

# 受配電・開閉・制御機器コンポーネントの製品評価

Product Evaluation of Power Distribution, Switching and Control Equipment Components

宮沢 秀和 MIYAZAWA, Hidekazu

秦 淳一郎 HATA, Junichiro

沼上 毅 NUMAGAMI, Takeshi

受配電・開閉・制御機器コンポーネントの開発工程においては、市場の要求に対して製品の仕様を満足させるため、多項目にわたる製品の評価が必要である。

富士電機では、製品の性能を決める因子の絞込み評価、使用環境を考慮した信頼性評価、取扱い性を意識したインタフェース評価、製品規格に基づく特性評価の四つの観点で評価を行い、製品の品質をつくり込んでいる。これらの製品評価により製品の仕様を満足させることで、顧客満足度を高めるとともに、総合的な開発効率の向上を図っている。

In the development process for distribution, switching and control equipment components, product evaluations encompassing many items are required to satisfy product specifications and meet market demands.

Fuji Electric builds product quality by implementing four kinds of evaluation: a screening evaluation on factors determining product performance, a reliability evaluation in view of a product use environment, an interface evaluation that considers handleability, and a characteristic evaluation based on product standards. With these evaluations, Fuji Electric makes our products meet their specifications to increase customer satisfaction while improving the efficiency of our overall development.

## 1 まえがき

富士電機の受配電・開閉・制御機器コンポーネントにおける主な製品は、電磁開閉器、低圧遮断器、操作表示器（コマンドスイッチ）、高圧遮断器、電力監視機器である。

これらの製品の開発においては、低電圧から高電圧の電流を気中や真空中で開閉して遮断する技術、電磁石や開閉機構で遠隔あるいは手動で動作する技術、電流を検出あるいは計測する技術が求められる。これらの技術を基に構想設計を行い、製品の要素技術となる開閉機構部や接点部などの部分試作品を用いて、開発要求仕様を満足する基本構造を確立する。次いで、型試作品を用いて製品に要求される性能の評価を行い、品質のつくり込みを行う。最終段階の量産試作品では、安定したものづくりができるための品質を確立している。

本稿では、品質のつくり込みや市場でのさまざまな使われ方を考慮した性能検証を実施している製品評価について述べる。

## 2 製品評価

富士電機の受配電・開閉・制御機器コンポーネントは、グローバル化に伴い、表1に示すような国内のJISはもとより海外のIEC規格やUL規格への適合あるいは準拠が求められており、複数の規格を満足させ、規格認証を取得する必要がある。

開発工程において、市場の要求に対して製品の仕様を満足させるため、表2に示すように多項目にわたる製品評価が必要である。製品の性能を決める因子の絞込み評価、使用環境を考慮した信頼性評価、取扱い性を意識したインタフェース評価、製品規格に基づく特性評価の四つの観点

表1 各製品の国内外規格

機種	国内	海外	
電磁開閉器	JIS C 8201-4-1	IEC 60947-4-1	UL60947-4-1
低圧遮断器	JIS C 8201-2	IEC 60947-2	UL489
操作表示機器 (コマンドス イッチ)	JIS C 8201-5-1	IEC 60947-5-1	UL508
	JIS C 8201-5-5	IEC 60947-5-5	
高圧遮断器	JEC-2300	IEC 62271-100	-
電力監視機器	JIS C 1102-□	IEC 61000-□	-
	JIC C 1216	(IEC 255-3)	

で評価を行い、製品の品質をつくり込んでいる。

### (1) 製品の性能を決める因子の絞込み評価

開発の初期段階では、シミュレーションなどを活用して設計因子の絞込みを行う。特に、最適な材料を選定することは非常に重要である。試作段階では、構成部品の形状、寸法、採用材料などの設計パラメータを実験的に評価して目標性能を満足する最適値を求める。

### (2) 使用環境を考慮した信頼性評価

近年、再生可能エネルギー、高効率化、省エネルギーの取組みで製品の使われ方が多様化し、エネルギー効率の高い機器や直流機器の採用が増加している。このような多様化に対応するため、顧客の装置への適用や、設置場所など製品の使用環境の状況を把握し、経年劣化を考慮した加速評価を行い、製品の信頼性を保証している。

### (3) 取扱い性を意識したインタフェース評価

人が直接操作する部位は、最も操作しやすくなるように考慮する必要がある。また、緊急時に想定されるあらゆる操作にも耐えられる強度と安全性を備えたフェールセーフ設計が要求される。そこで、過去の使い方に関するデータを参考にして、推奨値を超える強い力での操作や工具を使用した操作による評価を行い、強度限界値や壊れ方を把握

