



25 Kilograms of Pure Energy

Mercedes-Benz S 400 HYBRID における高効率バッテリーマネージメント
システムの開発 (Johnson Controls-SAFT 社)



25 kg : これが 2009 年に発売予定の Mercedes-Benz S-Class S 400 HYBRID に搭載されるハイブリッドバッテリーの重量です。このバッテリーは円筒形をした 35 個の再充電可能リチウムイオン電池で構成され、15 kW (20 HP) のピーク出力を発生可能です。バッテリー ECU は、その最重要タスクのひとつとして、この小さなエネルギーパッケージの電気的および熱的な保護を担います。この ECU のアルゴリズムは Johnson Controls 社と SAFT 社とのジョイントベンチャーによって開発されました。そこでは ECU ソフトウェアのコード生成に dSPACE 社の TargetLink が使用されています。

Mercedes-Benz S 400 HYBRID

マイルドハイブリッド方式を採用した S 400 HYBRID では、エンジン始動、スタート/ストップ機能、ブースト (エンジンのパワーアシスト)、エネルギー回生の目的でモーターを使用します。スペースを節約するために、トルクコンバータのケーシングに内蔵したコンパクトなディスク状モーターを、エンジンと 7G-TRONIC 7 速オートマチックトランスミッションとの間に搭載しています。モーターは最大出力 15 kW (20 HP)、起動トルク 160 Nm (動作電圧 120 V 時) を持つアウターロータ型の三相永久磁石モーターです。ハイブリッドバッテリーをエンジンルーム内の従来のバッテリーと同じ位置に搭載することによってスペースが大幅に節約できるため、客室とランクルームのスペースを変更する必要は

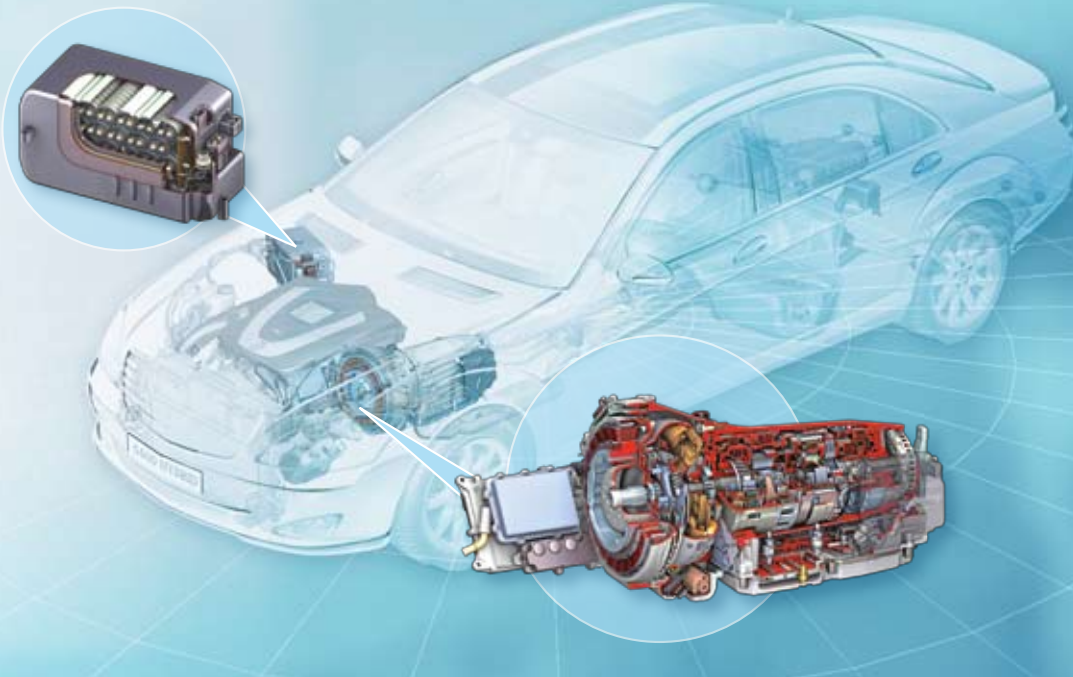


図 1 : S 400 HYBRID はマイルドハイブリッドドライブを採用しています。高電圧リチウムイオンバッテリーはエンジンルーム内に搭載されます。

ありません (図 1)。このリチウムイオンバッテリーは、ハイブリッドモーターのみならずヘッドライトや快適機能などの一般的な 12 V 電装システムにも、電圧コンバータを介して電力を供給します。エンジンの始動は車両バッテリーにとって最大の負荷となります。バッテリーの能力が自己放電や低外気温などによって低下した場合に、まず問題となるのがエンジンの始動です。このため充電量がある程度低下すると、ハイブリッドシステムはジャンプスタートをサポートします。12 V の鉛バッテリーはトランク内に搭載され、一般的な電装品と高電圧コンポーネントの監視システムへ電力を供給します。この鉛バッテリーはリチウムイオンバッテリーからのサポートを受けるため、大幅な小型軽量化が可能です。

