Touareg Hybrid – electrified and electrifying

ハイブリッド式パワートレインの機能統合テスト：
チームワークの重要性（Volkswagen 社）

Volkswagen Touaregに、新たにハイブリッドバージョンが加わりました。駆動用モーター、パワーエレクトロニクス、動力用バッテリでは、電気システムの連係動作の重要さが高まります。Volkswagen 社では、機能開発から電子制御ユニット（ECU）のリリーステストまで、機能の検証と品質保証のために HIL（Hardware-in-the-Loop）シミュレーションを体系的に使用しています。

新型 Volkswagen Touareg

Volkswagen Touareg は、発表されるとすぐに、アダプティブクルーズコントロール（ACC）、サイドアシスト（レーン離脱警告）、リアアシスト（パーキングカメラ）などの革新的な車両機能によって、快適性と安全性における新たな基準を打ち立てました。

Touareg の新しいバージョンも、カスタマーフレンドリな先進技術を量産レベルに高め、すべてのクラスの車両でその成果を使用するという企業ポリシーを受け継いでいます。Touareg Hybrid には、ハイブリッドパワートレイン（図 1）と、レーダーおよびビデオセンサからのデータ評価による衝突防止システムなどの先進運転支援システムが用意されています。

フルハイブリッド方式のパワートレインは、機能および ECU ネットワークに対して過酷な要求を課しています。そのため、自動車メーカーはシステム統合を最適化することが不可欠です。自動車メーカーは、完成車に対する最終的な責任があり、さまざまなサプライヤからのシステムを含め、すべてのシステムが車両での使用に際して、エラーがなく堅牢であることを保証する必要があります。

HIL テストベンチを使用する理由

次の 2 つの主要な要件に基づいて、ネットワーク化された HIL（Hardware-in-the-Loop）テスト環境の構築が決定されました。

- ネットワーク化された ECU の機能、特にハイブリッド機能の統合テストを短時間で動的にセットアップできること。
- 開発の初期の段階では使用できるプロトタイプの数に限りがあるため、サプライヤおよび各専門部門が機能開発および開発時に特有なテストに使用できるテストステーションがあること。

HIL テストベンチの選択

Volkswagen 社が、ハイブリッドパワートレインのテストにネットワーク化されたHIL シミュレータを使用したのは今回が初めてであり、Touareg Hybrid がその最初のケースとなりました。このプロジェクトを成功させるためには、Electric Drive コンポーネントのシミュレーション分野で総合的な経験を有する強力なパートナーが必要であり、Volkswagen 社は dSPACE をパートナーに選びました。特に、開発プロセスの初期の段階では、まだ ECU が完全には機能せず、診断機能もまだ不十分であるため、シミュレータ上で動作させることが困難です。このようなときに、HIL 開発パートナーとしての dSPACE の経験が役立ちます。FlexRay などの最新の革新的なバスシステムに関する能力が、テスティングのパートナーとして dSPACE を選んだ決定的な要因となりました。

Volkswagen 社の統合テストおよびテストケース作成プロセス

車両全体に分散された運転支援機能の複雑性に対処するために、Volkswagen 社では、実際の車両およびテストベンチ上でのテストだけでなく、HIL（Hardware-in-the-Loop）シミュレーションを体系的に使用しています。多段階のテストプロセスにおける製品創造プロセス（PCP）内の所定の時点で、車両の総合ステータスが、統合 HIL テストベンチ上で詳細に調べられます。これらのテストは、総合的な統合テストの一部を構成しています。これにより、各システムと、その機能による外部的な効果の相互関係を、開発の初期段階に、高い網羅率でテストし、検証することができます。

