

特集：新型MAZDA3

11

新型MAZDA3 M Hybrid デバイス開発 Development of All-New Mazda3 M Hybrid Device

吉田 勝正*¹ 田村 和寛*² 中上 信宏*³ 西田 史彦*⁴
 Katsumasa Yoshida Kazuhiro Tamura Nobuhiro Nakagami Fumihiko Nishida
 坂上 翔*⁵ 仲間 彰子*⁶ 楊 殿宇*⁷ 中村 浩之*⁸
 Sho Sakagami Akiko Nakama Tenyu Yan Hiroyuki Nakamura

要 約

マツダでは、CO₂排出削減・燃費向上の目標達成に向け「ビルディングブロック戦略」を推進している。今後も、内燃機関はグローバル市場における自動車の主要な動力技術であり続けるとの予測に基づき、内燃機関の理想を追求し続けつつ、最適な制御技術や効率的な電動化技術を組み合わせてゆく戦略である。

今回、お客様へ優れた環境性能を提供し、かつ人間中心を考慮した電動化技術を目指して、新型MAZDA3では新たにM Hybridを開発した。減速エネルギーの回生、モータアシストにより燃費を向上、更に迅速再始動や変速アシストによりドライバビリティを改善した。また、居住空間を犠牲にせず重量等配分・低重心にも貢献するパッケージングを実現している。本稿では、中核デバイスとなるM Hybrid battery, Integrated Starter-Generator (以下、ISG), DC/DCコンバーターについて紹介する。

Summary

Mazda is driving its “Building-Block Strategy” to reduce CO₂ emissions and to enhance fuel economy. Based on the prediction that the internal combustion engine will remain the key power technology in the global car market, we will propel the strategy to balance optimal control technologies and efficient electrification technologies, as pursuing the ideal internal combustion engine.

In order to realize a human-centered electric technology while offering excellent environmental performance to all customers, All-New Mazda3 has introduced the newly developed “M Hybrid” technology. Regeneration of deceleration energy and motor assist contribute to elevate fuel efficiency. Quick restart and shift assist improve drivability as well. Furthermore, we have achieved the packaging contributing ideal weight distribution and low gravity center without sacrificing roominess. In this article, we introduce the core technology “M Hybrid”; M Hybrid battery, Integrated Starter-Generator (hereafter abbr. ISG), and DC/DC converter.

Key words : EV and HV systems, Motor, Inverter/Converter, Power Storage System, Energy Regeneration

1. はじめに

マツダでは、CO₂排出削減・燃費向上の目標達成に向け「ビルディングブロック戦略」を推進している。内燃機関の理想を追求し続けつつ、最適な制御技術や効率的な電動化技術を組み合わせてゆく戦略である。

新型MAZDA3では、新たに開発したマイルドハイブリッドシステムであるM Hybridを搭載した (Fig. 1)。本稿ではその中核デバイスとなるM Hybrid battery,

ISG, DC/DCコンバーターについて紹介する。



Fig. 1 ALL-NEW MAZDA3

*1~3, 5, 6, 8 電駆・PT制御部品開発部

Electric Drive & PT Control System Component Development Dept.

*4 パワートレイン企画部

Powertrain Planning Dept.

*7 技術研究所

Technical Research Center.

2. 開発コンセプト

新型MAZDA3にて新たに開発したM Hybridでは、お客様へ優れた環境性能を提供しつつ、人間中心を考慮した電動化技術を目指して以下のコンセプトとした。

＜スモール商品群への一括企画＞

- ・スモール商品群に展開可能な小型/軽量システム
- ・人間中心のパッケージ/理想の重量配分

＜効率的な電気駆動＞

- ・減速エネルギーの回生による燃費向上
- ・ISGによるドライバビリティの改善
- ・ISGとのハーネス距離の最小化
- ・DC/DCコンバーターの高容量化

＜安定した電源供給と安全性＞

- ・衝突安全性 (M Hybrid battery)
- ・確実なエンジン再始動
- ・バッテリー寿命 (M Hybrid battery) の確保

3. パッケージング

乗員の優れた快適性を備え、居住空間を犠牲にしないパッケージングを実現することを目指した。

電動化デバイスを接続するハーネスが長いと電氣的損失が増加し効率的に駆動することが難しくなる。したがって、接続するハーネスの距離を最小化するために、電動化デバイスは集約してレイアウトする必要がある。

