パワーエレクトロニクス 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：パワーエレクトロニクス

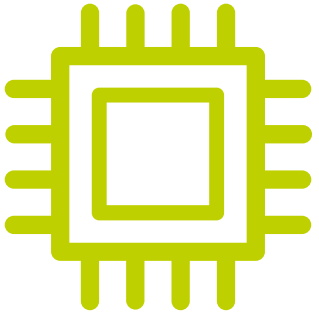
パワーエレクトロニクスは、電圧レベルを調整し、電動トラクションモーターへの電力潮流を制御するのみならず、プラグイン車両を電力系統から充電できるようにするという点でも重要な役割を果たす。電動化の進展にともない、パワーエレクトロニクスの各車両における位置付けが高まっており、市場機会も急速に拡大している。

自動車業界の厳しい要求に伴い、出力密度の高いソリューション、高速スイッチング半導体、高い信頼性、そして高温材料への需要が強まっている。バッテリーからの直流電流を交流電流に変換してモーターを作動させるインバーター、バッテリーからの直流電流を車両の各種電子システムでの使用に合わせて変換するDC-DCコンバーター、電力系統からの交流電流を直流電流に変換してバッテリーを充電する車載充電器といった多種多様なニーズに応えるために、これらの技術が必要とされている。

半導体は最も高コストの部品である。低電圧アプリケーションでは、比較的低コストで製造可能性の高いシリコンが引き続き重要な役割を果たしていくだろう。一方、高電圧アプリケーションでは、大型・高品質ウェハーの低コスト製造技術の進展や、革新的なデバイス設計を背景に、ワイドバンドギャップ半導体の一種であるSiCの広範な採用が今後も続いていくとみられる。GaNは、DC-DCコンバーターなどの高いスイッチング周波数を必要とするアプリケーションに適しているが、費用対効果の高い製造が難しく、広範な使用はまだ2~3年先である。この2つの材料は、いずれも 2035年に向けた出力密度指標の目標達成に不可欠だが、量産車市場での採用を実現するには、費用効率性とデバイスの信頼性をさらに改善させる必要がある。

これらの材料の潜在力をフルに引き出すには、関連コンポーネントを、高温・高周波・高電流環境でも正常に機能するよう最適化しなければならない。受動部品、PCB、センサー設計、回路アーキテクチャのそれぞれについて技術革新が必要である。また、コンバーターの性能および長期的信頼性を改善するには、最先端制御ソフトウエアとフォールトトレラント設計が求められる。標準化とアーキテクチャの最適化は、スケールアップに役立ち、コストを引き下げるだろう。

最後に、これらの要素をすべて高度に統合すれば、小型・軽量で究極的に低価格のデザインが実現できるが、その一方でリサイクルと環境負荷に関する課題も生まれる。この課題への対応としては、易解体設計などの新しいアプローチや、材料について真の循環型経済を創出する取り組みが必要である。



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。

マーク・ジョンソン教授

ノッティンガム大学
APCパワーエレクトロニクスSpoke担当

2020年のパワーエレクトロニクス・ロードマップは、電動化へと向かう現在の世界的な動きを反映しています。この動きのなかで、技術開発が劇的に加速するとともに、アプリケーション要件に関する知識が精緻化し、サステナビリティが自動車業界の優先課題として認識されるようになっています。

ここでの議論や調査、ワークショップでご協力いただいたパワーエレクトロニクス分野の関係諸氏に深く感謝の意を表させていただきます。

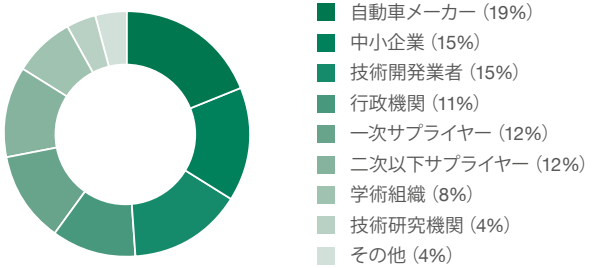
今回、半導体、コンポーネント、コンバーターという中心的な重要技術については、2017年のロードマップから踏襲しました。一方、熱管理や製造を始めとするさまざまな分野の技術的推進要素を再配置して焦点をしぼるとともに、新たなテーマとして「ライフサイクル」を取り上げ、よりサステナブルな開発と、最終目標としての循環型経済への移行の必要性を強調しました。

最後に、車両用量産パワーエレクトロニクスへの理解が深まり、市場もより成熟してきたことから、本ロードマップでは、これまで以上に正確な性能指標を提供できたと確信をもっています。

業界専門家オンライン調査所見2020

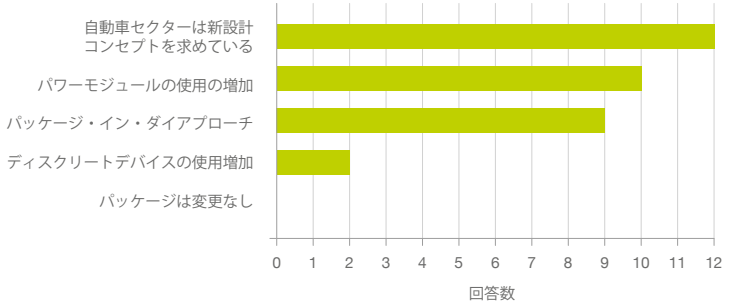
1200V以上の高作動電圧を目指す傾向は高容量アプリケーションで顕著であり、重大な変化が半導体パッケージング分野で起こりつつある。

