電気モーター
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。

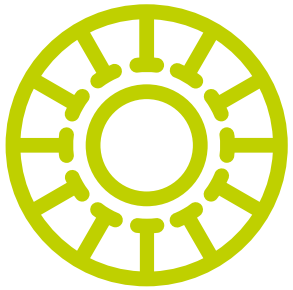
automotive council UK

ADVANCED PROPULSION CENTRE UK

概要：電気モーター

2022年までに世界で500以上の電気自動車（EV）モデルが発売され*、2025年までにEVの販売台数が全世界で850万台に達する見通しのなか、電気モーターの需要も著しい増加を見せている。EUでは電気自動車の販売台数は既にディーゼル車の販売台数と肩を並べている。

- 電気モーターの開発における課題としては、性能の向上（特にユニット体積あたりの出力）、量産市場普及に向けたコスト低減、長期供給が確保されていない材料への依存度の低減、製造における環境負荷の最少化とEOLリサイクルなどがある。
- システムの性能向上は、新しいアーキテクチャを採用したり、駆動装置に複数機能を緊密に統合させることによって実現することができる。
- よりコンパクトなデザインになると、小さな空間での電気絶縁と断熱の要件に応えるために、新素材と熱管理戦略が必要になる。
- 素材開発は様々な方面で進んでいる。新しいフォームファクタと合金化で銅巻線の性能は向上するが、長期的には、先進ナノ材料が飛躍的な性能向上をもたらすであろう。永久磁石ニーズのための重レアアース材料への依存は減らす必要がある。リサイクル材を増やし、二次レアアース類の利用度を高め、高分子結合などこれまでと異なる製法を採用していくことがチャンスをもたらす。長期的には、専用アモルファス金属などの開発により、電磁鋼板のさらなる改善が可能である。軟質磁性コンポジットも、材料の最適化や、製造コストの大幅削減が実現すれば、自動車用途でより広く普及する可能性がある。
- 機械損失を減らすには、巻線がポイントとなる。これまでと異なる巻線戦略と、予備成形または3D巻線により、性能向上が得られる可能性がある。ロータとステータには、材料の歩留まりを改善するための新しい製法が求められる。
- 環境負荷の観点では、環境への影響を最小限に抑えつつ、電気モーターを経済的にリサイクルすることには課題が多いが、例えばモータ組み立て工程でウェット処理への依存を減らせば、生産効率が上がり、解体とリサイクルが容易になる。一体成型でよりコンパクトにしていく流れからして、難題ではなるが短期的に、解体とリサイクルを見越して設計していくことが、これまで以上に重要となる。長期的には、エネルギー大量消費型の製造工程への対処が重要になる。バリューチェーン全体のライフサイクル分析が極めて重要となるであろう。



*Bloomberg BNEFによるElectric Vehicle Outlook 2020（2020年電気自動車展望）より

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。

バリー・メクロウ教授

ニューキャッスル大学
APC電気モーターSpoke担当

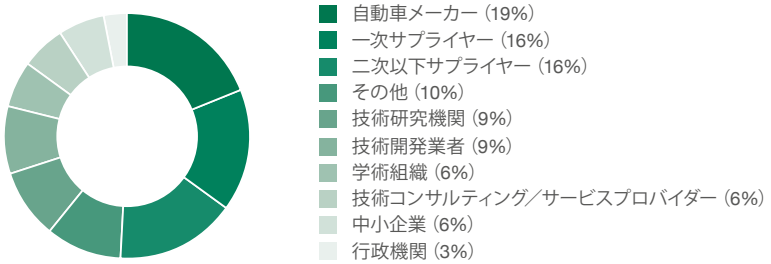
車両が電力駆動へと変換を遂げている今、自動車業界は急速に変化する大きなうねりの中にあります。私たちのねらいは、電気駆動モータの野心的かつ現実的な道筋と目標を設定することによって、英国が常に電気革命の最前線にあることです。APC E-Machines Spokeが支援して作成した英国自動車協議会（UK Automotive Council）のロードマップは、業界の数多くのキープレイヤーや学術研究者の協力を得てまとめられたもので、2030年にはすべてを電気で推進する自動車にするという英国政府の目標を実現する指針となります。

国際的なリーダーシップを獲得するために、英国は幅広い技術を出来る限り活用しながら、革新的な電気モーターと製造技術を並行して開発していかなければなりません。

業界専門家オンライン調査所見2020

業界の抱える主な課題として、中国からの磁石供給に過度に依存していること、ドライブライン部品統合の要求が高まっていること、そしてLCA（ライフサイクルアセスメント）の環境的配慮が必要なことが挙げられる。