表 2 製品評価

項目	評価の検証技術	製品評価の観点
動作評価	高速度・高精度測定技術 可視化技術 自動計測技術 機構解析技術 最適化技術（品質工学活用）	①製品の性能を決める因子の絞込み評価 設計検討だけでは決められない設計制御因子パラメータを実験的に見極め設計値を決める  ②使用環境を考慮した信頼性評価 使用される負荷に合致した評価を行う 想定される使用環境での安定性を評価する  ③取扱い性を意識したインターフェース評価 限界を把握し取扱い性のチューニングを行う  ④製品規格に基づく特性評価 規格に適合する試験方法で特性値が良品基準を満足していることを効率的に確認する  製品知識
遮断評価	大電流評価技術 過度現象解析技術 アーク観測技術 直流評価技術 磁界解析技術	
寿命評価	予測技術 実負荷模擬回路技術 加速評価技術	
耐環境評価	統計手法活用技術 材料技術 故障解析技術	
通電性評価	熱解析技術	
絶縁評価	高電圧測定技術	
振動・衝撃評価	複合評価技術	
耐ノイズ評価	EMC計測技術 高精度計測技術	
取扱い性評価	定量化技術 可視化技術	

し、フェールセーフになっていることを確認している。

(4) 製品規格に基づく特性評価

量産試作品の評価では、設計値の図面公差を考慮して特性を最小値から最大値の範囲で把握するための試験を行い、特性値が良品基準値内であることを確認する。電力監視機器などは、顧客の使用条件が多様となるので、効率的な試験を実施して想定される全ての組合せで電力量計測データを取得している。また、規格認証を取得するため、国内認証機関はもとより、UL、CCCなどの海外認証機関との信頼関係を構築し、規格に基づく評価試験を忠実に実施している。

③ 製品評価試験の事例

3.1 製品の性能を決める因子の絞込み評価試験

(1) 電磁接触器の動作評価と寿命評価

電磁接触器は大きく分けて接点開閉部と電磁石部分からなる。接点開閉部を構成する主な部品は、可動接点、固定接点、接触スプリング、接点支えである。電磁石部は、可動鉄心、固定鉄心、操作コイルからなり、樹脂成形フレーム部品で覆われている（図1）。

電磁接触器は、操作コイルに電圧を印加すると電流が流れ、鉄心内に磁束が発生して可動鉄心が固定鉄心に吸引される。この動きと連動して、可動鉄心に連結された接点支えが共に動き、フレームに固定された固定接点と可動接点が接触して電流が流れる。

この開閉動作の時間は、10~20msと高速である。そこで、光学変位計や動きを可視化できる高速度カメラを活用して高精度に動作を評価し、安定した接点の接触ができるスプリング荷重の最適化や接点支えと可動鉄心などの連結

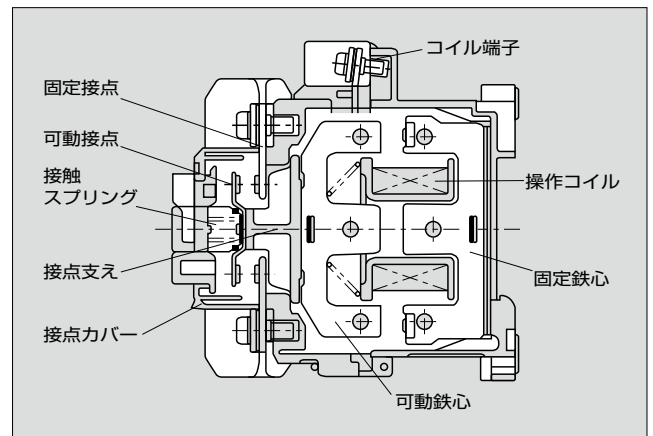


図1 電磁接触器の構成部品

形状に問題のないことを確認する。交流電源では、コイルに印加した電圧の位相を0~180°の範囲で変化させて、動作を自動で計測できるようにして効率的な評価を行っている。

寿命評価においては、モータの起動・停止を模擬した加速試験を行っている。接点接触時の動作と発生するアークエネルギーによる接点の減少量の測定を行った例を図2に示す。接点材料・形状(A)で、動作を最適化することでアークエネルギーを小さくした。さらに、最適な接点形状を決定し、接点材料・形状(B)で目標の消耗限界を満足し、目標寿命を達成した。

