

特集：MAZDA MX-30

06

BEVのバッテリーを使い切る技術 Maximizing Battery Performance for BEVs

橋坂 明^{*1} 若山 敬平^{*2} 江角 圭太郎^{*3}
Akira Hashizaka Norihira Wakayama Keitaro Ezumi
田中 健治^{*4} 塚本 直樹^{*5} 岡田 光平^{*6}
Kenji Tanaka Naoki Tsukamoto Kohei Okada

要約

一般的に、BEV用の駆動用バッテリーの入出力可能電力は温度や充電状態に大きく依存するため、駆動用モーターの出力や回生発電量が減少し、走りの魅力や航続可能距離に影響が出る。MX-30 EV MODELでは、「入出力可能電力を余すことなく使う」、「入出力可能電力を安定させる」、「入出力可能電力が低い状態を補う」の3つの観点で、厳しい温度・充電状態でもバッテリーのポテンシャルを可能な限り使うための要素技術群を開発した。これにより、マツダが目指す人馬一体の走り、実用的な航続可能距離を確保することができた。本稿では、MX-30 EV MODELの電気駆動システムの紹介とともに、この要素技術群である「バッテリーを使い切る技術」について解説する。

Abstract

The inputtable and outputtable power of batteries for BEVs, in general, largely depends on the temperature and charging state; therefore, output power of drive motor and input power of regeneration may decrease, which affects driving performance and cruising range. We have developed elemental technologies to use up potential performance of batteries as much as possible even in sever temperature and charging state through the MX-30 EV Model. The technologies were developed from the three perspectives of “using up inputtable and outputtable power”, “stabilizing inputtable and outputtable power” and “compensating for the low power state”. As a result, the technologies contribute to Mazda’s concept of “Jinba Ittai” and the practical cruising range of the MX-30 EV Model. We explain, in this paper, the electric drive system of the MX-30 EV Model and the elemental technologies, “Maximizing Battery Performance for BEVs”.

Key words : EV and HV system, Energy control system, Energy management, Battery technology

1. はじめに

MX-30 EV MODEL (以下MX-30) では、BEVならではの駆動力のつながり感・応答の自由度を活かし、マツダが目指す人馬一体の考え方を実現している。具体的には、エレクトリックG-ベクタリングコントロールプラス(e-GVC Plus) やステアリングホイールパドル、モーターペダルといった走る歓びを加速させる新機能を採用し、走りの魅力品質を進化させた(詳細は別稿参照)。また、駆動用バッテリーの容量は35.5kWhとし、LCA(ライフサイクルアセスメント)によるCO₂排出量を抑えつつ、買い物や通勤など日常生活でのお客様の実用的な使用環

境に見合った航続可能距離を確保している。

一方、BEVのパワーソースは基本的には駆動用バッテリーのみである。駆動用バッテリーの入出力可能電力は温度や充電状態などにより制限されるため、走りの魅力品質や航続可能距離に影響がある。そこで、MX-30では、さまざまな温度・充電状態でバッテリーの入出力性能を引き出すための電気駆動システムならではの要素技術群を採用し、走りの魅力品質を確保すると同時に、限られたバッテリー容量で実用的な航続可能距離を確保した。本稿では、この要素技術群である「バッテリーを使い切る技術」について解説する。

*1~3 PT制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

*4~6 走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance
Development Dept.

2. 電気駆動システム構成

2.1 ハードウェア構成

Fig. 1 に MX-30 の電気駆動システムの構成を示す。駆動用モーターは永久磁石同期モーターであり、減速機を介してドライブシャフトへ接続される。リチウムイオン電池で構成される駆動用バッテリーからの直流電流はインバーターにより三相交流電流に変換され、駆動用モーターにより走行する。減速時はブレーキユニットと協調しながらモーターで発電をおこない、減速エネルギーを電力に変換して駆動用バッテリーに蓄える（協調回生）。DC/DC コンバーターは高電圧を 12V に降圧することで、ヘッドライトや各コントローラーなどの 12V で動作する補機への電力供給をおこなう。電動空調システムはコンプレッサー（ヒートポンプ）と PTC ヒーターで構成され、駆動用バッテリーから電力が供給される。

