンプライアンス

ロードマップ2020
熱推進システム

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

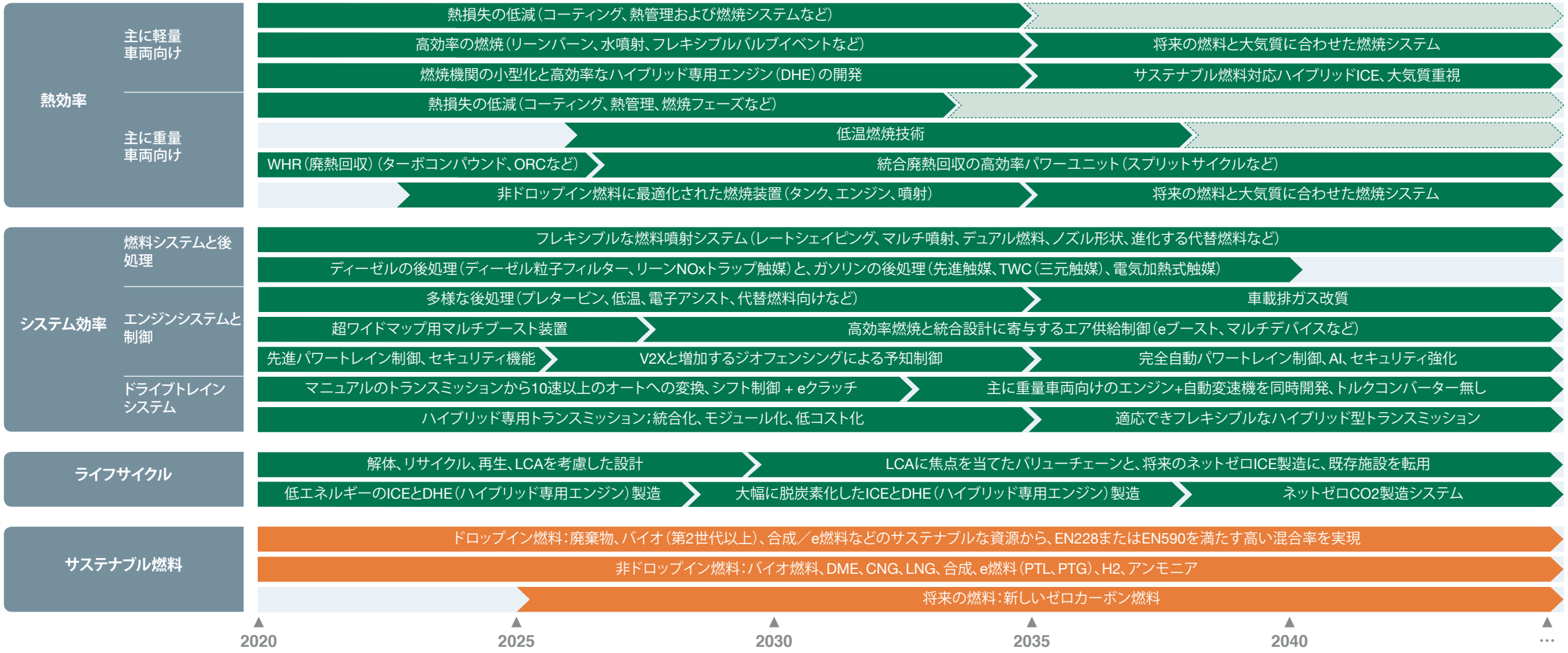
ADVANCED PROPULSION CENTRE UK

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。

深緑色の矢印：
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。



テクノロジーの主要テーマ

熱効率

- 主に軽量車両向け
- 主に重量車両向け

主に軽量車両向け：これは軽量車両の燃焼技術専用のセクションで、より小型の燃焼機関と、ハイブリッド専用エンジン（DHE）へのシフトがこのカテゴリーの主要傾向である。