「FJシリーズ」は、このような最適化で限界設計にすることで、容積比で約28~38%の小型化を実現しながら、海外向け市場の価格レベルを満足している(176ページ「電磁接触器「FJシリーズ」「SKシリーズ」の機種拡充」参照)。

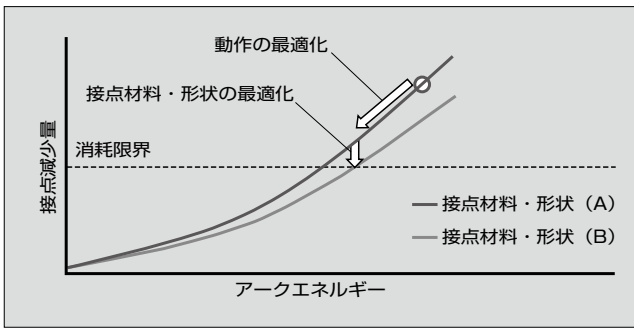


図2 アークエネルギーと接点消耗量の関係

(2) 直流高電圧 MCCB 遮断評価試験

低圧受配電機器である配線用遮断器 (MCCB) や漏電遮断器 (ELCB) は、600 V 以下の交流を対象に、過電流や地絡を検出し、回路を遮断する機器である。

MCCB や ELCB の要求仕様の電流を安全に遮断できることを確認するため、短絡発電機設備を活用して、市場で起こり得る実際の事故電流 (最大 150 kA) をつくり出し、10 ms 以下の過渡的遮断現象を評価することで、接点周りの寸法や材料を決めている。

近年では、太陽光発電などの再生可能エネルギーやデータセンターの普及とともに、直流給電 (300~400 V) が増え、さらに、送電ロスを減らすための直流高電圧 (1,000 V) に対応した遮断器の要求が高まっている。一般的に交流回路では、周期的に存在する電流のゼロ点を迎える前までに接点間に発生するアークを制御し、絶縁を確保して電流を遮断させていた。直流回路ではゼロ点が存在しないため、限られた大きさの空間の中でアークを引き伸ばし、接点間に発生する電圧を電源電圧以上に高めることが必要になってくる (図 3)。

遮断に関して JIS C 8201-2 では、定格電流 (800 A) と定格遮断容量 (5 kA) だけを確認すればよいことになっている。しかし、直流実負荷回路での確実な遮断を保証するために、定格遮断容量以下の全領域における検証を行っている。

直流電流を遮断するためには、アークを瞬時に消弧グリットに転流させて引き伸ばし、接点間電圧を高める必要がある。シミュレーションを活用して消弧室の内壁の形状やグリットの形状および枚数などの設計パラメータの絞込みを効率的に行うとともに、高速度カメラを用いて 10 ms

