

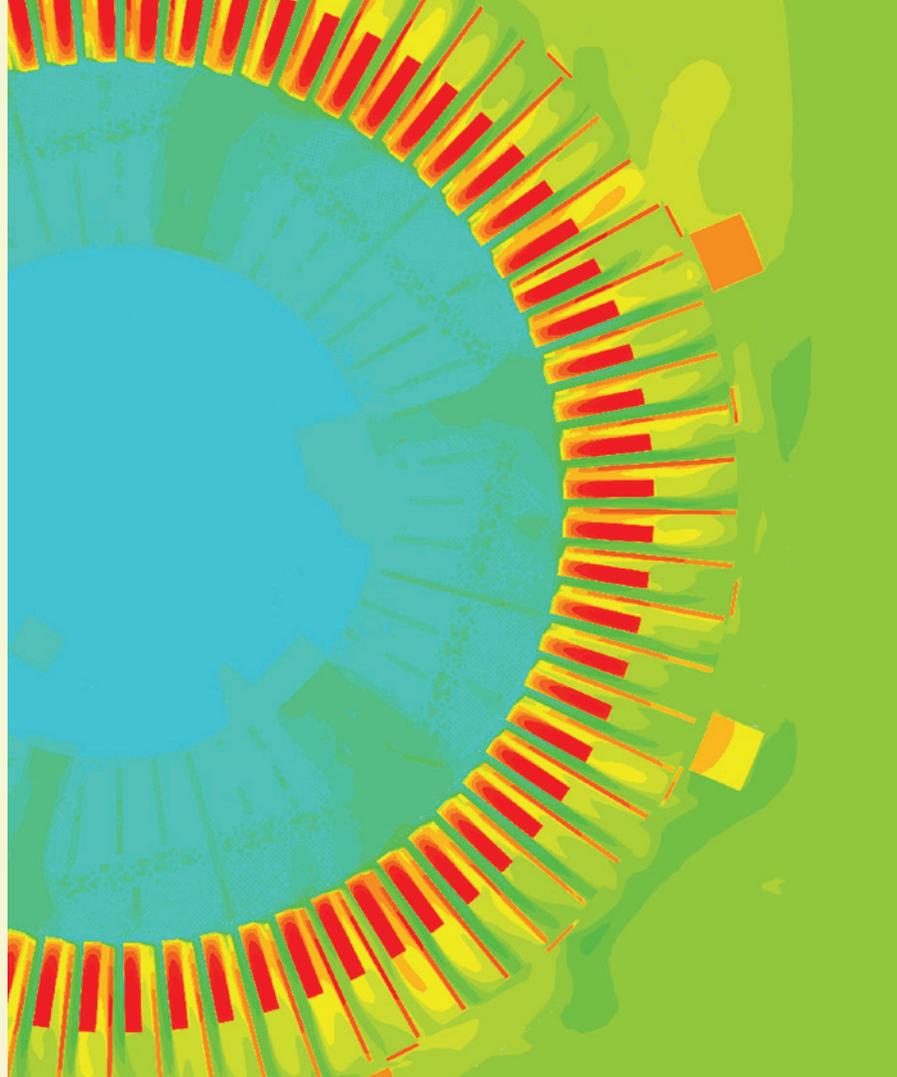
# 01

## 研究開発



常務執行役員  
研究開発本部長

**鉢呂 友康**  
Tomoyasu Hachiro



当社は、創業当時から受け継がれる好奇心と探究心を糧に、難しい課題を解決しようとする強い意志によって、時代や社会の要求に合わせた研究開発を進めてきた。この120周年記念号では、研究開発をパワーエレクトロニクス、情報通信（ICT）、共通基盤技術の3分野に分類し、これまでの10年・現在・今後についてまとめている。

パワーエレクトロニクス分野では、1990年代に入って主回路デバイスにIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を適用することで飛躍的に電力変換装置の大容量化、スイッチング速度の向上による高機能化や低騒音化を進めた。最近の10年では制御回路にFPGA（Field Programmable Gate Array）を適用することで、電流制御をハードウェアロジックで高速に実現でき、開発・設計の柔軟性が増すことで、共振抑制や高調波抑制などの制御技術の高度化を進めてきた。しかし、IGBTのテール電流に起因するスイッチング速度とオン電圧の制約によって、高機能化と低損失化の両立が難しくなっている。今後の飛躍のためには主回路デバイスの刷新が必要であり、素材を従来のSi（Silicon）から新しい時代の主役として注目されているSiC（Silicon Carbide）とした主回路デバイスの適用を推進し、更なる高機能化と低損失化を両立させる革新的な電力変換装置の創出に努める。

情報通信分野では、情報通信機器の信頼性向上のための電源・通信・制御システムの二重化、リアルタイムOS採

用による保守性・拡張性・再利用性の向上、電気設計図面からソフトウェアを生成する自動化などを進めた。近年ではIPネットワーク技術や省電力無線通信技術の応用、装置の小形化に伴う耐ノイズ性の向上を図ってきた。現在は現場機器のネットワーク化が進み、多様なデータを中央に集約して分析・処理して現場機器にフィードバックするクラウドコンピューティング技術が発展している。今後は現場に近い個別機器が自立的に機能するためのエッジコンピューティング技術を高度化することで、通信コスト削減とリアルタイム性を両立させながら、故障予兆診断や無人での最適運転を実現し、機器稼働率の向上と保守コストの低減に貢献していく。

コンピュータ解析技術では、計算機性能の向上と解析ソフトウェアの高機能化によって、構造・電磁界・熱流体・音響などの物理現象や、それら連成問題を三次元的に、かつ高精度に解析できるようになり、開発プロセスへの適用が進んできた。今後は大規模かつ複雑化するシステムの解析時間短縮のため、全体解析と部分解析の組み合わせによる解析精度の向上を図る。また分子動力学などを用いた材料の劣化や破壊の解析技術を確立し、設計段階で長期信頼性を評価する解析技術の構築を目指す。