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。



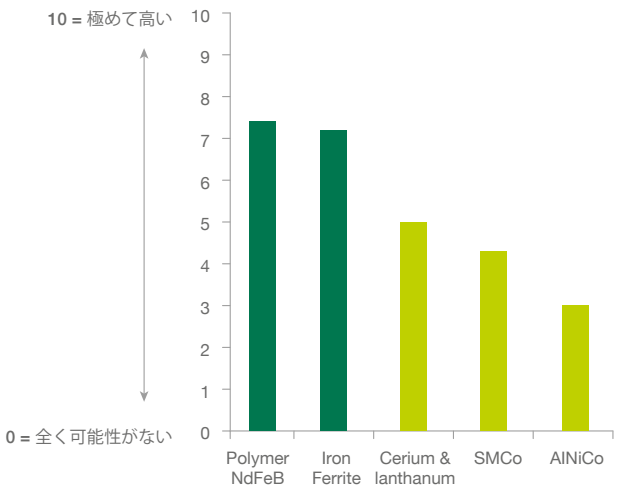
専門家が注目する上位3つのトピック

1 中国からの磁石供給に依存しているため、市場が価格変動と、供給問題に晒されている。

2 コンパクトで低価格の設計が、パワーエレクトロニクスと電気モーターの、ドライブライン・コンポーネントへの統合に拍車をかけており、これが、保守性、解体、そしてEOLのエネルギー効率の良いリサイクルに問題を呈している。

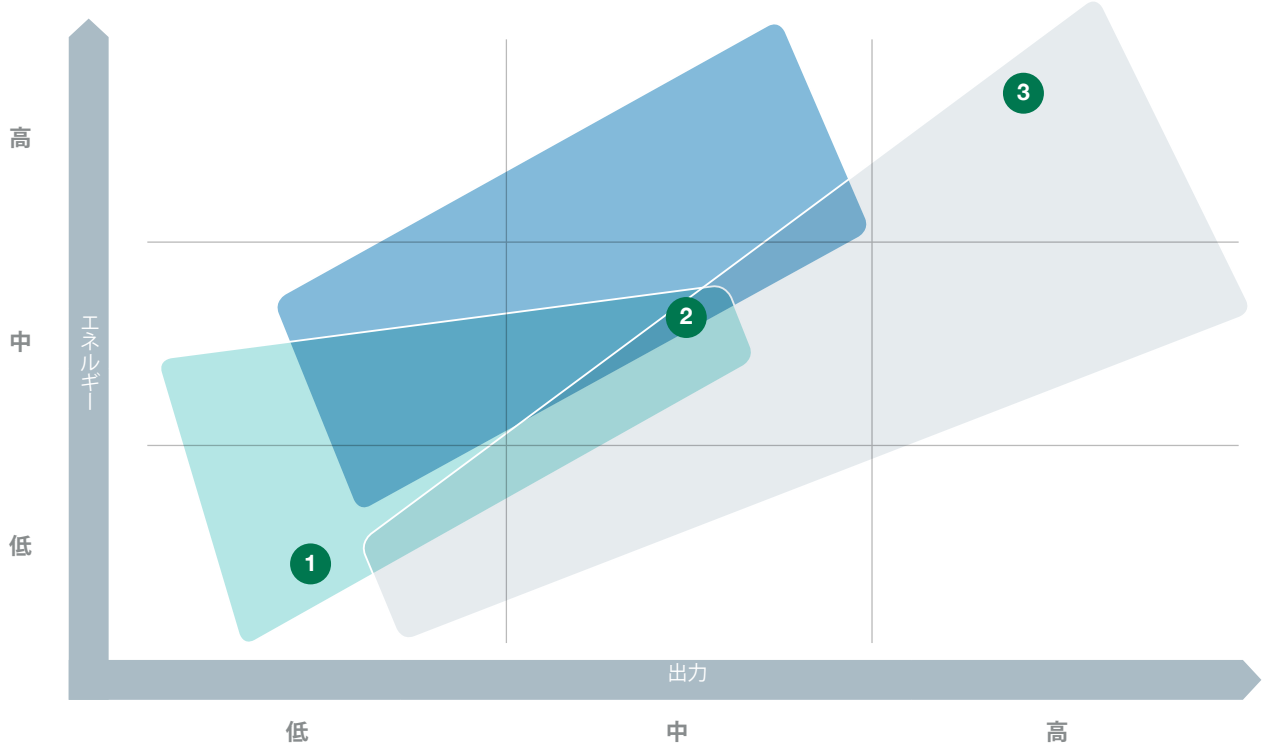
3 原材料の採掘と精製に関する環境への配慮、エネルギー効率の高い製造、そしてEOLのLCAにより注意を向ける必要がある。

