

電気自動車向けの インテリジェントな バッテリー管理と充電



Sang Chon

C2000™ MCU オートモーティブ・
マーケティング・マネージャー

Jon Beall

監視および保護バッテリー管理システム・
マーケティング・マネージャー

テキサス・インスツルメンツ

概要

環境保護運動が盛んになるにつれ、電動のスクーターから車、バス、貨物トラックまで、あらゆる種類の電気自動車(EV)が、これまで以上に道路を賑わすようになります。電源設計者にとっては、性能要件が大きく異なる、幅広い種類のバッテリーや車両に対応したシステムを提供することが求められるようになります。このホワイトペーパーでは、バッテリーの性能、寿命、安全性などの課題に対応しつつ、インテリジェントなバッテリー管理および充電システムを設計する場合に適した、主な考慮事項について検討します。



要件に応じて数が決まる1つまたは複数の電力変換ステージ、電力サブシステムのさまざまな要素を管理するため、アーキテクチャ上の重要な場所に配置されたインテリジェント・コントローラまたは組み込みプロセッサなどの複数の部品で構成されています。

インテリジェントなセル監視

バッテリー・パック内のセルの状態に仕様外のものが1つでもあると、最低でもバッテリーおよび車両の内部に損傷が発生するか、乗員の安全性が脅かされることに直接つながるため、EVバッテリーの充電および放電時には、各セルを厳密かつ正確に監視することが不可欠です。EVバッテリーには、小型の爆発物に相当するエネルギーが蓄えられています。過電圧または低電圧状態は熱暴走につながる可能性があり、それによってバッテリー障害が発生することがあります。

EVのバッテリー・パックは、直列および並列に配置された複数のセル・モジュールで構成されています。バッテリー・パックの周囲と車両全体に配置されたバッテリー管理システム(BMS)は、バッテリー・セル自体の近くに配置された監視用部品、車両の