エンジンはマイルドハイブリッド用に専用設計されました。このエンジンには、エンジン熱効率の向上 (燃料消費率の改善) と有害エミッションの削減が同時に得られるアトキンソンサイクルの利点を取り入れています。一方その欠点として低回転数領域のトルクがやや劣りますが、モーターがこの欠点を補います。

包括的なエネルギー管理が、ハイブリッドパワートレイン内の各コンポーネント (バッテリー、モーター、電圧コンバー

タ) を車両からの要求に合わせて最適に制御します。たとえばモーターは、加速運転中にエンジンをサポートする一方で、ブレーキ操作中にはジェネレータとして機能してエネルギー回生を行います。またエンジン始動時は、ハイブリッドバッテリーが電圧コンバータを介して車両の電装システ

ムを供給します。さらにモーターの動作点を適切にシフトすることによって、たとえば郊外や市街地といったさまざまに異なる運転状況においても、エンジンの動作点を常に最適効率領域内に維持します。

ハイブリッドバッテリーの構造と冷却

この極めて高効率でコンパクトなモジュラー式ハイブリッドドライブの中心となるのが、自動車専用に設計された新型のリ

チウムイオンバッテリーです (図 2)。このバッテリーは、従来のニッケル水素ハイブリッドバッテリーに比べてより高いエネルギー密度と電気効率を持ち、より小型軽量であることを主な長所とします。このハイブリッドバッテリーは放電と充電の両方向で、最大電流 200 A において 128 V の

Torben Materna 氏、Johnson Controls-SAFT 社

端子電圧を供給します。バッテリー全体は 35 個のリチウムイオンセルで構成され、容量 7 Ah の各セルが公称 3.6 V の電圧を発生します (図 3)。冷却を行うために、バッテリーは車両のエアコンディショニングシステムへ接続されます。バッテリーの冷却はドライバーによるエアコンの設定に関係なく常に優先されます。したがって、たとえエアコンのスイッチが切られていても、必要時には最大パワーでバッテリーの冷却が行われます。

「量産コード生成ツール TargetLink のおかげで、ハイブリッドバッテリーのマネージメントシステム用に新開発したコントローラモデルから、短時間で量産レベルのコードが得られました」



図2：重量 25 kg の高電圧リチウムイオンバッテリー。
冷却機能を内蔵した高強度バッテリーケース



図3：高電圧バッテリーには 35 個のリチウム
イオンセルを使用

バッテリーマネージメントシステム

バッテリーマネージメントシステム (BMS) は、バッテリー内の電氣的、熱的 (物理的)、化学的なプロセスのすべてを集中的に制御します。BMS は独立した ECU (電子制御ユニット) としてバッテリーに内蔵され、下記の機能を担います。

- 安全機能 (電圧カットアウトなど)
- 充電状態の表示 (インストルメントクラスタに表示、図 4 参照)
- 電流、電圧、電力リミットの計算
- 温度管理
- バッテリー劣化の監視
- 充電バランス (セル間の充電ばらつきの一均化)

この ECU は上記の制御以外にブラックボックスとしても機能し、診断機能からの読み取りが可能なバッテリー関連パラメータの保存を行います。高電圧/高電流に対する作業安全性を保証するために、バッテリー作動中以外はバッテリーの高電圧端子への通電を遮断する多重の安全機能が備えられています。これによりバッテリーの搭載、移動、保管作業が安全に行えます。

バッテリーマネージメントシステムのネットワーク化

バッテリーマネージメントシステムを正しく機能させるために、BMS がバッテリーと他のシステムとの間に介在し、他のコンポーネントから状態評価用のデータを取得します。このため BMS は下記ハイブリッドプランチ内のすべての ECU へ接続されます。

- エネルギーマネージメント (エンジン ECU)
- パワーエレクトロニクス (モーター)
- 電圧コンバータ (DC-DC)

エラーに即応するために、バッテリーとエアコンディショニングシステムはダイレクトにメッセージ (バッテリーからの冷却要求や冷却ステータスなど) を交換します。

バッテリーの制御

バッテリーセルの寿命を延ばしながら電力を最大限に利用するために、冷却制御機能がバッテリーを約 30 °C に維持します。極端な負荷がかかった場合は、電流/電圧リミットが過熱を防ぎます。これらの機能によって、セルの長期的なダメージと容量の低下が防がれます。温度制御機能は、極端な状況にならない限りバッテリー温度を 50 °C 以下に維持するように設計されています (図 5)。

