

成果と展望

強いコンポーネントをコアにした顧客価値を創出するソリューション



江口 直也

富士電機株式会社 執行役員
技術開発本部長

1. まえがき

富士電機は、エネルギー・環境技術の革新の追求により、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献するという思いを込めて“*Innovating Energy Technology*”というブランドステートメントを策定しています。この思いを実現するため、富士電機では、電気エネルギーを安全・安心かつ効率的に供給・利用する技術や、熱エネルギーを無駄なく活用する技術、ならびにそれらを最適に制御する技術の開発に研究資源を集中しています。2013年に策定した中期経営計画の中では、パワー半導体とパワーエレクトロニクス（パワエレ）技術をコアにし、計測・熱コンポーネントも含めて、徹底的に差別化されたコンポーネントを開発し、それらを核にして、制御技術をプラットフォーム化・パッケージ化し、エネルギーソリューションを提供する研究方針を掲げています（図1）。本稿では、この方針に基づく最近の開発状況を紹介します。

2. パワー半導体とパワエレ技術のシナジー

パワー半導体技術とパワエレ技術は、富士電機のコア技

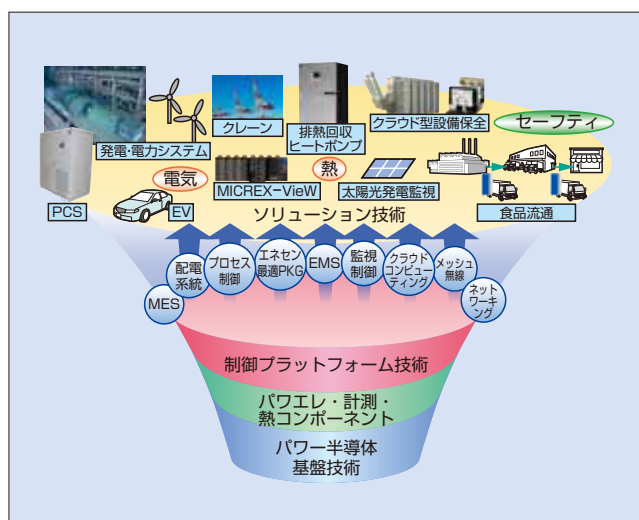


図1 富士電機のコア技術と注力分野

術です。これらのシナジーにより徹底的な差別化を狙っており、Si デバイスの物性限界を超えて劇的に損失を低減する次世代デバイスである SiC（炭化けい素）パワー半導体と、これを適用したパワエレコンポーネントの開発に注力しています。

パワー半導体の生産拠点である松本工場では、SiC 生産設備として業界に先駆けて稼動させた6インチウェーハプロセスラインにより、国立研究開発法人 産業技術総合研究所と共同で開発した600～1,700V 耐圧のSBD（Schottky Barrier Diode）と1,200V 耐圧のMOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）を量産しています。同時に、SiC デバイスが持つ性能を最大限に発揮できるようにするため、高温動作、高放熱、低インダクタンスの超小型・高信頼性の各種モジュールを開発しています。

SiC-SBD を FWD（Free Wheeling Diode）に使用し、IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）チップには富士電機製の第6世代「V シリーズ」を適用したハイブリッドモジュールを製品化しています。1,200V、1,700V 耐圧に加え、低キャリア周波数で動作させる電気鉄道向けの1,700V 耐圧のハイブリッドモジュールを製品化しました。高信頼性を確保するため、ベース材料に AlSiC（アルミニウムと炭化けい素の複合材料）、絶縁基板材料に高熱伝導度の AlN（窒化アルミニウム）を適用しており、インバータに適用した場合、Si モジュールと比較して32%損失を低減できます（キャリア周波数3kHz⁽¹⁾）。さらに、高耐圧の3,300V 耐圧のハイブリッドモジュールも開発しました⁽²⁾（図2）。本モジュールで使用している SiC-SBD は、共同研究体つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション（TPEC）との共同開発品です。本モジュールは、高信頼性化のために、Sn-Sb 系のはんだをチップ下のはんだに適用することにより、連続運転温度を Si-IGBT モジュールの125℃から150℃に高め、Si 現行品と比較してモジュールのフットプリントを約30%低減しました。インバータに適用した場合、Si モジュールと比較して損失を38%低減できます（キャリア周波数10kHz）。