ISGは従来のオルタネータを置換し内燃機関横にレイアウトするため、ISGを中心に電動化デバイスをエンジンルーム近くへ搭載した。M Hybrid batteryをフロア下車室外、DC/DCコンバーターはヘッドライト裏としパッケージングを最適化した (Fig. 2)。

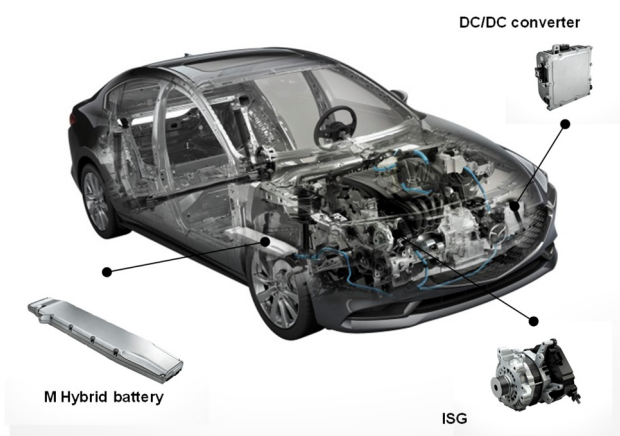


Fig. 2 Packaging for M Hybrid

これらの効果により、電氣的損失の低減とキャビン内の乗員スペース/荷室容量の確保を高いレベルで両立するとともに、ホイールベース間にバッテリーを配置し重量等配分・低重心なパッケージングを実現している。

4. デバイス概要

4.1 M Hybrid battery

新型MAZDA3 M Hybridに搭載するM Hybrid batteryにはリチウムイオンバッテリー (以下、LiB) を採用しており、負極にチタン酸リチウム (以下、LTO)を用いる東芝製のSCiB™から構成されている。

M Hybrid batteryの主要SPECはTable 1のとおり。

Table 1 LiB Specification

| | Specification |
|------------------------------------|---------------|
| Size(L x W x H) mm | 800x177x55 |
| Weight | 9.5kg |
| Nominal Voltage | 21.6V |
| Nominal Capacity | 0.216kWh |
| Charge Power (25°C, SOC50%,10s) | 10kW |
| Discharge Power (25°C, SOC50%,10s) | 12kW |
| Thermal Management | Passive |



(LiB appearance)

M Hybrid batteryではSCiB™の特徴を活かし、減速エネルギーの回生による燃費向上、衝突時の安全性及びバッテリー寿命の確保を実現している。

(1) SCiB™の特徴

LTOの優れた特徴として、高い安全性/長寿命/優れた低温性能/高入出力/広い実効SOC (State Of Charge: 充電率) レンジがある。外部からの圧力などによって内部短絡が発生しても、LTOが高抵抗に相変化する電流が流れにくくなることで熱暴走に至らない為、発煙・発火の可能性が極めて少ない。低温環境下でもLTO負極上に金属リチウムが析出しないため、低温環境下における充放電によっても劣化が少なく幅広い温度環境にて燃費へ貢献できる。大電流での充放電が可能のため、減速時に大き

な再生電力を蓄電し、エンジンの始動に必要な大電流を供給することが可能である。LTO電極で構成されるセルは、カーボン負極のLiBより公称電圧が低いためエネルギー密度は低い。しかし、充放電に伴う体積変化が十分小さく、信頼性を保証するための拘束部材を最小限に抑えることができる。また、セルの内部抵抗を低くし発熱量を抑えるとともに、筐体に放熱性の高いアルミダイキャストを採用している。これにより、補機による冷却が不要となるため、バッテリーパックの高密度化及び静粛性、電力効率が向上した。

(2) 減速エネルギーの回生による燃費向上

減速エネルギーのうちブレーキの熱として大気に捨てているエネルギーを最大限回収するために必要な容量を決定している。WLTCモードにて必要な電力収支をカバーするには200kJは必要であり(Fig. 3), 更に実用的な消費電力も考慮して十分な容量を確保している。