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。



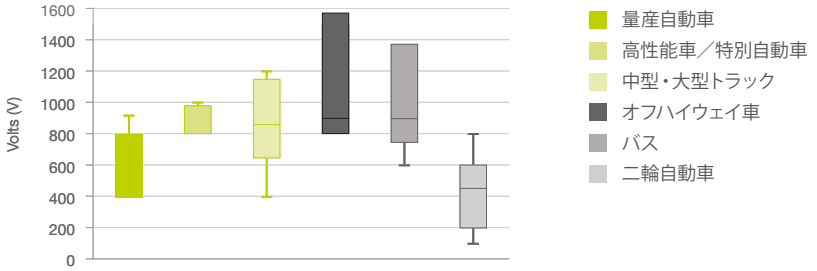
半導体パッケージング分野で進む変化

半導体パッケージング分野では現在、先端WBG材料、電力需要の増大、高い作動温度、空間制約への対応に向けた変化が急ピッチで進んでいる。



自動車セクターにおける典型的な最大作動電圧

1200V以上の高作動電圧が大型・高性能車両で増加している。



半導体材料SiCおよびGaNの市場シェア予想

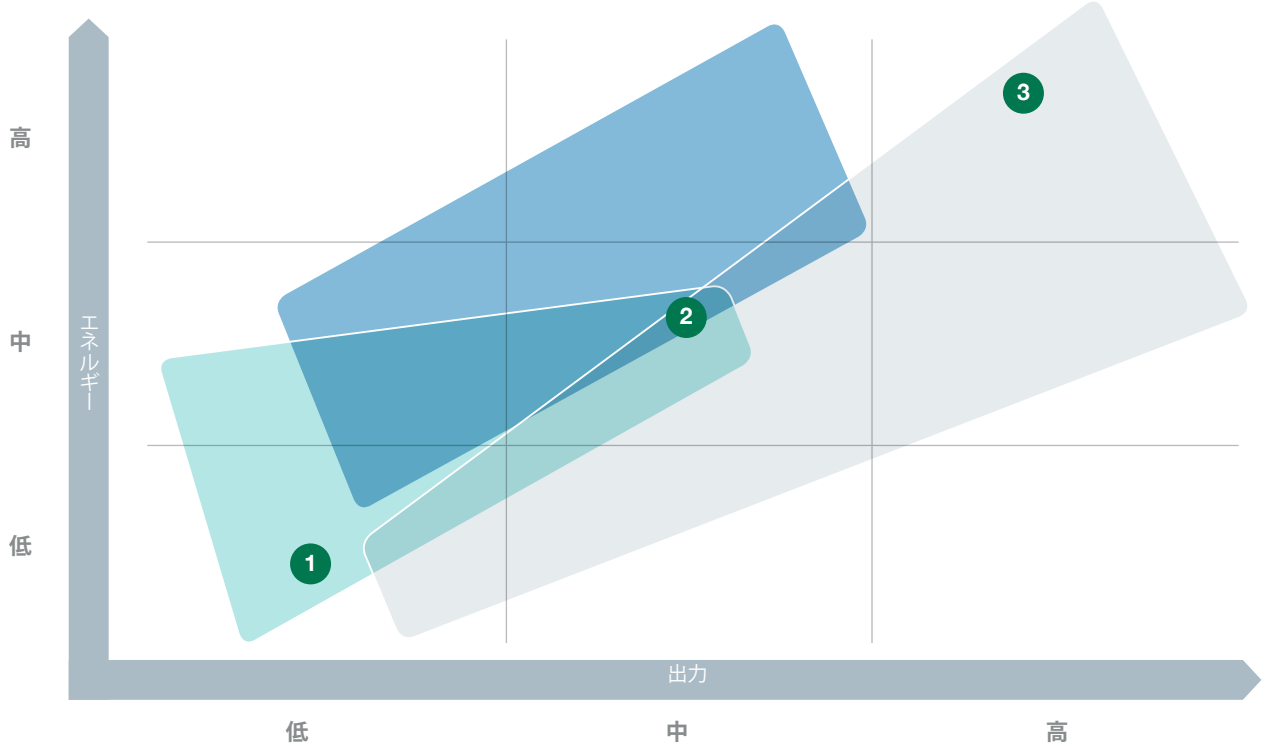
高電圧アプリケーションの場合、大型・高品質ウェハーの低コスト生産の進展にともない、SiCの広範な採用が増えていくと予想される。GaNは、高いスイッチング周波数を必要とするアプリケーションに適しているが、市場シェアの拡大はまだ数年先だろう。

SiCは今後数年間にEV関連市場で大きく伸び、2035年までには市場浸透率が40~60%に達するだろうと調査回答では予想された。

一方、GaNについての見方はより慎重だった。量産車市場への投入は早くても2025年で、2035年までに実現できる市場シェアは20~30%と予想された。

アプリケーション別エネルギー／出力分布図

推進装置は、用途それぞれの使用事例および活用デューティーサイクルを考慮し、必要とされる出力およびエネルギーニーズに合わせて設定されている。
下記：主流大衆車のエネルギー／出力関連図