主に重量車両向け：重量車両のデューティサイクルと排ガスの要件は、軽量車両とは大きく異なる。ポイントを定めた燃焼技術の改善と、駆動システムアーキテクチャの再設計により、排出ガスを低減し、短距離および長距離走行時の燃費を向上させることができる。

システム効率

- 燃料システムと後処理
- エンジンシステムと制御
- ドライブトレインシステム

システム効率：

燃料システムと後処理をロードマップ2020では別建てとし、車載燃料供給及びCO_2、汚染物質を軽減する後処理それぞれの技術変化と軌道をより明確にした。

エンジンシステムと制御では、大気、熱、排ガスの管理による効率向上、寄生損失の低減、パワートレイン制御の進歩について取り上げた。

ドライブトレインシステムは、熱推進システムを低速／低負荷で作動させることができ、効率と排出ガスの大幅な改善が可能となる。統合またハイブリッド型トランスミッションが中心テーマである。

ライフサイクル

ライフサイクルには、TPS部品のエネルギー強度、LCA負荷、資源消費、リサイクル可能性バリューチェーンが含まれる。解体、リサイクル、再生産できるように設計することが、現在のテーマである。ハイブリッド専用エンジンや新しいネットゼロ燃料の燃焼システムには、ライフサイクルの原則を初めから組み込んでおく必要がある。

サステナブル燃料

サステナブル燃料：ロードマップに、サステナブル燃料に関する全く新しいセクションが加わった。内燃機関は、燃料を消費し、結果としてその燃料由来の排ガスを生む。エンジンで用いられる燃料の改善に取り組むことは、テールパイプ排出（大気放出される有害物質）量や将来のネットゼロ目標に直接貢献する。ロードマップには、3つの燃料テーマ（ドロップイン型、非ドロップイン型、将来の燃料）が挙げられており、現在利用可能または開発中の低炭素およびネットゼロ炭素オプションの例が示されている。

熱効率（軽量車両）

熱損失の低減、高効率の燃焼、ハイブリッド化は、性能を向上させ、特に都市部走行車両の規制要件を満たすために重要な戦略である。

- 熱効率
  - 主に軽量車両向け
  - 主に重量車両向け
- システム効率
  - 燃料システムと後処理
  - エンジンシステムと制御
  - ドライブトレインシステム
- ライフサイクル
- サステナブル燃料

1. 熱損失の低減（コーティング、熱管理および燃焼システムなど）
2. 高効率の燃焼（リーンバーン、水噴射、フレキシブルバルブイベントなど）→ 将来の燃料と大気質に合わせた燃焼システム
3. 燃焼機関の小型化と高効率なハイブリッド専用エンジン（DHE）の開発 → サステナブル燃料対応ハイブリッドICE、大気質重視

1 熱損失の低減

内燃機関の熱効率を向上させるためには、シリンダー内のガスから燃焼室壁に逃げる熱など、熱損失を低減することが重要な技術の一つである。

セラミックやシリコンベースのコーティングなどの先進的なコーティングや材質は、熱損失を減らして熱効率を向上させるのに役立つ。高温での高い接着性、耐久性、耐腐食性、高負荷耐性の問題を克服する必要がある。

2 高効率の燃焼

リーンバーンとは、内燃機関で、空気を過剰にして燃料を燃やすことを言う。リーンバーンで、燃焼温度を下げることで熱損失を減らし、上手くいけばNOxを非常に低いレベルに抑えることもできる。

湿式圧縮では、インレットに水を注入し、空気の圧縮過程で水滴を蒸発させることで連続的に冷却する。これにより、高い効率と低い汚染物質排出を実現する。

燃焼効率を高めるには、フレキシブルバルブ事象による気筒休止が欠かせない。

業界のデータによると、48～50%のBTEが現在実現できている。

ソフトウェアと制御の改良により、気筒休止戦略はより高度になっていく。現在はまだ、1、2本の気筒のオン・オフを切り替える方法だが、今後は複数の気筒が走行状況に応じて動的に反応する方法に進化していくであろう。