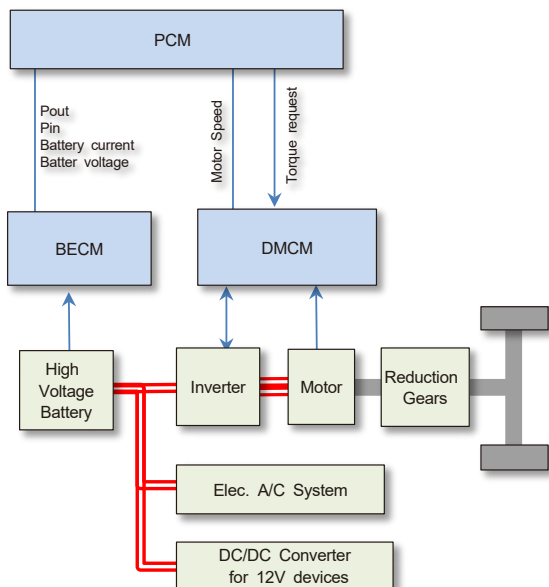


Fig. 1 Schematic Diagram of MX-30 Electric Drive System

2.2 コントローラー構成

MX-30 は、駆動用バッテリーや駆動用モーターといった個別ユニットごとにコントローラーを設け、各ユニット状態をモニターし、制御している。同時に、Powertrain Control Module (PCM) が、それら個別ユニットと協調し、全ての電気駆動システムの動作を統合制御している。

Battery Energy Control Module (BECM) は、バッテリー充電量や温度などの状態を把握し、バッテリーを保護するための入出力可能電力を演算し、これら情報を PCM に送信している。

Drive Motor Control Module (DMCM) は、PCM が送信する要求モータートルクの実現を担う。駆動用バッテリーからの直流電圧を交流に変換し、走行に必要な電力

を駆動用モーターに供給している。また、コイル等各部温度やモーター回転数などの状態を把握し、これら情報を PCM に送信している。

PCM は、ドライバーの意図どおりに車両を駆動・減速させるため、BECM や DMCM からの情報と運転者のシフトレバー操作やアクセル操作を統合的に判断し、駆動用モーターのトルクをコントロールしている。

2.3 制御機能と要素技術

PCM を中心とした電気駆動システムは多くの機能をもっており、それらは種々の要素技術によって実現している。Fig. 2 に、要素技術のイメージを示す。

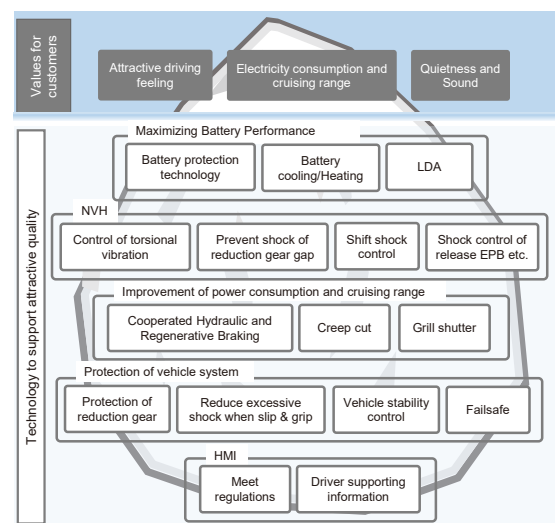


Fig. 2 The Iceberg Structure of Electric-Driving Technologies

例えば、システム保護ではモーターインバーターの冷却や、駆動輪がスリップ状態から復帰する際の衝撃を緩和する。電費（電力消費率）・航続可能距離の向上では、空気抵抗を低減するグリルシャッターなどを採用した。クリープカットはブレーキペダルを踏んで停車している際、クリープトルクをゼロとして電力消費を抑えるものだが、クリープ復帰時にはショックを発生させない制御技術が必要となる。また、本稿の主題である「バッテリーを使い切る技術」もこれら要素技術の一つである。要素技術に支えられ、走りの魅力品質や優れた電力消費率などの性能を提供している。

3. バッテリーを使い切る技術

3.1 バッテリーを使い切る意義

エンジンとバッテリーの 2 つのパワーソースをもつハイブリッド車とは異なり、BEV では駆動用バッテリーが唯一のパワーソースである。そのため、走りの魅力品質を安定的に得るには、温度や充電状態によって変化しないバッテリー出力性能が必要である。また、減速エネルギーを無駄なく回生し、電費を向上するためにも、安定