調査結果：EVには、Nd-Fe-B焼結磁石と併せて、磁性材料が採用される可能性が極めて高い



アプリケーション別エネルギー／出力分布図

推進力システムは、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。下記は主な量産車のエネルギー／出力関連図を示す。



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。

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
電気モーターの指標	コスト（$/kW）	6	4.8	3.3
	単位体積あたりの電力密度（kW/l）	8	25	30
	単位質量あたりの電力密度（kW/kg）	4	8	10
	WLTPの平均効率	93%	95%	97%

下表は、ロードマップに用いられた指標の仕様であるが、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。

電気モーター指標の仕様	2020	2025	2035
最大出力	100kW	100kW	100kW
連続出力	50kW	50kW	70kW
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	10万以上	10万以上	20万以上

注記：

- 上記の電気モーター指標は❶ **高コスト効率の、量産型**アプリケーションに関するものである。他の製品アプリケーションの別の指標に関しては前ページを参照のこと。
- コスト指標は、高コスト効率の量産型の電気モーターにOEMが支払うであろう価格を示す。
- すべての重量と体積には、モータの可動電磁コンポーネント、シャフト、ケースおよびヒートシンクが含まれる。冷却液、外部ラジエータ、冷却液ポンプの重量は含めてはならず、電気フィルタとパワーエレクトロニクスのコンポーネントも含めない。
- 連続出力とトルクは、15分以上持続可能であること。
- 出力はECE R85に定められる通り、正味出力とする。
- WLTPの平均効率は、パワートレインの効率を指すが、モータ、インバータ、およびトランスミッションが2025年と2035年に示される効率値を達成するものとして読み取ること。

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、今後の方向性と、このテクノロジーの最高クラスの性能を測定するアプローチを示す。

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
電気モーターの指標	コスト（$/kW）	6	4.8	3.3
	単位体積あたりの電力密度（kW/l）	8	25	30
	単位質量あたりの電力密度（kW/kg）	4	8	10
	WLTPの平均効率	93%	95%	97%

2020年指標は、業界エビデンスに基づいてコスト効率、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：大幅なコスト削減は、スケールメリットによって実現できる。ここに挙げた目標に関しては、電気自動車を普及させていくため、コスト削減が最重要である。

電力密度は軽量化を図り、パッケージングを小さくするために重要である。

効率：WLTP（乗用車等の国際調和排出ガス・燃費試験法）が、車載電気モータの効率改善を評価する標準的で一貫した試験方法である。電気モーターの効率は高いとはいえ、さらなる向上とロス低減の余地がある。

下表は、ロードマップに用いられた指標の仕様であるが、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。

電気モーター指標の仕様	2020	2025	2035
最大出力	100kW	100kW	100kW
連続出力	50kW	50kW	70kW
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	10万以上	10万以上	20万以上

注記：

- 上記の電気モーター指標は❶ **高コスト効率の、量産型**アプリケーションに関するものである。他の製品アプリケーションの別の指標に関しては前ページを参照のこと。
- コスト指標は、高コスト効率の量産型の電気モーターにOEMが支払うであろう価格を示す。
- すべての重量と体積には、モータの可動電磁コンポーネント、シャフト、ケースおよびヒートシンクが含まれる。冷却液、外部ラジエータ、冷却液ポンプの重量は含めてはならず、電気フィルタとパワーエレクトロニクスのコンポーネントも含めない。
- 連続出力とトルクは、15分以上持続可能であること。
- 出力はECE R85に定められる通り、正味出力とする。
- WLTPの平均効率は、パワートレインの効率を指すが、モータ、インバータ、およびトランスミッションが2025年と2035年に示される効率値を達成するものとして読み取ること。

ロードマップ2020
電気モーター

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

モーターのアーキテクチャと統合

モーターのアーキテクチャと統合では、電気モーターの電磁的および機械的設計分野における革新について、そしてそれらの革新がより広範なパワートレインシステムへどのように統合されるのかを示している。さらに、設計、シミュレーションツール、製法が向上するにつれて可能となる先進的なコンセプトについても焦点を当てた。

熱管理

熱管理技術が、高速で出力密度の高いモーターには欠かせない。ここでは断熱材や含浸樹脂などの先進的な熱管理材料の詳細および液冷や空冷など能動冷却戦略を示している。

材料開発
- 巻線
- 硬質磁性材
- 軟質磁性材

材料開発：

巻線の材料には、アルミニウムのようなコスト効率の良い巻線材料と、銅の性能を超える高性能の巻線材料という、2つの開発ルートがある。

硬質磁性材が電気自動車の駆動モータに占める最大のコストであることが多いため、材料、サプライチェーン、製造の革新によって、コストを削減することが不可欠である。自動車業界の一次レアアースへの依存を下げ、Nd-Fe-B焼結磁石の回避が革新の可能性のある分野である。