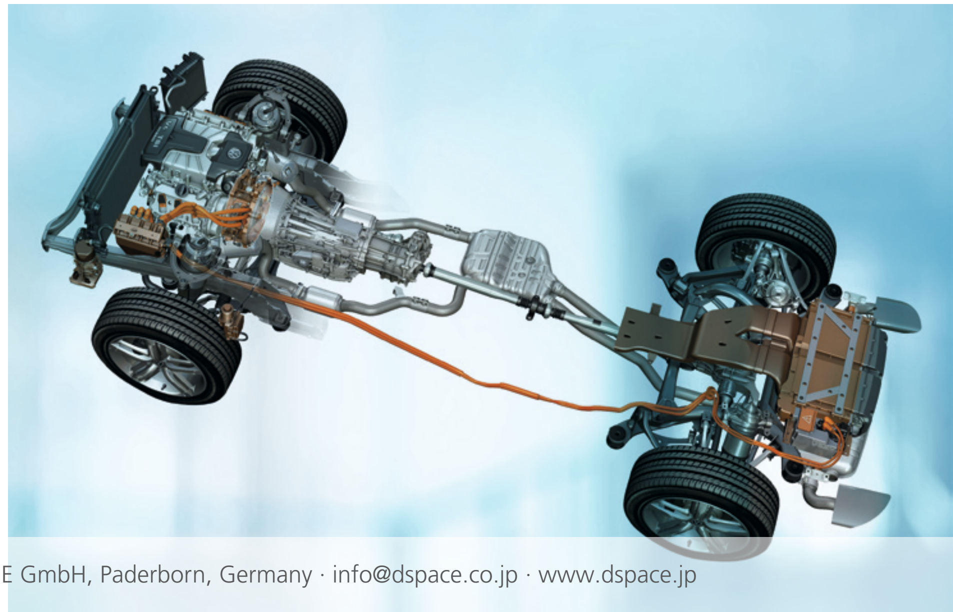
システム統合に関する車両の現在の成熟度を調べるために、総合的な統合テストにおいて、それぞれのテスト作業に基づいて、プロトタイプ車両やテストベンチなど、異なる試験設備が使用されます。これらでテストの結果がまとめられ整理されて、車両の総合的な統合ステータスの詳細なモニタリングが行われます。所定のテストを行う場所は、適切性と使用可能性に基づいて、使用可能なエレクトロニクステスト設備（図 2）から選択されます。

HIL テストベンチ上で実行される ECU テストでは、選択されたテスト項目（表 1）に関するテストが行われます。また、HIL テストでは、テストドライブで発生した異常の体系的な解析もサポートされます。このように、HIL テストシステムは、大きな技術的付加価値を生み出し、開発およびリリースプロセスで効果的に使用されています。

テストシステムの要件

テスト環境の基本的な要件は、ネットワーク化された ECU のすべての機能を再現する HIL テストステーションの能力です。たとえば、車両内の ECU がセンサおよびアクチュエータからのデータを受信したとき、エラーを発生させることなく応答する必要があります。Touareg Hybrid 用のネットワーク化された HIL シミュレータは非常に複雑であり、29 個の ECU が接続されています。この複雑さに対応するため、テストベンチサプライヤは、テストベンチの試運転および運用時に多くの要件を満たす必要があります。