したバッテリー入力性能が必要である。

しかしながら、一般的な駆動用バッテリーにおいては、寿命や信頼性確保のための入出力可能電力が設定されている。Fig. 3 にリチウムイオン電池の出力可能電力の傾向を示す。SOC はバッテリーの充電状態を示し、残充電容量が大きいほど SOC は高くなる。一般的に低温（氷点下）や低 SOC での出力可能電力は、駆動力（走り）にとって満足のいくものにならない。また、入力可能電力については、低温や高 SOC で低くなり、減速回生の機会と電力量が減る。

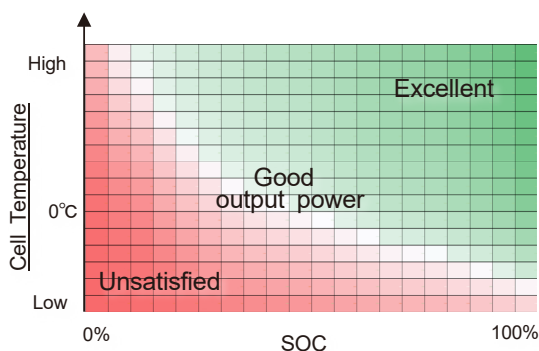


Fig. 3 Dependency of Outputtable Power of Li-Ion Batteries on Cell Temperature and SOC

既存のリチウムイオン電池の性能向上をはじめ、全固体電池などの新型電池開発といった取り組みがされているが、満足のいく入出力特性をもつバッテリーの実現には時間を要すると考える⁽¹⁾⁽²⁾。一方で、BEV の普及は喫急の課題であり、バッテリーの進化を待てない。そこで、MX-30 では既存のバッテリーのポテンシャルを最大限に使い切る技術、すなわち、

- ・ 入出力可能電力をマージンなく使い切る技術
 - ・ 温度管理などにより入出力可能電力を安定させる技術
 - ・ 入出力可能電力の低下を適切に補う技術
- を作り込んだ。これら技術により、低温や低 SOC での駆動力を確保するとともに、回生量の減少も最低限に抑えた。Fig. 4 に、バッテリーの使い切り技術の概念を示す。

3.2 入出力可能電力を守る制御

Fig. 5 に、走行中の駆動用バッテリーの使い方のイメージを示す。DC/DC コンバーターでは一定以上の電力が消費され、空調作動時は電動空調システムでも一定以上の電力が使用される。モーターインバーターへの電力は運転者の要求駆動力に応じて増減するが、出力可能電力が十分でない場合、駆動力を制限しないと、駆動用バッテリーの出力可能電力を越えてしまう。駆動用バッテリー自身は入出力を制限することはできないため、モーターインバーターなどの負荷側の消費電力を制御することで、入出力可能電力を守る必要がある。

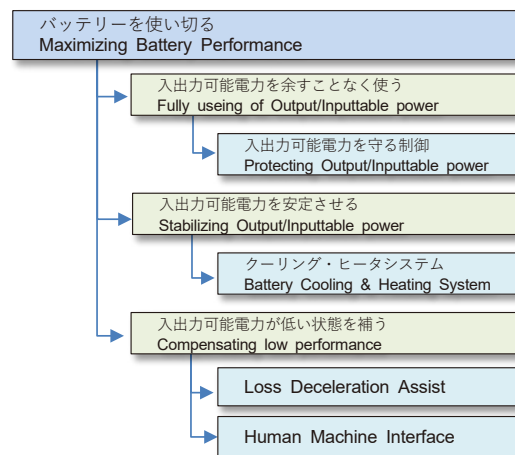


Fig. 4 Tree Diagram of Maximizing Battery Performance Technologies

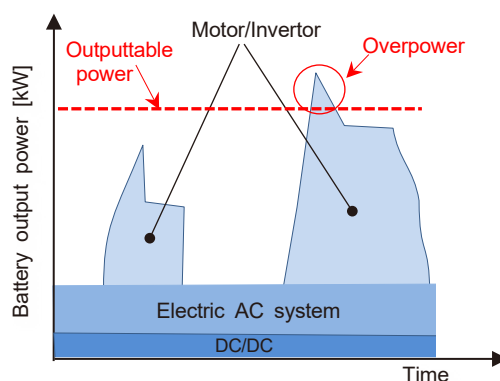


Fig. 5 Time-Chart of Battery Power Use

減速においては、モーターインバーターで減速回生を行うため、電動空調システムと DC/DC コンバーターの消費電力を差し引いた回生電力がバッテリーに入力される。出力側と同様、モーターインバーターの電力マネジメントを行わないと、入力可能電力を超えるケースがある。

