

基盤・先端技術

基盤技術
先端技術



展 望

アジアを中心とした新興市場の拡大が進み、グローバル競争は激しさを増している。多くの日本企業は、事業の選択と集中を実行し、製品開発に研究開発資源を優先的に投下して構造改革を進め、競争優位性の確保に努めている。一方、製品開発へ傾注することで、研究開発のスコープの短期化、先行研究への投資不足など、持続的な成長への懸念も警鐘されている。対策として、外部リソースを求めるオープンイノベーション型の技術戦略を取る企業が増えている。また、この戦略は、選択と集中を行った結果、自社に存在しない技術に対する、顧客ニーズに迅速かつ的確に対応するためにも重要である。

富士電機では、パワー半導体とパワーエレクトロニクス（パワエレ）をコア技術の中心に据え、計測・制御技術でこれらのコア技術をシステム化することで、電気・熱エネルギー関連ソリューションへの取組みを強化している。また、これらのコア技術を支える基盤技術や将来の先端技術にも積極的に取り組み、イノベーションの継続と研究開発の質の向上に貢献している。オープンイノベーションとしては、産官学連携の大規模プロジェクトへ参画し、ワイドバンドギャップパワー半導体技術など自社のコア技術を強化するとともに、大学などの外部研究機関と共同研究を実施して、基盤技術を錬成し、将来の先端技術を探索している。

パワー半導体の先端技術としては、独立行政法人 産業技術総合研究所と共同研究を実施して、またはプログラムに参画して、1,700 V 耐圧クラス SiC-SBD (Schottky Barrier Diode)、1,200 V 耐圧クラス SiC-MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)、13 kV 級超高耐圧 SiC-IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を開発した。SiC-SBD および SiC-MOSFET は、インバータなどのパワエレ機器への搭載により、これらの機器の損失を大幅に低減することが期待されている。超高耐圧 SiC-IGBT は、送配電機器など超高耐圧分野への応用が期待されている。これらの素子を開発するためには、金属と SiC、酸化膜と SiC などの界面特性を再現性良く制御することが必要となるため、放射光電子分光法や透過電子顕微鏡を用いた分析手法を組み合わせることで、原子数層レ

ベルの分解能で、原子の濃度分布や結合状態を比較できる分析・解析技術を開発した。

パワエレ製品において、半導体デバイスで発生する損失を正確に予測するために、デバイス等価回路モデルを利用した損失予測技術を開発した。また、パワエレ製品のグローバル展開を推進するために、IEC 委員会活動と規格対応技術の開発を進めた。

システム化に必要な計測・制御技術として、計測データをシンプルかつ大量に管理することができる高速データベース技術や、組込みソフトウェアの開発工数削減に貢献する仮想ハードウェア適用技術を開発した。計算機が大量の画像データ群から学習し、アルゴリズムを自動で生成する機械学習技術を開発し、ロボットビジョンへ適用した。

回転機や変圧器などの電気機器で利用される電力用磁性材料は、その製造条件や設計条件により磁気特性が変化し、機器の性能に大きな影響を与える。これらの条件を模擬した状態で磁気特性を測定することで、電力用磁性材料の最適利用技術を開発した。

熱エネルギーソリューションに用いるコンポーネントとして、工場の温排水を利用した蒸気発生ヒートポンプシステムを開発し、三重工場でフィールドテストを実施した。

面記録密度 1.4 Tbits/in² 以上のハードディスクにおいて、次世代の記録方式として期待される熱アシスト磁気記録方式向け磁性層技術に取り組み、現行の 2 倍の磁気異方性エネルギーを維持しつつ、キューリー温度を 100℃ 下げる材料を開発した。