3.5T未満の軽量自動車　路線バスおよび長距離バス　3.5Tを超える重量物運搬車およびオフハイウェイ車

ロードマップ2020は、(1) 高コスト効率の量産指標の値を示すものである。

(2) 高出力密度、高性能のアプリケーション、(3) 高出力、超高効率のアプリケーションの値は今後業界と共に開発される。

❶高いコスト効率と量産を重視

このような製品には、低価格でスケールメリットを実現することが最重要である。アプリケーションとしては、量産乗用車や配達用トラック（大半が400V）などがある。

❷高出力密度、高性能を重視

高い出力密度が求められるが、コストはそれほど重要な決定要因ではない。アプリケーションは、高性能乗用車やバス、普通トラック（800Vが一般的）などである。

❸高出力、超高効率を重視

高出力密度と信頼性がこれらのアプリケーションには求められるが、エネルギー利用を最大化するため、効率が鍵を握る。アプリケーションは、44トンのトラックや大型オフハイウェイ車両（700~1,200V）などである。

automotive council UK
ADVANCED PROPULSION CENTRE UK

高コスト効率の、量産アプリケーションのためのテクノロジー指標

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
インバーターの各指標	費用（$/kW）	3.5	2	1.7
	容積出力密度（kW/l）	17	25	35
	重量出力密度（kW/kg）	13	20	25
	WLTP平均効率	93%	95%	97%

		2020	2025	2035
DC-DCコンバーターの各指標	費用（$/kW）	50	40	35
	容積出力密度（kW/l）	1.2	1.75	3
	重力出力密度（kW/kg）	0.75	1.2	2.5
	ピーク効率	95%	96%	97%

		2020	2025	2035
単相車載充電器（OBC）の各指標	費用（$/kW）	80	65	50
	容積出力密度（kW/l）	0.5	1	1.5
	重力出力密度（kW/kg）	0.8	1.2	1.75
	ピーク効率	93%	95%	97%

下表は、ロードマップに用いられた指標の仕様を示すが、この仕様は参考情報であり、目標とする仕様を示すものではない。

インバーター各指標の仕様	2020	2025	2035
ピーク出力	100kW	100kW	100kW
連続出力	50kW	50kW	70kW
入力電圧（最小）	250V	250V	500V
入力電圧（公称）	400V	400V	800V
出力電流（最大）	450A rms	450A rms	225A rms
冷却液注入口の温度	65℃	65℃	65℃
生産量	>100k	>100k	>200k

DC-DC各指標の仕様[1]	2020	2025	2035
ピーク出力	3kW	3kW	4kW[2]
連続出力	3kW	3kW	4kW
入力／出力電圧（公称）	400V	400V	800V
出力／入力電圧（公称）	12V	12V	12V
冷却液注入口の温度	65℃	65℃	65℃
生産量	>100k	>100k	>200k

OBC各指標の仕様[3]	2020	2025	2035
ピーク出力	6.6kW	6.6kW	6.6kW
連続出力	6.6kW	6.6kW	6.6kW
入力／出力電圧（公称）	190/270V AC 45-60Hz	190/270V AC 45-60Hz	190/270V AC 45-60Hz
出力／入力電圧（公称）	400V	400V	750V
冷却液注入口の温度	65℃	65℃	65℃
生産量	>100k	>100k	>200k

1. 単方向電力潮流およびガルバニック絶縁を想定　2. MaaS／インフォテインメント機能の増大を想定　3. 双方向電力潮流およびガルバニック絶縁を想定

テクノロジー指標
これらの指標は2020年にロードマップの新たな目標になり、このテクノロジーの進路と最高クラスの性能の測定方法を示すものとなる。

高コスト効率の、量産アプリケーションのためのテクノロジー指標

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
インバーターの各指標	費用（$/kW）	3.5	2	1.7
	容積出力密度（kW/l）	17	25	35
	重量出力密度（kW/kg）	13	20	25
	WLTP平均効率	93%	95%	97%

		2020	2025	2035
DC-DCコンバーターの各指標	費用（$/kW）	50	40	35
	容積出力密度（kW/l）	1.2	1.75	3
	重力出力密度（kW/kg）	0.75	1.2	2.5
	ピーク効率	95%	96%	97%

		2020	2025	2035
単相車載充電器（OBC）の各指標	費用（$/kW）	80	65	50
	容積出力密度（kW/l）	0.5	1	1.5
	重力出力密度（kW/kg）	0.8	1.2	1.75
	ピーク効率	93%	95%	97%

インバーター
インバーターは、車載バッテリーパックからの直流電流を、電動モーターの作動に適した交流電流に変換する。

DC-DCコンバーター
DC-DCコンバーターは、固定DC入力電圧を、インフォテイメント、照明、ADAS各機能などの低出力補助装置用に制御可能なDC出力電圧に変換する。

車載充電器
車載充電器は、電力系統からの交流電流（電源AC）を、バッテリーパックの再充電に適した直流電流に変換する。

2020年指標は、業界エビデンスに基づいてコスト効率性、量産アプリケーションにおける最高クラスの数値を反映して作成したものである。

コスト：コストの大幅削減はスケールメリットを通じて実現可能である。上記目標では、コストの削減が電気自動車の普及を支援するうえで極めて重要となる。

出力密度：出力密度は、重量を最小限に抑えパッケージングの空間を確保するために重要であるが、出力密度の改善はDC-DCコンバーターと車載充電器では限定的である。なぜならコンバーターは、追加的な磁性部品や多段階変換によるガルバニック絶縁を行う必要があり、より複雑だからである。

効率性：インバーターは通常、電気モーターとトランスミッションに統合されている。したがって効率性目標は、インバーターが車両パワートレインの一部として効率的に機能しなければならない点を考慮して、WLTP平均効率値として示される。作動点がより限定的であることから、ピーク効率はDC-DCコンバーターと車載充電器に適している。