今後も社会を支えているという使命感を持って新しいことに挑戦し、新しい技術・新しい製品・新しいシステムを創出し続けていく所存である。

# 01 研究開発

当社の幅広い製品を支え、製品力の強化・品質向上に貢献する基盤・製品技術を開発

## 2007

- 植物系樹脂を使用したエコ絶縁被覆を開発

## 2008

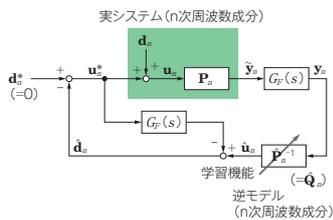
- 解析用HPC (High Performance Computing) システムを導入し、大規模解析を開始

## 2009

- PMセンサレスモータ制御技術を再生エネ発電システムへ応用

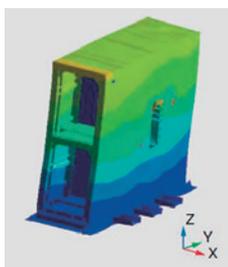


- モータ振動抑制や電力高調波低減に効果的な制御技術「一般化周期外乱オブザーバ」を開発



## 2010

- 電力機器のフル三次元モデルの耐震解析技術を開発



## 2011

- 中国科学院・(国研)産業技術総合研究所(産総研)との国際共同研究体制で低温脱硝触媒を開発

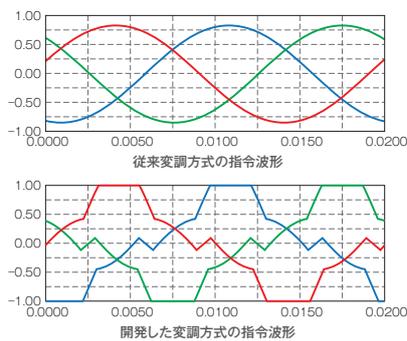


## 2012

- 高速・大容量システムを実現するフィールドネットワークIOリンクⅢを開発



- 太陽光発電用PCS (Power Conditioning Subsystem) の高効率を実現する新主回路・変調方式を開発

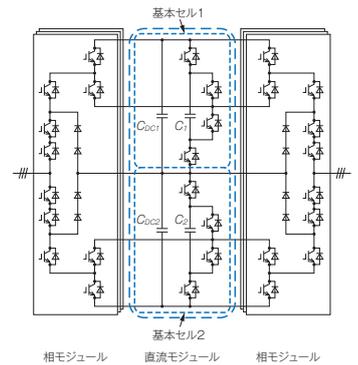


- プリント板保護コーティング剤の腐食ガス透過性評価手法を確立



## 2013

- 高圧インバータ用に独自の5レベル回路方式を開発し、高効率・小形化を達成



## 2014

- パワーエレクトロニクス製品用HILS (Hardware-In-the-Loop-Simulation) による検証で開発スピードを向上



- 保護リレーのIPネットワーク化を実現

- 大電力試験分野で「ISO/IEC 17025」の試験所認定を取得



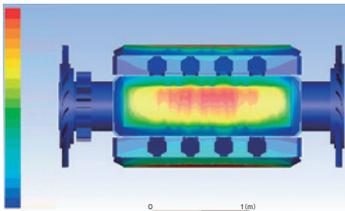
## 2015

- 監視装置向けCPUボードにSoC (System-on-a-Chip) を適用し、小形で高性能・消費電力低減を実現

● 予防保全のためのセンシングシステムを構築し、フィールド適用を開始

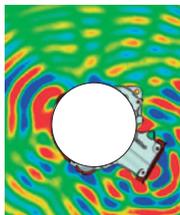
● プリント板のSI (Signal Integrity) / PI (Power Integrity) 解析技術を確立し、設計段階でのノイズの見える化で開発フロントローディングに貢献

● 熱流体解析の大規模化で、発電機内部の状態把握及び冷却効率を向上

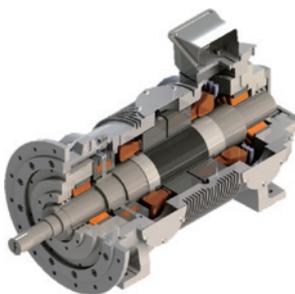


## 2016

● モータの電磁力から発生する振動及び音に関する解析技術を向上



● ロータの高強度化、効率的な冷却方式などの高速モータ技術を確立



## 2017

● モータインバータシステムのEMI (Electro Magnetic Interference) 解析技術の確立

# 2018 ~

## 研究開発分野の今後

低炭素化社会の実現に向けて電気エネルギーの効率的利用が求められる中、当社が目指すパワーエレクトロニクス応用製品の方向性は、「大容量化」・「小形化」・「高効率化」・「高速化」の4つである。これらの包括的な指標として、装置体積あたりの出力容量を示すパワー密度がある。当社製品の一例では、2020年に10年前の5倍の高出力密度化を目標としているものがある。これは同じ出力容量とすれば、体積が1/5になることになる。一概には信じられないものであるが、この実現とさらなる向上を目指していく。

電力変換機器では、高密度実装技術に関する研究開発を推進する。そのため、新しいスイッチングデバイスとして注目されているSiCを活用した主回路技術や高度な解析技術を駆使した高密度設計・実装技術、高速制御技術を適用した高周波・高効率制御技術などの要素技術を強化するとともに、それらを融合することでパワー密度を最大化する。

電動機では、今後は「高速化」を重点とした開発を進める。中でも高速回転を実現するための機能性材料や高速電動機に適した絶縁材料・磁性材料などの材料技術、及び高速回転に起因する発熱に対する冷却性能向上のための解析技術や電力変換器と電動機の協調設計などに注力した基盤技術の開発