特に車両を使用していない時などに温度が極端に低下すると、バッテリーがダメージを受ける可能性があります。このため運転を開始するとバッテリーは電流によって即座に加熱されます。-20 °C 以下の温度で過大な電流負荷がかかるとリチウム沈殿が発生し、急激にバッテリーの容量が低下する可能性があります。

車両がアイドリング運転状態になると、その期間を有効に利用してシステムの再校正、安全性チェック、セルバランシング (セルの充電ばらつきの一均化) がシステムチェックに行われます。バッテリーの寿命はセルの充電状態の均一性に大きく影響を受けるため、セルバランシングは特に重要です。

すべてのセルの充電状態を均一にするために、充電状態を解析して特定のセルだけに充電を行います。これにより一部のセルを過充電にすることなく、バッテリー本来の容量を完全に利用することができます。

モデルベース開発プロセス

このプロジェクトにおける最重要課題のひとつは、バッテリー専門家が持つノウハウと自動車技術者の要求を結集させて、バッテリーセルを保護しながら車両として高い可用性を確保できるシステムを開発することにあります。このため、実験室状態で得られた理論的なバッテリーモデルとセルデータを、十分な精度を維持しながら実用的レベルで実行可能なソフトウェア

用語解説

アトキンソンサイクル – 圧縮比よりも膨張比を大きくした内燃機関の理論サイクルです。4 ストロークエンジンでは、圧縮行程初期における吸気バルブの閉じタイミングを遅らせて、実効圧縮比を下げることによって実現できます。その結果として熱効率 (燃料消費率) の改善が得られます。

ブースト – ピーク的な動力発生時に電気モーターを動作させてエンジンをサポートします。

マイルドハイブリッド – モーターはエンジンのサポートだけを行います。モーター単独で車両を駆動することはありません。

エネルギー回生 – ブレーキ操作による減速時などにおいて、余剰エネルギーをバッテリーに貯蔵します。



図 4a：走行速度を 60 km/h 以下へ減速中の状態です。モーターがジェネレータとして作動し、車両の運動エネルギーを電気エネルギーへ変換してハイブリッドバッテリーへ充電します（エネルギー回生）。インストルメントクラスタには、バッテリーへ向かうエネルギーの流れが緑の矢印で示されます。現在のバッテリー充電状態は 50 % で、充電が続行中です。

図 4b：走行速度を 50 km/h 以上へ加速中の状態です。モーターはバッテリーからの電力を消費してエンジンによる加速をサポートします。インストルメントクラスタには、ホイールへ向かうエネルギーの流れが赤の矢印で示されます。先ほどのエネルギー回生のおかげで、バッテリーの充電状態は 51 % に増加しています。

図 4c：停車するためにブレーキをかけました。速度 0 km/h ではエンジンとモーターはともに停止します。今回の減速によるエネルギー回生によって、バッテリーの充電状態は 52 % まで増加しました。

にまとめ上げる必要がありました。モデルベース開発と dSPACE 社の量産コード生成ツール TargetLink により、既存の Simulink バッテリアルゴリズムとバッテリー特性をコントローラモデルへ簡単に統合することができ、既存の Simulink バッテリモデルを使用して妥当性確認が行えました。リチウムイオンテクノロジーの制御システムの設計は、このプロジェクトが初めてであったため、以前のプロジェクトの成果を利用することはできず、したがってコントローラソフトウェアは完全な

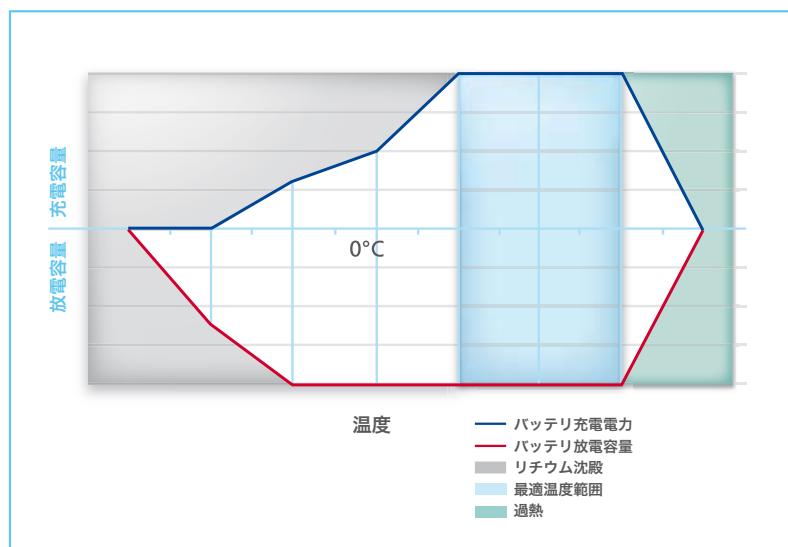
白紙状態から開発する必要がありました。効率的な量産コードの実装に向けて最適なモデルを作成する上で、dSPACE 社から発行されたモデリングガイドラインにもとづいて策定した社内ガイドラインが助けとなりました。