軟質磁性材は電磁鋼板と、軟質磁性コンポジットの両方で並行して材料革新が進んでいる。電磁鋼板は、シリコンの含有量を増やして電導性を上げ、一層薄板化していく。一方、軟質磁性コンポジットには、量産車市場に適するように革新が求められる。

製造の革新

製造の革新は非常に重要であり、自動車用途にソリューションを規模拡大していくためには、材料の改良と併せて、製造の革新にも共に取り組まなければならない。本ロードマップでは量産型の巻線技術、先進磁性材の製法、およびモーターの組み立てにおけるウェット処理の削減について説明している。

ライフサイクル

ライフサイクルには、電気モーターとそのサプライチェーンの炭素強度、環境負荷、資源消費、リサイクル可能性が含まれる。これらすべての要素を改善して初めて、電気自動車は真の意味でサステナブルなソリューションとなる。

モーターのアーキテクチャと統合

新しいアーキテクチャと更なる機能統合によって、より高性能でよりコンパクトな設計が実現し、また画期的な新材料、設計手法、製造アプローチを活用する機会ともなる。

モーターのアーキテクチャと統合

1. 先進アーキテクチャ（永久磁石なし、アキシャル型磁束、横方向磁束の新ロータ設計、高速モータなど） → ラジカル・アーキテクチャ（高温超電導体、コアレスロータなど）
2. 第 1 世代の統合ドライブ（隙間なくパッケージ） → 機能を統合したドライブ（ハウジング、埋込型電子モーター、高速ギアボックスなど）
3. 優れたシミュレーション技術による新しいモーター設計 → 適応型／柔軟な機能を備えた、ALM対応のモーター新設計

熱管理

材料開発
- 巻線
- 硬質磁性材
- 軟質磁性材

製造の革新

ライフサイクル

1 先進アーキテクチャ

電気モーターを設計する際の主要ポイントは、ステータとロータの幾何形状、エアギャップの大きさ、巻線戦略（集中型か分散型か）、磁束経路、および永久磁石の位置と形状である。

量産型の高コスト効率のEVアプリケーションには、ラジアル型磁束装置が一般的であるが、電力密度の高いアプリケーション向けに、アキシャル型磁束装置も販売されている。そのようなアーキテクチャでは、コイルがステータを取り囲むように放射状に配され、ロータが90°方向転換されている。これによってコンパクトなモータとなり、鉄芯に電磁鋼板を使う必要性が減る。磁束経路が直線となるため、粒子指向電磁鋼板を代わりに使用してさらに効率を上げることができる。

将来的にはステータとロータのアーキテクチャが画期的に変わる可能性がある。例えば、高温超電導体、コアレスロータ、超電導磁石を使用したモータなどが考えられる。

2 統合ドライブ

パッケージ空間を最小限に抑え軽量化を図るため、統合ドライブがさらに一般化してきている。洗練化のレベルはさまざまだが、一般化の例としては、インバータ、モータ、およびトランスミッションをまとめてパッケージ化し、システムとして効率的に作動するように最適化したものである。

高出力密度を実現し、システムの効率を高めるため、機能を統合したドライブも研究が進んでいる。このようなシステムでは、高圧ケーブルを排し、単一の熱管理システムとし、1つのハウジングにすべてを納める。長期的には、より高性能のニッチな用途のものには、ステータやロータの上にパワーエレクトロニクスを埋め込んだ3D印刷のドライブを選択できる。

統合ドライブの課題としては、製造の実現性、効果的な冷却システム、スムーズなフェイルセーフ機構、小型電気モーターを支える高切り替え頻度数の実現などがある。

3 シミュレーションによる設計改良

高度化が進むマルチフィジックス設計ツールにより、新しい電気モータートポロジーを作成する際の自由度が増す。熱、磁気、電気、機械に関する要素を組み合わせ、最適な電気モーター設計をすることができる。

積層造形法のコスト効率が向上しより一般化すると、例えば、高性能の電気モーターに用いられる、複雑な形状の磁石や巻線の3D印刷など、画期的な新デザインの製造が可能となる。アプリケーションによっては、モータを丸ごと3D印刷することも可能である。これにより、硬質磁性材、軟質磁性材、埋込型パワーエレクトロニクスを一体化できる。