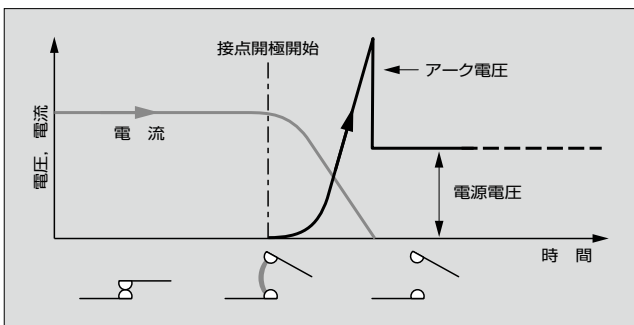


図3 直流回路遮断時の波形

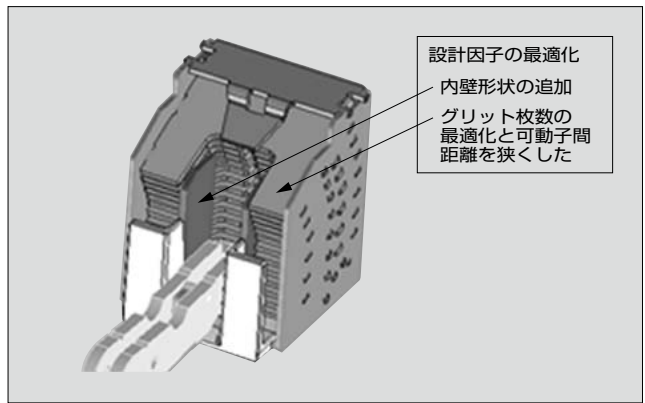


図4 消弧室形状と内壁形状

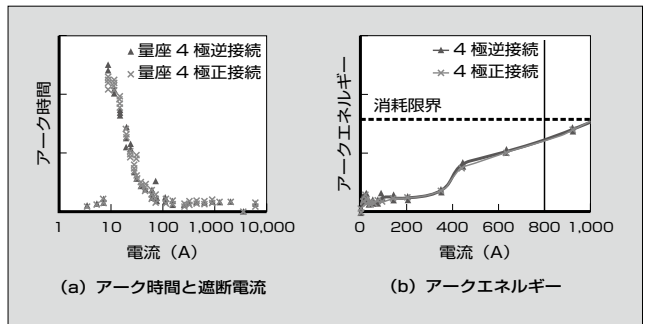


図5 全領域アーク時間とアークエネルギー

の現象を可視化し、DC1,000 V において電流を遮断する際にアークが最も転流しやすい構造を決定した (図 4)。

直流の遮断性能は接点数 (極数) に比例する。4 極で DC1,000 V に対応させる場合、1 極当たり DC250 V の遮断性能があれば満足できる。そこで、単相の DC250 V 試験回路で評価を行った。

開発した消弧室を用いて、試験条件を DC250 V 単極とし、正・逆接続に対して保証する全電流領域で、遮断良否を判断するアーク時間の長さやアークエネルギーに着目した評価を実施し、DC1,000 V を印加したときの直流電流を確実に遮断できることを確認している。また、寿命に関しては、JIS C 8201-2 の規格に基づき、定格電流で 1,000 回の開閉耐久試験を行っている。太陽光発電では日照の度合いによっては電流が非常に小さい場合が想定される。一般に直流では、図 5 に示すように、10 数 A の小さい電流の領域でアーク時間が長い。この領域で開閉が頻繁に行われることも想定して評価を行い、定格電流以下であっても十分な耐久性があることを確認している。このように、直流無極性ブレーカを、太陽光発電設備をはじめ、あらゆる直流分野で安心して使用できるように品質をつくり込んでいる (196 ページ “直流高電圧用ブレーカの無極性遮断技術” 参照)。

3.2 使用環境を考慮した信頼性評価試験

近年、インバータ・サーボアンプの普及拡大に伴い、電磁接触器は従来の電動機の直入れ駆動の用途だけでなく駆動制御装置の一次側開閉器としても使われるようになって

いる。この用途における開閉性能を確保するための評価試験について述べる。

インバータ・サーボンプの一次側開閉器として使用する場合には、電源投入時に発生するコンデンサ充電電流の開閉性能が重要になる。直入れ時の突入電流は定格の6倍であるが、コンデンサ充電時に発生する突入電流は定格の8~15倍と大きくなる(図6)。この突入電流における接点の耐溶着性評価と繰返し開閉による接点の耐久性(寿命)評価を実施した。

電動機始動時の電流を模擬した使用負荷種別 AC-3(半波 10ms における定格電流の6倍の電流を開路し、定格電流を開路する)に対して、コンデンサ回路での接点閉路時に流れる電流は、半波 3ms 程度と急峻(きゆうしゅん)な波形となるため、接点減少量は約 10 倍になる。図7に、開閉試験後の接点写真を示す。AC-3 試験での 100 万回開閉時の接点消耗の状態はコンデンサ開閉の 10 万回に相当することが分かる。

接点寿命の評価においては、市場で使用されている駆動制御装置を用いて、接点寿命評価を実施すればよいが、実

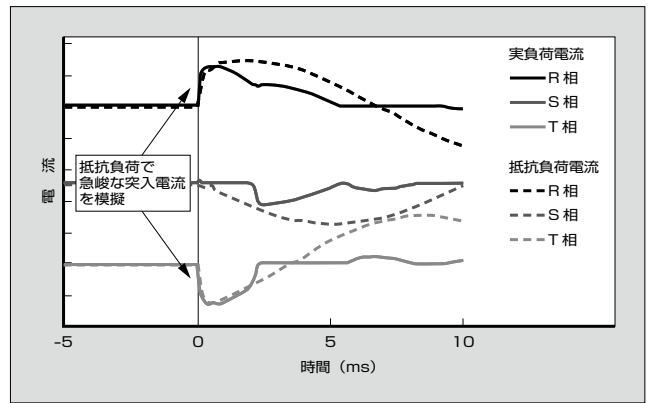


図8 サーボ実負荷と抵抗模擬負荷試験の波形比較

回路のコンデンサの充放電時間は一律でないため、開閉する頻度を高めることができない。そこで代表的な駆動装置を実際に開閉し、電圧、電流波形を取得した。この実波形を抵抗負荷回路の開路で模擬することにより、接点消耗に影響する電流立ちの波形を等価にする模擬回路で評価できるようにした(図8)。