エンジン ECU 内に実装されたエネルギー管理システム (EMM) の機能開発者も TargetLink を使用していたため、彼らとの共同作業が円滑に進み、異なる会社に属する EMM 開発者と BMS 開発者との間の調整も極めて容易でした。

バッテリーコントローラの実装

バッテリー ECU には Infineon 社の TriCore マイクロコントローラを使用しました。この ECU にコントローラソフトウェアモデルを実装するには、そのモデルから量産対応の固定小数点コードを生成する必要があります。このためまず最初に、適合変数などのプロジェクト内でグローバルに関与するすべてのデータを dSPACE データディクショナリ内で定義しました。変数のスケールリングは、TargetLink が提供するスケールリングサポートの支援のもとにモデル内で行いました。固定小数点コードの妥当性は、MIL (Model-in-the-Loop) および SIL (Software-in-the-Loop) シミュレーションの比較によって確認しました。使用予定のプロセッサにおけるこのコードのランタイム挙動とリソース消費量は、評価用ボード TriBoard TC1796 による PIL (Processor-in-the-Loop) シミュレーションによってテストしました (図 7)。このコードは極めて初期の PIL テストから、特に計算負荷の高いプログラム部分において、非常に良好なランタイム挙動を示しました。150 MHz のクロックレートを持つプロセッサは、ソフトウェアからのリアルタイム要求を開発全体を通して常に満たしました。TargetLink はコントローラモデル用に約 25,000 行のコードを生成しました。この量産コード生成ツールは取り扱いが容易であるため、短時間で量産レベルの結果が得られました。

図 5：ハイブリッドバッテリーの充放電プロセスにおける電気容量とバッテリー温度の関係



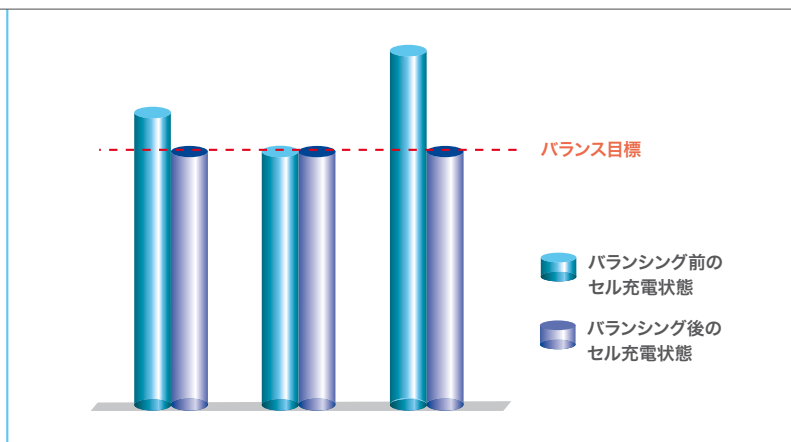


図6：バッテリー管理システムは、車両のアイドル運転中にバックグラウンド処理でセルごとの充電量を均一化します。これによってすべてのバッテリーセルが常に理想的な充電状態に保たれます。



Torben Materna 氏, Johnson Controls-SAFT Advanced Power Solutions GmbH
Torben Materna 氏は、Johnson Controls-SAFT Advanced Power Solutions 社（ハノーバー、ドイツ）においてリチウムイオンバッテリー管理システムの開発を担当したソフトウェア開発プロジェクトマネージャです。

コミショニングおよび展望

テストベンチでは最初にバッテリー ECU のテストが行われました。ここでは安全機能と温度制御機能の有効性の検証に特に重点が置かれました。次に一般公道におけるシステムの安定性を評価するために、夏期と冬期にテストドライブが実施されました。結果として、このハイブリッドバッテリーと ECU は、十分な量の電気エネルギー

を連続的に供給可能な堅牢なシステムであることが証明されました。

現在は、このシステムを異なる車両モデルへ適用して評価を行っています。ソフトウェアがモジュラー構造であるため、今回のプロジェクトで開発/確認したバッテリーアルゴリズムは他のプロジェクトでも再利用可能です。■

Torben Materna
Johnson Controls-SAFT
Advanced Power Solutions GmbH
ドイツ

図7：バッテリー管理システム (BMS) のモデルベース開発における主要フェーズと、各フェーズでの開発タスク