3 燃焼機関の小型化とハイブリッド専用エンジン

ICEの小型化は、燃料変換効率の向上とCO_2排出量の低減を同時に実現するための非常に適した手法として認識されている。

ICEがハイブリッド化することで、パッケージの相乗効果が生まれ、性能も柔軟になる。例えば、Mahle（マーレ）社は、高効率の2気筒または3気筒のターボチャージャー付きガソリンエンジンを組み込んだ、完全統合されたプラグインハイブリッドドライブを出している。

将来的にこれらのハイブリッド車は、ネットゼロ排ガスの規制準拠のため、サステナブル燃料で走行する必要がある。

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | …

熱効率（重量車両）

独自のデューティサイクルとパワートレイン構造、廃熱回収、低温燃焼、将来の燃料への適応など重量車両にはICE技術向上の機会が多くある。

熱効率	主に軽量車両向け	1 熱損失の低減（コーティング、熱管理、燃焼フェーズなど）
	主に重量車両向け	2 低温燃焼技術
		3 HR（廃熱回収）（ターボコンパウンド、ORCなど）／統合廃熱回収の高効率パワーユニット（スプリットサイクルなど）
		4 非ドロップイン燃料に最適化された燃焼装置（タンク、エンジン、噴射）／将来の燃料と大気質に合わせた燃焼システム
システム効率	燃料システムと後処理	
	エンジンシステムと制御	
	ドライブトレインシステム	
ライフサイクル		
サステナブル燃料		

2020 2025 2030 2035 2040 2045 2050 …

1 熱損失の低減

軽量車両については、先進的なコーティングや材料を使用することで熱損失を減らして熱効率を向上させることができるが、重量車両の場合、デューティサイクルやアプリケーション次第で異なる。例えば、現在開発中のセラミック系やシリコン系のコーティングは、高温での高い密着性、耐久性、耐食性、高負荷耐性の問題を克服する必要がある。

2 低温燃焼技術

低温燃焼は、高い熱効率を維持しつつ、NOxと煤の排出量を同時に削減できる比較的新しいエンジン技術である。

例えば、点火前に空気と燃料を予め混合し、希薄な混合物を反応させることで、NOxや微粒子をほぼゼロにすることができる。

3 廃熱回収ソリューション

燃焼した燃料のエネルギーの大部分は、エンジンシステムで熱として失われる。廃熱は回収して熱エネルギーとして再利用したり、電気に変換して車載バッテリーの充電などに利用できる。

廃熱を利用することで、システムの出力と効率が向上し、排ガスも減る。熱回収システムの例としては、ターボコンパウンド機関や有機ランキンサイクル（ORC）エンジンなどがある。

4 燃焼システム

2020年のTPSロードマップには、燃焼機関のカーボンフットプリントを削減できる非ドロップイン型の燃料候補が列記されている。

場合によっては、貯蔵タンク、注入システム、エンジン内部コンポーネントなど、既存の燃焼システムへの小中規模の改造が必要となる。これによって、ICEの脱炭素化とネットゼロ準拠への道が拓ける。

将来の燃料開発の先進化のためには、燃焼システムのさらなるカスタマイズや適応が求められる。

燃料システムと後処理

後処理は、微粒子やNOxの排出軽減に向けて開発が続くが、将来の新燃料の管理に移行していくであろう。

熱効率
- 主に軽量車両向け
- 主に重量車両向け

システム効率
- 燃料システムと後処理
- エンジンシステムと制御
- ドライブトレインシステム

ライフサイクル

サステナブル燃料

1 フレキシブルな燃料噴射システム（レートシェイピング、マルチ噴射、デュアル燃料、ノズル形状、進化する代替燃料など）

2 ディーゼルの後処理（ディーゼル粒子フィルター、リーンNOxトラップ触媒）と、ガソリンの後処理（先進触媒、TWC（三元触媒）、電気加熱式触媒）

1 燃料噴射システム

燃焼サイクルが変化し、新しい燃料が導入され、高効率化が目標となるにつれ、噴射システムも発展を続ける。いくつかの例が挙げられている。

2 ディーゼルおよびガソリンエンジンの後処理

NOx（PMおよびPN）の規制がますます厳しくなる中、排ガス後処理の進歩はソリューションの一部となる。今後は新しい低炭素燃料やネットゼロ燃料が主流となるため、2040年以降は後処理の需要が落ちると予想される。

