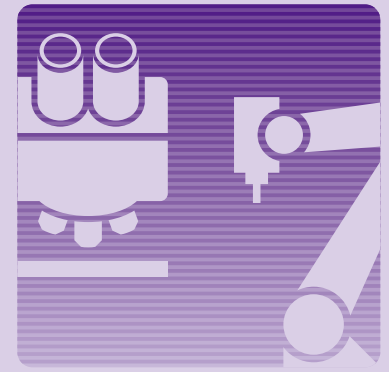


基盤・先端技術



基盤技術 先端技術

富士電機は、新たな顧客価値の創出と SDGs など社会課題解決に向けた強いコンポーネント、システムおよびソリューションの開発に注力するとともに、これらの開発を支える基盤技術や差別化を実現する先端技術の研究開発に取り組んでいる。

再生可能エネルギー（再エネ）である地熱発電では、地熱蒸気中に含まれる不純物が地熱蒸気タービンに付着堆積することで発電効率が低下するという課題を解決するために、不純物であるシリカの付着を抑制する炭素系コーティング技術を開発した。

また、受配電設備のさらなる安全性の向上や小型化のために、新たな絶縁材料や電力機器の監視技術の開発を進めている。絶縁材料では、2017 年から国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のプロジェクトに参画し、従来よりも 30% の小型化を目指したガス絶縁開閉装置向けに誘電率傾斜機能材料（ ϵ -FGM）を開発している。電力機器の監視技術として、受配電設備での短絡事故による設備の損傷を軽減するため、短絡点のアーク放電を高速に検知する技術を開発した。また、電力設備の外部金属接地壁面に簡単に取り付けられる TEV センサ（静電容量センサ）を利用して絶縁故障の予兆信号を検出し、設備の安全性と稼働率向上を実現する部分放電検知技術を開発した。

パワーエレクトロニクス分野においては、純水に界面活性剤を添加した冷却媒体の沸騰現象を利用した沸騰冷却促進技術による機器の小型化や、回転機における循環電流を考慮した損失の高精度な計算手法の構築、ターボ機械などにおけるモータのギャレス化や、小型・高効率化に向けた超高速 PM モータの駆動制御技術と磁気軸受制御技術を開発した。

次世代パワー半導体では、大幅な省エネルギー（省エネ）化が期待されているスーパージャンクション（SJ）構造を持つ超低オン抵抗 3.3 kV 耐電圧クラスのトレンチゲート型 SiC-SJ-MOSFET を開発した。

食品流通機器では、冷凍冷蔵ショーケースにおける食品をはじめとした保冷商品の高品質温度管理と省電力化を実

現するため、ファンの微小な風で熱交換器の霜を昇華・剥離によって除去することが可能な冷凍回路技術を開発した。

先端的シミュレーション技術として、材料の疲労寿命を想定する設計技術の獲得を狙い、疲労き裂進展の予測シミュレーション技術の構築を進めている。材料の疲労特性から導出した損傷率を基に、き裂発生位置とその進展形状が予測できる技術を開発した。今後、精度向上と製品への適用を図る。

計測制御技術として、再エネの大量導入に伴う系統周波数の変動拡大への対策技術や、複雑化する電圧分布などに対応する配電系統監視技術を開発している。NEDO からの委託業務により周波数変動を低減する太陽光 PCS（Power Conditioning System）の制御技術を開発し、シミュレーションにより有効性を確認した。また、計測値の誤差や異常値を除去し自動的に補正を行う、限られた計測情報から精度よく配電系統状態が推定可能な技術を開発した。

DX（デジタルトランスフォーメーション）を実現するための AI や IoT 関連技術の開発も進めている。省エネには設備運用の最適化が重要である。そこで、複数のソルバ（AI ソフトウェア）の中から最適なソルバを選定する機能を開発した。汎用モデリング言語などによる定式化を行い、各ソルバで演算させることで最速のソルバを選定する。大規模プラントや高速性が要求される場合に活用していく。