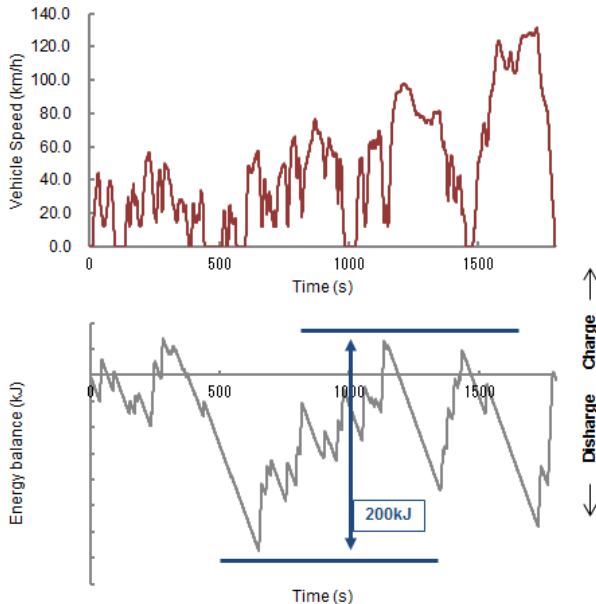


Fig. 3 WLTC Power Profile

(3) 衝突安全性

LiBの電解液に可燃性液体を用いることが一般的だが、内部短絡や圧壊時に発煙・発火の可能性がある。一方、フロントシート下車室外では側突や床下干渉から保護するため高い安全性が求められる。

安全性のコンセプトとして3つの施策を実施している。まず、車両前面・側面・後面いずれの方位からの衝突に対しても最も有利な車両の中心（前後輪軸間及びフロアフレーム間）にバッテリーパックを配置している (Fig. 4)。次に、バッテリーパックの筐体にアルミダイキャストを用いることで強度を保ちつつ軽量化を図っている。最後に、バッテリーパック内に高い安全性を持ったSCiB™を採用した。

これらによりバッテリーパックではECE-R100認証を取得し、高い安全性をもつことを立証した。

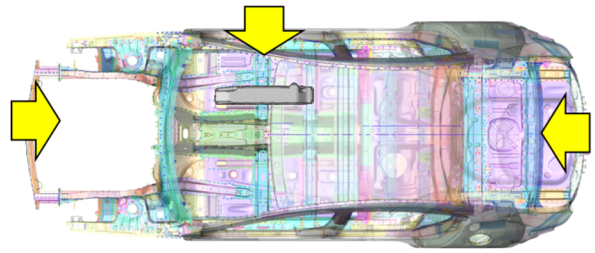


Fig. 4 Crush Safety Concept for LiB

(4) バッテリー寿命

LiBが劣化すると燃費性能やアイドリングストップ頻度に影響するため、お客様の使い方を考慮しながら劣化を抑制することが商品性を高めることにつながる。そのため、バッテリー寿命を予測するモデルを構築し効率的に開発を行った。

『充放電電圧』『走行中のバッテリー温度』『SOC』は制御因子、『放置中の温度』は外乱として考え、走行中のサイクル劣化及び放置中の経年劣化をモデル化した。バッテリー劣化を表す指標として『容量』『内部抵抗』があり、所定の温度・充放電パターン・SOC範囲を設定し、バッテリーパックの実機での内部抵抗上昇率とモデルによるシミュレーション結果を検証した。その結果、Fig. 5に示すとおり高精度にバッテリー寿命を予測可能なモデルを構築した。

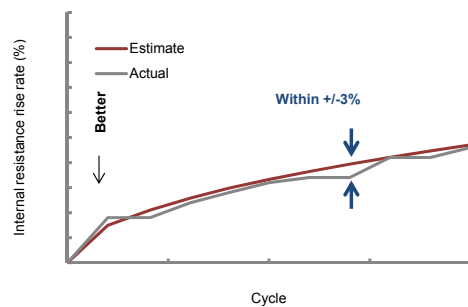


Fig. 5 Battery Lifecycle Model

次に構築したモデルを用いて、制御因子と外乱を振り、実車走行を想定したサイクルモードと駐車時を想定した保存モードとの組み合わせによる劣化を予測した。その結果、バッテリー温度・SOC・充放電電圧を制御することで経年時にも目標の性能を維持できることを確認した。

(5) サーマルマネジメント

バッテリー寿命を確保するために走行中のバッテリー温度を所定範囲内に制御する必要がある。バッテリー温度が変動する主要因は、充放電による自己発熱、バッテ

リーパックからの放熱、バッテリーパック周辺環境からの受熱である。

M HybridではLiBに入出力する電流が大きくなるため、内部抵抗が大きく低減したセルを採用している。バッテリーパックからの放熱量を向上させるために、セルの表面積が最も大きい面を車両下側にレイアウトするとともに、熱伝導性の高いアルミ製のケースに放熱している。