を進める。

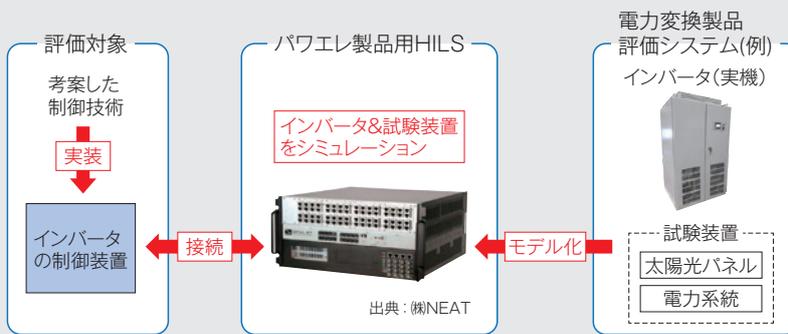
一方、IoT (Internet of Things) によって社会や産業全体のデジタル化が進展している中、当社ICT応用製品の目指すべき方向性は、データ活用によるシステムやサービスの高度化・インテリジェント化である。各種インフラ機器のセンサデータを活用し、機器の稼働率向上や運用・保守コスト低減などの付加価値をお客様に提供していく。そのため、インフラ機器のセンサデータを現場側で知的に処理するIoTコントローラや、データ解析技術を駆使した故障予兆診断技術、当社が保有するプラント運用ノウハウを機械化し、プラントの自動運転を実現するための機械学習技術の応用など、知能情報処理技術に関するハードウェアとソフトウェアの研究開発を進めていく。

さらに、当社の全ての研究開発の開発スピードの向上と製品競争力強化に向け、絶縁を中心とした材料技術や解析技術 (CAE: Computer Aided Engineering) などの共通基盤技術の高度化に取り組む。特にCAEでは、損失・冷却・強度などの製品設計や検証をコンピュータ内に再現した仮想の製品を用いて擬似的に実施するための技術確立に取り組む。さらには金属疲労や微小破壊などの材料挙動を加味した解析技術を確立し、製品寿命の解析の実現を目指す。

# 01-1 パワーエレクトロニクス

省エネ化・高応答化を実現する可変速装置・電力変換装置技術

## パワーエレクトロニクス製品用HILS



試験環境ブロック図

HILSとは制御装置のテスト評価に用いられる装置で、航空機・自動車分野で広く用いられてきた。当社では主に自動車関連製品に適用してきたが、現在ではパワーエレクトロニクス（以下、パワエレ）機器の評価でも活用している。

パワエレ機器は半導体スイッチやフィルタ回路などの電気回路や制御装置から構成され、半導体スイッチを数十kHzで駆動して任意の出力を得る。その制御装置を評価するためには、半導体スイッチの駆動に対して高速のモデル演算間隔が必要である。

これを実現するHILSを用いて、太陽光PCSなど電力変換製品の制御装置評価を実施している。HILSを活用することで早期の問題発見・解決を実現し、製品の信頼性向上に貢献している。

今後は、パワエレ機器だけではなく、周辺のシステムとともに評価し、システムとしての信頼性向上に貢献していく。



パワエレ製品用HILS

### 過去10年

電力変換製品のFRT (Fault Ride Through) 要件対応などの新機能追加時の制御装置評価に活用した。

電力変換製品の多くは系統に接続して運用するため、系統に接続した場合の現象を把握することが不可欠である。特にFRT要件に対応するためには、系統の様々な事故を再現した試験を実施することが必要になる。HILSを使用することで様々な系統条件を再現でき、新機能を追加するための評価試験を実施した。

### 現在

HILSを新製品開発で活用し、問題の早期発見・解決によって製品開発のスピードアップを図っている。

制御装置の試験を早期に実施することは、手戻り作業の短縮につながる。また試作機を用いて評価する場合、問題発生時に装置のどこに問題があるかの要因分析に時間を要する。そこで試作機評価前にHILSで制御装置を評価することで、試作機評価時の問題点を早期に抽出でき、製品開発のスピードアップにつながっている。

### 未来像

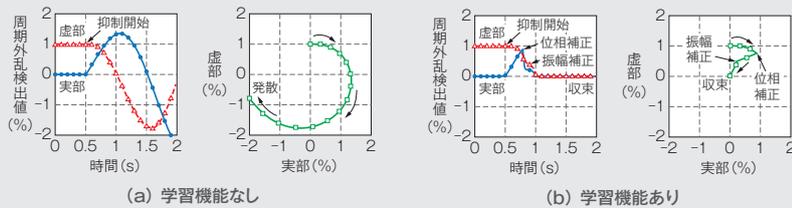
電力変換装置だけではなく、お客様のシステムを組み合わせた際の挙動をHILSで評価し、システム全体での信頼性を向上する。

また、蓄積したHILSでの解析結果やモデルベースの開発によって試作レスでの開発を実現し、更なる製品開発のスピードアップを実現する。



プラント・システムへの展開

## 一般化周期外乱オブザーバ技術



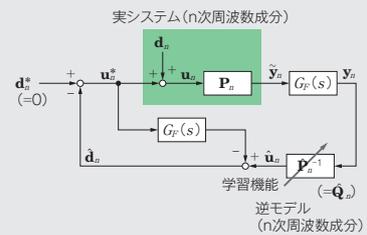
モデルの自動学習機能の効果

当社が開発した一般化周期外乱オブザーバ方式は、制御システムの安定性や品質に悪影響を与える周期的外乱を抑制する普遍的な制御技術である。例えば、モータドライブシステムの振動・共振の抑制、電力系統連系機器の高調波の抑制などで効果を発揮する。本方式は、制御システムの特定周波数

成分を複素ベクトルによって一般化し、抽出した周期外乱を打ち消すように自動的に抑制する。簡素なアルゴリズムであり、様々な用途への水平展開も容易である。既存の制御方式との親和性が高く、併用することで周期的な外乱を除去できる。

また、一般的に制御にはモデル

が必要となるが、本方式は未知の制御対象システムであっても同定しながら制御するモデル自動学習機能を備えるため、高い適応性・安定性があり、現地調整工数の省力化、制御品質均一化にも貢献する。



基本構成

### 過去 10 年

#### ●PID 制御 (Proportional-Integral-Derivative Controller)

例えば水処理プラントの流体制御など、古くから幅広く利用されてきたが、PIDパラメータの決定は調整員のスキルに依存していた。PID自動調整ツールで、制御品質均一化と調整時間短縮に貢献した。