2020 ▲ 2025 ▲ 2030 ▲ 2035 ▲ 2040 ▲ …

熱管理

小さなスペースでの電気絶縁と断熱の厳しい要件を満たすために、新素材や、より局所的な冷却方法が必要になる。

モーターのアーキテクチャと統合

熱管理

材料開発

巻線

硬質磁性材

軟質磁性材

製造の革新

ライフサイクル

1 電気と熱に対する絶縁・断熱材（絶縁/断熱膜など） → 電気を絶縁し熱を伝える、先進的材料

2 直接液体冷却（巻線の終端部、ラミネート加工など） → 先進冷却コンセプト（相転移冷却など）

3 統合熱管理（インバータとモータ冷却の集約など）

1 絶縁・断熱材

電気絶縁に用いる材料は、断熱材としても機能するため、排熱の障害となってしまう。したがってこれを薄くするための努力がこれまでにもかなり向けられてきた。ただし、インバータによる電圧の高速切替えでは、dV/dt（単位時間当たりの電圧変化量）が大きく、それに対応できる先進的な絶縁材が必要である。新しい絶縁・断熱材が優れているかどうかを評価するための2つの重要な基準は、絶縁材が耐えられる単位厚さあたりの電圧（絶縁耐力）と、それを横切るAC電流によって発生する熱量（誘電損失係数）である。これらの要素を向上させても、絶縁・断熱材の作動温度やコーティングの柔軟性が損なわれてはならない。高電圧パワートレインが一層普及すると、PVDF（ポリフッ化ビニリデン）やFEP（フッ素化エチレン-プロピレンコポリマー）などの材料が採用される可能性が高い。

2 能動冷却

EVの電気モーターには、様々な冷却方法が存在し、強制空冷から受動冷却のようなコスト効率の良い方法から、中空シャフトロータ冷却、アウタージャケット液体冷却、オイル噴射などのより複雑な方法まで多岐にわたる。極めて高性能のアプリケーションには、巻線終端などの高熱スポット用の誘電体オイルの浸漬冷却などの選択肢もある。EVの熱管理用のオイルとグリコールは、従来のICE用の配合とは異なるため、耐摩耗性能、摩擦低減、効率、電気的適合性、そして絶縁について検討しなければならない。

長期的には、相転移材（PCM）を採用するなどして有用な熱エネルギーを蓄えたり、電気エネルギーに変換したりするなど、より高度な熱管理戦略を構築する余地がある。

3 冷却システムの集約

統合ドライブに移行する中で、熱管理を集約させることが、コスト効率が高く実用的な革新のステップになる。インバータとモータに別々に冷却系統を設けるのは複雑でコストも高い。とは言っても、冷却システムを１つにまとめようとすると、また別の特有の課題が発生する。モータとパワーエレクトロニクスは異なる温度で動作することが多いため、両方のテクノロジー間の熱差を管理できる冷却システムを設計することは、システムエンジニアリングにとってかなりの難題である。

2020 2025 2030 2035 2040 …

材料開発

新しいフォームファクタと合金化で銅巻線の性能は向上するが、長期的には、先進ナノ材料が性能に飛躍的な変化をもたらすであろう。

モーターのアーキテクチャと統合

熱管理

材料開発
- 巻線
- 硬質磁性材
- 軟質磁性材

製造の革新

ライフサイクル

1 性能を向上させる巻線材料

優れた素材と巻線設計により、これまでと異なる高性能の巻線が実現できる。占積率を高めるために、丸形状のワイヤよりも、効果的にスロット域を埋めることができる角形状のワイヤが一般的に採用されるが、角形状のワイヤは取り扱いが難しい。これは巻きの工程で捻じれると逆に占積率が下がってしまうからである。この他の設計上の改良としては、細いワイヤを複数撚り合わせたもの（リッツワイヤなど）や、巻線の交流損失を下げるためにラミネート加工した巻線などがある。

長期的には、銅や表面上に埋め込まれたカーボンナノチューブ、グラフェン、ナノ材料、高温超電導体などの先進材料が、特殊な高出力・高性能アプリケーションで商品化される可能性がある。これらは、電導率、熱性能、および低損失の面を飛躍的に向上させることになるが、どうしても高価格である。

1 改良型の銅巻線（合金、リッツワイヤ、ラミネート、改良コーティングなど） → 高性能巻線（グラフェン、高温超電導体など）

2 代替となる低コスト巻線（例：アルミニウム、アルクラッドなど） → 代替材料を使う、コスト競争力のあるALMによる巻線

2 高コスト効率の巻線材料

巻線材料は、大幅にコストが下がる可能性がある。アルミニウム製の巻線は、銅よりも安価かつ軽量で、鋼鉄と一緒にリサイクルしやすいため、魅力的な代替品である。ただし、導電率が低いため、終端の課題を克服しつつ、銅巻線のものに匹敵する重量、大きさ、電力密度を備えた、アルミニウム巻線入りの電気モーターを設計できるかが課題である。銅とアルミニウムの合金であるアルクラッド巻線を使用すれば、コストを下げつつ、銅の性能特性の一部を維持できるため、ハイブリッドソリューションとなるかもしれない。