また、車両アンダーカバーのエアインテーク形状を工夫し走行風をアルミケースの下面に効率的に導入しており、空力性能を犠牲にせずLiBの冷却効率を向上させた (Fig. 6)。バッテリーパック周辺環境からの熱流入は、CFDにより経路を特定し遮熱を行うことで影響を最小限に抑えている。また一般に、アルミダイキャストへの泥付着による腐食が課題となるが、酸洗いにより酸化皮膜除去・アロジンによる化成処理・カチオン塗装を実施し十分な腐食抑制期間を確保している。

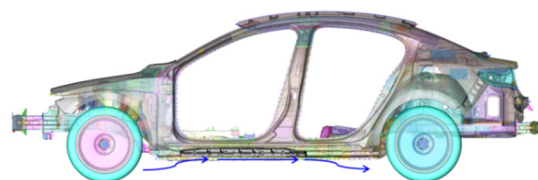


Fig. 6 Wind Flow Model

所定の外気温・車速・充放電パターンにて実機でのバッテリー温度を検証した。その結果、Fig. 7に示すとおり、SCiB™の劣化特性・制御により強制空冷や水冷/油冷のような冷却機能を用いなくとも、目標性能を満足することができた。

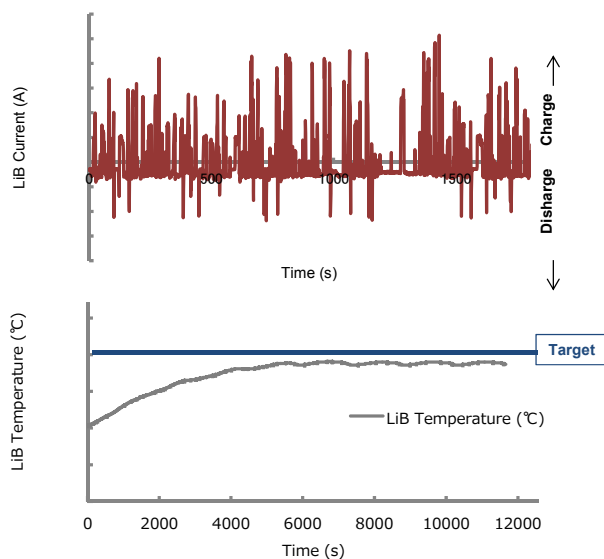


Fig. 7 Battery Thermal Model

(6) 状態検出

SCiB™は通常のLiBと異なり比較的SOCの高い領域で

劣化が抑制される傾向にあり、SOCが低いほど入力性能が高く回生による燃費効果が高くなる。また、安全性の確保と劣化の抑制のために充放電時の上下限電圧を制御する必要があり、エンジン再始動を確実にを行うためにはLiB温度、SOC、SOH (State Of Health: 劣化状態) を高精度に推定する技術が重要となる。

セルの最大温度、最小温度を計測可能な位置にサーミスタを取り付け、バッテリー温度をモニタしながら充放電を制御している。

起動時には開放電圧からSOC推定を行う。走行中のSOCはパラメータを逐次学習する電池モデルから導出した起電力を用いて推定したSOCと電流積分によって推定したSOCに対して、カルマンフィルタを適用することで推定している。これにより長時間走行時でも電流積分によるSOC推定誤差を抑制し高精度化を実現した (Fig. 8)。

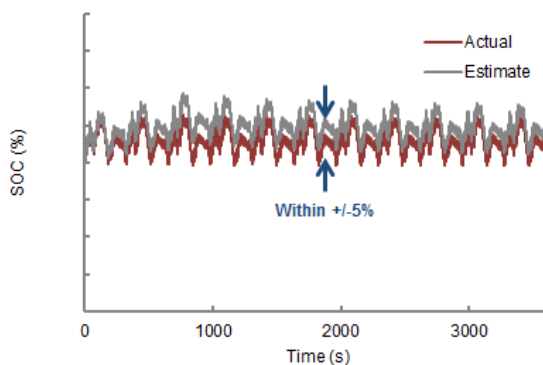


Fig. 8 SOC Model

SCiB™の特徴として容量低下は微小であることから、SOHは内部抵抗の推定技術の構築に重点をおいて開発を進めた。所定の周期にて充放電の切り替わりを検出し、電圧差 ΔV 及び電流差 ΔI を用いて逐次最小二乗法を実行、バッテリー温度・SOCにより補正を行い推定している。その結果、目標の精度以内に内部抵抗を推定することが可能であることを検証した (Fig. 9)。