また、東海道新幹線車両向けに、SiC パワー半導体モ

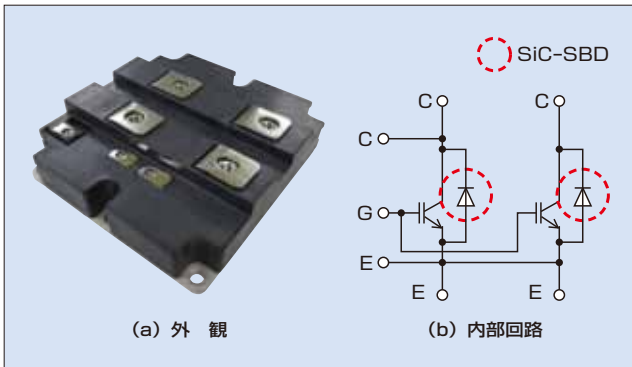


図2 3,300V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール

ジュールを搭載した省エネルギー（省エネ）と小型・軽量化を狙った主変換装置を、東海旅客鉄道株式会社と共同で開発しました（図3）。SiC パワー半導体モジュールは、従来の Si パワー半導体モジュールに比べて発熱量が少ないことから、主変換装置の冷却機構を簡素化でき、主変換装置を含む駆動システムの小型・軽量化と省エネ化を実現します。なお、高速鉄道の駆動システムに SiC パワー半導体モジュールを採用して実施した走行試験は、世界初となります。

インバータ用にさらに信頼性を高めた SiC-MOSFET を開発し、SiC-SBD と組み合わせた All-SiC モジュールを開発しました。このモジュールの低損失という特長を生かして、全閉自冷構造の防じん防水型のインバータを開発しました（図4）。このインバータは、これまででは困難だったじんあい、水、油などが掛かる環境に設置することができます。また、生産ラインにおいて複数あるモータの近くに分散して設置することができるよう、機能安全やカスタマイズロジック、オープンネットワークオプションなどの各種機能も備えており、プラントの省エネに貢献することが期待されます。

また、SiC-SBD を適用したサーバ用バックアップ電源システムを製品化しました（図5）。本システムは、従来はサーバラックに交流で供給されていた電力を、直流に変換して供給するシステムです。変換部に SiC-SBD を適用したことによる低損失化に加え、電力変換の回数を従来