#### ●ロバスト制御

より高度な制御性能が要求されるダイナモメータシステムを中心に、非線形ロバスト共振抑制制御など高応答・高精度で安定した装置の提供に貢献した。

### 現在

#### ●適応・学習制御

電力系統インピーダンス・各種プラント・モータ駆動システムなど制御対象の特性が経時的に変動する場合は、効率・応答性・精度などの制御性能が低下する可能性があるため、動作中に制御パラメータやモデルを最適に自動調整する技術が望まれる。前述した一般化周期外乱オブザーバの用途展開や、時系列データを用いた学習制御・適応自動調整技術などを検討しており、更なる高性能化や省力化に向けた開発を進めている。

### 未来像

#### ●複合領域協調設計

IoTを活用した統計的制御モデル・無線通信を介した制御・余寿命など診断技術・人工知能技術が進展するとともに、CAEによる詳細解析モデルの制御応用(縮退化技術)と、モデルベース開発環境での複合領域協調設計技術が本格化する。制御特性がモノの仕様や設計にも事前に反映され、複数の技術分野が協調して最適設計される。制御設計自体が自動化する可能性も踏まえ、最適協調設計・自動設計に挑戦する。

## インバータ用モータ制御

当社のモータ制御技術は、バイポーラトランジスタを適用した初期のインバータ開発と同時に始まり、継続的發展を遂げてきた。

まずV/f制御を実用に耐えるようにするため、過電流抑制制御やデッドタイム補償といった安定化制御を開発し、汎用インバータをはじめとするモータドライブ用インバータ製品に適用してきた。

その後、IM (Induction Motor) 用速度センサ付きベクトル制御・同センサレス制御及びモータ定数自動調整機能を実用化し、1990年代半ばからはPM (Permanent Magnet type synchronous) モータの速度センサ付きベクトル

制御にも着手した。2000年頃からPMモータのセンサレスベクトル制御、V/f制御を順次開発し、一通りのラインアップの開発を完了した。

それらのセンサレスモータドライブ制御開発と並行して、空転しているモータを再起動するための速度推定方式を開発し、製品適用を果たしている。PMモータ制御の場合にはインバータ起動時の初期磁極位置推定技術が必要である。この技術はセンサレス用途だけでなくエレベータ用インバータにも適用され、速度検出器の位置検出信号を不要なシステムとした。

近年では、風力や小水力などの

再生可能エネルギーの利用で、発電効率が優れた可変速発電システムが主流となってきており、さらに励磁電流が発生せず高効率なPM式発電機が適用されている。当社はいち早くそれらに対してPMセンサレスベクトル制御を適用し、製品化を達成してきた。これらの製品では発電効率も重要視されることから、PM式発電機の永久磁石の温度変動を補償する制御も導入している。

動力計測インバータ用途などの高応答制御が求められる分野に対しては、電流予測を用いた高速制御や電流センサ誤差補償技術といった基盤技術開発を行っている。

### 過去10年

主にPMモータのセンサレスドライブ制御を開発してきた。2003年に同一次元磁束オブザーバ式ベクトル制御及び空転再始動時速度・位相推定制御を、2007年にV/f形PMモータ制御を研究開発し、2010年に製品化した風力発電用コンバータには拡張誘起電圧オブザーバ式ベクトル制御を導入した。本方式は、その後小水力発電用コンバータにも適用されている。

また、磁束オブザーバ式ベクトル制御のPMモータ磁気飽和に対する制御限界把握の研究も行った。

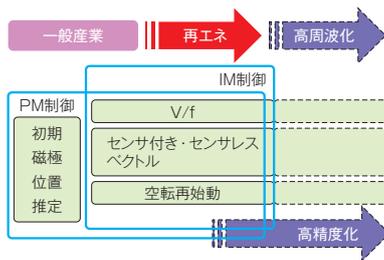
### 現在

IM・PMモータ双方のセンサレス制御の更なる高性能化に取り組んでいる。磁気軸受の本格的な実用化や大容量機械の電動化への要望の高まりを受け、出力の高周波化の開発を進めている

### 未来像

高周波数用途PMモータに対する瞬停再始動やベクトル式センサレス制御が求められる。同時に、制御定数同定技術も高精度化を進め、高効率モータへのセンサレス制御対応も視野に入れて研究・開発を推進する。

セル多重式直接高圧インバータにもPMセンサレス制御を導入する必要がある。瞬停再始動方式などの2レベルインバータ以外への拡張適用を進める。



モータ制御ロードマップ

## 高効率変換技術



高圧インバータ試作機

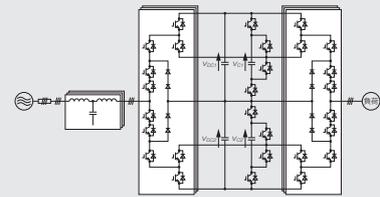
当社は電力変換の高効率化を実現するため、変換回路方式や制御方式など様々な技術の研究を続けてきた。高効率化に有効な手段の

一つに、変換回路の高電圧化がある。この分野における直近の研究成果の一つに、当社独自の5レベル回路方式を適用した高圧インバータ装置がある。

本回路方式の特長は、フライングキャパシタ（5レベル出力を実現するための直流電圧源）を、入力3相、出力3相の計6相で共通利用する点である。各相に設けられるキャパシタを共通にすることで、その個数・容量を低減するとともに、キャパシタを通過する電流が複数相で相殺されることで、損失の低減効果が得られる。また本回路構成によって、従来の高圧インバータで大きな体積を占めて

いた入力変圧器が不要となる。加えて、相電圧5レベル、線間電圧9レベルの入出力電圧は、高調波歪みを大きく抑制し、高電圧モータの直接駆動を実現する。これらの特長によって、業界最高クラスの効率と小形化を実現した。

今後も電力変換器の高効率化に注目し、研究を進めていく。



ミニモデル回路構成図

### 過去10年

太陽光発電用PCSを開発し、主回路・変調方式を変更して高電圧化（750V）し、高い効率（96.5%）を実現した。また、15kWのフルSiCインバータを試作し、小形・高効率化を実現した。