ディーゼルの後処理の例としては、ディーゼル粒子フィルター、リーンNOxトラップ、ディーゼル酸化触媒などがある。

また、ガソリンの後処理としては、ろ過機能に加えて、ガソリン粒子フィルターや三元触媒によるガス排出量の低減を可能にする活性触媒コーティングなどの例がある。

2020 2025 2030 2035 2040 2045 2050 …

エンジンシステムと制御

エンジンのシステムと制御の多岐にわたる改善は、既存エンジンにおける開発にも、より斬新な設計の出現にも役立つ。

1 広範囲の後処理

将来的に廃熱が減少しても、幅広い性能を提供できるシステムに重点が移っていく（特に重量車両）。長期的には、車載改質やCO_2回収など、これまでにない新技術が、特に重量車両で活用される可能性がある。軽量車両では2025年以降、より狭いエンジン作動域内での排気管理に重点が置かれるようになる。

2 ブーストデバイスと技術

ブーストシステムは、デバイスの組み合わせにより、広域で高効率の運転を可能にする。これらのデバイスは、材料やベアリングの開発によって改良が続く（高温対応、低摩擦）。高電圧（48V+）が実現すれば、マルチデバイスのアプローチを補完する幅広いeブーストのアプリケーションが可能になる。

3 制御システム（パワートレイン、予測、AI埋込）

よりスマートなパワートレイン制御は既に燃料消費を向上させている。V2X、複雑なモデルベース制御、既知の道路・交通状況に基づく予測制御が、間もなく更なる向上をもたらすであろう。都市部でのゼロエミッションゾーン遵守のためにジオフェンシングを積極的に行うと、エンジンが一時的に切られたり、ウルトラクリーンモードでの走行になったりするように制御することが可能となる。その後は、特にCAVと連携することによる完全自動制御システムが可能となる。

		2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	…
熱効率	主に軽量車両向け								
熱効率	主に重量車両向け								
システム効率	燃料システムと後処理								
システム効率	エンジンシステムと制御	1 多様な後処理（プレタービン、低温、電子アシスト、代替燃料向けなど）					車載排ガス改質		
システム効率	エンジンシステムと制御	2 超ワイドマップ用マルチブースト装置			高効率燃焼と統合設計に寄与するエア供給制御（eブースト、マルチデバイスなど）				
システム効率	ドライブトレインシステム	3 進パワートレイン制御、セキュリティ機能		V2Xと増加するジオフェンシングによる予知制御			完全自動パワートレイン制御、AI、セキュリティ強化		
ライフサイクル									
サステナブル燃料									

ドライブトレインシステム

トランスミッションとハイブリッド化は推進装置の効率化に不可欠な要素であり、同時開発することで、よりピーク効率に近い状態での運用が可能となる。

- 熱効率
  - 主に軽量車両向け
  - 主に重量車両向け
- システム効率
  - 燃料システムと後処理
  - エンジンシステムと制御
  - ドライブトレインシステム
- ライフサイクル
- サステナブル燃料

1 トランスミッションとトルクコンバーター

トランスミッションは、マニュアルに代わるスマート・マニュアルとオートマチック・トランスミッション（特に軽量車両におけるマルチスピードと可変スピード）により、最適なエンジン作動を可能にする。長期的には、軽量車両用トランスミッションの役目はハイブリッド化によって変化する。重量車両では、同時開発されたオートマチック・トランスミッションが、エンジンの進化を支える。