緊急停止時に、自然放熱により原子炉冷却が可能であり、完全受動安全特性を備えた実用小型高温ガス炉の原子炉概念を確立した。

PM2.5 を測定対象とし、光学的手法と質量分析法を組み合わせ、従来 8 時間以上を要した成分分析をリアルタイムで測定する複合分析計の要素技術開発を完了した。

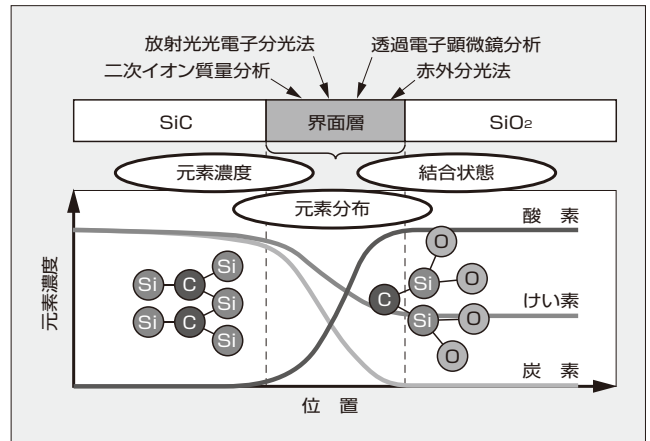
富士電機では、今後も、電気・熱エネルギー技術や、計測・制御技術の革新につながる先端技術にチャレンジするとともに、これらの開発を支える基盤技術を駆使して研究開発の質の向上に取り組んでいく。

基盤技術

① 次世代パワーデバイスの開発を支える分析・解析技術

SiC-MOSFETの信頼性を高めるためには、良好なゲート酸化膜界面特性を確保する必要がある。ゲート酸化膜はSiと同様に熱酸化により形成している。しかし、界面特性を向上させる狙いで添加した元素や形成過程で放出される炭素が関わって、SiC基板と酸化膜との間に複雑な構造が現れ、これにより電子の流れが阻害されて信頼性を損なう場合がある。富士電機は、放射光光電子分光法や透過電子顕微鏡分析をはじめとするさまざまな分析・解析技術を駆使し、ゲート酸化膜界面の構造を、元素の濃度、分布、結合状態などの観点から評価する手法を確立した。その結果、酸化膜の形成過程と界面構造との関係をより深く解き明かすことができ、ゲート酸化膜界面の特性を向上させてSiC-MOSFETの信頼性を高めることができた。

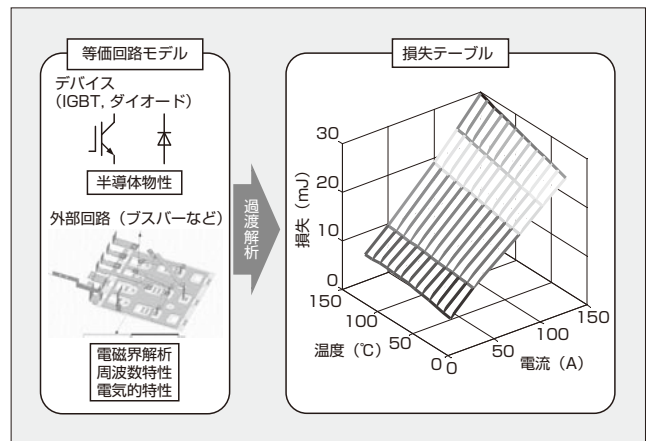
図1 界面元素の濃度・分布・結合状態の模式図



② デバイス等価回路モデルを利用した装置損失予測技術

パワーエレクトロニクス装置において、半導体デバイスで発生する損失を正確に把握することは、装置構造や冷却体を設計する上で非常に重要になる。しかし、発生する損失は、温度や電流などの動作条件、装置配線に起因する寄生インダクタンスおよびゲート駆動回路などの外部回路で変化するため、損失の把握には試作と測定を繰り返す必要がある。富士電機では、デバイス物性に基づき、動作条件によらないデバイスの等価回路モデルと外部回路モデルとを組み合わせることで、発生する損失を予測できるシミュレーション技術を開発している。また、損失と動作条件の関係をテーブル化して熱解析と組み合わせることで、温度変化時の損失を予測でき、熱解析精度の改善が見込める。これにより、装置設計の検討期間の短縮が期待できる。