IoT（Internet of Things）関連技術として、システム全体を俯瞰（ふかん）してシステム要求仕様書を自動生成する機能を、システムモデリング言語「SysML」を活用して開発した。本機能により仕様の不整合を減らし、開発効率や品質向上が期待できる。また、IoT 機器を経由した攻撃防止のため、不正なソフトウェアの起動や書込みを防止するセキュアブート技術を開発した。ROM 容量や起動時間増加のデメリットを小さくする構造としており、広く富士電機製品に適用が可能である。

このように富士電機は、製品開発を支える基盤技術、先端技術を徹底的に強化することにより、安全・安心で持続可能な社会の実現のためのソリューションを提供していく。

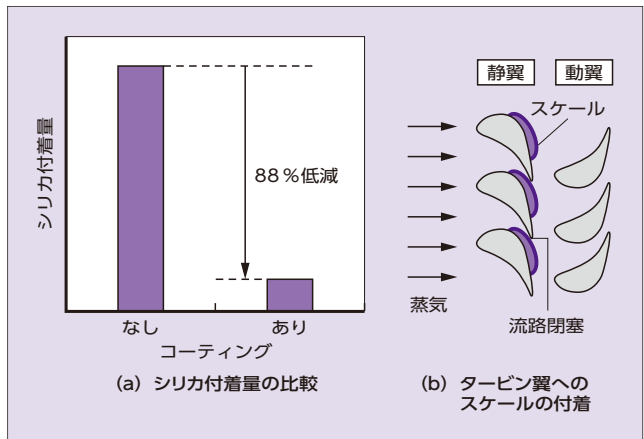
基盤技術

① 地熱蒸気タービン表面の低付着コーティング技術

地熱蒸気タービンでは、地熱蒸気中に含まれるシリカなどが付着堆積するスケリングという現象がある。この大量のスケールがタービン翼間の蒸気流路を閉塞して、発電効率を低下させることがある。この対策として、炭素を主材とした低付着コーティング技術を NEDO の地熱発電技術研究開発に参画して開発した。

低付着コーティングとしてタービン材である 13%Cr 鋼よりも反応性が低くスケールが付着しにくい炭素コーティングを採用し、さらにシリカの付着因子となりうる炭素中の欠陥を低減するコーティングプロセスを開発することで、タービン材と比較してスケールの付着量を飛躍的に抑制した。本開発により、スケール付着による地熱蒸気タービンの効率低下の抑制が期待できる。

図1 タービン材へのコーティングの効果



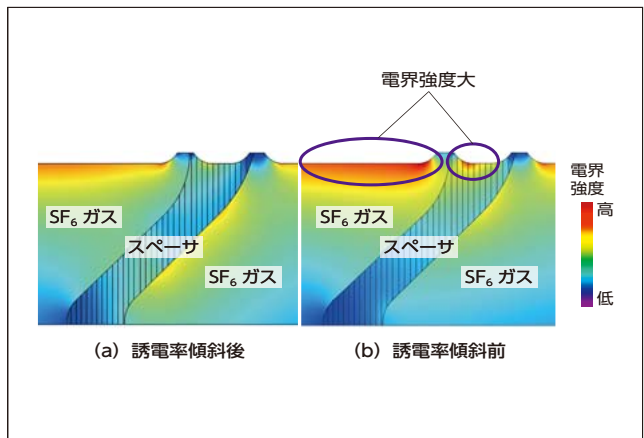
② 誘電率傾斜機能材料 (FGM) スペーサの逆求解解析による誘電率分布設計技術

富士電機は 2017 年から NEDO のプロジェクトに参画し、電力の安定供給に不可欠な高電圧電力機器の小型化や信頼性向上を実現するため、誘電率傾斜機能材料 (ϵ -FGM) を適用して、従来よりも小型化したガス絶縁開閉装置 (GIS) 用の絶縁スペーサを開発している。

この中でガス中の導体部の最大電界強度を理論的な限界まで低減すると同時に、樹脂中の電界強度とのバランスも考慮して、最適な誘電率傾斜を求める逆求解解析システムを開発した。本手法を適用して、従来よりも 30% 小型の絶縁スペーサ (245 kV 相当) を試作し、絶縁性が IEC 規格に適合することを確認した。