Fig. 2 に示したように、BECM は入出力可能電力 (P_{in} , P_{out}) をリアルタイムで演算し、PCM に送信する。PCM は、バッテリー電流・電圧やモーター速度等の情報を受信し、 P_{in} と P_{out} を守るように DMCM にモータートルク出力を指令する。

バッテリー出力電力はモーターが力行運転の場合、(1) 式となる。

$$P_{bat} = T_m \cdot N_m / \eta_{mot} + P_{dcdc} + P_{ac} \quad (1)$$

P_{bat} : 駆動用バッテリー出力 [kW]

T_{mot} : モーター軸トルク [N・m]

N_{mot} : モーター速度 [rad/sec]

η_{mot} : モーターインバーター総合効率 [-]

P_{dcdc} : DC/DC コンバーター消費電力 [kW]

P_{ac} : 電動エアコンシステム消費電力 [kW]

MX-30 では、 N_{mot} は車速に依存するため、 T_{mot} を (2) 式

のとおりに制限することで、 P_{bat} を P_{out} 以下にすることができる。

$$T_{mot} \leq (P_{out} - P_{dc} - P_{ac}) \cdot \eta_{mot} / N_{mot} \quad (2)$$

ここで、 η_{mot} を得るにはあらかじめ PCM に実装しておいたマップを参照する手法が簡便である。ただし、 η_{mot} はモーターインバーター内部の温度の依存性や、個体バラツキをもつ。そのため、マップにより η_{mot} を得るオープンループ制御のみで、 P_{out} を逸脱しないようにするには、誤差を考慮したマージンを確保して T_{mot} を制限する必要がある。

Fig. 6 に、マージンを確保した制御で、アクセル開度全開で加減速を繰り返した際の P_{bat} と P_{out} の挙動を示す。モータートルクは正値が駆動、負値が回生を示し、 P_{bat} と P_{out} は正値が充電（入力）、負値が放電（出力）を表している。加速時に P_{bat} は低下（バッテリー出力が増加）しているが、 P_{out} を超えることはない。しかしながら、 P_{out} に対して大きなマージンが確保されており、 P_{out} を使い切れていないことが分かる。

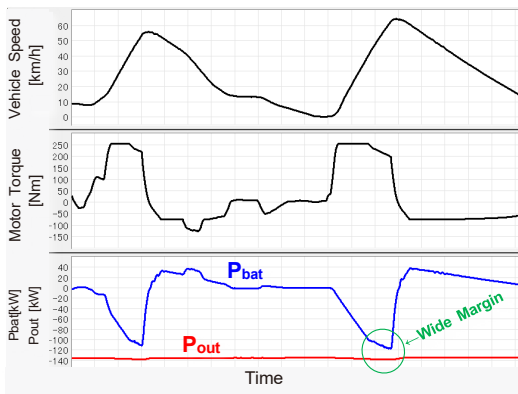


Fig. 6 Comparison of P_{bat} and P_{out} without Feed Back Control

そこで、 P_{bat} を観測し、(3) 式により η_{mot} をリアルタイムに演算し、 T_{mot} を制限するフィードバック要素を取り入れた。

$$\eta_{mot} = T_{mot} / (P_{bat} - P_{dc} - P_{ac}) \cdot N_{mot} \quad (3)$$

(3) 式右辺の分子、もしくは分母が 0 近傍になる場合や過渡時においては、 η_{mot} の誤差は大きくなる傾向がある。また、 P_{dc} などの観測値の誤差も無視できない。そのため、本制御ではカルマンフィルターによる η_{mot} の精度向上を行っている。

Fig. 7 に、フィードバック制御を実施した際の実際の挙動を示す。ここで、モーター内部の温度を氷点下に保ち、 η_{mot} の誤差を生じやすいようにした。加速時に P_{bat} が低下（バッテリー出力が増加）するが、モータートルクを適切に制限することで、 P_{bat} が P_{out} を超えることな