図3 東海道新幹線車両向け主変換装置

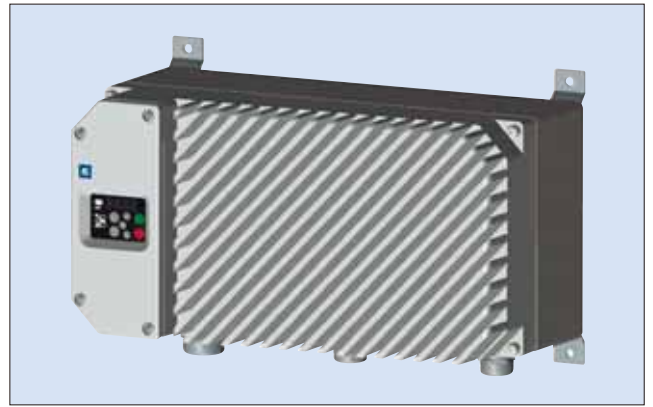


図4 全閉自冷構造の防じん防水型インバータ

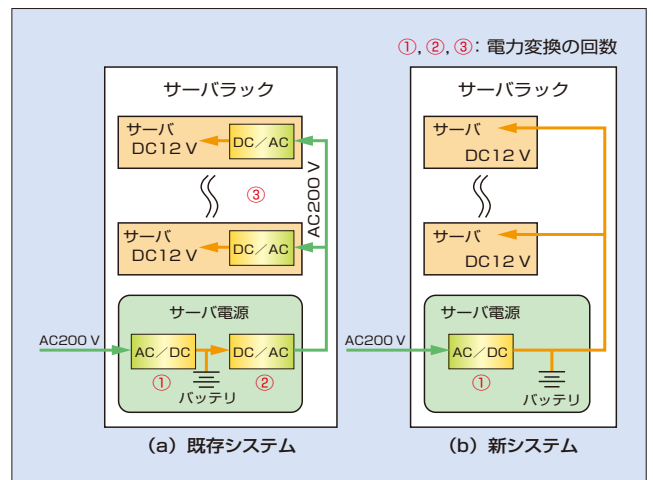


図5 サーバ用バックアップ電源システム

の3回から1回に減らすことで、効率を従来の84%から92%に向上でき、電力損失を従来の約半分に減らすことができます。データセンターでのサーバの高性能化・大容量化に伴う電力使用量の増加に対するソリューションを提供します。

また、さらなる低損失化が可能な SiC トレンチ型 MOSFET の開発を行っています。SiC の場合、面方位によって移動度（オン抵抗）やアバランシェ降伏（耐圧）の特性が変わるため、従来のシミュレーションによる特性予測は困難でした。TPEC の事業として、トレンチ面方位に対応したモデルの導入や横方向電界の考慮、およびパラメータの最適化により、オン抵抗、耐圧とも実測値によく合致する高精度なシミュレーションモデルを構築しました⁽³⁾。このシミュレーション技術を活用して、最適な SiC トレンチ型 MOSFET 構造を設計しています。

これまで述べたように最先端の SiC デバイスとその性能を最大限に引き出すモジュール技術を組み合わせ、さらにそれらを搭載した小型で低損失、かつ差別化されたパワーエレクトロニクス製品の開発により、SiC デバイスとその適用製品で世界トップレベルを狙っていきます。

従来の Si デバイスにおいては、さらなる小型化、低損失化、高信頼性化を実現した第7世代「X シリーズ」

IGBT モジュールを開発しました。

第 7 世代 IGBT チップは、ドリフト層の厚さを薄くし、表面のトレンチゲート構造を微細化・最適化することにより、オン電圧とターンオフ損失のトレードオフ関係を大幅に改善しました。SiC ハイブリッドモジュールにも適用し、新たに開発した薄型・高熱伝導度の AlN 絶縁基板により放熱性を向上させ、同時に高強度はんだの適用とワイヤボンディング設計を最適化することにより、パワーサイクル耐量を向上させました。さらに、耐熱性を向上させたシリコングルを適用することにより、X シリーズ IGBT モジュールでは、従来は 150℃ であった連続動作温度を 175℃ とすることが可能となりました。これにより、同じサイズで比較すると約 35% 出力電流を増加することができ、パワエレ装置の小型化、高効率化に貢献できます。

このような特徴あるパワー半導体の性能を最大限発揮して差別化されたパワエレ製品を短期間で効率的に開発し、タイムリーに市場投入するため、パワー半導体の開発周期と同期したパワエレプラットフォームを開発しています。2012 年度に上市した汎用インバータ「FRENIC-Ace」をプラットフォームとして、アジア市場向けの空調インバータ「FRENIC-eHVAC」や欧州市場向けエレベータ用インバータ「FRENIC-Lift」を短期間で開発し、上市しました。

同様に、新デバイスである SiC デバイスや X シリーズ IGBT モジュールを適用したパワエレのプラットフォーム開発も進めています。

3. 受配電・開閉・制御機器、計測・制御、熱コンポーネント

受配電・開閉・制御機器コンポーネントにおいては、生産設備やオフィスビル、商業施設における省エネに貢献するエネルギー監視機器「F-MPC Web ユニット」(UM12-10)を開発しました。これは、工場やビルなどに設置され、電気、水、ガス、温度などさまざまな計測値を収集・蓄積し、PCなどで監視するための Web 画面を内部で作成する Web サーバ機能を持っています。同時に、デマンド制御などを実施するコントローラとしても機能します。さらに、空調や照明など負荷機器の順序制御機能を搭載しました。USB ホスト機能や SD カードインタフェース、増設用の拡張スロットを備え、従来品と比較して拡張性も大幅に強化しています。計測機器との通信には、富士電機の「F-MPC シリーズ」の専用プロトコルに加え、MODBUS RTU プロトコルや Ethernet 対応機器とも接続可能であるため、他社製品を含めた幅広い計測機器からデータが収集できます(図 6)。システム構築の容易化のために、接続された計測機器の自動検索機能を備えて設定を自動化しました。上位機器との通信においても Ethernet の TCP/IP 通信に加え、PLC のローダコマンドや MODBUS TCP に対応するなどして汎用性を高めています。