本手法を各種高電圧機器の絶縁設計に活用し、機器の小型化や据付面積の低減を図っていく。

図2 逆求解解析で得られた電界強度分布



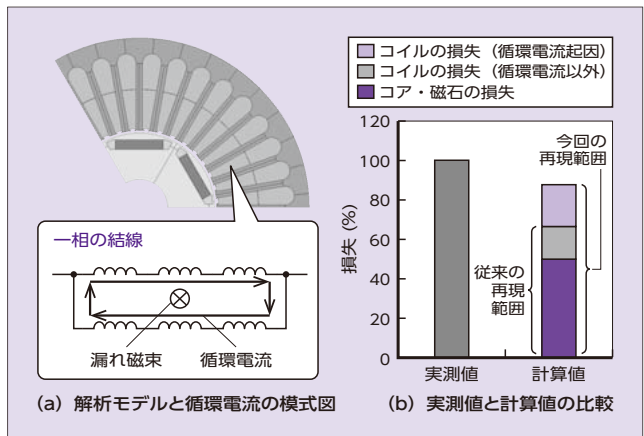
③ 回転機の効率向上を実現する磁界解析技術

回転機の省エネルギーを図るためには、発生要因ごとの損失を定量化し、対策を検討する必要がある。

富士電機は、並列する素線からなる巻線に、交流の漏れ磁束が鎖交することで発生する循環電流による損失を新たに考慮する計算手法を、東海大学と千葉工業大学との共同研究によって開発した。

図(a)には回転機の磁界解析モデルと循環電流の模式図を、図(b)には回転機の損失実測値を 100% として計算値と比較した結果を示す。従来の計算では、損失の約 70% を再現できていたのが、循環電流を考慮することで約 90% まで再現できるようになり、高い精度で損失を予測できるようになった。今後、高効率回転機の開発に本手法を活用していく予定である。

図3 回転機における循環電流と損失



基盤技術

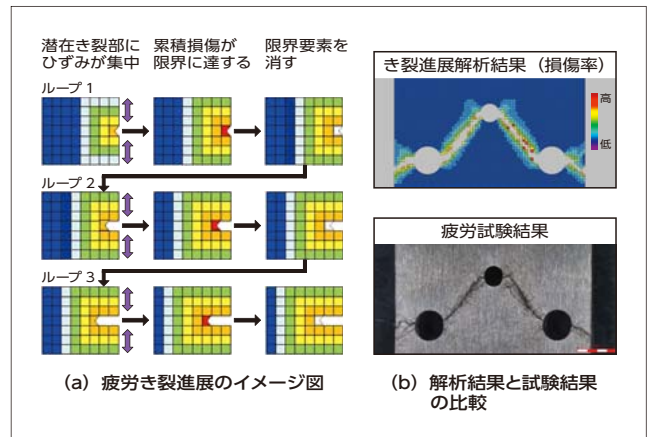
4 疲労き裂進展シミュレーション技術

船舶、自動車、発電などの分野の機器や半導体モジュールのように繰返し応力を受ける製品の信頼性を向上させるためには、破壊までの疲労き裂進展を予測する必要がある。しかし従来、実験による材料の疲労特性を使って構造物の破壊を予測していた。そこで、き裂進展を予測するため、次の手順で行うシミュレーション技術を開発している。

- (1) 構造物をメッシュ状の要素に分割したモデルを作る。
- (2) 各要素への繰返し応力による負荷を累積する。
- (3) 累積負荷が限界値に達した要素は、疲労破壊したと見なしモデルから取り除く。(2)に戻って計算を繰り返す。