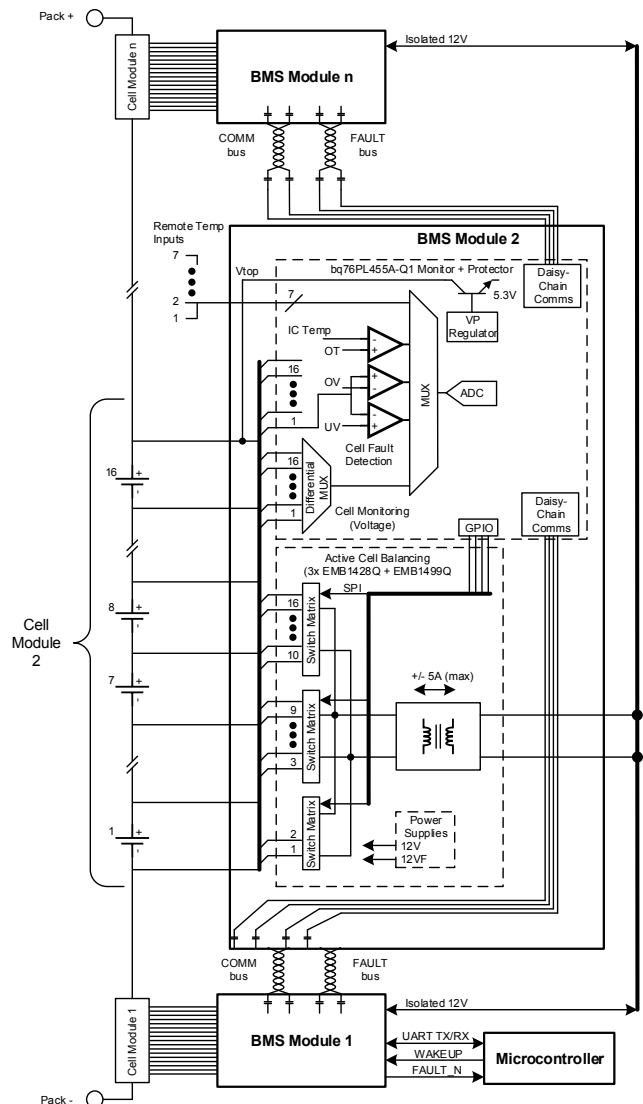


図1：複数のバッテリー・セル・モジュールが積み重なってバッテリー・パックを形成

通常はバッテリー監視集積回路 (BMIC) やセル・バランス・デバイスに、モジュール内の各バッテリー・セルの電圧、モジュール内のさまざまな測定ポイントの温度、およびその他の状態を監視する役割が与えられています。このデータはセル管理コントローラ (CMC) と、システムの複雑さに応じて高次の処理要素、たとえば1つまたは複数のバッテリー管理コントローラ (BMC) などに報告されます。これらの測定値の精度と、BMICからCMCおよびBMCへの通信頻度が、問題となる状態を早い段階で検出し、危険な段階に至る前に修正処置を行うための鍵となります。修正処置としては、たとえば個々のセル温度を許容範囲内に戻すため、BMCによって回生充電を停止するかパックからの電力消費を減らす方法や、ダッシュボード上の"エンジン・チェック"ライトを通じて車の運転者に状態を通知する方法が挙げられます。いずれの場合も、BMCで正しい修正処置をタイムリーに実行できるように、BMICには非常に高い精度の計測と、CMCとの安定した通信を行う能力が要求されます。効果的な通信ネットワークの設計という観点で見たEVは、電気的ノイズが大量に発生する、実際には非常に厄介な環境です。

BMICとCMCのそれぞれの通信の安定性は、多くの場合、全体的な設計と、BMS内の各種デバイスを接続しているネットワークの配線によって決まります。

BMCは、CMCによるバッテリー・パック内の多数のセルの監視データから電圧情報を集めます。また、バッテリー内に残っている電荷と、バッテリーの再充電が必要になる前に車両が走行できる距離を判断するために使用される、バッテリーの充電状態 (SOC) の計算も行います。健全性状態 (SOH) と呼ばれる別の計算では、バッテリーの動作状態について重要な情

報が得られるため、バッテリーの残りの寿命を推定し、適切な保守手順を推奨することができます。

インテリジェントなバッテリー管理

車両の複雑さに応じて、いくつかのインテリジェント・マイクロコントローラ (MCU) が、バッテリーと電力サブシステムに関する各種の重要なタスクを監視および管理します。通常、これらのMCUには複数の処理コアが含まれています。ARM® コアなどの汎用の縮小命令セット・コンピューティング (RISC) プロセッサのみで構成されているMCUもあれば、高度な数学的処理を中心としたタスクを担い、通常はTIのC28x DSPコアのような1つまたは複数のデジタル信号処理 (DSP) コアを備えたMCUもあります。

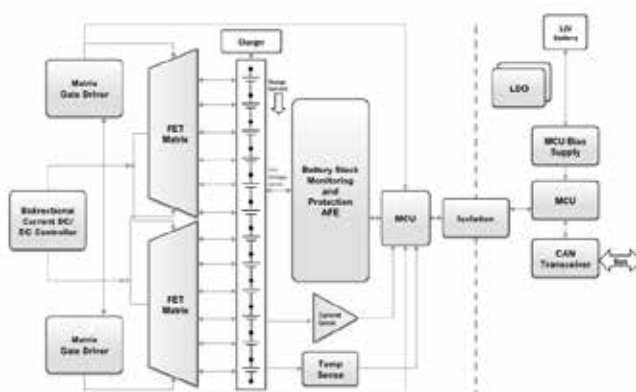


図2: バッテリー・セル制御と主制御を含むBMSシステムの概要

CMCはBMICと連携し、バッテリーの性能と寿命を保証するという重要な役割を果たします。たとえば、充電サイクル中に、熱の影響でバッテリー・セルのうち1つが劣化し、残りのセルが4.2Vまで充電されるのに対して、そのセルは4.1Vまでしか充電されなくなったことがBMICで検出されたとします。この場合は、充電プロセスを効果的に管理し、すべてのセルが4.1Vまでしか充電されないように制限できます。これにより、すべてのセルに加えられるストレスが軽減し、バッテリー・パック全体としての寿命が延びるほか、バッテリー・パックにエネルギーを効率的に蓄積して、モーターに必要なだけの電力を要求に応じてすぐに供給できるようになります。