将来的には、先進的な積層造形法が、複雑な巻線プロセスに取って代わり、新しいコンフィギュレーションを提供する潜在能力を持つ。ただし、大量生産に用いるには、積層造形法が今よりも普及しコスト競争力を持たなければならない。

2020 2025 2030 2035 2040 …

材料開発

伝統的な一次レアアース類とそれに関連する焼結磁石製造への依存度を下げるアプローチとしては、リサイクル材のレベル向上、二次レアアース類の使用、高分子結合など代替製造方法の活用などがある。

モーターのアーキテクチャと統合

熱管理

材料開発
- 巻線
- 硬質磁性材
- 軟質磁性材

製造の革新

ライフサイクル

1

値動きの激しいレアアース材への依存を減らす

ネオジムの耐熱性を向上させるために、ジスプロシウムやテルビウムなどのレアアース類が添加されているが、高価であり、中国に極度に集中している。コストを下げ、供給リスクを排するために、重レアアース材の使用をできれば止めることが望ましいと考えられている。短期的には、トヨタなどの一部のOEMは、価格高騰のリスクから身を守るためにセリウムとランタンを既に追加し、将来的にはネオジムを段階的に排除していくことまでも考えている。

リサイクルされた永久磁石の使用は、サプライチェーンに多様性をもたらす機会になる。中期的には、リサイクルされたレアアース類のほんの一部のみが電気モーターへの使用可能性を持つため、性能を維持するためにはかなりの量の一次レアアース類が必要となる。長期的な目標は、高温性能と高い磁束密度を維持した100%リサイクル材料で作られた永久磁石を設計することである。これにより、レアアースの閉ループのサプライチェーンが可能になり、永久磁石機のコストと環境性能が向上し、長期的なLCA準拠の選択肢となる。

1 重レアアース類含有量の低減 → 一次レアアース類磁石と二次レアアース類磁石の混合 → 100%リサイクルのレアアース類磁石

2 量産アプリケーション用の、Nd-Fe-B焼結磁石の代替品（フェライト磁石、SmCo磁石、Nd-Fe-Bボンド磁石など）

2

焼結磁石の代替品

いくつかの例外を除き、EVの駆動モーターに使われる永久磁石は大抵Nd-Fe-B焼結磁石である。この製法の知的財産は保護されているものが多く、そのサプライチェーンは中国と日本の限られた企業によって占有されている。このような複雑な磁石の製造は非常に労働集約的で、様々な研削やスライシング技術を用いるため合金材料も無駄にしてしまう。

焼結から脱却した代替的磁石製造方法が、車の駆動系の電気モーターにとって魅力的なものとなるであろう。高コスト効率の鉄フェライト磁石が、さまざまなInnovateUKプロジェクトで試され、ハイブリッド車のシボレー・ボルトの低電力モーターにも使用されている。磁束密度が低いことから、この磁石はかなり重量があるため、そのままNd-Fe-B磁石の代替としてすぐに使うことはできない。サマリウムコバルト磁石も、高温の48Vベースのモータに使用されたことがあるが、かなりの高価格であるため、むしろ航空宇宙用途に適していると考えられる。

高分子結合のNd-Fe-Bボンド磁石が、さらに高コスト効率の代替物となりうる。場合によっては直接電気モーターの中で複雑な形状を製造できるため、後で機械加工する必要もない。ジスプロシウムのようなレアアース類を使わないため、サプライチェーンは、価格の乱高下の影響を受けにくいが、性能を最適化するには、これらの磁石を念頭に置いてモータを設計する必要がある。高分子結合のNd-Fe-Bボンド磁石では、LCAに準拠して磁石をリサイクルすることが課題となる。

材料開発

現行の電磁鋼板を改良することで、モーター全体の効率を高めることができる。新しい先進的な製法で作られた軟質磁性コンポジットと次世代電磁鋼板が、より高い性能をもたらす可能性がある。

モーターのアーキテクチャと統合

熱管理

材料開発
- 巻線
- 硬質磁性材
- 軟質磁性材

製造の革新

ライフサイクル

1 電磁鋼板の革新の方向性

電磁鋼板の磁気特性と化学特性の進歩により、渦損失とヒステリシス損失を減らし、モーター全体の効率を高めることができる。短期的な課題としては、自動車に関連した測定方法と材料モデル／特性評価、接着およびコーティング技術の改良（自己接着コーティングなど）、量産車用の、より低損失でより薄手の鋼板、またより高い合金含有率の鋼板の実現が挙げられる。

長期的な課題としては、粒子指向性電磁鋼板のさらなる利用、高コスト効率の他の金属の導入、局所的に最適化したテーラード鋼の開発などが挙げられる。急速な冷却により非晶質となるアモルファス導電性金属も、高性能用途には有望である。これらは、積層造形法や連続鋳造法など、代替の製造方法に合わせることができる。これを規模拡大し、自動車アプリケーションでコスト効率高く使用できるようにすることが課題である。