実験サンプルによる疲労試験を行い、き裂発生位置とき裂進展形状が予測可能であることを確認した。今後、製品の信頼性向上への活用を目指し開発を進める。

図4 疲労き裂進展シミュレーションの概念と解析結果

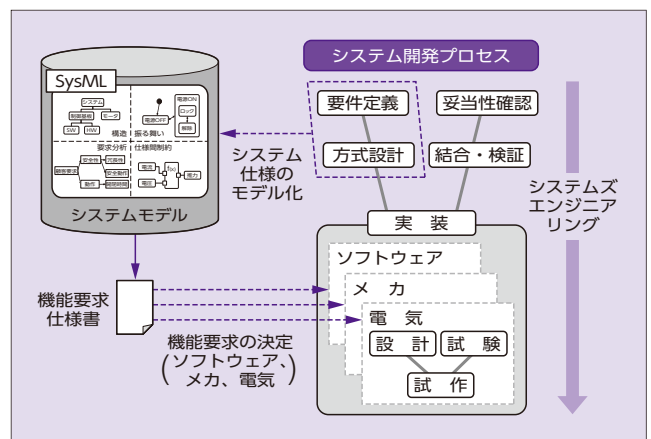


5 システムモデリング言語 SysML を活用したシステム開発

システム開発では、システム全体を俯瞰（ふかん）して詳細な仕様を決定する“システムズエンジニアリング”が有効である。近年は情報通信技術の発展に伴うシステムの大規模・複雑化により、重要性が増している。

富士電機は、システムモデリング言語“SysML (Systems Modeling Language)”によるシステムズエンジニアリング手法の研究開発を進め、SysML で記述したモデルからシステム要求仕様書を自動生成する機能を開発した。システムを俯瞰して要求仕様を決定できるので、関係する各種技術分野間の仕様の不整合による不具合を減らし、開発効率や品質が向上する。今後は、動作や制御を模擬する各種シミュレータと連携して、製品開発のシステム仕様の検討段階において妥当性の確認に用いる予定である。

図5 SysML を活用したシステム開発プロセス

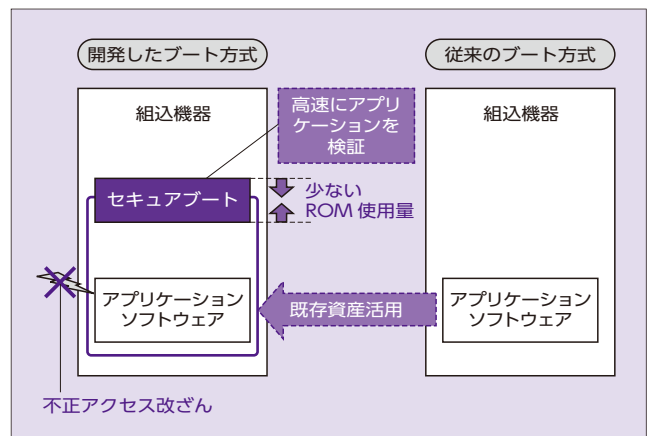


6 組込機器向けソフトウェア保護技術

昨今多発しているIoT (Internet of Things) 機器を踏み台にした攻撃への対策として、不正なソフトウェアの起動や書き込みを防止するセキュアブート技術を開発した。

組込機器のセキュリティ対策を行う上で問題となることが多いROM 使用量や起動時間の増加を抑制することにより、安価なプロセッサに搭載可能とした。また、既存ソフトウェアを流用可能な構造とし、セキュリティ対応に伴う開発コストを抑えることを可能とした。これにより、富士電機製品のセキュリティ強化を進め、お使い頂く顧客の安全・安心に貢献する。

図6 開発したセキュアブート技術の特徴



基盤技術

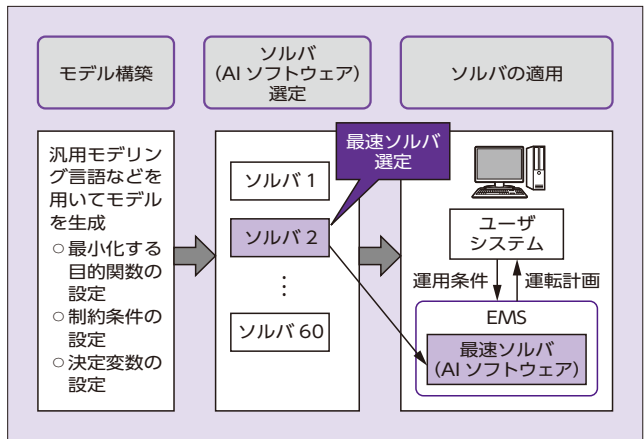
⑦ EMS における運用計画立案の高速最適化 AI 技術

EMS（エネルギーマネジメントシステム）は、ソフトウェアである最適化 AI（ソルバ）を用いて、工場やビルの省エネルギー（省エネ）・省 CO₂ を行うための設備の起動停止や出力設定などの運用計画を立案している。しかし、プラントの大規模化や複雑化が進む中、ソルバの性能のさらなる高速化が求められていた。