図 1：バッテリモジュールが含まれている Touareg のハイブリッドパワートレイン



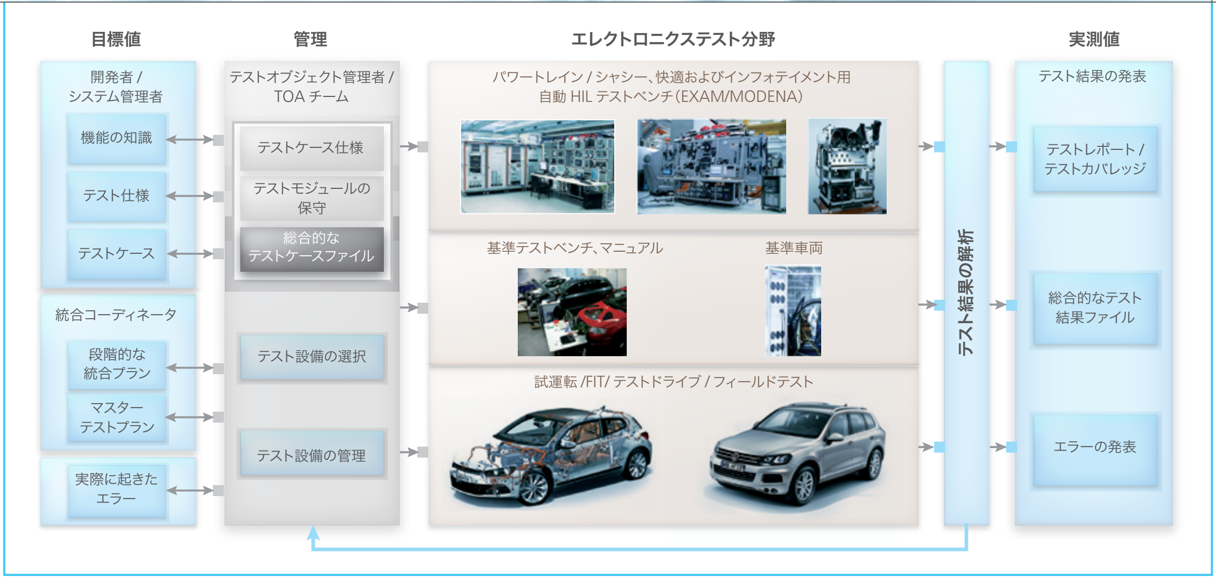


図 2：エレクトロニクステスト設備の構成

モジュール方式

まず、テストステーションは、Volkswagen Touareg の 3 種類の駆動方式およびオートマチックトランスミッションに対応するように設計する必要があり、ディーゼル（3.0 l TDI）、ガソリン（3.6 l FSI）、ハイブリッド（3.0 l KFSI）をすばやく切り替えられる必要があります。

柔軟性

Volkswagen 社は、生産開始（SOP）の 2 年前に最初のプロトタイプの HIL テストを開始します。この時点では、まだ ECU は開発中であり、センサの調整やコネクタのピン配列の変更など、システムの修正が必要になります。このような修正を、通常は ECU に必要な診断機能が揃わないうちに、HIL シミュレータ上で直ちに円滑に行う必要があります。

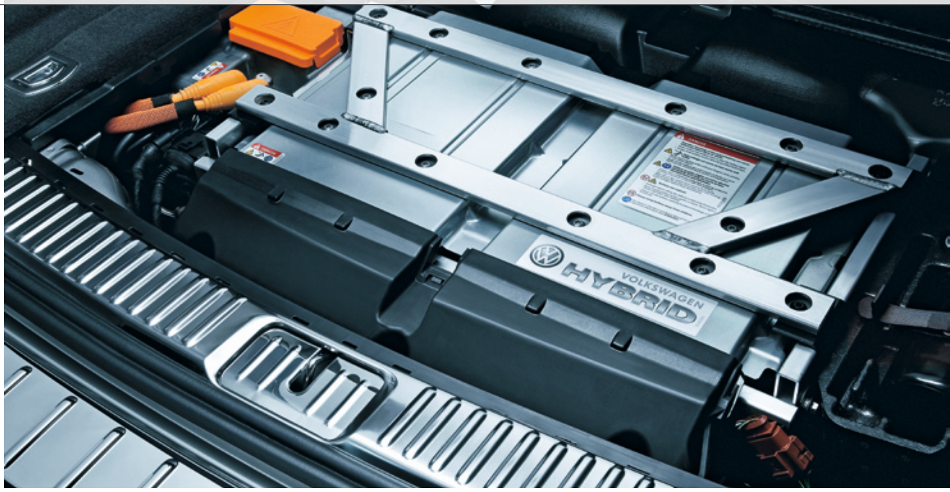
効率的なソフトウエア構造およびシステムの安定性

Volkswagen 社で使用されているネットワークシミュレータが、機能テストおよびソフトウエアバージョンのリリースに大きな貢献をしています。このために使用するシステムは、特に自動化されたテストでは、安定して機能する必要があります。各駆動方式に対して頻繁に加えられる変更によって、困難度がさらに増大します。

> 「ECU 開発者との良好な連携なしには、このテストベンチを運用することはできなかったでしょう」
>
> René Schüler 氏、Volkswagen AG

表 1：HIL テストのテスト項目

テスト項目	説明
ハイブリッド準備完了ステータス	ハイブリッドがレディ状態となる条件およびレディ状態が解除される条件
運転状態の連携	内燃エンジンの始動／停止、モーターによる運転、制動／回生、ブースト機能、（発電機による充電）、遷移状態など、個別の運転状態に関する条件
ハイブリッドに関するドライバー情報および運転操作	メータ類およびディスプレイ、エネルギーフローディスプレイ、車載コンピュータ、回生ディスプレイ、警告信号、およびエラーメッセージを通じて運転者に与えられるハイブリッドに関する情報
エラーに対する応答および代替手段	欠陥が発生したときに ECU が設計したとおりの挙動を示すかテストすること