インバーター

コスト効率が高い量産アプリケーション用のインバーターは、通常、低ピークで連続出力定格である。公称入力電圧は、800Vシステムのコストが低減するまで今後5~10年は約400Vである。冷却液注入口の温度は、現在の業界標準で電気モーターと調和させたものを基準としている。

DC-DCコンバーター

DC-DCコンバーターは通常3kWであり、補助装置需要を満たすのに十分である。しかし長期的には、高度インフォテイメントやADASおよびCAVの機能に合わせて増大すると考えられ、2035年までに4 kWのDC-DCコンバーターが登場するだろう。

車載充電器（OBC）

高コスト効率の量産アプリケーション用の車載充電器は、業界標準の6.6kWに移行していくと予想される。入力電圧は英国の電力供給網を反映しているが、欧州市場では三相のOBCが採用される可能性もある。

下表は、ロードマップに用いられた指標の仕様を示すが、この仕様は参考情報であり、目標とする仕様を示すものではない。

インバーター各指標の仕様	2020	2025	2035
ピーク出力	100kW	100kW	100kW
連続出力	50kW	50kW	70kW
入力電圧（最小）	250V	250V	500V
入力電圧（公称）	400V	400V	800V
出力電流（最大）	450A rms	450A rms	225A rms
冷却液注入口の温度	65℃	65℃	65℃
生産量	>100k	>100k	>200k

DC-DC各指標の仕様[1]	2020	2025	2035
ピーク出力	3kW	3kW	4kW[2]
連続出力	3kW	3kW	4kW
入力／出力電圧（公称）	400V	400V	800V
出力／入力電圧（公称）	12V	12V	12V
冷却液注入口の温度	65℃	65℃	65℃
生産量	>100k	>100k	>200k

OBC各指標の仕様[3]	2020	2025	2035
ピーク出力	6.6kW	6.6kW	6.6kW
連続出力	6.6kW	6.6kW	6.6kW
入力／出力電圧（公称）	190/270V AC 45-60Hz	190/270V AC 45-60Hz	190/270V AC 45-60Hz
出力／入力電圧（公称）	400V	400V	750V
冷却液注入口の温度	65℃	65℃	65℃
生産量	>100k	>100k	>200k

1. 単方向電力潮流およびガルバニック絶縁を想定　2. MaaS／インフォテインメント機能の増大を想定　3. 双方向電力潮流およびガルバニック絶縁を想定

ロードマップ2020
パワーエレクトロニクス

テクノロジーのロードマップ

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

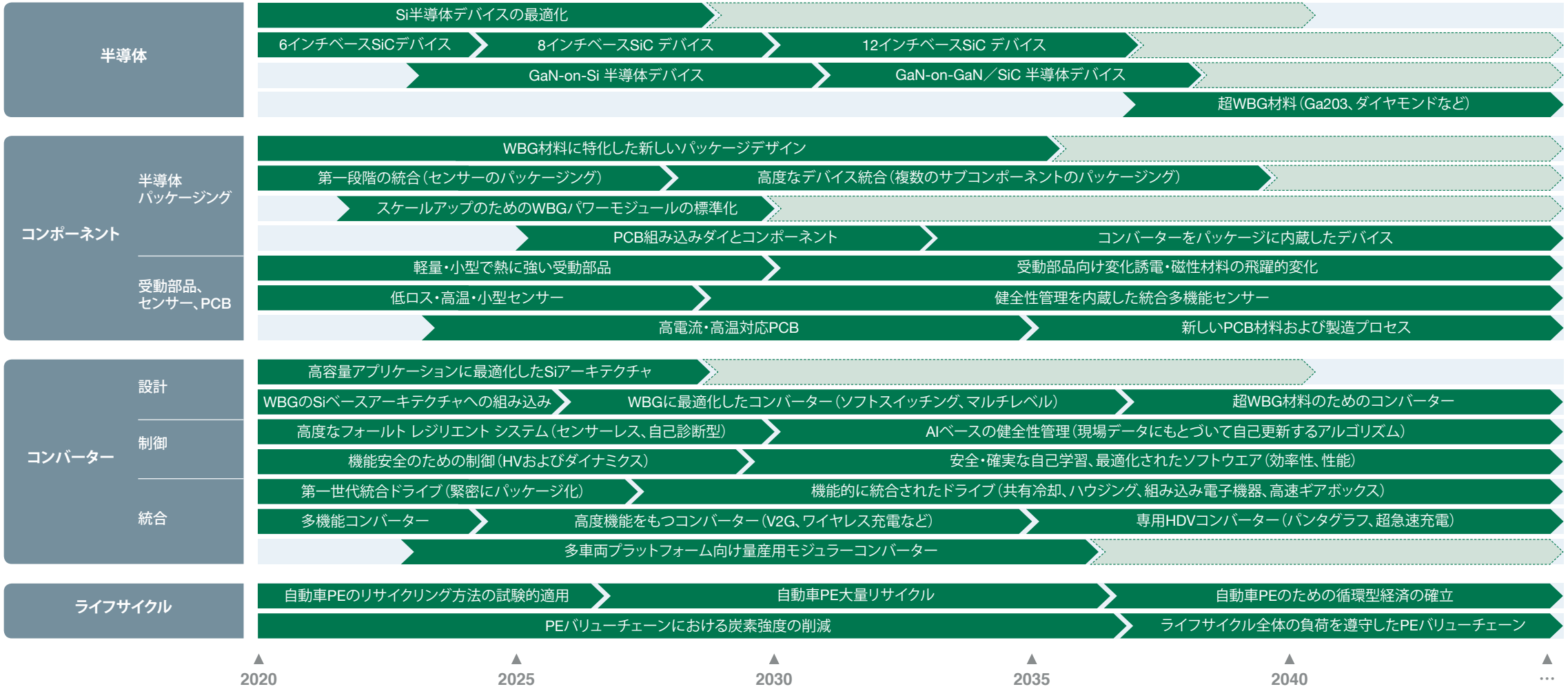
ADVANCED PROPULSION CENTRE UK

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：
当該技術は量産車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：
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