く、ほぼ重なっていることが分かる。つまり、 P_{out} を余すことなく、ほぼ使い切った走行ができています。

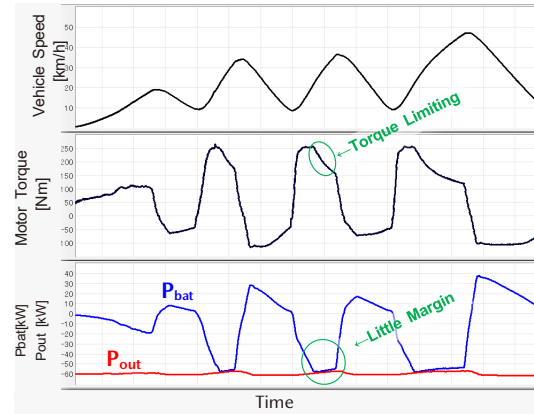


Fig. 7 Comparison of P_{bat} and P_{out} with Feedback Control (Kalman-Filter)

3.3 バッテリークーリング・ヒーターシステム

MX-30 では、入出力可能電力を良い状態に保つため、空調システムの冷媒を用いたクーリングシステムを構築した。Fig. 8 にシステムの概要を示す。空調システムは、冷房と暖房の双方に使用可能なヒートポンプシステムを採用している。駆動用バッテリーを構成する各バッテリーモジュールには、冷媒との熱抵抗が最小になるように冷媒の流路を設置し、バッテリーが高温になった時のみ、バッテリークーリング用の膨張弁を開き冷媒をバッテリー側にも流している。

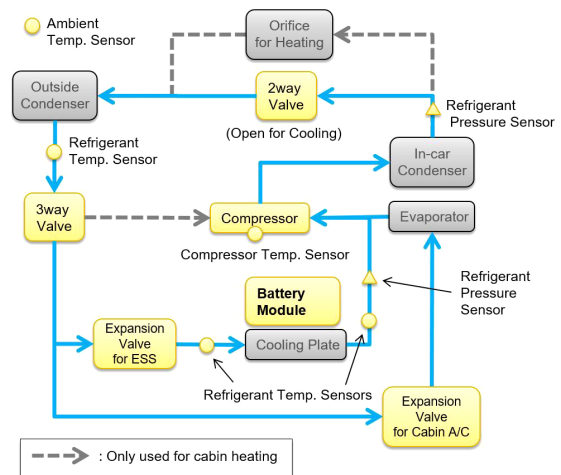


Fig. 8 Schematic Diagram of Cooling System for the Battery Module

このクーリングシステムの課題は空調と冷却の両立である。外部充電中も積極的に冷却を実施することで、走行開始時に温度が低い状態を作り出し、走行中の冷却の頻度を抑制している。また、走行中に冷却が必要となった場合も、走りの魅力を失わない範囲で走行性能の低下

を許容し、空調との両立を図っている。

入出力可能電力はバッテリーの劣化が進んだ場合も減少する。MX-30 では、走行を終了して駐車する際にバッテリー温度が高い場合は、駐車中の冷却も可能にしている（実施可否は選択可能）。これにより、高温状態での放置の頻度を下げ劣化を抑えている。

低外気温下でも出力可能電力を確保するために、バッテリーヒーターを搭載した。バッテリー温度が一定以下になった際、ヒーターに通電することで温度降下を防ぎ、走行性能の低下を抑制する。一方で、駐車中にヒーターを作動させると、SOCの低下が懸念される。そこで、運転者がヒーターの作動の許可／禁止を選択できるようにし、航続可能距離と走りのバランスを調整できるようにした。なお、バッテリーヒーターは低外気温下での充電時間の短縮にも貢献している。

3.4 Loss Deceleration Assist

MX-30 では、走行中にアクセルオフした時、モーターでの回生（発電）により通常のカソリン車のエンジンブレーキと同様の減速力を発生させている（アクセルオフ回生）。また、ブレーキペダルの踏み込み時は、摩擦ブレーキと回生ブレーキが連動する協調回生ブレーキを採用している。

アクセルオフ回生においては、満充電等でバッテリー入力可能電力が低下する場合、狙いの減速力が発生させられない。そこで、入力可能電力が低い状態を補うため、アクセルオフ回生が低下する状態であっても、ブレーキユニットと協調し摩擦ブレーキを補助的に作動させ、減速中の安心感を得るのに必要な減速力を確保させている。このシステムを「Loss Deceleration Assist (LDA)」と呼ぶ。

Fig. 9 に、Loss Deceleration Assist の動作のイメージを示す。ブレーキとアクセルペダルの両方を離して、坂を下り続けるシーンである。最初はアクセルオフ回生を実施しているが、SOCの上昇につれて入力可能電力が減少するため、アクセルオフ回生による減速感が目減りする。そこで、摩擦ブレーキを作動させ、目減り分を補填している。最終的には回生が全くできなくなるが、摩擦ブレーキのみで最低限の減速度を確保する。