後部に搭載されているニッケル水素（NiMH）バッテリ

>「ECU の機能および開発ステータスに関する質問には、電話 1 本で回答が得られました。必要な知識を備えた開発担当者がすぐに対応してくれました」
>
> Christian Claus 氏、IAV GmbH

ユーザフレンドリ

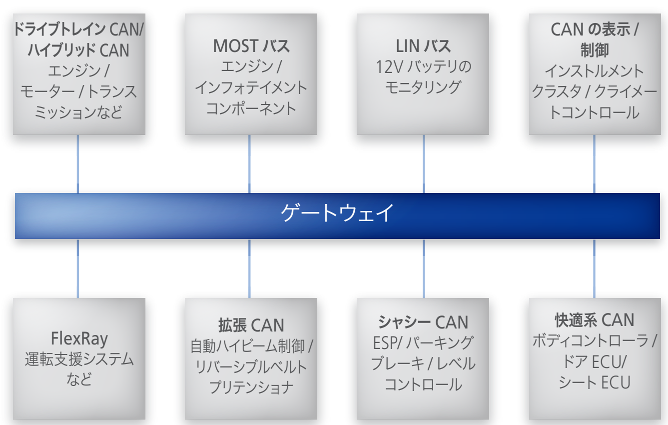
テストベンチのユーザのすべてが HIL エキスパートになるためのトレーニングを受けているわけではありません。特定のテストオブジェクトを担当するエンジニアおよび各専門部門／サプライヤが HIL シミュレータを使用するのは、テスト作業を効率的に行うためです。効率化のためには、シミュレータに関する深い知識を必要とせずに、ECU の機能に集中する必要があります。

ネットワークシミュレータの構成

Touareg Hybrid用のシミュレータは、バーチャルビークルとして設計され、すべての車両領域をカバーしています。パワートレインは次のシステムで構成されています。

- 内燃エンジン
- モーター
- トランスミッション
- 高電圧バッテリ

図 3：Touareg Hybrid のネットワークアーキテクチャ



これらのシステムは、シミュレーションモデルと、スロットルやインジェクションバルブなどのさまざまな実部品、バッテリ電圧をエミュレートする高電圧エレクトロニクスによって、実際にシミュレートされます。この HIL システムは 3 種類の駆動方式と、ギア比およびコンバータの異なるオートマチックトランスミッション用として構成することができます。駆動方式およびトランスミッションの選択された組み合せは、ECU 固有のマッピングコネクタを使用して識別されます。最後に、対応するモデルパラメータがロードされます。これによって、必要なモジュール化と柔軟性が達成されています。

通常は、テストに供される ECU は、Volkswagen 社のテストセットアップサービスから提供されたテストベンチセットアップ上に存在します（図 4）。

バスシステム

パワートレイン領域には、さまざまな CAN バスと LIN バス、および 1 つの FlexRay バスが接続されています（図 3）。すべてのバスに対して、レストバスシミュレーションがセットアップされました。CAN バスには、メインバスおよびローカルバス切り替え用のゲートウェイを置きます。これにより、各 ECU をバスから切り離し、別のバス上に分離し、1 つのバス上で受信したメッセージは他のバス上に複製することができます。このスイッチング方式により、特定の CAN メッセージを意図的に編集したり、信号レベルで遅延させ、ECU の不具合をシミュレートすることもできます。

シミュレーションモデル

内燃エンジン用の VW 社独自のシミュレーションモデルと、dSPACE の自動車用シミュレーションモデル（ASM）が使用さ

「dSPACE との共同作業で、HIL シミュレータ上でのネットワーク化されたハイブリッド機能の検証には、どのようなことが必要であり、また、どのようなことを解決しなければならないかを学ぶことができました。この知識を今後のプロジェクトにも活かしていきたいと思います」