差別化された熱コンポーネントとして、ヒートポンプ

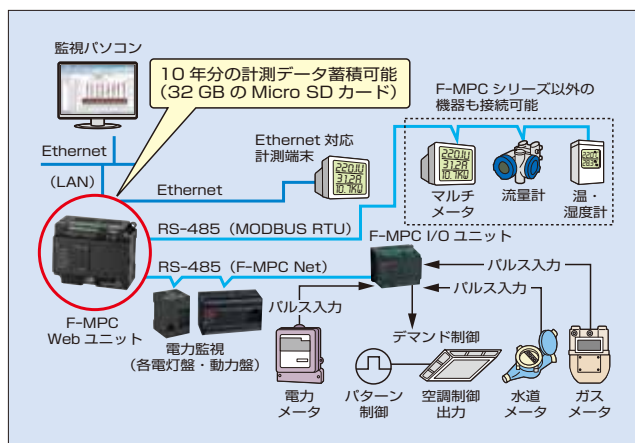


図 6 「F-MPC Web ユニット」を用いた施設監視システムの例



図 7 蒸気発生ヒートポンプ

技術を応用し、100～120℃の飽和蒸気を供給する中容量(30kW)の蒸気発生ヒートポンプを製品化しました(図 7)。これまで有効に利用されていなかった 60～80℃の温排水から熱を回収することができ、工場内で蒸気加熱を必要とする給水予熱や洗浄、殺菌、空調・加湿などの設備に適用できます。各設備の近傍に設置が可能なため、配管の延伸に伴う放熱ロスを抑制できます。また、蒸気の使用量に応じて、最大 10 台までの複数台運転ができます。このように、熱も含めた工場の省エネソリューションに貢献します。

4. 顧客価値を創出するソリューション

特徴あるセンシング技術と経験豊富な制御技術、さらに得意とするパワエレ技術を組み合わせ、ボイラの燃料費削減に貢献するボイラ燃焼ソリューションパッケージを開発しました(図 8)。リアルタイムで計測が可能な独自のレーザ方式 CO 分析計を使用し、ボイラ排ガス中の CO 濃度を常時基準値内に抑制しつつ、ボイラの効率が最も高くなる空気量で燃焼を制御することにより、燃料費の削減を実現します。実際のボイラで効果を実証しており、100t/h のボイラの場合、年間 2,000 万円以上の削減効果が期待でき

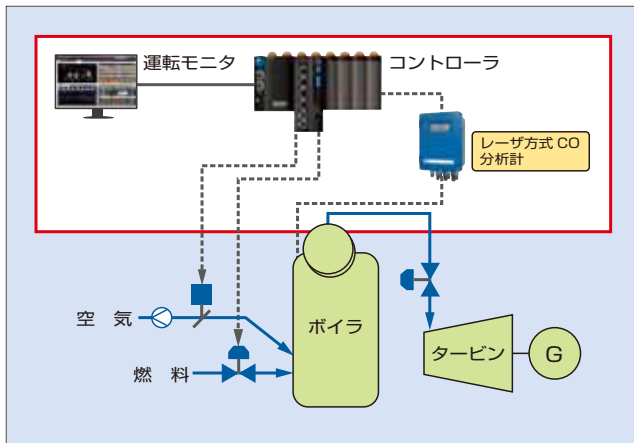


図8 ボイラ燃焼ソリューションパッケージ

ます。

同様に、計測制御技術とパワエレ技術のシナジーを活用したソリューションとして、クレーンソリューション制御パッケージを開発しました。港湾クレーンの振れ止め制御としては、業界トップレベルの精度を実現するとともに、回生エネルギーの有効活用を図り、38%の省エネが可能です。

特徴あるセンサをコアにしたソリューションとして、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）を応用した感振センサと、これを用いて建物の構造性能の一次診断を行う構造ヘルスマニタリングシステムを、建設会社と共同で開発し、製品化しました（図9）。