SiCインバータ試作機

### 現在

インバータ主回路の3レベル化で、高効率化を実現した。また、400V系無停電電源装置 <sup>サイリック</sup> THYRIC 7000では、業界最高クラスの高効率（97%以上）を達成

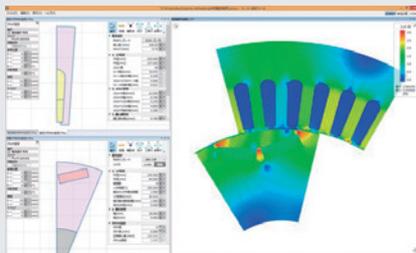


THYRIC 7000

### 未来像

電力変換装置に求められる性能や機能は、多様化する傾向にある。効率やサイズ・コストに対する要求のみならず、用途や環境に応じ応答性や信頼性などの複数の要求を実現する必要がある。当社は、SiCなどの次世代パワーデバイスの活用や、高周波スイッチング技術などの回路技術の向上、様々なシミュレーション技術を複合的に利用した設計技術の確立などの研究を進め、用途・要望に合わせて最高の性能を提供できる基盤（技術）・製品技術を生み出す。

## 回転機基盤技術



設計ツール

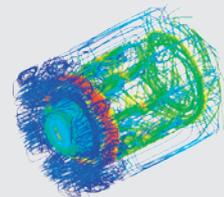
回転機は、当社創業時から開発・生産している主要製品のひとつである。発電機や誘導電動機などの製造・販売に始まり、1968頃には永久磁石を採用したPMモータの生産を開始している。その後、ネオジム磁石に代表される高性能永久磁石の出現で回転機の大幅な小形・高効率化が進み、PMG（永久磁石式発電機）、エレベータ

用モータ、ダイナモメータ、EV用モータなどの性能を向上してきた。

PMモータは、他のモータに比べ設計の自由度が高く、お客様の要望に応えられるよう専用にカスタマイズされた高性能なモータを提供できる。これを実現する基盤技術として、設計力を強化する電磁界解析技術の開発やモータ設計ツールの開発を進めてきた。また

近年は、三次元のフルモデルで熱流体解析を実施できる解析環境を整え、冷却性能を改善する熱流体解析技術を構築している。

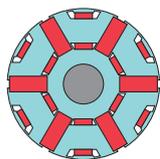
回転機は今後もますます高出力密度化・高効率化・軽量化などの要望が高まっていくと考える。設計解析技術を更に強化し、新しい高性能材料を取り入れ、各種の要望を実現する基盤技術を引き続き強化していく。



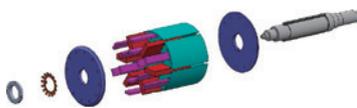
熱流体解析

### 過去10年

2010年頃にはレアアース原材料の価格が高騰し、ネオジム磁石使用量を削減した省レアアースモータやフェライト磁石を採用した脱レアアースモータの開発を推進した。



ロータ断面図



ロータ構造

### 現在

ブローヤやコンプレッサなど、高速回転が必要とされる機器をダイレクト駆動する高速モータの開発に注力し、磁気軸受を採用することで従来のベアリングでは実現できなかった高回転速度を達成している。

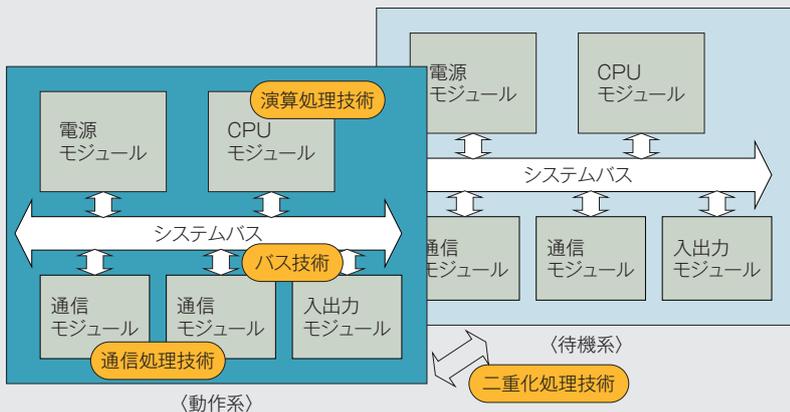


高速モータ

### 未来像

省エネ・地球環境問題に対応するため、内燃機関の電動化は今後ますます加速していく。高性能磁石（高磁束密度・高保磁力）・低鉄損電磁鋼板・高性能絶縁材料（高耐圧・高放熱性）などの新しい材料を適用することで、回転機の高出力密度化や高効率化が図られていく。新材料を適用して高性能を実現するための設計解析技術を強化し、回転機並びに回転機が組み込まれるシステム製品の更なる高性能化に努め、地球環境に貢献する製品を創出していく。

## ICT 関連の制御技術



プロセスコントローラ構成図

プラント設備向けプロセスコントローラに要求される要素技術として、「演算処理技術」・「システムバス技術」・「二重化処理技術」・「通信処理技術」が挙げられる。

当社は、独自のラダー処理用プロセッサと計装制御用汎用プロセッサをFPGA 1チップに実装し、専用演算プロセッサを開発した。これにより、演算処理を高速

にかつ独立して実行でき、実行時間のバラつきをなくし、安定動作を実現した。

システムバス技術によって、活線挿抜できるシステムバスを開発した。

二重化処理技術によって、従来二重化専用モジュールで構築していた機能をCPUモジュールに組み込みユニットの小形化を実現した。

通信処理技術では、Ethernet技術を利用した高速・大容量システムに対応する当社独自のフィールドネットワーク（IOリンクⅢ）を開発した。

### 過去 10 年

JIS規格対応プロセスコントローラ（UNISEQUE VC5000）を製品化した。また、当社フィールドネットワーク（IOリンクⅢ）を製品化した。



UNISEQUE VC5000



IOリンクⅢ

### 現在

クラウドシステムに適応したクラウド中継装置（CG1000）と計装制御用ワンループコントローラ（MEIFIT-LP FD200）を製品化した。液晶ディスプレイを採用し、多様な画面表示による視認性と操作性を向上した。