「SK シリーズ」では、このような実負荷のデータを用いて、接点寿命や耐溶着の限界を評価し、インバータ・サーボンプの一次側開閉を考慮して、要求される寿命回数を満足する機種種の拡充を行った。

### 3.3 取扱い性を意識したインタフェース評価試験

コマンドスイッチは、制御盤や各種装置・機械(操作盤)などの操作用スイッチや表示灯として使用されており、操作する人と機械の間のヒューマンマシンインタフェースを迅速かつ正確に行う重要な役割を担っている。

非常停止用押しボタンスイッチは、さまざまな人が操作するため、取扱い者の操作イメージで動作したことが伝わる操作感覚、ならびに適正な操作力でなければならない。一方、緊急時に操作されるため、工具でたたかれるなど過酷な操作も想定する必要がある。基本的には、人間工学的観点から、人が出せる力を想定して操作力のチューニングを行っているが、過去のデータを参考にして過酷な操作を実施することで、実力確認評価を行っている。仕様外でまれてはあがるが、プラスチックハンマーや南京錠などでたたかれて外郭に割れなどの破損が発生した場合でも、機能を損なわないフェールセーフになっていることを確認するため、電気的接点信号に同期させて、高速度カメラで機構の挙動を細かいショットで可視化し、「切る」機能に問題のないことを確認している。

この評価では、たたき方によって変わる操作力を定量化するため、プラスチックハンマーを1ポンド(0.453kg)の円柱剛体に置き換え、判定基準となる衝撃荷重が発生する高さから剛体を落下させる手法も採用している。富士電機独自の構造である「シンクロセーフコンタクト」を搭載した非常停止用押しボタンスイッチは、あらゆる安全性に対して配慮した製品であり、このような取扱いも含んだユーザインタフェース評価を充実させ、フェールセーフや

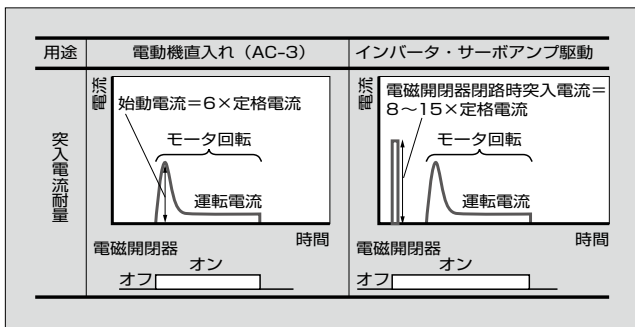


図6 電動機直入れとサーボンプ駆動の比較

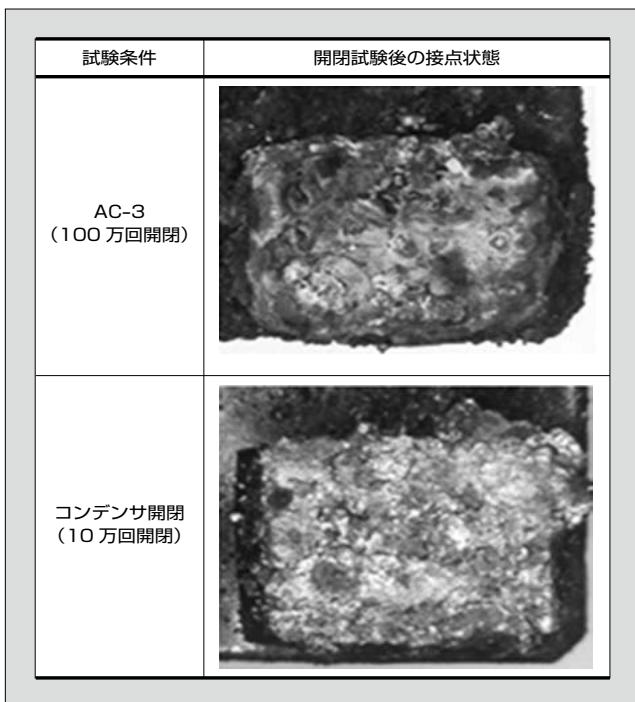


図7 開閉試験後の接点写真

堅牢性も兼ね備えた製品である〔181 ページ「シンクロセーフコンタクト」搭載 非常停止用押しボタンスイッチ (φ22, φ30)〕参照〕。

### 3.4 製品規格に基づく特性確認試験

電力監視機器の社内製品規格に基づく、量産試作工程での品質のつくり込み評価について述べる。

エネルギー使用の合理化を進めていく手段として、電力監視機器「F-MPC04 シリーズ」を製品化し、顧客の電力監視ニーズに対応した多品種をラインアップしている。この製品の製品評価では、主要な機能である電力量計機能を精度良く評価し、製品規格で要求する要素(表3)の可変条件の全てを組み合わせ、288通りの評価を短期間で行う必要がある。