当然ながら、リアルタイム・システムにはリアルタイムの応答性が不可欠です(特に、そのシステムが時速60マイルで走行する電気自動車の場合)。BMICは、CMCや上位のコントローラが必要な修正処置、たとえばパッケージからの電力消費を減らし、状況が悪化する前に過熱を抑制するなどの処置を速やかに実行できるように、監視中の状態のデータを頻繁に(マイクロ秒単位で)CMCに報告する必要があります。

インテリジェントなバッテリー充電

バッテリーの容量の低下や寿命の短縮につながる熱暴走やその他の状態を防止するため、バッテリーの充電と放電は効率的に行うことが重要です。バッテリー自体のパラメータが時間の経過とともに変化するため、これを実現するには、制御用MCUに一定のインテリジェンスが必要になります。実際のバッテリー充電を担うMCUは、端子の酸化やセル電圧の変化など、バッテリーの特性の変化に対して

すばやく調整を行い、リアルタイムで適応する必要があります。特に充電中の過電圧状態には、MCUがすばやく対応できなければなりません。そうしないとバッテリーの過熱を引き起こし、発火する可能性があります。

オンボード・チャージャなどのバッテリー充電モジュールを設計する場合は、オンボードの入力充電電流、中間DCバス電圧、バッテリー充電電流、バッテリー端子電圧の閉ループ制御に関する特定のリアルタイム動作要件を満たすために、DSPコアと専用のコプロセッサを備えた高次のマイクロコントローラや、ハードウェア・ベースのアクセラレータを導入することができます。

このような制御ループでは、PIDコントローラや2極2ゼロの補償回路のような演算集中型のアルゴリズムを使用する必要があります。特殊な命令セットを実行し、特殊な三角関数演算をサポートするDSPコアを備えたMCUを使用すると、これらのアルゴリズムに必要なプロセッサ・サイクル数を大幅に削減できます。たとえば、高度な数学的処理であるサインまたはコサイン演算を実行するために、RISCコアには60サ

イクルが必要ですが、一方でDSPコアは2または3サイクルで同じ演算結果を出すことができます。このようなマイクロコントローラは、その高い性能でバッテリー特性の変化の"検出漏れ"を最小化するため、電圧、電流、およびその他のシステム・パラメータに関する複数の電源トポロジや複数の制御ループの駆動にも対応できます。

さらに、停止/始動モードやタウン・モード、カントリー・モードなど、EVやハイブリッド電気自動車(HEV)での特定の高度な動作モードをサポートするには、高性能処理が必要です。

- **停止/始動モード**では、信号待ちや交通渋滞で停車した場合にHEV内のガソリン・エンジンを停止し、燃料を節約することができます。
- **タウンおよびカントリー・モード**では、HEVのガソリン・エンジンと電動モーターを、効率の良さに応じて切り替えることができます。たとえば、高速道路ではガソリン・エンジンを動力として高速で走行し、車の流れが緩やかな街中では、頻繁に停車するため電動モーターで走行します。

また、EVメーカーや電源メーカーでは、デジタル電源MCUの適応性と汎用性を活かし、電力定格、入出力電圧、PWM周波数などが異なる同様な電源トポロジを同じソフトウェア・フレームワークで制御することができます。つまり、デジタル電源MCUやMCUのファミリを使用する特定のトポロジ(例:トータムポールPFCまたは共振LLCフルブリッジDC/DC)向けに開発された同じソフトウェアを、低電力から高電力まで、新しい電力ステージに関連するデジタル制御パラメータといくつかのソフトウェア・パラメータに適切な変更を加えるだけで使用できます。そのため、デジタル電源MCUを利用することにより、メーカーでは電源制御ソフトウェア開発への投資を、アプリケーション要件を満たす幅広い電力定格の電源で、何度でも効率的に再利用または再適用できます。

革新的な技術や新しい材料が次々に電力ステージ部品に導入されている現在、このような適応性は特に重要です。

電力ステージの技術革新

具体的には、EVのオンボード充電アプリケーション向けに新しい広バンドギャップ・テクノロジーが登場しています。このテクノロジーは、送電網を利用したACコンセントへの直接接続に対応しているため、EVメーカーでは車両のチャージャのサイズと重量を減らすことができ、1回の充電での走行可能な距離をさらに延ばすことができます。さらに、この新しい電力ステージのテクノロジーでは電力効率が向上しているため、充電時の電力損失が少なくなり、充電時間も短縮されます。従来のシリコンMOSFETに比べて高いスイッチング能力と低いオン抵抗を実現する新しい広バンドギャップ・テクノロジーの例として、窒化ガリウム (GaN) と炭化ケイ素 (SiC) の2つがあります。