富士電機は、対象設備の運用計画を高速で立案する上で最適なものを、複数のソルバの中から選択する機能を開発した。主な特徴は次のとおりである。

- (1) 汎用モデリング言語などでモデルを構築するため、さまざまなソルバが使用可能
- (2) 構築したモデルを基に複数のソルバで計算を実行、最速のソルバを選定

図7 ソルバの最適化の概要



先端技術

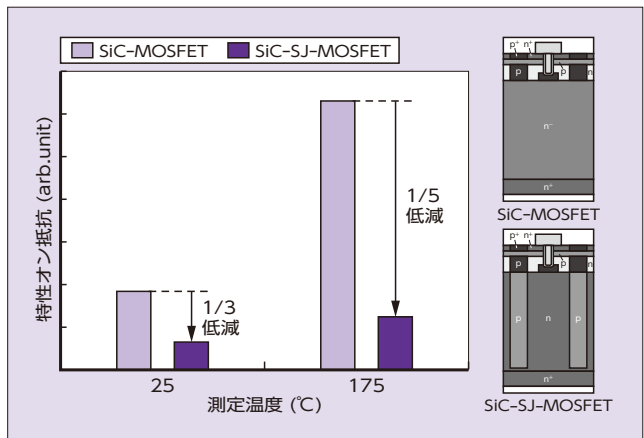
① 超低オン抵抗 3.3 kV SiC スーパージャンクション MOSFET

脱炭素社会を背景に、一層の省エネルギーを実現する上で、高耐圧 SiC パワーデバイスが必要である。富士電機は、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）の事業に参画し、3.3 kV 耐圧クラスのトレンチゲート型 SiC スーパージャンクション MOSFET（SiC-SJ-MOSFET）チップを開発した。

一般に MOSFET では、高耐圧化のためにドリフト層のキャリア濃度を下げるとオン抵抗が高くなってしまいます。周期的な pn カラムを持った SJ 構造では、ドリフト層のキャリア濃度を下げずに高耐圧化できる。

本チップは、3.3 kV 以上の耐圧を持ち、オン抵抗が 25℃において従来のトレンチゲート型 SiC-MOSFET の 1/3、175℃において 1/5 と極めて低い。

図8 SJ 有無による SiC-MOSFET のオン抵抗

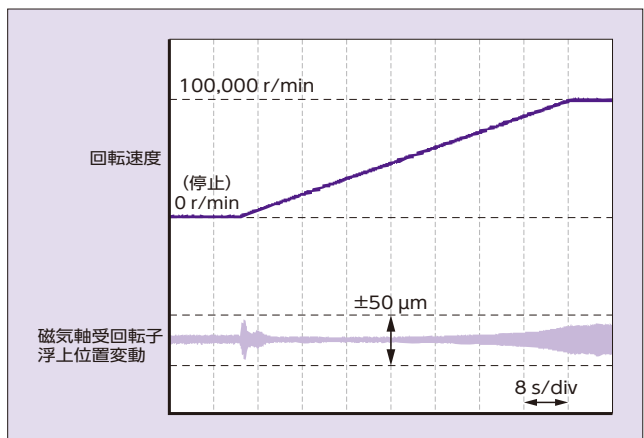


② 超高速 PM モータと磁気軸受の制御技術

ターボ機械などの高効率化や省メンテナンス化を図るため、ギアレス高速モータの要望が高い。そこで、4 極 10 万回転/分の超高速 PM モータ向けの高速駆動制御技術と、高速回転を実現する上で必要な磁気軸受制御技術を開発した。主な特徴は次のとおりである。