図2 等価回路モデルを使った損失テーブル



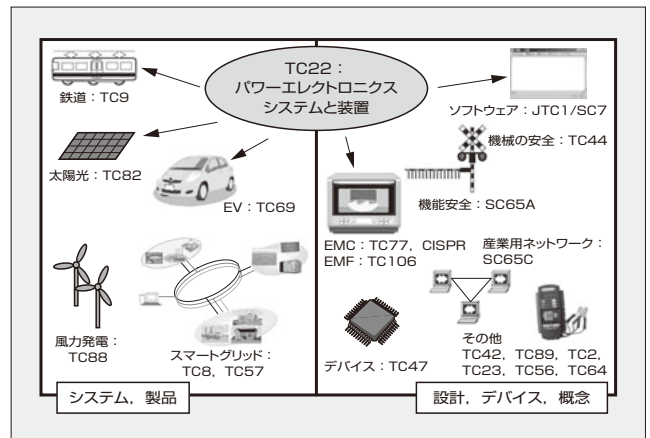
③ パワーエレクトロニクス関連の国際規格への対応

富士電機は、主力であるパワーエレクトロニクス製品のグローバル展開を推進するため、IEC（国際電気標準会議）の技術委員会の中で、特にTC22（パワエレ）、SC22G（ドライブ）、CISPR（EMC）などの委員会活動と、規格に対応するための技術開発を行っている。主な成果を次に示す。

- 太陽光電力変換システムのEMC規格のプロジェクトリーダーに就任し、規格作成を牽引（けんいん）している。
- ドライブ効率規格に対して日本国内で実証試験を実施し、規格会議で意見を提示して各国から理解を得た。
- 改定中の機能安全規格において、EMC試験技術の原案作成に取り組み、日本の意見を反映させた。

今後、審議が活発化するEMC規格、系統連系に関する標準化において製品開発と規格作成を両立して進めていく。

図3 パワーエレクトロニクス関連の国際規格



基盤技術

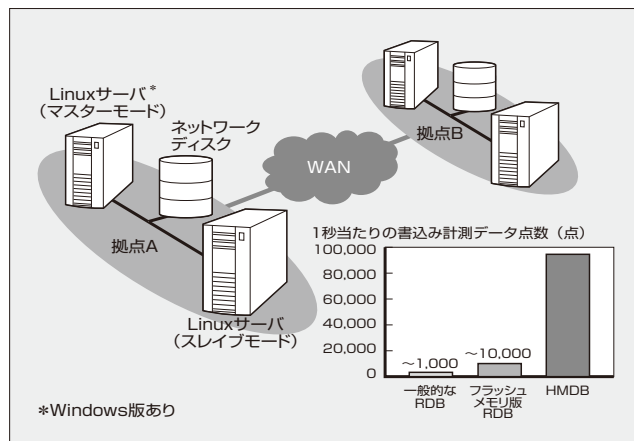
④ 高速データベース技術

MDMS (Meter Data Management System) におけるスマートメータ検針値やBEMS (Building and Energy Management System) アグリゲータにおける各種エネルギー値など、定周期に計測するデータをシンプルに、かつ大量・高速に管理できるデータベース (HMDB: High-speed Measurement Database) を開発した。

計測値データの格納に特化したことにより、シングル構成のLinuxサーバにおいても3,000万個のスマートメータ検針値を6分以内に格納することができる。

二重化システムやシステムの2拠点化などの高信頼性オプションもサポートしており、産業・社会システムの基盤ミドルウェアとしても展開可能である。

図4 HMDBのシステム構成と書き込み計測データ点数



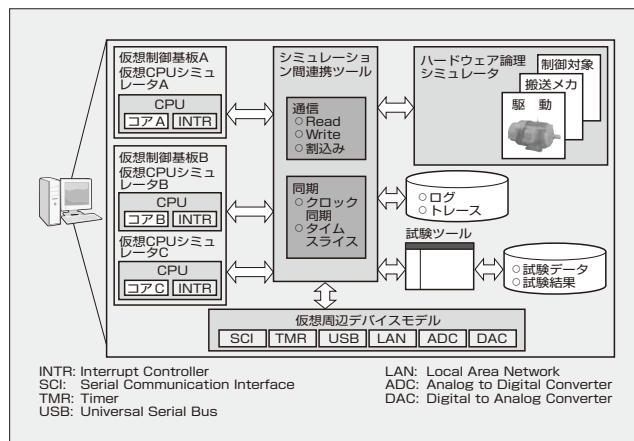
⑤ 組込み機器開発への仮想ハードウェア適用技術

組込みソフトウェアの開発期間短縮 (35%) と開発工数削減 (30%) を目的に、組込みCPUのバイナリコードをそのままパソコン上で動作可能とする組込み機器仮想ハードウェア開発環境を開発した。