2 ハイブリッド専用トランスミッション

ハイブリッドシステムは、近い将来、電気的・機械的なエネルギー貯蔵と推進補助の追加により、一層のエネルギー回収を可能にしていく。ハイブリッド化のレベルが進めば、エンジンとハイブリッドシステムの同時開発による最適なエンジン作動が可能になり、低排出と高効率が実現する。

1. マニュアルのトランスミッションから10速以上のオートへの変換、シフト制御 + eクラッチ → 主に重量車両向けのエンジン+自動変速機を同時開発、トルクコンバーター無し
2. ハイブリッド専用トランスミッション；統合化、モジュール化、低コスト化 → 適応できフレキシブルなハイブリッド型トランスミッション

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | …

ライフサイクル

環境に配慮したサステナブルな製造は、あらゆる製造プロセス、原材料、工場操業の総合的な環境影響評価にとって極めて重要である。

熱効率
- 主に軽量車両向け
- 主に重量車両向け

システム効率
- 燃料システムと後処理
- エンジンシステムと制御
- ドライブトレインシステム

1

リサイクル、再生、ライフサイクルアセスメント

ICEはリサイクル性が高く、成熟した再利用・再生支援産業がある。他の推進技術と比較して、ICEの製造はLCA負荷が低い。

リサイクル規制の強化により、寿命末期を視野に入れた設計が行われるようになっている。ライフサイクルを考慮するようになると、より広範な環境負荷が材料の選択に影響するようになる（例：水の使用量、廃棄物、電力消費など）。

再生エンジンの市場は世界的に見ても大きく、シェアが最も高いのは米国、成長率が最も高いのはアジアとなっている。これには、製品の解体、コンポーネントの交換と復元、そして製品全体と個々の部品を元の設計仕様に合わせて試験を行うことなどが含まれる。

また、今後5年間は、ICE製造設備の、新しいネットゼロエンジンや電動化システムへの用途変更の動きが加速すると考えられる。

2

省エネ、ネットゼロの製造

テールパイプからの排ガス以外で脱炭素化の重要な要素となるのは、パワートレイン製造が気候変動に与える影響である。

製造工場で消費されるエネルギーは、カーボンフットプリントに関係する。製造工程でのエネルギー利用削減と、CO_2ネットゼロ製造の実現に向けた継続的改善は、ほとんどのOEM企業が共通して長期戦略として取り組んでいるものである。バッテリーや燃料電池などの他の推進技術では実現していないが、エンジンは既に世界中で、カーボンニュートラルな工場で製造されている。

このアプローチは、材料や製造・組立に関する要件が異なる、将来のネットゼロエンジンやハイブリッドエンジンのコンポーネントにも広げていく必要がある。

ライフサイクル

1. 解体、リサイクル、再生、LCAを考慮した設計 → LCAに焦点を当てたバリューチェーンと、将来のネットゼロICE製造に、既存施設を転用
2. 低エネルギーのICEとDHE（ハイブリッド専用エンジン）製造 → 大幅に脱炭素化したICEとDHE（ハイブリッド専用エンジン）製造 → ネットゼロCO2製造システム

サステナブル燃料

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | …

サステナブル燃料

既存の化石燃料からの移行に向けて、高性能とコスト競争力のあるソリューションを提供するために、カーボンネットゼロのドロップイン型、非ドロップイン型、将来の燃料の開発が注目されている。

熱効率
- 主に軽量車両向け
- 主に重量車両向け

システム効率
- 燃料システムと後処理
- エンジンシステムと制御
- ドライブトレインシステム

ライフサイクル

1 ドロップイン燃料

これは、既存の燃料に追加あるいは置き換えることができ、既存のエンジンシステムで使うことができる低炭素燃料、ネットゼロ燃料である。

e燃料（電気の利用で生成する）から、有機廃棄物を燃料とするものまで、いくつかの既知の例が挙がっている。現在、農業用車両に用いられているバイオ燃料（バイオメタンなど）は、バイオマスを原料としているが、持続可能な食糧と熱の供給を確保する必要がある。合成燃料やe燃料は有力な代替候補となるが、その製造には再生可能エネルギーの使用を考慮する必要がある。