ロードマップ2020
パワーエレクトロニクス

テクノロジーのロードマップ

半導体

半導体は、自動車パワーエレクトロニクスにおける最も高コストの部品であり、パワーエレクトロニクス・ロードマップの他の分野すべてにおいてイノベーションの軌跡に影響を与える。このセクションでは、Siベース半導体の継続的改善とワイドバンドギャップ（WBG）半導体の成熟について説明する。

コンポーネント
- 半導体パッケージング
- 受動部品、センサー、PCB

コンポーネント：

新半導体パッケージングコンセプト：WBG半導体の性能を最適化するものとして、新たなコンセプトが登場するだろう。ここでは、特定の性能を実現するための専用パッケージングと、高電圧向けのパワーモジュールの標準化という2つの並行的な傾向について説明する。

受動部品、センサー、プリント基板（PCB）：これらは自動車業界のイノベーションを推進する可能性が高いコンポーネントである。高い作動温度と高電圧でのロス低減を実現するため、新材料と製造経路の開発が必要である。

コンバーター
- 設計
- 制御
- 統合

コンバーター：

設計：WBGの性能の向上を活用したコンバーター設計が、特に高性能アプリケーションに必要である。また、量産アプリケーションのコストを削減するために既存のアーキテクチャを徐々に改善していくことも必要である。

制御：今後ソフトウエアの成熟が進み、信頼性、性能、安全性が強化されるだろう。車両とパワートレインの統合および接続が進展するにつれ、高度な制御戦略が開発されると予想される。

統合：パワーエレクトロニクスをより効率的に統合すれば、コストが下がり空間も節約できる。可能性のあるイノベーション経路としては、モーターおよびトランスミッションへの電子装置の統合や、多機能またはモジュラー型コンバーターアーキテクチャの開発が挙げられる。

ライフサイクル

ライフサイクルには、パワーエレクトロニクスのバリューチェーン上の炭素強度、環境負荷、資源消費、リサイクル性が含まれる。電気自動車を真にサステナブルなソリューションにするには、これらの要素をすべて改善する必要がある。

半導体

シリコンと比べて飛躍的に優れた性能を実現できるワイドバンドギャップ材料の採用が、製造品質の改善とともに加速していくだろう。

1

シリコンの最適化

シリコンは低コストで組み込み製造が可能なため、低電圧・出力のアプリケーションに広く使われているが、チップサイズの縮小、薄型ウェハー、革新的IGBT/MOSFET設計（例えば高速スイッチング、逆阻止・逆導通IGBT）によって、性能をさらに向上させることも可能である。

2

SiCの開発

SiCベースインバーターが市場参入を果たし、TeslaのModel 3やSolarisバスなどがいち早くこれを採用している。今後も高出力アプリケーションでの広範な採用が続くと予想され、特に800VパワートレインがSiC半導体から最大の恩恵を受けるようになるだろう。

既存のSiC製造工場では6インチウェハーが製造されているが、市場リーダーは今後3~5年間に8インチに拡大することを目指している。また長期的ロードマップでは、12インチSiCの可能性も開かれている。知財の対象は水晶育成技術であるため、欠陥の少ない大型SiCウェハーを生産すればコストが低減し、より広範な採用が可能になるだろう。

3

GaNの開発

GaNが自動車パワートレインで使用されるにはまだ2~3年を要する。初期の適用はDC-DCコンバーター、車載充電器、センサー用途だろう。なぜならGaNは高速スイッチング周波数を必要とする低電圧・出力アプリケーションに最も適しているからである。GaNを600V以上のアプリケーションに適用するには、さらなる研究が必要である。

GaN基板は、他の基板材料と競合するようなサイズや純度での製造がきわめて難しい。そのため、GaN半導体の初期段階では、GaN-on-Siデバイスに適用し、まず市場の受け入れを促すことになるだろう。しかしGaN-on-SiのSiとの格子不整合には、高い欠陥および熱応力につながるという問題がある。長期的には、GaN基板の高コスト効率の製造が可能になるか、もしくは、SiC基板のGaNとの併用のコスト効率が高くなるかもしれない。

4

超WBG材料

次世代材料（ダイヤモンド、酸化ガリウム、窒化アルミニウムなど）は、SiCやGaNに比して飛躍的に高い性能を実現する可能性がある。ただし現在はまだ技術成熟度レベルが低く、主に学術機関やイノベーション新興企業が開発を進めている。

超WBG材料が自動車推進力システムに適したものとなるには、大規模な研究開発と製造革新が必要である。

コンポーネント

WBG半導体用の高性能パッケージングは、新設計とコンポーネントのさらなる統合によって実現できる。パワーモジュールの標準化の進展が、高コスト効率のスケールアップを可能にする。