この開発環境は、プログラムが動作する仮想CPUシミュレータ、シミュレーション間連携ツール、各種シミュレータ (仮想周辺デバイスモデル、ハードウェア論理シミュレータ、試験ツール) で構成される。

仮想周辺デバイスモデルは、シミュレーション間連携ツールを介して各仮想CPUシミュレータと接続することにより、共通利用を可能とした。通常は発生させることが困難なハードウェア異常の試験も仮想環境で自動化でき、開発工数の削減とともに信頼性の向上も可能である。

図5 仮想ハードウェア開発環境

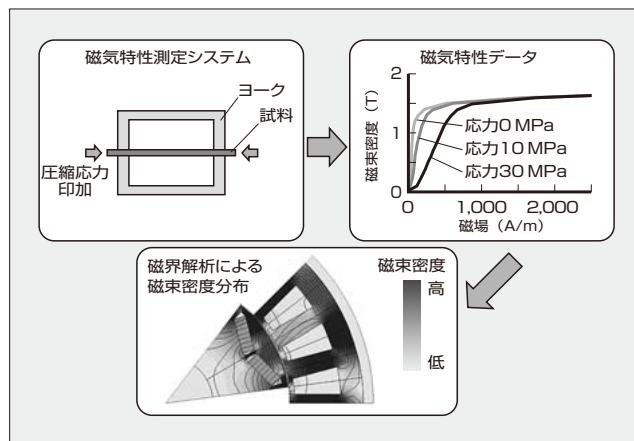


⑥ 電力用磁性材料の最適化利用技術

回転機や変圧器などの電気機器に用いられる電力用磁性材料は、製品の製造・設計条件によって磁気特性が変化し、機器の性能に大きな影響を及ぼすことが知られている。特に電磁鋼板はこうした傾向が強い。そのため、磁性材料の実使用環境下での磁気特性を考慮した設計による電気機器の最適化が求められている。

富士電機は、固定応力、プレス打抜き、かしめ、溶接などの製造条件と、インバータ励磁、周辺構造物への磁束漏れ、偏磁などの設計条件とを模擬した環境下での磁気特性を取得し、磁界解析に適用することで、電力用磁性材料の最適化利用技術を確認した。この技術を用いて、製品性能の向上や試作回数の削減による設計期間の短縮を進めている。

図6 実使用環境下での磁気特性を考慮した設計手法の例

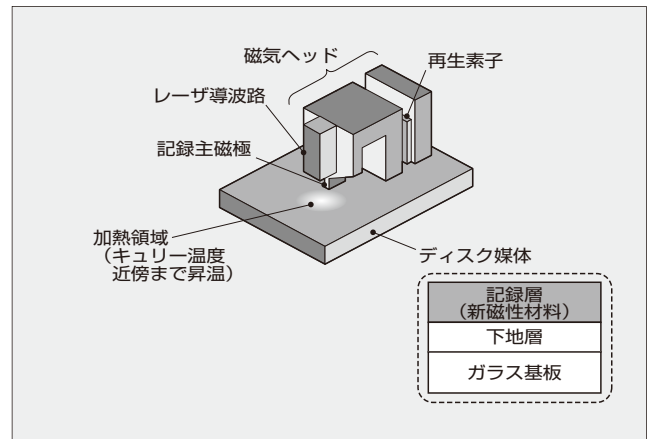


先端技術

① 熱アシスト磁気記録方式向け磁性層技術

ハードディスクドライブ（HDD）は、面記録密度 1.4 Tbits/in^2 （65 mm ディスク当たり 1 TB）以上において、熱アシスト磁気記録方式に切り替わっていくと予想されている。その記録層には、FePt 規則合金などの磁気異方性エネルギーの高い磁性材料を必要とするが、FePt 規則合金はキュリー温度が高い。記録時の加熱温度を抑え、加熱源であるレーザーのパワーを低くすれば、信頼性を高められるので、キュリー温度の低減が望まれている。現行の約 2 倍（ $1.6 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ ）の磁気異方性エネルギーを持ちつつ、FePt 規則合金よりキュリー温度が 100 度以上低く、微細なグラニューラー構造を維持できる材料を見いだした。本材料を適用した記録層は、レーザーパワーを 20% 低減でき、信頼性向上が期待できる。