CG1000



MEIFIT-LP FD200

### 未来像

社会インフラのプラント監視制御システムは、情報通信技術の発展に伴い大きく姿を変えてきた。また昨今の社会潮流であるIoT・クラウド・ビッグデータ解析などを活用し、維持管理・運転管理・設備管理の業務品質の改善と効率化が求められている。

上記の要求に対応していくために、従来のプロセスコントローラを高知能化・堅ろう化し、付加価値の向上と安定動作を両立した監視制御技術・製品技術を創出する。

## マイコン応用技術



盤 (外観)



盤 (内観)

世の中にマイコンの技術が登場したのは1970年代初頭のことであるが、当社でもマイコン技術の導入は古く、1975年頃に遡る。従来、ハードワイアードロジック

によって構成されていたダイナモ装置やテレコン装置が、最初にマイコン化された。以来、マイコン技術は日々進化を重ねてきた。

当社のマイコン応用技術は、

ミューボート/ミュービボック  
μPORT/μPIBOCに代表されるコンピュータ/コントローラ装置のメインCPU（中央演算ユニット）系列と、保護装置・制御機器・通信機器などに内蔵される機能特化型の組み込みCPU系列に二分化されている。

前者は、ユーザソフトウェアへの親和性を重視して、X86系の最先端デバイスの適用を進めており、一方後者は特化機能と性能の実現とともに、省力化・省スペース化を図るために、ARMコアを核として周辺機能まで組み込んだSoCの採用を進めている。

### 過去10年

フリースケール社製プロセッサPOWER QUICC II proをプラットフォームとしたテレコンの伝送機能をIP化するためのメディア/プロトコル変換装置を開発した。



IP変換器用プロセッサ

### 現在

アルテラ社製SoC FPGAをCyclone Vに搭載したテレコンのCPUボードは、FPGAとマイコンをワンチップ化したことで、省スペース・低消費電力化を実現した。

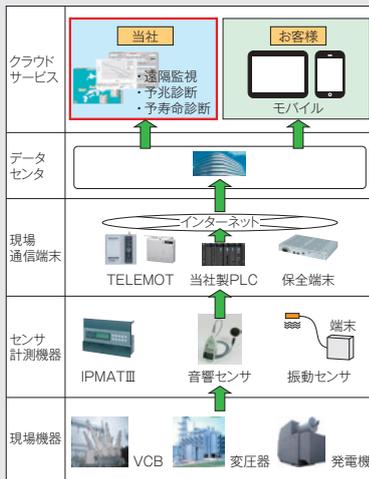


テレコン用プロセッサ

### 未来像

半導体プロセスの微細加工によって、高性能でシステムレベルの性能を1チップで実現するSoCは、今後更なる小形化・コスト競争力強化・消費電力低減の観点から重要なパーツとなる。当社は、これまで開発してきたプラットフォームを継承するとともに、次世代のマイコンとしてFPGAとマルチコアプロセッサコアを集積したMPSoC (Multi Processor System-on-Chip)などを搭載した製品を市場に先駆けて創出する。

## 保全データ解析による設備診断技術



ワンストップサービス

従来のメンテナンスはTBM（時間基準保全）が主流だったが、IoTの発達によって、インフラ設備に設置したセンサから常時かつ

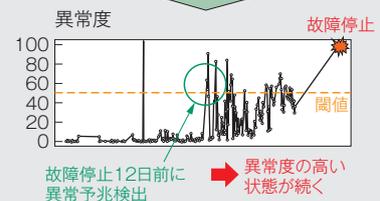
容易に保全データを収集できるようになり、今日ではCBM（状態基準保全）によるメンテナンスができるようになりつつある。当社は、お客様設備の稼働率向上と設備管理効率の向上を目的としたフィールド検証を2015年度に開始した。実際に稼働中の水力発電所設備を対象にセンシングシステムを構築し、保全データの継続的な収集・蓄積と分析に取り組んでいる。本検証では、機械学習手法を応用して発電機軸受付近の振動データを事後解析し、実際に故障が発生する約12日前に機械的故障の予兆を検出した。

今後は振動データのみならず、

音響データの分析や複数データの相関関係などで、予兆診断精度を向上するとともに対象設備の拡大を目指す。



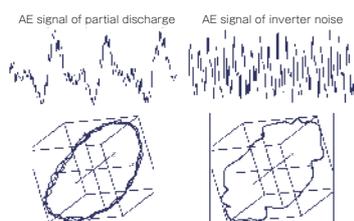
データ解析による異常の見える化



データ解析結果

### 過去10年

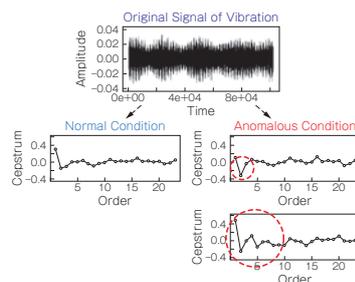
オンサイト計測したAE（Acoustic Emission）信号を、部分放電信号とインバータノイズ信号に分別できる軌道平行測度法を開発し、電気設備の部分放電を検出した。



部分放電検出結果

### 現在

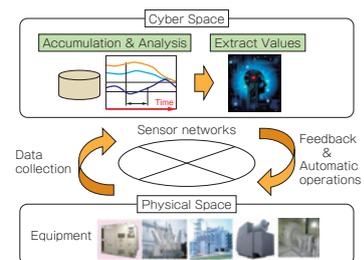
オンライン収集した振動データから、正常値と異なる振動を自動識別できる1クラス・サポートベクターマシンを応用し、電気設備の機械系異常予兆を早期に検出した。



異常予兆検出結果

### 未来像

現場機器の多様なデータをセンサネットワークで収集し、サイバースペースで創出した情報価値を機器にフィードバックすることで、機器の自動診断を実現する。



自動診断

## 保護リレー



保護リレー

保護リレーは発電所や変電所、送配電線路、需要家設備などで発生した短絡故障や地絡故障などの故障区間を電力系統から速やかに切り離し、系統への影響を最小限に抑える責務を負っている。その