LMG3410などのGaN電力ステージは、最大600Vの高い電力定格に加え、GaN FET、最適化されたドライバ、過電流および低電流状態向けの保護機能を備えています。SiCは、AC-DCとDC-DC両方の電力変換用バッテリー充電アプリケーション内のスイッチング・デバイスに、特に適しています(図3および図4を参照)。

安全性

どのような設計プロジェクトでも、コスト、性能、耐久性などの設計目標間にはトレードオフが伴います。EVの電源システムに関して、この唯一の例外となるのが安全性です。安全性に関する最も重要な考慮事項は、車両のバッテリー内での発火につながる可能性のある熱暴走です。

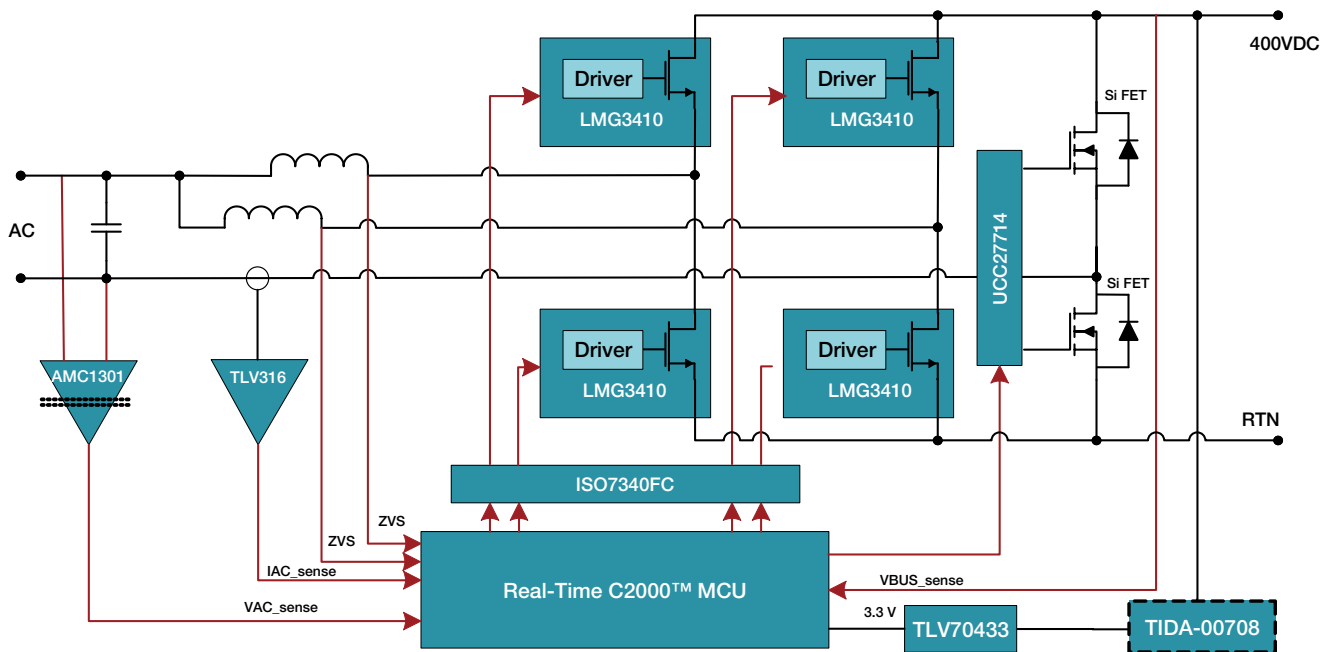


図 3: 2相インタリーブ・トータム・ポール PFC を制御する C2000™ MCU

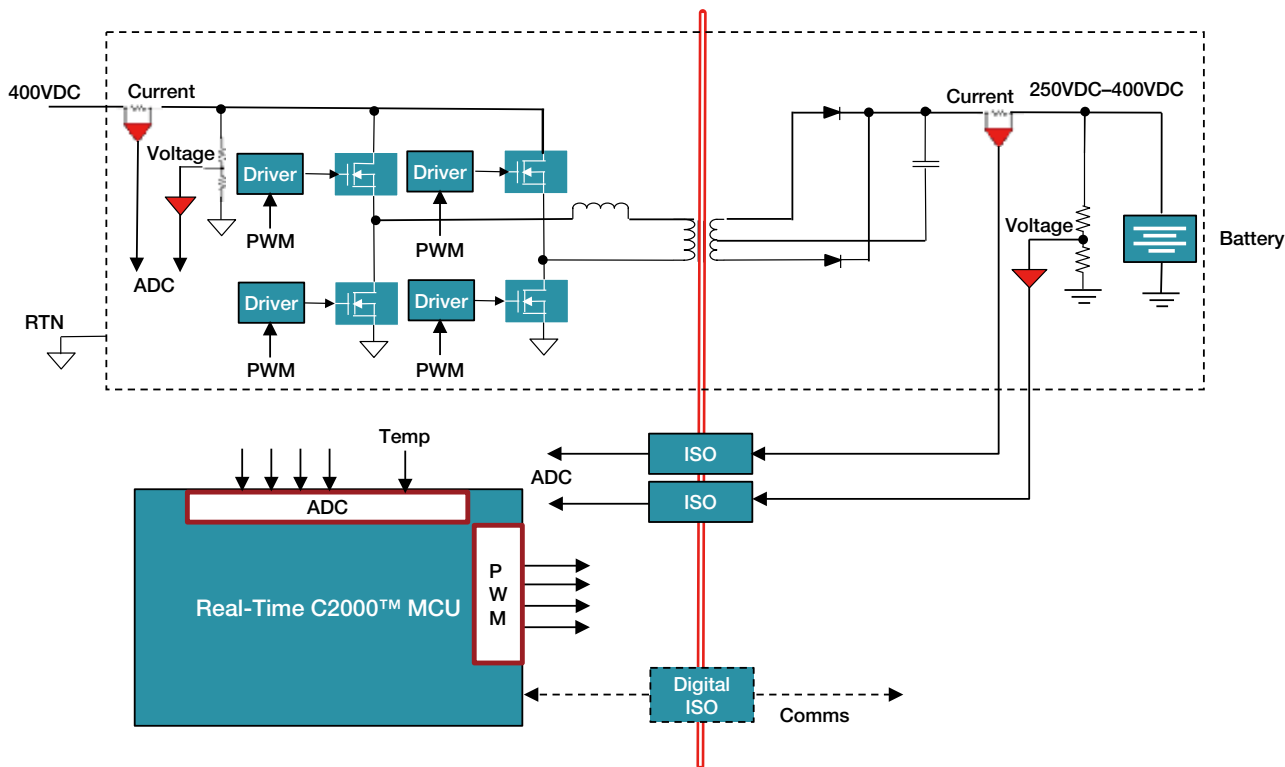


図 4: フルブリッジ LLC DC/DC を制御する C2000 MCU

熱暴走は、過充電や急な放電など、一部の誤動作によって引き起こされる可能性があります。危険な状況を回避するために、BMSでは常に動作パラメータの変化を監視および検出し、過熱が発生しているバッテリー・セルをシャットダウンするなどの保護動作を実行するよう、CMCまたはBMCに通知することができなければなりません。BMSに必要なもう1つの安全性機能として、アラームやアラートが本物であり、BMS内の障害によるものではないことを検証する機能が挙げられます。また、当然ながらBMSには、安全性を損なう可能性が生じる前に暴走状態を回避するため、適切かつ最も効果的な処置を瞬時に実行できる組み込みの保護機能が必要です。

基本的な要件として、Automotive Electronics Councilの仕様であるAEC-Q100の認定済み部品を使用する必要があります。また、BMS内の部品は、ISO 26262の電気自動車向け機能安全性標準に定義されている安全性機能をサポートしている必要があります。ISO 26262の要件によると、BMSで動作状態を分析でき、かつパラメータに何らかの変化が生じた場合に車両とその乗員にもたらされる可能性のある潜在的风险を評価できなければなりません。