図7 熱アシスト磁気記録方式の構成

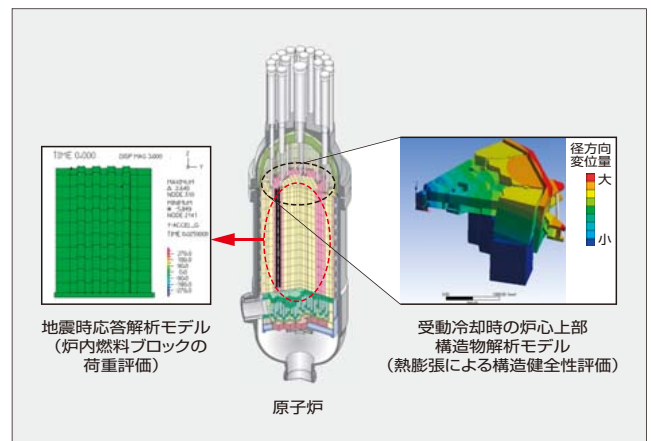


② 完全受動安全特性を備えた実用小型高温ガス炉

高温ガス炉は、緊急停止時にも自然放熱により原子炉冷却が可能で優れた安全特性を持つこと、ならびに軽水炉に比べて高温の熱により高効率ガスタービン発電や水からの水素製造が可能などの特徴の次世代の原子炉である。

富士電機は、さらに高温化を目指した超高温ガス炉において、完全受動冷却が可能な原子炉概念の確立を目指し、研究開発を進めている。受動冷却時の原子炉構造物健全性確保に関わる設計技術、黒鉛ブロック炉心の地震時応答解析技術および高燃焼度化に対応した炉心設計技術などを開発した。この結果、わが国初の超高温ガス炉である高温工学試験研究炉（HTTR）で実績のある金属製炉心拘束機構を採用した出口温度 900°C の超高温ガス炉においても、完全受動冷却を実現する原子炉の基本構造概念が確立できた。

図8 地震時応答と構造解析の例



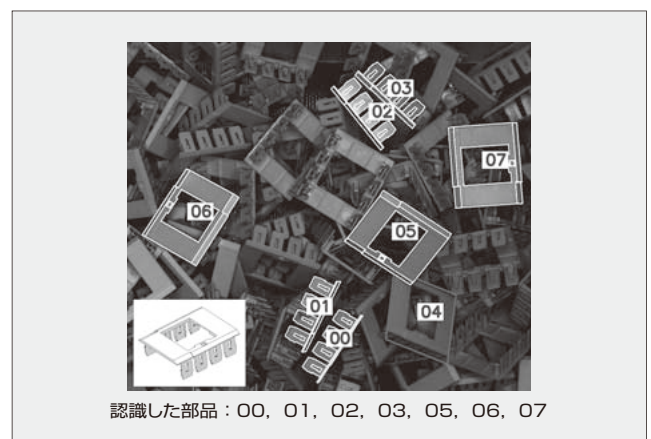
③ 機械学習技術のロボットビジョンへの適用

ロボットビジョン分野において、ばら積みにされた部品の位置と姿勢を認識し、ロボットで取り出す技術の研究開発を行っている。

これまでの開発手法は、開発者が部品ごとに特徴的であると考えられる形状パターンに着目し、部品の位置と姿勢を認識するアルゴリズムを構築するものであり、部品が変わるたびに開発をやり直す必要があった。

そこで、計算機が大量の画像データ群の中から部品の特徴的なパターンを学習し、最適なアルゴリズムを自動生成する手法の“機械学習”を適用することにより、新規部品に対する開発工数を大幅に削減することが可能になった。