ロードマップ2020
パワーエレクトロニクス　テクノロジーのロードマップ

半導体

1 WBG材料のための新しいパッケージング

シリコンよりも出力密度が高く温度範囲が広いアプリケーションを支えるには、熱管理とパッケージングを改善しなければならない。さもなければ、パッケージングとチップの耐用年数が短縮する可能性がある。同様に、GaNトランジスタは切替速度がきわめて速いため、デバイスを過度電圧から保護しEMIを抑制するために、超低インダクタンスのパッケージが必要である。

コンポーネント

半導体パッケージング

受動部品、センサー、PCB

1 WBG材料に特化した新しいパッケージデザイン

2 第一段階の統合（センサーのパッケージング）　高度なデバイス統合（複数のサブコンポーネントのパッケージング）

3 スケールアップのためのWBGパワーモジュールの標準化

4 PCB組み込みダイとコンポーネント　コンバーターをパッケージに内蔵したデバイス

コンバーター

設計

制御

統合

2 パワーモジュール内部の統合強化

半導体部品のみを収納するシングル／マルチチップモジュールから、高電流・高温で作動可能なセンサー、フィルター、ゲートドライバを完全統合したパワーモジュールへの移行が進むかもしれない。

第一世代の統合モジュールにはセンサー、受動部品、またはゲートドライバが埋め込まれるだろう。長期的には、機能性向上のために、主要コンバーター部品のすべてがパワーモジュールに統合される可能性がある。

3 WBGパワーモジュールの標準化

OEMと一次サプライヤーは多種多様なコンバータープラットフォームおよび設計を有している。WBG材料のためのパワーモジュール設計を標準化できれば、モジュラー型のコンバーター設計が可能になり、設計・開発コストを削減できる。ただしこの方法は、幅広い製品に対応できる柔軟性・機能性をもったパワーモジュールとコンバーターを設計することが課題となる。またOEMと半導体／モジュールメーカーが、設計基準に関して広範に合意する必要があるだろう。

4 コンポーネントの徹底的な統合

既存のパワーモジュール設計に、より多くのサブコンポーネントを組み込むための並行的アプローチは、新しい製造方法によるパワーエレクトロニクス・コンポーネントの統合である。

その一例は、ダイ、受動部品、ゲートドライバをPCBに接着／はんだづけするのではなく、内部に組み込んだ多機能PCBである。長期的には、コンバーターの全機能（ゲートドライバ、制御ソフトウエア、センサー機能、受動部品）を単一のパッケージに統合したパッケージ内蔵型コンバーターのコンセプトを、コンポーネントと基板の共製造を利用して実現できるようになるだろう。これにより、パワーエレクトロニクスの小型化が実現し、出力密度を大きく高めることが可能になる。

ライフサイクル

2020　2025　2030　2035　2040　…

コンポーネント

高温・高周波・高電流環境に耐える、より小型の新しい受動部品、磁性材料、PCB材料が求められいている。

半導体

コンポーネント
- 半導体パッケージング
- 受動部品、センサー、PCB

コンバーター
- 設計
- 制御
- 統合

ライフサイクル

1 受動部品の改善

受動部品（例えばキャパシタやインダクタ）は、新しいWBG半導体とともに共開発する必要があるだろう。現在、DCリンクキャパシタのサイズを縮小して高い出力密度を実現するために、高温（<150℃）のセラミック、金属膜、およびPLZTキャパシタが開発されている。

DC-DCコンバーターと車載充電器においてより高い出力密度を実現するうえで制限要因となっているのは、磁性部品のサイズである。したがって、インダクタを小型化しより高い周波数で動作できるようにするため、新しい磁性材料が探求されている。

1. 軽量・小型で熱に強い受動部品 → 受動部品向け変化誘電・磁性材料の飛躍的変化
2. 低ロス・高温・小型センサー → 健全性管理を内蔵した統合多機能センサー
3. 高電流・高温対応PCB → 新しいPCB材料および製造プロセス

2 センシング技術と健全性管理

センサーは、高温に耐えてロスが少なく、高い正確性を維持できるものが必要となるだろう。SiCとGaNの使用を通じたデバイスパッケージの縮小化にともない、高周波能力を拡充した小型センサーが求められるようになる。貴重な空間を確保するため、温度、電圧、電流を測定できる統合された多機能センサーが優先的に開発される可能性がある。物理的センサーがワイヤレスのセンサーへと進化し、重量と配線を減らす一方、データアナリティクスとソフトウエアの改善が必要になると考えられる。

3 PCB設計の強化

電気自動車のPCBに必要な電力は大きく、高温・高周波・高電流環境に耐えるものでなければならない。厚さ25~50μmの標準的なPCBの銅層よりも、150~200μm程度の重銅が有用となるだろう。他にも、電気自動車用PCBの可能な選択肢としてセラミックとPTFEがあり、いずれも高温・高電流・高周波の作動に適している。セラミックの回路基板は高コストであるため、セーフティクリティカルな高性能アプリケーションのみに使用されるだろう。一方、PTFEはコストと性能を両立できるオプションである。長期的には、「ハイブリッド」型のPCB材料と新製造プロセスが登場し、前述の半導体パッケージングのサブカテゴリーで説明したような、ダイと受動部品を統合したPCBが実現する可能性がある。

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

コンバーター

ワイドバンドギャップ半導体の利点をフル活用するには、Siベース設計を超えた先進コンバーターアーキテクチャが必要である。

ロードマップ2020
パワーエレクトロニクス

テクノロジーのロードマップ

半導体

コンポーネント
- 半導体パッケージング
- 受動部品、センサー、PCB

1 Siベースコンバーター設計の最適化

低電圧の場合、Siベースコンバーターのトポロジーが、SiCダイオードとSiスイッチ、効率性改善のための回路トポロジー、分散アーキテクチャ（多数の小型コンバーターが並列）およびパラレル／インターリービング・システムと合わせて引き続き利用されるだろう。