MEMSを応用した低価格の感振センサによる計測結果を用いて、振動データから建物の各階における最大加速度および最大層間変形角を推定し、地震後の健全性を診断するシステムです。本システムにより余震に耐えられる強度を維持できているかどうかの診断が可能であり、安全・安心ソリューションを提供できます。

2016年4月からの電力の小売全面自由化に対応して、小売電気事業者（新電力事業者）に課せられる“計画値同時同量制度”に対応した需給管理システムを開発しました。そして、株式会社エヌ・ティ・ティ・データおよび株式会

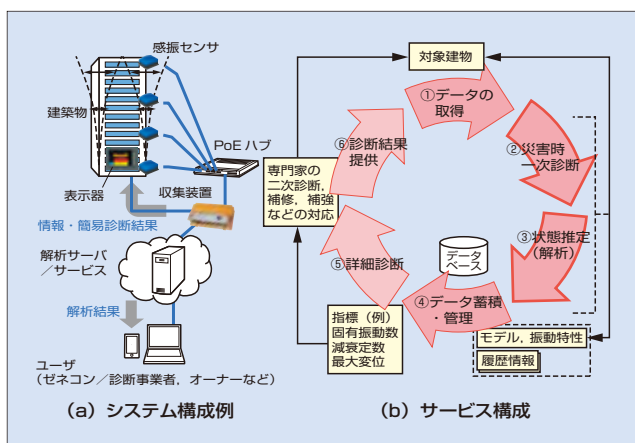


図9 建物健全性診断ソリューションの構成例

社 協和エクシオとの協業により、新電力事業者向けクラウドサービスとして販売を開始しました。需給シミュレーション技術に加え、多くの顧客の大量データを高速に処理する技術を適用して、次に示す特徴を持つサービスの提供が可能になります。

- (a) 低圧需要家向けの需要予測
- (b) バランシンググループ（需要・発電）を考慮した計画策定
- (c) 電力市場取引
- (d) 顧客情報管理システムと連携した顧客情報の自動取込み

サービス提供を行いながら、今後もお客さまの要望を取り込み、機能改善を実施していきます。

最近、すべてのものがインターネットにつながるIoT（Internet of Things）という概念が脚光を浴びています。富士電機は、現場データのセンシングからゲートウェイ、ネットワーク技術、データ解析技術まで、一貫通貫の製品・技術を保有しており、IoTを活用した顧客価値を創出する各種ソリューションを準備しています（図10）。

その一つとして、設備ライフサイクルマネジメント環境を実現するクラウド型総合設備管理システムを開発し、サービス提供を開始しました。先行してサービスを開始している“EMS サービス”に、新たに設備の“保全サービス”“稼動監視サービス”機能を加えて、一体化したクラウド型サービスを実現しました（図11）。設備の稼動状況の把握、保全・点検の記録、エネルギーの計測を通じて、設備の劣化や故障の予兆診断、エネルギー効率の総合的な管理が可能となりました。これにより、顧客設備の導入から運用、更新までのトータルライフサイクルマネジメントが実現でき、顧客の設備管理効率の最大化、エネルギーコストの最小化が実現できます。

ユニークな応用として、ウェアラブル型遠隔作業支援パッケージを製品化しました。現場の作業者が保持するメガネ型ウェアラブル端末と遠隔地の支援者側拠点（本部）とをインターネットでリアルタイムに接続し、独自に開発