3.5 Human Machine Interface

他にも入出力可能電力の低下を補う技術として、Human Machine Interface (HMI) を用いて、出力可能電力が低下した際、運転者が駆動力への影響をリアルタイムで把握できるようにしている。Fig. 10 にパワーメーターの外観を示す。出力可能な最大パワーをゲージ（セグメント）で表示し、実際のモーター出力を針で示すようにした。運転者は現在の出力と最大パワーとの差分を直感的に把握することで、追い抜きなどで適切なアクセル操作が可能となる。

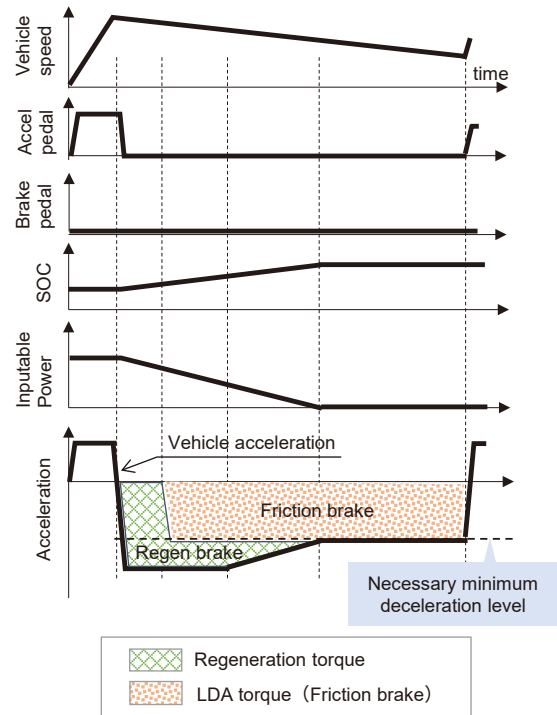


Fig. 9 The Time-Chart of Loss Deceleration Assist

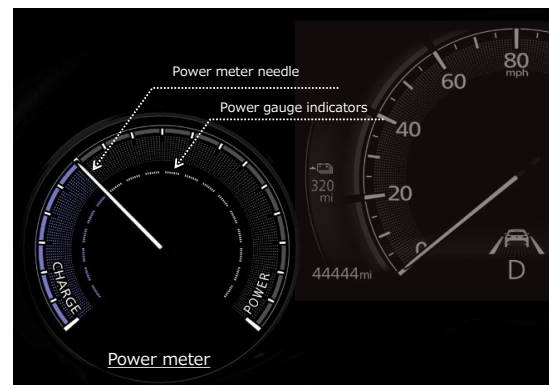


Fig. 10 Power Meter of MX-30 EV MODEL

4. おわりに

マツダではプレマシーハイドロジェン RE ハイブリッド⁽³⁾⁽⁴⁾、デミオ BEV⁽⁵⁾ といった電気駆動車を継続的に開発しており、蓄積してきた基盤となる要素技術を基に MX-30 EV MODEL を提供することができた。今後も、更に魅力的な電気駆動車を提供していくため、走る喜びを実現する機能とともに電気駆動システム要素技術も進化させていく。

参考文献

- (1) 石黒恭生：次世代電池：ノーベル賞受賞液系リチウムイオン電池を将来へ繋ぐ全固体電池開発，学術の動向，Vol.25, No.2, pp.26-32 (2020)
- (2) 国立研究開発法人新エネルギー産業技術総合開発機構：「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発」基本

計画

- (3) N. WAKAYAMA: Development of Premacy Hydrogen RE Hybrid, 31th International Vienna Motor Symposium, Vol.716-2, No.14 (2010)
- (4) 若山敬平ほか：ハイドロジェン RE ハイブリッドシステムの開発, [マツダ技報, No.27, pp.31-35 \(2009\)](#)
- (5) 福庭一志ほか：デミオ EV の制御開発, [マツダ技報, No.30, pp.130-134 \(2012\)](#)

■著者■



橋坂 明



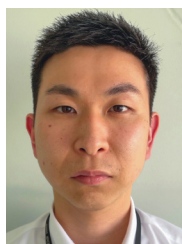
若山 敬平



江角 圭太郎



田中 健治



塚本 直樹



岡田 光平