René Schüler 氏、Volkswagen AG

れています。ハイブリッドパワートレインおよびビークルダイナミクスは、ASM DriveTrain、ASM Electric Components、ASM Vehicle Dynamics を使用してシミュレートされます。これらの ASM はオープンな構造であるため、VW 社のモデルと簡単に組み合わせることができ、ハイブリッドパワートレイン用のモデル全体を作成することができました。このドライブトレインモデルに実装されたスピンドルアクチュエータを使用して、モーターだけでの動作をシミュレートするために内燃エンジンが切り離されます。ASM Electric Components のバッテリモデルは、ニッケル水素バッテリ（NiMH）の特性に合わせてパラメータ設定され、高電圧バッテリとして使用されています。これらのモデルは非常に堅牢であり、モーターのみでの駆動、ハイブリッド駆動、内燃エンジンでの駆動、回生、惰行など、すべての従来方式およびハイブリッド方式での運転のシミュレーションが可能であることが証明されました。オープンなモデルは、効率的なソフトウエア構造に必要な要件を満たしています。

バッテリのシミュレーションおよびエミュレーション

バッテリマネージメントシステム（BMS）のテストを行うために、高電圧バッテリの端子電圧と各バッテリセルクラスタの電圧をエミュレートする必要があります。そのために、制御可能な 400 V 電源およびガルバニック絶縁された DC アンプを使用することができます。セルおよびバッテリの挙動のシミュレーションには、ASM Electric Components のバッテリモデルが使用され、これによって、電源およびアンプの制御が行われています。このシステムによって、NiMH エネルギー貯蔵システムのオン／オフ電流や充電および放電特性など、信頼性の高い表現を実現することができます。高電圧を絶縁し、作業人員を保護するために、高電圧エレクトロニクスはシールドシステムとしてシミュレータ内に設置されています。