ISO 26262の機能要件を満たすということは、BMSを、処理ユニットなどの冗長化されたりリソースを備えたフェイルセーフ・システムとし、各ユニットにメモリや複数のA/Dコンバータのような専用の機能を用意する必要があるということです。これに加え、BMSには、それ自体が適切に機能しており、誤ったアラームを発していないことを検証するための自己診断機能が必要です。最後に、BMSには高速で応答できる保護メカニズムが不可欠です。これにより、たとえば熱暴走状態が検出および検証された場合に、バッテリー・パックやその他の機能要素で直ちにシャットダウンを実行できます。

EV電源システムに導入されている一部の最先端MCUには、互いにミラーリングを行い、ロックステップ方式で命令を実行するデュアル・プロセッシング・コアが搭載されており、命令実行のたびに各プロセッサの比較と検証が行われます。メモリ内のエラー訂正コード(ECC)など、部品レベルの診断手法は、システム内のデータの精度を確保し、より大規模なシステム全体の自己診断機能にデータを送り込むために役立ちます。

TIのHercules™ TMS570 MCUは、ISO 26262:2011の要件をASIL-Dまで満たしているとして、TÜV SÜDによる認定を受けています。TÜV SÜDは、国際的に認知されている、品質および安全性基準の準拠に関する独立認定機関です。Hercules MCUファミリは、各MCUで同じ機能および安全性アーキテクチャを採用しているスケーラブルなファミリです。128KB～4MBフラッシュ、80MHz～300MHzの範囲内でピン互換のMCUが提供されています。

TIのHercules TMS570 MCUは、デュアルコアCPUのロックステップ/比較やメモリのエラー訂正コード(ECC)リアルタイム診断に加え、ハードウェア・ベースのCPUロジック組み込みセルフ・テスト(LBIST)、SRAMのプログラム可能な組み込みセルフ・テスト(PBIST)といった機能を備えています。これらのハードウェア・ベースの安全性機能は、ミッションクリティカルなブロックのエラー診断に役立ち、最小限のソフトウェア・オーバーヘッドで広範囲の診断を可能にします。

このような例のデモとして、以下のTI Designリファレンス・デザインが用意されています。

- TMS570 MCUを、bq76PL455A-Q1およびEMB1428とともに使用した、基本的なバランシング・アルゴリズムによるアクティブ・セル・バランシング BMS
[\(TIDM-TMS570BMS\)](#)
- bq76PL455A-Q1およびEMB1428/EMB1499を使用した、アクティブ・セル・バランシング [\(TIDM-00817\)](#)
- bq76PL455A-Q1を使用した、パッシブ・セル・バランシング [\(TIDA-00717\)](#)

マルチプロセッシング・コアを使用したロックステップ以外のソリューション向けには、リアルタイム制御性能に優れたTIのC2000 MCUを使用することで、BMSアプリケーションに必要な機能安全性を確保できます。異種混合の非対称アーキテクチャを活用することで、C2000 MCUの処理要素はそれぞれが独立しており、数年前に定義されたEGAS安全コンセプトで説明されている、アルゴリズム・レベルのクロスチェックを実装できます。ECCメモリと冗長化された割り込みベクタ・テーブルを追加すると、計算要素を十分に保護できます。

C2000 MCUは、BMSに必要なDSPレベルの計算性能を提供するだけでなく、機能安全性に関する制御システム全体への対応も行います。冗長化されたADCと複数のアナログ・コンパレータにより、アナログ信号が定義済みの範囲から外れた場合に瞬時にPWMを直接ディスエーブルにすることで、入力信号が温度でも、バッテリー電圧でも、別の重要な信号でも、その信号の保護に必要な診断を提供します。

結論

インテリジェントな電源管理システムと革新的な電力ステージ部品は、車両のバッテリーの性能と寿命を最適化しつつ、バッテリーの安全性の検証に役立つタスクを実行するうえで最適な組み合わせです。重要な動作パラメータの包括的かつ頻繁な監視、システム内のすべての制御ループにおける全ノード間の安定した通信、迅速な意思決定とその後の効果的な制御および保護メカニズムが、EVやHEVの電源システムには不可欠です。