ため、保護リレーには確実に事故を検出する信頼性と、迅速に故障区間を切り離すリアルタイム性が求められる。

ハードウェア面では主保護リレー・後備保護リレーそれぞれが

事故を検出する二重化システムとするなど、信頼性を確保している。

ソフトウェア面ではRTOS (Real-Time Operating System) を採用し、迅速な動作を実現するとともに、標準モジュール化や電気設計図面からソフトウェアの自動生成、故障状態から故障部位を推定し、異常の早期復旧に役立つなど信頼性の向上を図っている。近年では、IPネットワーク技術をはじめとした汎用技術への対応が求められ、既存の信頼性・リアルタイム性とそれら汎用技術への柔軟な対応の両立が課題となっている。

### 過去10年

ブラウザを用いたヒューマンインタフェースを採用するなど、汎用技術を適用した機種を開発した。



画面例

### 現在

電力系統の各所に配置された装置間で計測された電流・電圧などの瞬時値データを、IPネットワークで通信する新たな保護リレーへの取り組みを実施している。

また装置の小形化に伴い、遮断器などのノイズ発生源の近傍に保護リレーが設置されることが増えたため、耐ノイズ性能を強化する開発を行い、信頼性を向上している。

近年、初期に納入した機器の更新時期がきており、高機能化しつつ既存機種への置き換えを容易に行える機種の開発に取り組んでいる。

### 未来像

RTOS・汎用OSの併用と、更なる汎用技術の採用による高機能化を実現する。装置のネットワーク化が進み、遠方から装置の監視・制御を実現するために必要なセキュリティ対策に取り組む。

CPUの高性能化・高速化に伴い高度な処理が実現し人工知能 (AI) 技術によるデータ解析機能の高度化・予兆診断・電力自由化によって複雑化する電力系統の保護や各種パラメータの自動調整などの機能を実装する。

# 01-3 共通基盤技術

製品の開発期間短縮化と信頼性を高める材料・分析・解析技術

## 絶縁技術



ワニス



滴下含浸

絶縁は、重電機器における黒子の存在で普段は意識されないが、機器の寿命・信頼性に大きく寄与する技術である。

### (1) 回転機器絶縁の技術紹介

大形回転機器は、縮小化（耐熱性向上）、絶縁信頼性向上と廃棄樹脂量の低減による環境負荷低

減、低VOC（揮発性有機化合物）化を目的とし、これまで各種の回転機器用コイル含浸ワニスの開発と含浸システムを構築してきた。また小形モータは、急速に市場を拡大しつつあるEV用モータの絶縁に関する寿命・信頼性に特に重点を置き、知見・ノウハウを蓄積している。

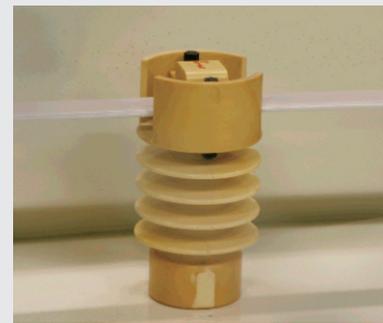
### (2) 静止機器絶縁の技術紹介

静止機器の絶縁技術は、開閉装置と変圧器に区分される。

開閉装置は、縮小化と信頼性の向上のため、高強度・高耐熱・低線膨張率・低誘電率のモールド原料を、エポキシ樹脂をベースに開発している。「研究」という要素

技術にとどまらず、各モールド部品の検証にも関わることで実機特性を研究にフィードバックし、信頼性を高めている。

変圧器の絶縁技術では、海外材料や環境対応材料など、改めて長期信頼性を確認すべきものを支援している。



がいし

### 過去10年

#### ●回転機絶縁

電気絶縁性に優れたエポキシ樹脂と凝固するまでの時間が長い不飽和ポリエステル樹脂の長所を生かしたミューレジン#9000を開発した。車両用モータの製造では、量産・高信頼性の滴下含浸システムを構築した。

#### ●機器絶縁

1970年代から培ってきたモールド技術を生かし、高信頼性・高強度で安価な耐熱性樹脂を新たに開発した。また従来の樹脂原料と全く異なる、石油に依存せず植物油を由来としたエコ樹脂を開発した。

### 現在

#### ●回転機絶縁

急増する車両用モータ生産に対応し、滴下含浸設備を一新した。新設備では機種ごとに最適な含浸量を制御しながら混流生産ができ、廃棄ワニス量削減に貢献している。より高い信頼性と製造のしやすさのための最適化を図っている。

#### ●静止機器絶縁

モールド樹脂の原料となるエポキシメーカの再編が進みつつあるが、原料変更があってもモールド特性に影響のない配合・製法を確立した。

### 未来像

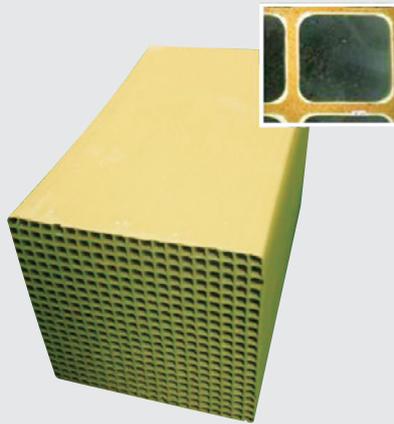
#### ●回転機絶縁

回転機器は一層の小形化・軽量化が求められ、含浸ワニスには高い放熱性・熱伝導性が不可欠となっている。さらに作業性・環境性を考慮して新しい原材料を選定する。

#### ●静止機器絶縁

1970年代から安定性・耐熱性・寸法安定性などの点でエポキシ樹脂が使われてきたが、材料革新が進み、リサイクル性を視野に入れた高性能の熱可塑性樹脂の採用も視野に入れて評価・開発する。

## セラミックス技術



低温脱硝触媒ハニカム

当社では、極めて過酷な環境に対し高い信頼性が求められる製品で、高強度・高耐熱性といったセラミックスの特性を利用した製品技術を開発してきた。特に1975年に世界に先駆け酸化亜鉛