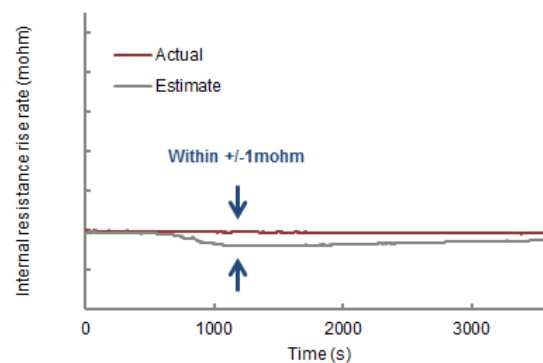


Fig. 9 SOH Model

4.2 ISG

新型MAZDA3 M Hybridではベルトを用いてエンジンにトルクを伝達するISGを採用している。従来のオルタネータの構造をベースとして、電流制御回路部をインバータに変更することで、発電機能に加えて駆動機能を実現している。ISGの主要SPECは下記のとおり。(Table 2)

Table 2 ISG Specification

| | Specification |
|--|---------------|
| Max. output power (Motoring) @21.6V | 5.1kw |
| Max. output torque (Motoring) @21.6V | 48.5Nm |
| Nominal output current (Generating) @24.0V | 130A |
| Motor Diameter | φ158 |
| ISG total length | 182 |
| Cooling method | Air cooling |



(ISG appearance)

ISGはこれらの機能を活用して車両の燃費、ドライブビリティの向上に貢献している。

(1) 燃費への貢献

下記三つの機能を実現することで車両の燃費向上に貢献している。

①CoM (Change of Mind : 燃料停止～エンジン停止までの間のエンジン再始動) の実現

ベルト伝達方式を採用することにより、車が停車するよりも前の減速中からエンジンを停止することで、燃料消費量を低減する機能を実現している。また、正弦波PWM制御を採用することで駆動時の消費電流を低減し、電流精度を向上させることで、

CoM及びCoM時の電源保証を実現している。

②高効率発電の実現

MOS-FEを用いた同期整流発電の採用により、発電効率向上を実現している。

③モータアシスト

加速時のモータアシスト等のさまざまなISGの駆動機能を織り込み、エンジン・トランスミッションと協調することで最適なエネルギー効率を実現している。

(2) ドライブビリティへの貢献

24V電源の活用と正弦波PWM制御の採用により、トルク実行精度向上と高トルク化を実現している。その結果、従来のスタータと比較して短時間でのエンジン再始動や、シフトアップ時のショック低減制御を実現し、スムーズな車両発進、変速を実現している。また、ベルト伝達を用いてISGの再始動トルクをエンジンに伝達することで、従来スタータがトルクを出せなかった高回転までトルクを出し、エンジン再始動時のエンジン振動を低減している。加えて、スタータを用いたエンジン再始動の場合に発生する歯車の嵌合音が無くなり、20dB以上のノイズ低減を実現している (Fig. 10)。

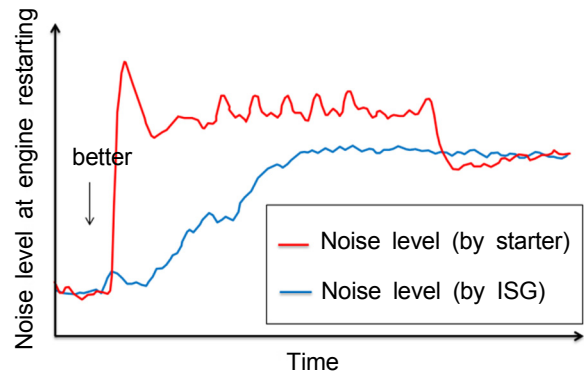


Fig. 10 Noise Level at Engine Restarting

(3) 信頼性の確保

ISGが温度上昇した場合には、部品保護のためにISG機能に制約をかける必要があり、上述のモータアシスト等の機能を実現できなくなる。ISG機能をより安定的に、より広範囲で実現するために、ISGのサーマルマネジメントが非常に重要である。そのために、下記2項目の対応を実施している。