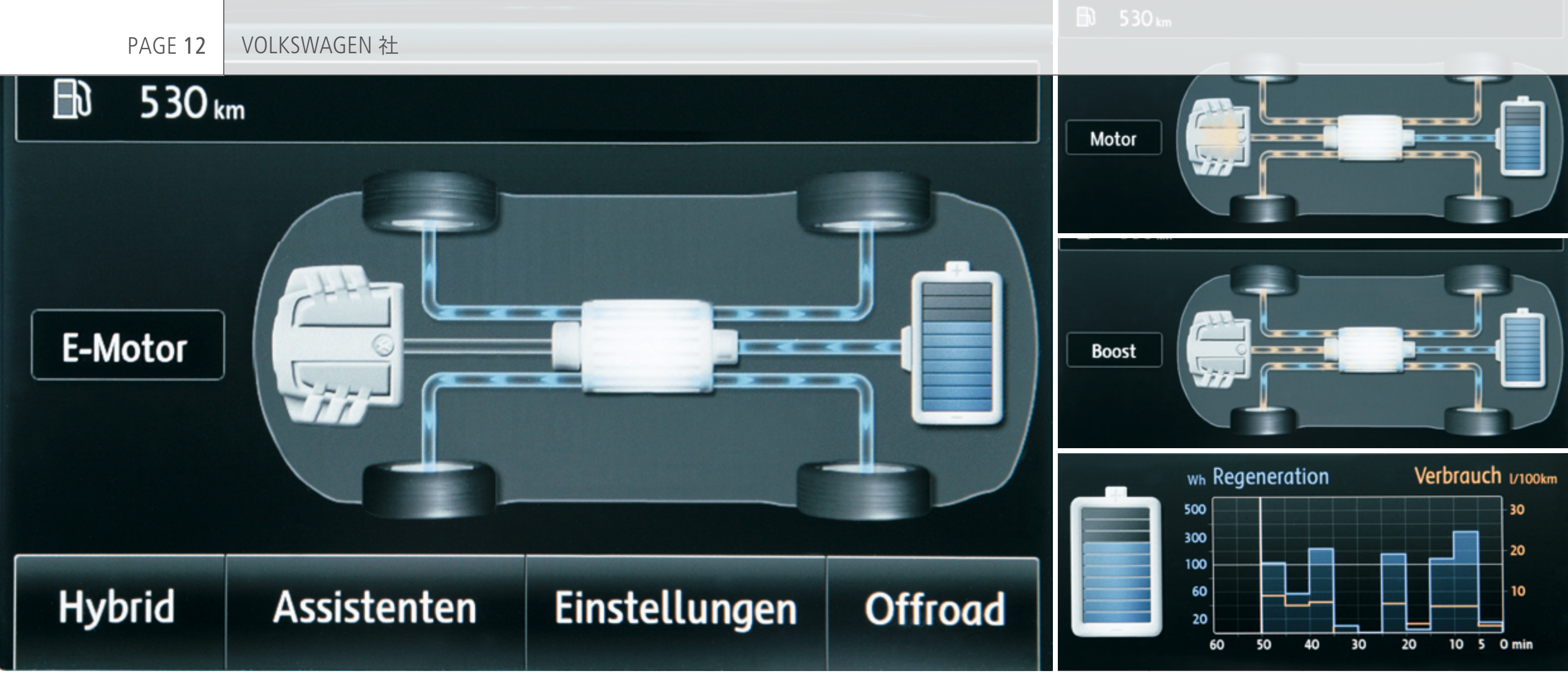
モーターのシミュレーション

Touareg に使用されている出力 38 kW のモーターは、ASM Electric Components の 3 相モーターモデルによってシミュレートされています。モーター ECU のテストは、信号レベルの評価で十分です。そのため、信号とパワーデバイス間のインターフェースで接続を切りました。このモーターモデルでは、パワーエレクトロニクス（IGBT）を制御するパルス幅変調（PWM）信号が、PWM 計測ソリューションを使用して計測および処理されています。このモデルの演算結果は、インターフェースボード（DS5202 PSS、DS2102）を介して ECU に位置と電流信号として出力されます。この環境を利用して、ECU を制御の閉ループ内でテストすることができます。

運用および経験

車両が複雑になるにつれて、テスト技術者、テストベンチ担当者、そして最も重要な開発者間のより密接な連携が不可欠であることが、シミュレータの運用に向けたプロセスの中で改めて浮き彫りになりました。このようなプロジェクトは、各専門部門の ECU 開発者のノウハウと、立ち上げに関するサポートなしでは達成できるものではありません。この後に続くテストベンチの運用でも、同じことが言えます。これが、ECU ソフトウエアおよびハードウエアに対する修正を行い、ひいてはテストベンチ要件の変更を迅速かつ効率的に行うための唯一の方法だからです。

図 4：試験施設でのシミュレータおよびテストベンチのセットアップ



モーターのみでの走行、充電、ブースト、回生、燃料消費などのエネルギーフローインジケータ付きドライバー情報ディスプレイ

dSPACE のレジデントエンジニアは、開発者のサポートだけでなく、HIL シミュレータの変更や、新しい状況への対応を支援します。HIL エキスパートが常にオンサイトでサポートを提供するだけでなく、dSPACE の開発部門に直接相談することもできます。
テストセットアップの適応が高度に動的でありモジュール化されているため、上記の統合テスト段階で、常に最新の ECU バージョンを実行することができます。ACC、サイドアシスト、ESP などのネットワーク化された機能のチェックに加え、このテストは、ハイブリッドの連携を目的としたものでした。これは主として、ハイブリッド機能に関するドライバー情報や運転操作、故障および適切な運転状態の選択に対する正しい応答に関するものでした。

「dSPACE の自動車用シミュレーションモデル（ASM）は、Touareg Hybrid の電気コンポーネントの堅固で信頼性の高いシミュレーションを保証してくれました」

René Schüler 氏、Volkswagen AG

René Schüler 氏、Volkswagen AG
同氏は、Volkswagen 社における Touareg Hybrid 用 HIL シミュレーションのプロジェクトマネージャです。

Christian Claus 氏、IAV GmbH
同氏は、Volkswagen 社での Touareg Hybrid の HIL テストに大きく貢献したプロジェクトエンジニアです。