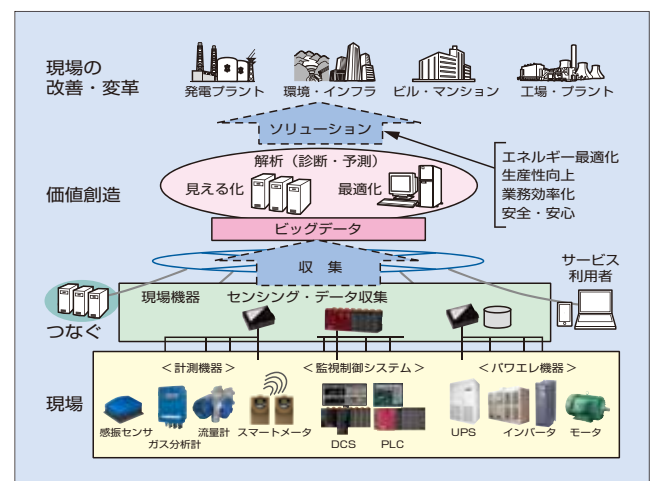


図10 富士電機のIoTソリューション

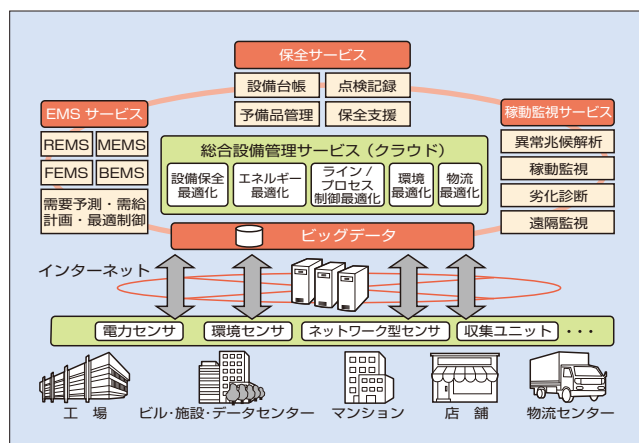


図11 クラウド型総合設備管理サービス

したソフトウェアを用いて、作業への支援・指導を行うものです。作業状況の画像と音声の入力がハンズフリーで可能であり、それを基に遠隔地の熟練技術者からの確かな指示を受けることができます。

今後もIoTを活用した顧客価値を創出するソリューションの実現を目指し、IoTソリューションのための差別化された機器を開発していくとともに、そのプラットフォーム技術を開発していきます。

5. 基盤・先端技術

これまで述べてきた各技術を共通的に支える基盤技術や将来を見据えた先端的な研究開発を進めています。

熱流体や構造、電磁気、EMC（Electromagnetic Compatibility：電気・磁気的な妨害を及ぼさないこと／及ぼされないこと）など、各種シミュレーション技術を構築しています。

パワエレ機器に使用されるパワー半導体は、高速スイッチングにより、電磁ノイズを周囲に放出する可能性があります。従来、その対策は試行錯誤的なアプローチが主でしたが、富士電機では、設計段階から対策を検討するために電磁ノイズ（伝導ノイズ、放射ノイズ）シミュレーション技術の開発を進めています。伝導ノイズについては、開発初期には簡易モデルを適用し、詳細設計時には、より詳細なモデルにより正確なシミュレーションを実施し、製品を開発しています。

伝導ノイズよりもシミュレーションが難しい放射ノイズに対しては、モデル化が容易で計算時間が短い、機器の一部を抽出するシミュレーション技術を開発し、その解析を繰り返しながら、機器全体を解析する手法を確立しました⁽⁴⁾。これにより短時間で、よりよい機器構成を検討することが可能となりました（図12）。

材料技術としては、SiC デバイスなどの高温動作デバイスのパッケージ用として250℃に耐えられる樹脂の開発や、金属組織シミュレーションを活用した異種金属接合技術の開発、磁性材料の残留応力や熱による物性変化の研究など、