2 ワイドバンドギャップのコンバーター設計

Siベースコンバーターの設計が徐々に進化し、WBG半導体の普及を加速させるだろう。しかし、ワイドバンドギャップ材料の潜在能力をフルに実現するには、新たな回路トポロジーの進化が必要である。例えば、高周波アプリケーションのためのソフトスイッチング技術、アダプティブパワーインバーター、高周波パルス幅変調および共振コンバーター、マルチレベルコンバーターなどである。

コンバーター
- 設計
- 制御
- 統合

1 高容量アプリケーションに最適化したSiアーキテクチャ

2 WBGのSiベースアーキテクチャへの組み込み → WBGに最適化したコンバーター（ソフトスイッチング、マルチレベル） → 超WBG材料のためのコンバーター

ライフサイクル

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | …

コンバーター

自己診断および自己修正機能をもつ先進制御ソフトウエアとフォールトトレラント設計により、耐久性、信頼性、安全性の改善を実現できる。

ロードマップ2020
パワーエレクトロニクス　テクノロジーのロードマップ

半導体

コンポーネント
- 半導体パッケージング
- 受動部品、センサー、PCB

コンバーター
- 設計
- 制御
- 統合

ライフサイクル

1 高周波、フォールトトレランス、故障予測技術

耐久性と信頼性は、コンバーター設計において最も重要である。先進制御戦略は製品を差別化する好機であり、重要ノウハウや知財もこの分野に多く存在する。ワイドバンドギャップのパワーエレクトロニクスは高速の制御を必要とするため、より強力な制御ハードウエアが求められるだろう。

現在開発の焦点となっているのは、冗長性の低いフォールトトレラントコンバーター設計である。これにより健全性管理が、受動的管理から、In-Situデータ収集で可能となる予測的管理へと変化するだろう。さらに自己修正機能があり再構成可能なパワーエレクトロニクスへの移行も、AI／機械学習と、低電圧電子機器用の革新的で柔軟な回路アーキテクチャで実現すると予想されている。

2 安全・セキュリティのためのソフトウエア

電気モーターのトルクを制御するインバーターは、電気自動車の安全性にとって非常に重要である。ISO 26262で定義されている機能的安全リスク分類プログラムのASIL-D認証を確保するには、冗長性を組み込み、意図的でない加速やブレーキ、電気ショックを監視・防止できるようにしなければならない。

長期的には、制御ソフトウエアがより性能を高め、効率性や乗り心地に合わせて運転サイクルを調整できるようになると予想される。自動運転機能の追加に伴い、外部的脅威から制御ソフトウエアを保護することも必要である。また、複雑性やコスト削減のためにパワートレイン、ADAS、インフォテイメントシステムの全体を通じて電子制御ユニットを統合していく傾向も生まれており、新しい電気アーキテクチャ設計が求められている。

1 高度なフォールト レジリエント システム（センサーレス、自己診断型） → AIベースの健全性管理（現場データにもとづいて自己更新するアルゴリズム）

2 機能安全のための制御（HVおよびダイナミクス） → 安全・確実な自己学習、最適化されたソフトウエア（効率性、性能）

2020　2025　2030　2035　2040　…

コンバーター

モジュラーアーキテクチャとともにドライブ内部の機能統合を進めることで、小型・軽量・低廉な設計が可能になる。

ロードマップ2020
パワーエレクトロニクス　テクノロジーのロードマップ

半導体

コンポーネント
- 半導体パッケージング
- 受動部品、センサー、PCB

コンバーター
- 設計
- 制御
- 統合

ライフサイクル

1 パワーエレクトロニクスとドライブの統合

パッケージング空間を最小化し、重量を抑えるために、統合ドライブが普及し始めている。洗練化の度合いはさまざまだが、最初の統合は、インバーター、モーター、トランスミッションを緊密にまとめてパッケージ化し、一つのシステムとして効率的に作動するよう最適化することである。

出力密度を高め、システム効率を改善するために、多くのOEMや一次サプライヤーが機能的に統合されたドライブを探し求めている。このようなシステムでは、高電圧のケーブル配線が取り除かれ、熱管理システムが単一化され、ハウジングが共有されるだろう。長期的には、より高性能でニッチなアプリケーションが、パワーエレクトロニクスをステータやロータに埋め込んで3Dプリントされたドライブを使うようになるかもしれない。

2 コンバーターの機能性

自動車業界は現在、複数の機能を融合させたコンバーターへと向かいつつある。DC-DCコンバーターと車載充電器を一つのユニットにまとめ、空間を節約しコストを削減するケースが増えている。

今後数年間に、充放電および車両・デバイス間能力が主流化し、車両をエネルギー源にすることが可能になるだろう。ワイヤレス充電機能も当初は特殊アプリケーションに限定されるものの、将来的に量産車市場で採用されていく可能性がある。長期的には、大型のバッテリー式電動車と架線式電気トラックが商業化されると、超急速・急速充電をまたは電力網から直接高電圧充電を受け入れる専用コンバーターが必要になるだろう。

3 モジュラーコンバーター・アーキテクチャ

さまざまな車両タイプで使用可能なモジュラー車両プラットフォームが普及していく傾向に従い、OEMも多様な車両プラットフォームに展開できるモジュラーコンバーターのアーキテクチャを探求している。ここから、スケールメリットが拡大し、柔軟性も増していくだろう。