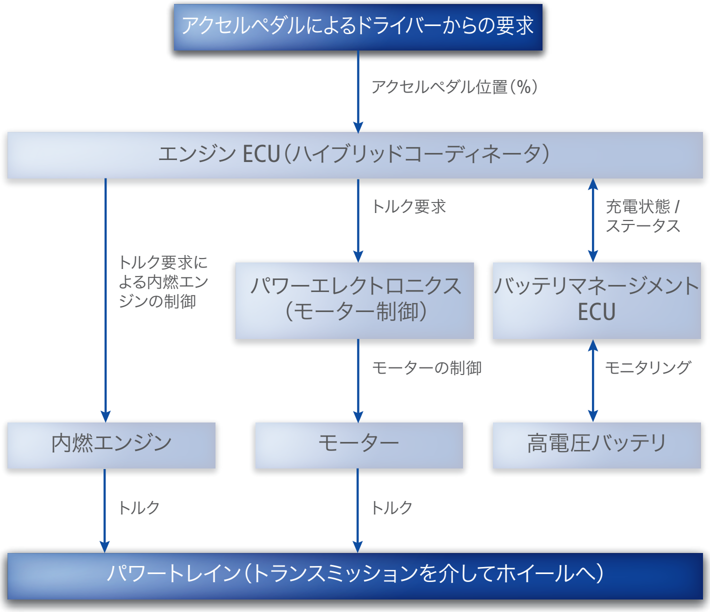
今後の展望

Volkswagen 社では、将来の Touareg の駆動方法の拡張のために、HIL テストベンチの拡張を計画しています。これには、新しい内燃エンジンモデルの統合と、マッピングコネクタを通じた ECU の識別が含まれています。先進運転支援システム（ADAS）用 ECU をシミュレーションに含めることができるように、仮想テストドライブ用高精度環境シミュレーションも、HIL テスト環境に追加されます。そのために、これらのシステムのセンサ（カメラ、レーダー）を適切にシミュレートする必要があります。

René Schüler,
Dr. Marcus Brand
Volkswagen AG
Christian Claus
IAV GmbH
ドイツ

Touareg Hybrid のネットワーク化された機能の例

エンジン ECU は、内燃エンジンの制御だけでなく、ハイブリッドとの調整役も務めています。その役割りは、パワートレイン内のトルクの調整と、バッテリマネージメント ECU やパワーエレクトロニクス ECU などの車両に搭載された各 ECU を監視することです。
運転者がアクセルペダルを踏み込むと、エンジン ECU に、必要なトルク量が伝えられます。エンジン ECU は、このトルク量（必要な加速／速度）と、システムの状態、温度、およびバッテリの充電状態（SOC）を使用して、モーターによる駆動、内燃エンジンによる駆動、または「ブースト」と呼ばれる 2 方式の組み合わせのいずれを使用するかを決定します。



まとめ

dSPACE HIL シミュレータは、Volkswagen Touareg の開発において、機能の検証に大きな役割りを果たしました。量産が開始されてからも、新しいバージョンおよび車両の機能拡張のためにテストステーションが使用されています。ごく短時間でセットアップできるため、統合テスト段階で、さまざまな駆動方式のテストを行うことができました。dSPACE との共同作業で、HIL シミュレータ上でのネットワーク化されたハイブリッド機能の検証には、どのようなことが必要であり、また、どのようなことを解決しなければならないかを学ぶことができました。この知識を今後のプロジェクトにも活かしていきたいと思います。

Volkswagen ファミリーは、機能の検証を行うために、自動車ブランド各社とのネットワーク化された HIL テストベンチの緊密な連携が重要であると考えます。Volkswagen Touareg に続き、Audi A8 や Porsche Cayenne は、モジュール式縦型プラットフォームテクノロジ（MLP、または MLB とも呼ばれます）がベースになっています。これにより、標準化された HIL テストベンチ設備を使用するという目標が達成され、標準化された車両テクノロジによる統一されたハードウエアおよびソフトウエア構造を実現することができました。MLP のテストに dSPACE を選択した理由の一つは、dSPACE と Audi 社（主要 MLP 開発企業）との幅広い共同作業の積み重ねがあったことです。Audi、Volkswagen、Porsche の 3 社は、連携して、テストステーションの計画、実装、検証を行い、密接に関連した車両プロジェクトにおける相乗効果を活用しています。HIL テクノロジに加え、テストケースの作成、テストケースの自動化（社内ツール EXAM）、エラー追跡における連携も順調に進んでいます。