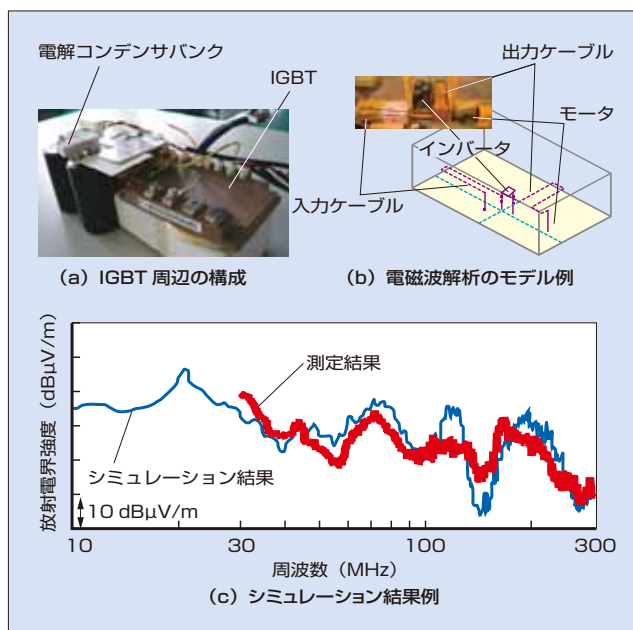


図12 放射ノイズシミュレーション結果例

継続して推進しています。

パワー半導体モジュールの信頼性に大きな影響を与える封止樹脂と金属との密着性についても、第一原理計算や分子動力学計算などのシミュレーション技術を活用した解析手法を確立しています。樹脂と密着のための助剤の分子構造から、樹脂と被接着部材との化学結合力を計算する技術を構築しました。被接着部材としてアルミニウムを例とした場合、助剤の種類による密着力の実測結果は、化学結合力の大小で説明できます⁽⁵⁾（図13）。この化学結合力に加え、アンカー効果や汚染などの外的要因、および機械特性による界面応力を考慮することにより、実際の密着力が推定できます。

また、グローバルに製品を展開していくに当たって、国際規格への対応はますます重要となっています。このような状況の中で、富士電機は国際規格への取組みを継続して強化しています。特に、パワエレ関連では国際委員会活動に積極的に取り組んでおり、パワーコンディショナ（PCS）

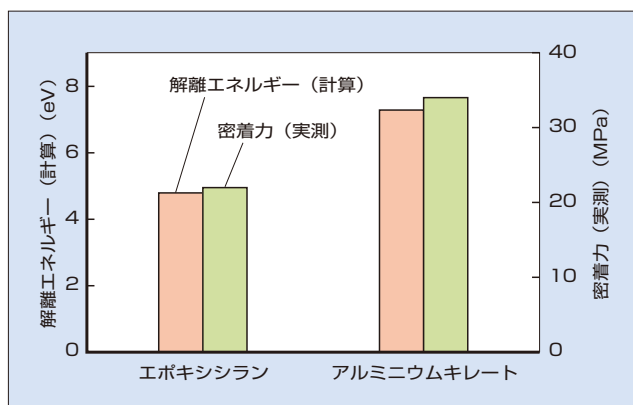


図13 化学結合力〔解離エネルギー（計算）〕と密着力（実測）との比較

における EMC やインバータ効率測定の規格制定活動に貢献し、成果を上げています。

6. あとがき

富士電機が取り組んでいる、電気エネルギーを安全・安心に効率的に供給し、利用する技術や、無駄なく熱エネルギーを活用する技術、ならびにそれらを最適に制御する技術を中心にその概要を紹介しました。環境と調和した安全・安心で持続可能な社会の構築は、今後ますます重要になります。

開発強化に向けて、東京工場地区には全社の技術開発拠点となる研究開発棟（本館）が、松本工場地区にはパワー半導体の技術開発センターが、吹上工場地区には器具事業の評価試験棟がそれぞれ竣工し、稼動しました。さらにパワエレ製品開発の集約と効率化を狙った、鈴鹿工場地区のパワエレ開発センターが2016年秋から稼動する予定です。

このように今後も研究開発を精力的に進め、富士電機のブランドステートメントに込められた“エネルギー・

環境技術の革新の追求により、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献する”という思いを実現し、地球社会のよりよき企業市民として貢献すべく、邁進してまいります。

参考文献

- (1) 小根澤巧ほか. 1,700 V耐圧SiCハイブリッドモジュール. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.245-248.
- (2) 金子悟史ほか. 3,300 V耐圧SiCハイブリッドモジュール技術. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.249-253.
- (3) 小林勇介ほか. シミュレーションによるSiCトレンチ型MOSFETの特性予測. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.1, p.11-15.
- (4) 玉手道雄ほか. パワーエレクトロニクス機器の電磁ノイズシミュレーション技術. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.1, p.35-39.
- (5) 小笠原美紀, 立岡正明. 分子シミュレーションを活用した樹脂材料の密着性の解析. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.1, p.26-29.





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。