1 改良型電磁鋼板（高Si含有、薄手ラミネーションなど） → コスト競争力のある次世代型電磁鋼板（CoFe合金、局所特性など）

2 量産車向け軟質磁性コンポジット（小さな結晶粒径、低い飽和度）

2 自動車の推進力に適した軟質磁性コンポジット

軟質磁性コンポジットは、電磁鋼板に比べて自動車用途にはあまり用いられていないが、ネットシェイプ製造を使えば、より複雑な3D形状を作り出すことができる。課題としては、損失と透過性の改善、結晶粒径の縮小、製造工程の大幅なコスト削減などがある。

2020 2025 2030 2035 2040 …

製造の革新

これまでと異なる巻線戦略と予備成形または3D印刷された巻線により、性能が向上するが、その一方でステータとロータの原料歩留まりを向上するための新たな製法が必要となる。

モーターのアーキテクチャと統合

熱管理

材料開発
- 巻線
- 硬質磁性材
- 軟質磁性材

製造の革新

ライフサイクル

1 スケールメリットを実現する巻線技術

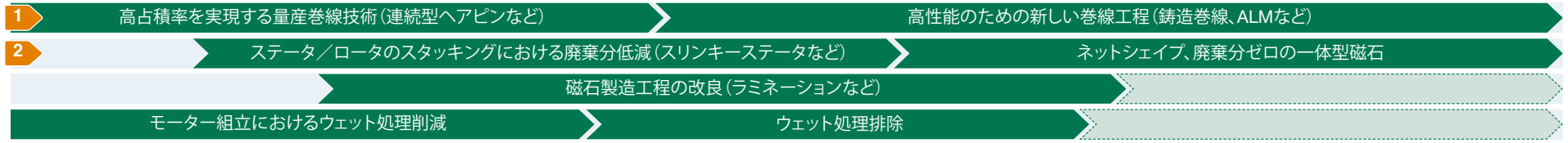
巻線戦略（分散型、集中型など）が、性能を最大限高め、機械損失を減らす鍵となる。主な課題として、材料占積率の向上と、低コストのモーターとするため製造プロセスの完全自動化が挙げられる。巻線工程の向上には、樹脂の無駄を無くし、エネルギー消費を減らし、床面積を最大化する、より優れた含浸技術（トリクル含浸など）が求められる。

予備成形された鋳造巻線と3D印刷された巻線はいずれも、材料の使用量を最適化し、複雑な幾何形状を作り上げる能力があるため、性能を飛躍的に高める可能性を持つ。

2 ステータとロータの製造における、材料効率の向上

電磁鋼板の既存のステータおよびロータのスタンピング技術は非常に効率が悪く、原料歩留まりは最高でも70%ほどである。ハイブリッド車とEV車の設計では、通常、0.25mmから0.30mmの厚さのラミネーションを使うが、これは、従来の圧延装置やスタンピング装置の能力限界に近いため、不良率が高く、処理量も減り、歩留まりも低い。レーザー切断が解決策となりうるが、高価であり、またスタンピングと同じ速度でラミネーションを製造できないため、主にニッチな用途に用いられる。

長期的には、硬質磁性材と軟質磁性材の両方をロータやステータに統合する、ネットシェイプ、廃棄分ゼロの磁性材を使用することが目標である。これには、粉末冶金の進歩、あるいは先進的な積層造形法技術の利用が必要となる。



2020 2025 2030 2035 2040 …

製造の革新

永久磁石の新しい製造プロセスが求められている。モーターの組み立てにおけるウェット処理への依存を減らせば、生産効率が上がり、解体とリサイクルが容易になる。

モーターのアーキテクチャと統合

熱管理

材料開発
- 巻線
- 硬質磁性材
- 軟質磁性材

3

永久磁石の新しい製造方法

永久磁石の製法の進歩によって、積層からの渦電流損失の低減や、強度、耐久性、高温耐性の向上をもたらすことができる。その他の磁性材とその製法については、[焼結磁石の代替品]を参照のこと。

超高性能アプリケーションの場合、バッテリーパックまたは燃料電池システムからのエネルギーを最大化するために超電導磁石が使用できる。

4

モーター組み立てにおけるウェット処理の低減と排除

ウェット処理があると、量産組立ラインが複雑になってしまう。樹脂、グリース、添加剤、接着剤の硬化時間の管理と安全な取り扱いに、時間も費用もかかっているため、これらの化学物質を排除すれば、モーターの生産速度がアップし、コストも低減する。