2 非ドロップイン燃料

これは、装置の改造を必要とするため、現在のICEシステムにそのまま使うことはできないものである。貯蔵タンクや噴射システムの簡単な改造から、ICEコンポーネントの全面的な変更まで多岐にわたる改善が必要とされる。

ネットゼロの非ドロップイン燃料には、メタノールから作られる気体燃料のジメチルエーテル（DME）、水素（気体または液体）、その他いくつかの合成燃料やe燃料など、様々なオプションがある。

3 将来の燃料

これらは主に、ゼロカーボン排出を実現する、現在まだ広く用いられていない新燃料である。

内燃機関用の新燃料を探す動きが強まる中、ICEの既存の製造システム、確立された材料供給、低コストの製造を活用できる、化石燃料の代替品を見つけようと、大規模な研究が進められている。

サステナブル燃料

1. ドロップイン燃料：廃棄物、バイオ（第2世代以上）、合成／e燃料などのサステナブルな資源から、EN228またはEN590を満たす高い混合率を実現
2. 非ドロップイン燃料：バイオ燃料、DME、CNG、LNG、合成、e燃料（PTL、PTG）、H2、アンモニア
3. 将来の燃料：新しいゼロカーボン燃料

2020 2025 2030 2035 2040 2045 2050 …

用語集

略語	解説
AI	人工知能。通常は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。
BEV	バッテリー式電動自動車（Battery electric vehicle）
BTE	正味熱効率（Brake thermal efficiency）。ベースエンジンがクランクシャフトから有用な機械的仕事に変換することができるエネルギーの割合（トランスミッションとドライブラインの損失は除く）。
CAVs	コネクテッド・自律走行車（Connected and Autonomous Vehicles）。多種多様な自律性のレベルやテクノロジーを有する自動運転車の総称。
GhG	温室効果ガス（Greenhouse gases）。大気中に熱を閉じ込めるもので、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素、フッ素系ガスなどが含まれる。
HDV	重量車両（Heavy-duty vehicle）
ICE	内燃機関（Internal combustion engine）
LCA	ライフサイクルアセスメント。プロダクトの環境負荷をライフサイクルの全段階で評価すること（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）。
ORC	有機ランキンサイクル（Organic Rankine Cycle）。廃熱を利用して追加電力の生成を行う。原理は従来の蒸気タービンと似ているが、水蒸気ではなく有機流体を使用することで、数々の性能上の利点が得られる。
PM	粒子状物質（Particulate matter）。空気中に浮遊する有機・無機の固体・液体粒子の複雑な混合物を指す。汚染物質濃度に関する規制がある。
PN	粒子数（Particulate number）。粒子サイズが、健康への影響に重要であるというエビデンスに基づき、異なるサイズの粒子数を表す。
TPS	熱推進システム（Thermal Propulsion System）。エンジンまたは燃料電池と熱システムや電気システムを統合することにより、車輪への電力供給管理や、廃エネルギー回収による性能・効率向上を図る装置。TPSの主な特徴は一次エネルギーが（電池のように電気化学的ではなく）化学的に貯蔵されることにある。
V2X	Vehicle-to-X。すべての車とインフラシステムが相互に接続されたインテリジェントな交通システムのこと。

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

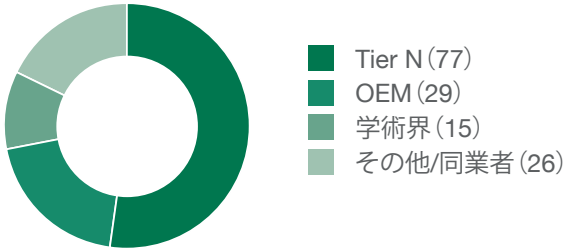
2020ロードマップの刷新参画サマリー

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