①エンジン吸気側、車両前側にISGを搭載することでエンジンからの熱を受けにくくしている。エンジン排気側への搭載に比べて雰囲気温度を10℃以上低減している。

②正弦波PWM制御の採用により駆動トルク精度・電流精度を向上させることで、電流によるジュール熱の発生を抑制し、ISG内部の温度上昇を抑制した。

4.3 DC/DCコンバーター

新型MAZDA3 M Hybridでは、LiBに蓄えた回生電力を12V系電装品に適した電圧に変換する24V DC/DCコンバーターを採用している。主要仕様をTable 3に示す。高温に対する耐久性を必要とし、更にスペースが限られるエンジンルームに搭載するため、車両の充放電収支からDC/DCコンバーター容量を最適化し、小型化を図っている。またDC/DCコンバーターは強制ファンや水で冷却するのが一般的だが、車両の冷却機構を簡素化するため、走行風やラジエータ冷却用の電動ファンによる風流れを有効に利用し、自然空冷による冷却を実現している。

Table 3 DC/DC Converter Specification

| | Specification |
|--|-----------------------|
| Max Continuous Output Power @Tair≤70°C | 1.7kw (120A@13.5V) |
| Size(L x W x H) | 94 x 174 x 180mm |
| Cooling method | Air cooling |



(DC/DC Converter appearance)

(1) DC/DCコンバーターの出力容量の最適化

DC/DCコンバーターの発熱量は出力電流に依存する。また放熱のための冷却構造はサイズに影響する。よってDC/DCコンバーターの小型化を実現するためには、DC/DCコンバーターの出力容量の適正化が必要である。以下により、出力容量の最適化を実現している。

- ①各季節、走行シーンにより異なる車両消費電力を算出し、最適なDC/DCコンバーターの出力容量を決定している。
- ②消費電力の大きいヒーター系部品を通常の12V鉛バッテリー側から、24V電源側に接続している。これによりDC/DCコンバーターが供給する12V鉛バッテリー側の消費電力を12%低減し、DC/DCコンバーターの出力容量を最適化している。

(2) 自然空冷による冷却（サーマルマネージメント）

車両冷却システムの簡素化を図るために、自然空冷での冷却方式を採用している。車両の熱流体解析により、DC/DCコンバーターの放熱フィンに最も効果的に当たる流入風 (Fig.11 (A)) 及び放熱した空気を排気する流出風 (Fig.11 (B)) を特定している。その結果、車両後方側にフィンを設置し、車両の風流れを最大限活用することで、放熱に必要な冷却風量を確保している。これにより、エンジンルームでの自然空冷を実現している。

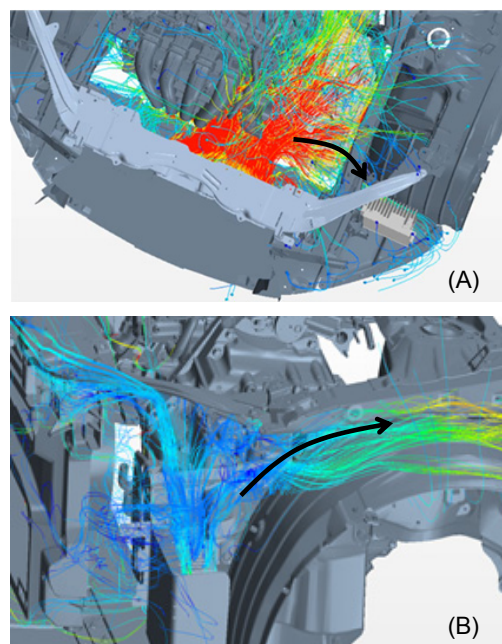


Fig. 11 Thermal & Fluid Analysis

5. おわりに

スモール商品群に一括で展開可能なマイルドハイブリッドを目指し、高効率かつコンパクトなM Hybridを実現することができた。減速エネルギーの回生、モータアシスト、CoM、高効率発電による燃費向上とともに、ISGによる迅速再始動や変速アシストによりドライバビリティの改善にも貢献することができたと考えている。また、乗員の優れた快適性を備えつつ、居住空間を犠牲にせず重量等配分・低重心にも貢献するパッケージングを実現することができた。

今後も人間中心を考慮した電動化技術の開発を継続してゆく。

参考文献

- (1) 高橋ほか：減速エネルギー回生システム“i-ELOOP”の開発、[マツダ技報, No.30, pp.37-42 \(2012\)](#)
- (2) 高橋ほか：減速エネルギー回生システム“i-ELOOP”のデバイス開発、[マツダ技報, No.30, pp.43-50 \(2012\)](#)

■ 著 者 ■



吉田 勝正



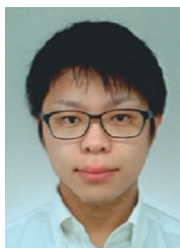
田村 和寛



中上 信宏



西田 史彦



坂上 翔



仲間 彰子



楊 殿宇



中村 浩之