乾式保持法（機械的接合技術など）を使用して磁石接着剤を無くしたり、コイルを熱材料で前処理して含浸材を無くしたりすることが、いずれも組立作業中のウェット処理を排除するためのオプションとなりうる。

これらの化学物質を排除すれば、EOLに電気モーターを解体するのも楽になる。例えば、現在は含浸材を使うことによりステータスロットに巻線が埋め込まれてしまい、銅を抜き出すのが難しくなっている。

製造の革新

- 高占積率を実現する量産巻線技術（連続型ヘアピンなど）→ 高性能のための新しい巻線工程（鋳造巻線、ALMなど）
- ステータ／ロータのスタッキングにおける廃棄分低減（スリンキーステータなど）→ ネットシェイプ、廃棄分ゼロの一体型磁石
- 3 磁石製造工程の改良（ラミネーションなど）
- 4 モーター組立におけるウェット処理削減 → ウェット処理排除

ライフサイクル

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | …

ライフサイクル

いくつかの手段は現れてはいるものの、環境負荷を最小限に抑えつつ、電気モーターを経済的にリサイクルすることには課題が多い。短期的には、解体とリサイクルを念頭に置いた設計にしていくことが重要となる。長期的には、バリューチェーン全体のライフサイクルアセスメントを行うことが不可欠である。

モーターのアーキテクチャと統合

熱管理

材料開発
- 巻線
- 硬質磁性材
- 軟質磁性材

製造の革新

1

大量リサイクルの手法

車両の電動化が進むにつれ、電気モーターをリサイクルするための大量ソリューションが必要になる。課題は、磁石、銅、電磁鋼板をいかに傷めることなく、コスト効率よく抽出できるかである。したがって、大量リサイクルのプロセスを規模拡大する場合、環境への影響を最小限に抑え（有害な化学物質やエネルギーを大量に消費するプロセスを使用しない）つつ、重要な素材と重要でない素材の両方の回収率を高くする必要がある。業界にとっての課題は、これらをすべて実現しつつ、事業として成り立たせることである。

レアアース類のリサイクルには、数多くの革新的な手法が現れつつあり、水素注入による磁石の解体から、溶媒抽出プロセスの使用まで多岐にわたる。レアアース類の問題は、品質を維持できるかどうかである。一次レアアース類を用いない、完全な循環経済を築くことが、最終的な目標である。銅は、品質劣化なく何度でもリサイクルできるものの、含浸があると材料の抽出が困難になる。

電磁鋼板を十分に解体してリサイクルすることが主な問題点となる。各積層の間に絶縁層が挟まっていることや、シリコン含有量が高いことを考えると、これまでの鋼板グレードではリサイクルできない。したがって、電磁鋼板をリサイクルするための新しいプロセスを開発する必要がある。

2

LCAおよびネットゼロCO_2を見越して設計されたモーター

モーターが最初から解体を想定し、環境への影響が最小限になるように設計されていれば、リサイクルの作業がはるかに楽になる。これは、可逆性のある接着剤や含浸材料を用いたり、コンポーネントが解体しやすいようにしておくなどといったことである。

内部に永久磁石を入れ込んだ現在の電気モーターの設計では、磁石がロータの内部に埋め込まれ、強力な接着剤で接着されているため、リサイクルしにくい。これでは磁石がもろく、壊れてしまう可能性が高いため、機械的に抽出しようとしても無理である。熱処理を行えば、磁石をもっと抽出しやすくできるが、この工程では、加熱された接着剤から環境に有害な煙が放出される。さらに、長時間熱を加えると、磁石が制御不能となりロータから飛び出す危険さえある。

電気モーターのバリューチェーンの脱炭素化も重要である。鉄鋼、銅、磁石の製法はいずれもエネルギー消費量が極めて多い。低炭素エネルギー源への切り替え、もしくはエネルギー消費量の低い別の製造プロセスが必要になる。

ライフサイクル

1. リサイクル工場の試験運用 → 量産電気モーターリサイクル → 電気モーターの閉ループのバリューチェーン
2. LCAおよび解体を見越した設計 → 脱炭素化の進んだ製造とリサイクル → LCAにフォーカスしたバリューチェーン

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | …

用語集

略語	解説
ALM	積層造形法（additive layer manufacturing）は、本来ラピッドプロトタイピングに用いられていたもので、2次元層を多数積み重ねることによって3次元部品を作成する。3D印刷から電子ビーム溶解まで、さまざまな形態の積層造形がある。
dV/dt	単位時間当たりの電圧変化量。
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）。
Nd-Fe-B磁石	ネオジム（レアアース類）、鉄、ホウ素の化合物でできた、最も広く用いられている永久磁石。
SMC	軟質磁性複合材料（soft magnetic composite）は、絶縁層でコーティングされた、強磁性粉末粒子であり、複雑な形状に成形できる。
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