- (1) 定格出力 2.4 kW の PM モータに対して、出力周波数 3.3 kHz のベクトル制御を適用し、回転速度 10 万回転/分、モータ効率 91.4%、速度変動 0.5% 以内を実現した。
- (2) 磁気軸受によって浮上する回転子の位置変動を高精度に分析するアルゴリズムを開発し、磁気軸受制御パラメータの調整効果を高め、安定した浮上制御を実現した。今後、大容量化などを進め、応用範囲の拡大を図る。

図9 10 万回転/分 超高速 PM モータの加速波形と浮上位置変動



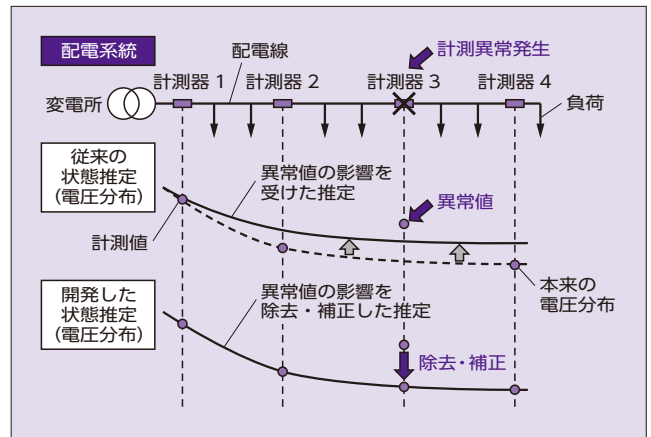
先端技術

③ AIを活用した計測異常検知技術－配電系統監視への適用

近年、太陽光発電や電気自動車（EV）、蓄電池の配電系統への接続が増加しており、それに伴う複雑化した電力・電圧分布（状態）を監視する技術が求められている。監視の際に実施される状態推定（系統上の限られた計測情報から未計測の状態を推定）では、計測値に誤差や異常があった場合でも、要求される推定精度の維持が重要となる。

富士電機は、明治大学との共同研究によって、AI技術であるコレントロピーとJIT（Just-In-Time）モデリングを活用した新たな状態推定技術を開発した。この技術によって、ノイズや計測器故障、通信障害などによって計測誤差が生じて、異常値を検知し、除去と補正を自動的にを行うロバストな状態推定が実現した。また、計測値間に時刻非同期性がある場合への対策も行っている。

図10 異常値の検知と除去・補正の効果



④ 高速アーク検知技術

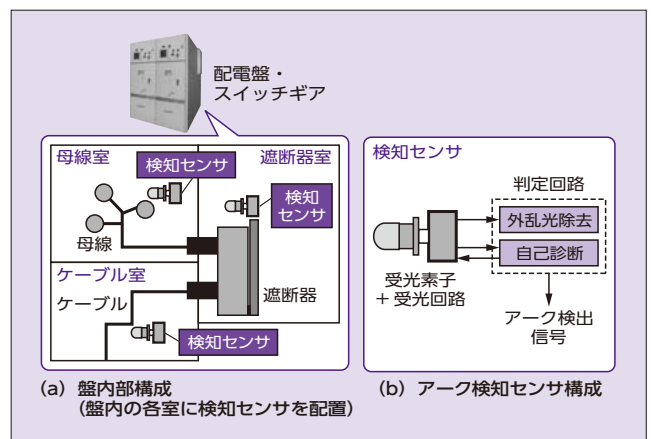
受配電設備で短絡事故が起こると、数kAから数十kAの電流が流れ、短絡点でアーク放電（アークプラズマ）が発生する。このとき、20,000℃以上の高温に達し、周囲に多大な損傷を与える。富士電機は、この損傷を軽減するため、高速アーク検知技術を確立した。

発生したアーク光を、高速かつ高い信頼性で検出するアーク検知技術の特徴は次のとおりである。

- (1) アーク発生から数ミリ秒以内に検出信号を出力
- (2) 外乱光除去機能によってアーク光の誤検知を防止
- (3) 自己診断機能によって故障や汚れなどによるセンサの異常を早期発見し、検知漏れや誤動作を防止