図9 機械学習による部品の位置と姿勢の認識結果



先端技術

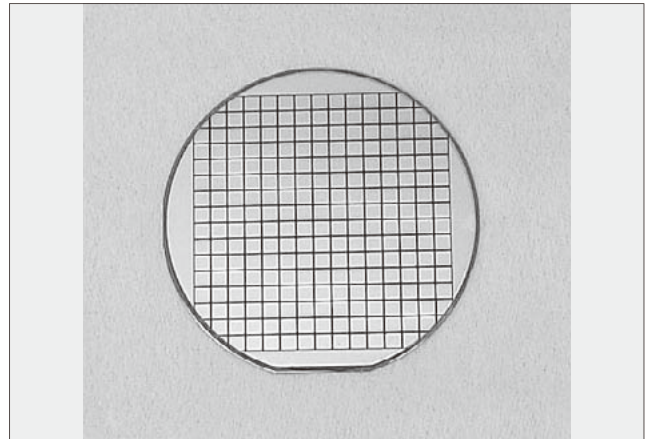
④ 1,700 V 耐圧クラス SiC-SBD

パワーエレクトロニクス機器のさらなる省電力化に対応するため、Si-FWD (Free Wheeling Diode) から炭化けい素を用いた SiC-SBD (Schottky Barrier Diode) への置き換えが進んでいる。

富士電機は、独立行政法人 産業技術総合研究所と共同で 1,700 V 耐圧クラス SiC-SBD を開発した。最新 IGBT モジュールの Si-FWD を SiC-SBD に置き換えることにより、インバータ発生損失を最大 39% 低減することに成功した。さらに、チップ単体としても 200℃ 以上の高温で動作し、Si-FWD と比べて 10 倍以上の破壊耐量を持つなどのメリットがあり、さまざまな次世代パワーエレクトロニクス機器への搭載を計画している。

●関連論文：富士電機技報 2013, vol.86, no.4, p.240

図 10 1,700 V 耐圧クラス SiC-SBD ウェーハ

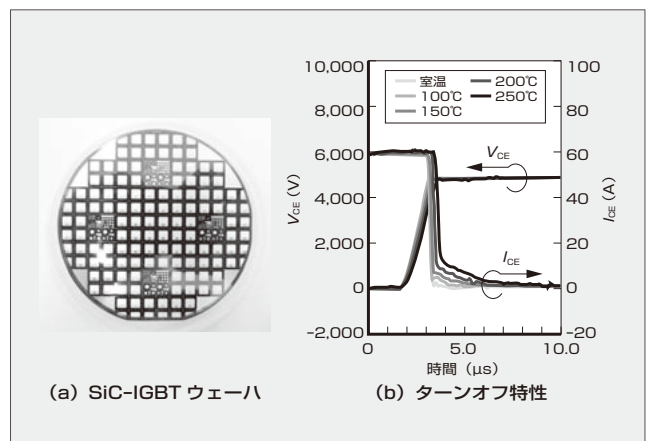


⑤ 13 kV 級超高耐圧 SiC-IGBT

独立行政法人 産業技術総合研究所を中核とする最先端研究開発支援プログラム (FIRST) に参画し、13 kV 級超高耐圧 SiC-IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を開発した。この素子はスマートグリッドにおける送配電機器など超高耐圧分野への応用が期待されている。従来のシリコン素子と比べて高耐圧かつ低損失であることから、装置の省エネルギー化および小型・軽量化が可能である。

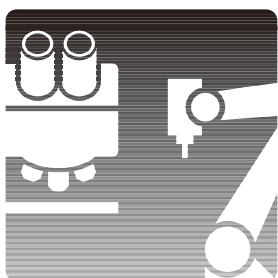
素子の特徴として、全層をエピタキシャル自立膜とする高品質なフリップ型ウェーハを使用しており、また、新酸化膜形成法と C 面 IEMOS 構造を組み合わせることにより、良好な電気特性を実現している。これらの技術の適用により、微分オン抵抗 $11 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ 、耐圧 16 kV 以上という世界最高レベルの特性を実現した。

図 11 13 kV 級超高耐圧 SiC-IGBT



(a) SiC-IGBT ウェーハ

(b) ターンオフ特性





*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。