TIの設計情報およびリソースに関する重要な注意事項

Texas Instruments Incorporated ("TI")の技術、アプリケーションその他設計に関する助言、サービスまたは情報は、TI製品を組み込んだアプリケーションを開発する設計者に役立つことを目的として提供するものです。これにはリファレンス設計や、評価モジュールに関する資料が含まれますが、これらに限られません。以下、これらを総称して「TIリソース」と呼びます。いかなる方法であっても、TIリソースのいずれかをダウンロード、アクセス、または使用した場合、お客様(個人、または会社を代表している場合にはお客様の会社)は、これらのリソースをここに記載された目的にのみ使用し、この注意事項の条項に従うことに合意したものとします。

TIによるTIリソースの提供は、TI製品に対する該当の発行済み保証事項または免責事項を拡張またはいかなる形でも変更するものではなく、これらのTIリソースを提供することによって、TIにはいかなる追加義務も責任も発生しないものとします。TIは、自社のTIリソースに訂正、拡張、改良、およびその他の変更を加える権利を留保します。

お客様は、自らのアプリケーションの設計において、ご自身が独自に分析、評価、判断を行う責任がお客様にあり、お客様のアプリケーション(および、お客様のアプリケーションに使用されるすべてのTI製品)の安全性、および該当するすべての規制、法、その他適用される要件への遵守を保証するすべての責任をお客様のみが負うことを理解し、合意するものとします。お客様は、自身のアプリケーションに関して、(1) 故障による危険な結果を予測し、(2) 障害とその結果を監視し、および、(3) 損害を引き起こす障害の可能性を減らし、適切な対策を行う目的で、安全策を開発し実装するために必要な、すべての技術を保持していることを表明するものとします。お客様は、TI製品を含むアプリケーションを使用または配布する前に、それらのアプリケーション、およびアプリケーションに使用されているTI製品の機能性を完全にテストすることに合意するものとします。TIは、特定のTIリソース用に発行されたドキュメントで明示的に記載されているもの以外のテストを実行していません。

お客様は、個別のTIリソースにつき、当該TIリソースに記載されているTI製品を含むアプリケーションの開発に関連する目的でのみ、使用、コピー、変更することが許可されています。明示的または黙示的を問わず、禁反言の法理その他どのような理由でも、他のTIの知的所有権に対するその他のライセンスは付与されません。また、TIまたは他のいかなる第三者のテクノロジーまたは知的所有権についても、いかなるライセンスも付与されるものではありません。付与されないものには、TI製品またはサービスが使用される組み合わせ、機械、プロセスに関連する特許権、著作権、回路配置利用権、その他の知的所有権が含まれますが、これらに限られません。第三者の製品やサービスに関する、またはそれらを参照する情報は、そのような製品またはサービスを利用するライセンスを構成するものではなく、それらに対する保証または推奨を意味するものでもありません。TIリソースを使用するため、第三者の特許または他の知的所有権に基づく第三者からのライセンス、あるいはTIの特許または他の知的所有権に基づくTIからのライセンスが必要な場合があります。

TIのリソースは、それに含まれるあらゆる欠陥も含めて、「現状のまま」提供されます。TIは、TIリソースまたはその仕様に関して、明示的か暗黙的にかかわらず、他のいかなる保証または表明も行いません。これには、正確性または完全性、権原、続発性の障害に関する保証、および商品性、特定目的への適合性、第三者の知的所有権の非侵害に対する黙示的保証が含まれますが、これらに限られません。

TIは、いかなる苦情に対しても、お客様への弁護または補償を行う義務はなく、行わないものとします。これには、任意の製品の組み合わせに関連する、またはそれらに基づく侵害の請求も含まれますが、これらに限られず、またその事実についてTIリソースまたは他の場所に記載されているか否かを問わないものとします。いかなる場合も、TIリソースまたはその使用に関連して、またはそれらにより発生した、実際の、直接的、特別、付随的、間接的、懲罰的、偶発的、または、結果的な損害について、そのような損害の可能性についてTIが知らされていたかどうかにかかわらず、TIは責任を負わないものとします。

お客様は、この注意事項の条件および条項に従わなかったために発生した、いかなる損害、コスト、損失、責任からも、TIおよびその代表者を完全に免責するものとします。

この注意事項はTIリソースに適用されます。特定の種類の資料、TI製品、およびサービスの使用および購入については、追加条項が適用されます。これには、半導体製品(<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、評価モジュール、およびサンプル(<http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm>)についてのTIの標準条項が含まれますが、これらに限られません。