1. 第一世代統合ドライブ（緊密にパッケージ化）→ 機能的に統合されたドライブ（共有冷却、ハウジング、組み込み電子機器、高速ギアボックス）
2. 多機能コンバーター → 高度機能をもつコンバーター（V2G、ワイヤレス充電など）→ 専用HDVコンバーター（パンタグラフ、超急速充電）
3. 多車両プラットフォーム向け量産用モジュラーコンバーター

2020　2025　2030　2035　2040　…

ライフサイクル

パワーエレクトロニクス業界の長期的な環境保護責任に対応するには、易解体設計や、希少材料のための循環型経済の創出といった新しいアプローチが必要となるだろう。

ロードマップ2020
パワーエレクトロニクス　テクノロジーのロードマップ

半導体

コンポーネント
- 半導体パッケージング
- 受動部品、センサー、PCB

コンバーター
- 設計
- 制御
- 統合

1

リサイクルと循環型経済

車両の電動化が進む中、パワーエレクトロニクスの量産車用リサイクルソリューションのニーズが生まれている。しかしこの課題は、パワーエレクトロニクスが小型化し、モーターとトランスミッションに組み込まれるようになっている現在、ますます対応が難しくなっている。そのため、易解体性やリサイクルを考慮した設計は、ただちに採用すべき重要な設計原則である。

WEEEは、廃電気・電子製品の収集、処理、リサイクル、回収を促進する義務基準である。したがって、パワーエレクトロニクスのリサイクルの課題は、バッテリーや電気モーターほど困難ではない。

しかし将来的な量産用リサイクル経路は、（有害化学物質やエネルギー集約的プロセスを用いずに）環境負荷を最小化し、重要・希少・貴重な材料の回収率が高いものでなければならない。業界にとっては、経済的にも妥当な形でこれを実現することが課題となる。長期的には、金・銀・銅などの採掘材料が自動車業界内で再利用または他のセクターで原材料に使用されるような循環型経済を創出することが、採算の取れる経路の一つとなりうるだろう。

2

炭素強度と環境負荷

カーボンニュートラルと、自動車のライフサイクルを通じた法規制という二重の圧力が、パワーエレクトロニクスと関連製品のサプライチェーンにとって大きな課題となっている。短期的には、エネルギー効率の高い製造プロセスや低炭素エネルギー源の利用を通じて、製造における二酸化炭素排出原単位を削減することが重視され、特に半導体デバイスプロセスに重点がおかれるだろう。

長期的には、パワーエレクトロニクス産業が環境に及ぼす全負荷について、厳しい目が向けられるようになるだろう。これには、パワーエレクトロニクス製造のバリューチェーン全体にわたる、水および土地の利用、化学廃液、原材料や化学品使用プロセスに関する報告と情報開示の改善が含まれる。

ライフサイクル

1. 自動車PEのリサイクリング方法の試験的適用 → 自動車PE大量リサイクル → 自動車PEのための循環型経済の確立
2. PEバリューチェーンにおける炭素強度の削減 → ライフサイクル全体の負荷を遵守したPEバリューチェーン

2020　2025　2030　2035　2040　…

用語集

略語	解説
ADAS	先進運転支援システム（Advanced Driver-Assistance System）。センサー、カメラ、先進コンピューティングを使用して運転手を支援するシステム。
ASIL-D	自動車安全水準（Automotive Safety Integrity Level）。ISO 26262規格に準じたリスク分類プログラムで、レベルDは製品の完全性（インテグリティ）要件が最高水準であることを示す。
バンドギャップ	材料の価電子帯の電子を伝導帯に励起するのに必要なエネルギー。SiCやGaNなど、特にバンドギャップの大きいワイドバンドギャップ（WBG）材料は、シリコンよりも高電圧および高温に耐える。
CAVs	コネクテッド・自律走行車（Connected and Autonomous Vehicles）。自律性のレベルやテクノロジー面で多種多様な自動運転車の総称。
GaN	窒化ガリウム（Gallium Nitride）。WBG半導体材料の一種で、シリコンに代替する可能性がある。
IGBT	絶縁ゲートバイポーラトランジスタ（Insulated-Gate Bipolar Transistor）。高効率な高速電力用電子スイッチ。
MOSFET	金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ（Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor）。電子信号の増幅と切替が可能なデバイス。
PCB	プリント基板（Printed Circuit Board）。電子部品を支援し電気接続を供給するもので、事実上すべての電子機器で使用されている。
PLZT	ジルコニウムチタン酸鉛ランタン（lead-lanthanum-zirconium-titanate）を原料とする誘電体層材料。
PTFE	ポリテトラフルオロエチレン（polytetrafluoroethylene）。炭素およびフッ素原子からなる合成フッ素重合体で、疎水性があり、摩擦係数がきわめて低い。よく知られているブランドはTeflonである。
SiC	炭化ケイ素（Silicon Carbide）。WBG半導体材料の一種で、シリコンに代替する可能性がある。
WEEE	欧州連合の電気電子廃棄物（Waste Electrical and Electronic Equipment）指令で、幅広い電気・電子製品に適用される。
WLTP	乗用車等の国際調和排出ガス・燃費試験法（World harmonised Light-duty Vehicles Test Procedure）。IC・ハイブリッド車および幅広い電気自動車の燃費、汚染物質レベル、二酸化炭素排出量に関する国際基準。

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