今後、アークによる損傷を低減するアーク消弧装置と組み合わせた検証試験を行う。

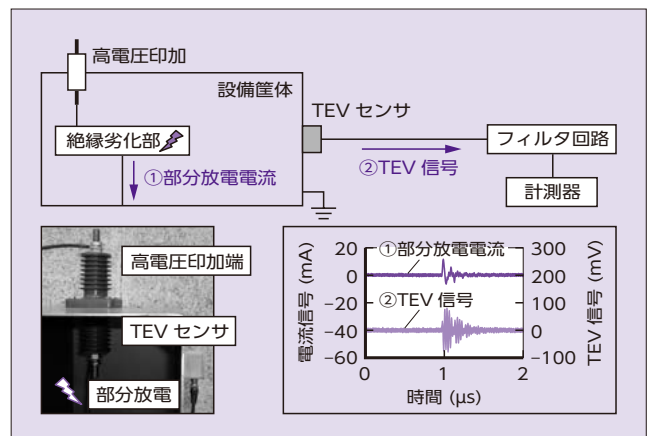
図11 装置構成



⑤ 密閉盤外部からの部分放電信号検出技術

電力設備は、高経年化に伴い絶縁故障の発生リスクが上昇する。稼働中に絶縁異常を未然に検知して設備の故障による停止を防ぐ技術が求められる。富士電機は、電力設備の筐体（きょうたい）などの外部金属接地壁面に簡単に取り付けられる静電容量（TEV）センサを利用した絶縁故障の予兆信号（部分放電信号）の検出技術を構築した。この技術は、部分放電で発生した電流（図中①）から、TEVセンサを用いてTEV信号（図中②）を検出し、フィルタ回路を用いて環境ノイズから分離する。これにより、絶縁破壊の前駆現象である100pCの微小な部分放電を検出できる。この技術によって稼働中の既設設備に対する絶縁異常の常時監視が可能になり、高経年設備の絶縁故障を防止することができる。

図12 TEVセンサを用いた部分放電測定システムおよび実測例



先端技術

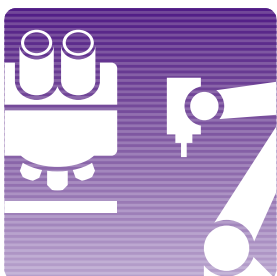
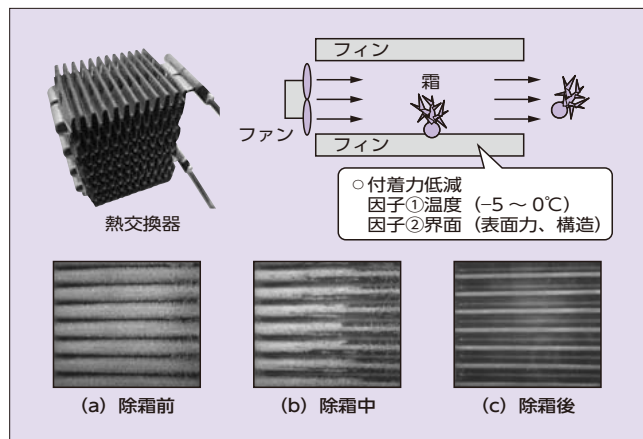
⑥ 霜を溶かさないう昇華・剝離除霜技術

冷凍ショーケースは、熱交換器を使って庫内を約 -20°C に冷却している。その際、熱交換器の表面温度が -20°C 以下の低温となるため、空気中の水蒸気を基に霜が成長する。従来は、一定周期でヒータ加熱により霜を溶かして除霜していたため庫内温度が最大 15 K 上昇することがあった。

開発した新しい除霜方式では、霜の付着力が低下する $-5 \sim 0^{\circ}\text{C}$ に熱交換器の温度を制御し、その間に昇華（気化）またはファンのわずかな風圧や他の機械部品が動作する時の振動によって霜を剝離して除霜する。

この技術により、除霜中も庫内温度の上昇を 5 K 以下に抑制して適切な温度範囲に保ち、品質を維持したまま食品などの商品が保存できる。また、除霜中のヒータ電力を大幅に削減し、最大電力を 30% 削減できる。

図 13 昇華・剝離除霜の原理





*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。