F-MPC04 シリーズは、VT (Voltage Transformer) と CT (Current Transformer) を用いて電圧と電流を計測し、かつ電圧・電流の位相差も計測して、有効電力、無効電力、力率を計測している。

F-MPC04 シリーズの電力量計は、JIS C 1216 普通級に相当するので、CT の定格電流の5%程度の低い電流においても計測精度2.0%を担保する必要がある。このような低い電流における計測誤差を小さくするため、従来24時間の開始時と終了時にのみ通信によって読み出していた電力量を、1カウント5分内を300ms間隔で通信することで、電力量の変化を精度良く計測できるようにした。計測分解能を上げることで、評価における計測誤差を0.1% (300ms/5分)未満とした(図9)。

これにより、評価精度の向上とともに、評価時間の短縮も可能となる。そこで、自動計測技術を導入し、従来のポイントを絞った評価から、全ての評価組合せを短期間で実施できるようにした。

このような評価を行うことで、実負荷でも計測精度の高い電力量計としての品質を向上させた多品種電力監視機器 F-MPC04P をラインアップに加えた。

表3 製品規格で要求する評価組合せ

要素	可変条件	
適用CT定格	5A, 50A, 100A, 200A, 400A, 800A	6種類
電圧	110V, 220V, 440V	3条件
電流	CT定格の5%, 100%	2条件
周波数	50 Hz, 60 Hz	2条件
力率	1.0, 0.5	2条件
電力方向	正方向, 逆潮流	2条件
評価組合せ	288通り	

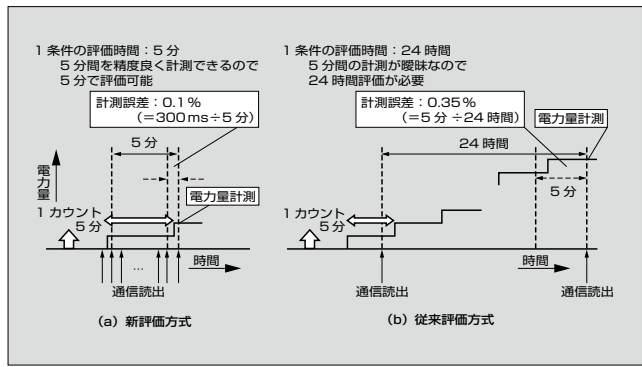


図9 電力量測定方法の比較

## 4 あとがき

再生可能エネルギー分野向けおよびアジア・中国市場向けに新製品や新技術を創出するためのグローバルマザー拠点として、吹上工場に新開発棟を2014年12月完成に向けて建設している。

開発設計、生産技術、品質保証の各部門が集結する建屋に新開発棟を隣接することでチーム力をさらに高め、開発期間の短縮や製品品質の向上を図ることによりお客さまの満足度を高め、総合的な開発効率の向上を図っていく。さらに、太陽光発電をはじめとした、直流高電圧に対応した遮断試験設備を新たに増強し製品評価技術を高める。

今後とも、受配電・開閉・制御機器コンポーネントのニーズを先取りした製品の開発を積極的に推進し、エネルギーの安定供給、省エネルギー、安全・安心、環境など、富士電機のソリューションを製品評価技術で支えていく所存である。



### 宮沢 秀和

受配電・開閉・制御機器コンポーネントの開発・評価に従事。現在、富士電機機器制御株式会社開発・生産本部開発統括部技術開発部長。



### 秦 淳一郎

電磁開閉器の開発・評価に従事。現在、富士電機機器制御株式会社開発・生産本部開発統括部技術開発部課長補佐。電気学会会員、電気設備学会会員。



### 沼上 毅

受配電・開閉・制御機器コンポーネントの開発・評価に従事。現在、富士電機機器制御株式会社開発・生産本部開発統括部技術開発部課長補佐。



\*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。