形ギャップレス避雷器の実用化に成功し、その40年以上の実績と信頼性が評価され、2014年にIEEEマイルストーンの認定を受けた。現在も避雷器の更なる小形・高性能化に向け、酸化亜鉛素

子の微細組織制御に関する研究を重ねている。

また、ディーゼル発電機用排ガス脱硝触媒の開発で培った押出成形技術をベースに、2011年より中国科学院・(国研)産業技術総合研究所(産総研)との国際共同研究体制で低温脱硝触媒ハニカムを開発した。近年、深刻な社会問題となっている中国大気汚染問題の解決に向けて、その実用化検討を継続している。最近では、セラミック成膜技術を応用したセラミック平膜水処理システムが海外で水再生処理の認証を受けるなど大きな成果を上げている。

### 過去10年

#### ●酸化亜鉛素子

2009年「でんきの礎」、2014年「IEEEマイルストーン」の認定を受けた。その後も酸化亜鉛素子の微細構造制御による小形化の研究開発を進めてきた。

#### ●環境浄化触媒

温室効果ガスの一つであるメタンをプラスチック原料として有用なベンゼンに変換する触媒(MTB〈Methane To Benzene〉触媒)の開発を推進した。中国大気汚染問題の解決を目的とした国際共同研究「中国低温脱硝触媒の開発」に着手した。

### 現在

#### ●低温脱硝触媒の開発

中国科学院過程工程研究所、産総研と共同で「低温脱硝触媒」を開発した。当社の有する粉体調整技術、セラミックスの成形・焼成技術、及び目的の触媒機能を付与するコーティング技術を組み合わせ、触媒ハニカムの製作工程を確立した。

この実用化を目的とし、中国現地の工場設備で実証試験を実施中である。深刻な中国の大気汚染問題の解決に向け、技術的貢献を目指す。

### 未来像

当社の取り扱い製品の技術領域では、高電圧・気候条件など過酷な環境にさらされることが多い。また、使用期間が長期間にわたるケースが多く、長期信頼性の確保が不可欠である。セラミックス材料は、これらの要請に応える技術の一つであり、今後も多様化する製品仕様への対応が求められる。

これまでに当社で培ったセラミックスに関する技術要素を組み合わせ、再生可能エネルギーや次世代インフラなど時代要請の変化に対応する。

## 分析技術



走査型電子顕微鏡

解析センターでは、「製品品質向上」・「新製品創出」・「環境への配慮」の3つの重点実施事項を掲げて、製品の品質向上に取り組んでいる。

長年培った分析技術を基に、不具合が生じた製品の故障原因究明と再発防止に向けて活動している。中でも、製品開発の段階から電子部品や電気部品の製造工程で

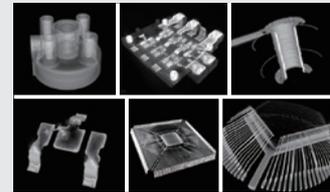
発生する潜在的な欠陥を調査する「良品解析」を推進している。部材の内部構造の非破壊欠陥調査のため、三次元CT（Computed Tomography）装置を導入し、例えば、電子部品のチップ構造や半田各層のボイド評価、ボンディングワイヤや混入物のマクロ観察などの分析技術を強化している。

熱や腐食性ガスなど設置環境を想定した長期信頼性試験については、各種加速試験と故障データを統計解析し、寿命算定などのノウハウとして積極的に蓄積している。

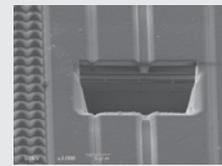
近年、FIB（集束イオンビーム加工）を搭載した電子顕微鏡を導入し、電子部品の小形化・高集積

化に合わせてサブミクロンオーダーの試料加工精度と欠陥箇所のマクロ観察を実現した。

今後も進化する電気部品や電子部品に合わせ、分析技術の開発を積極的に推進する。



部品の三次元内部透過像



FIB加工によるチップ断面像

### 過去10年

#### ●絶縁診断技術

樹脂表面の化学変化を指標とした絶縁フレームの劣化診断技術を中部電力(株)と共同研究で確立した。

#### ●コーティング剤の信頼性技術

スルーホール連結基板をモデルとし、プリント板保護コーティング剤の腐食ガスの透過性に関する評価手法を確立した。

#### ●ウィスカ防止技術

亜鉛めっき部材の経年でのウィスカ発生を抑制するための技術及び評価手法を確立した。

### 現在

#### ●微小構造、物質解析技術

樹脂やセラミックなどミリレベルからマイクロレベル領域の構造解析技術を確立し、プリント実装基板や接点などの微小異物の構造解析の獲得と不具合究明や適用部材の使用環境での故障寿命を想定した新しい加速劣化試験法の開発（腐食・光劣化・熱劣化）を推進している。

#### ●環境規制物質分析技術

RoHS指令で追加対象となる環境規制物質（フタル酸エステルなど）の迅速かつ高精度分析技術の開発を推進している。

### 未来像

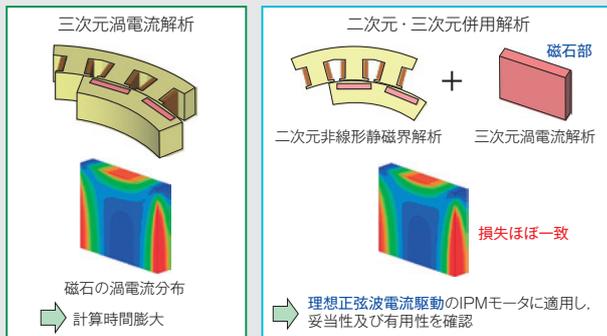
#### ●次世代デバイス評価技術

マイクロレベルからナノレベル領域に存在する微量物質のキャラクター化力を構築し、次世代デバイスの欠陥解析技術を確立する。

#### ●不具合現象の解析技術

不具合原因に起因する材料の表面や界面などについて、放射光による分子/原子レベルの状態解析まで深掘りし、材料劣化や寿命プロセスなどの反応現象を把握して製品不具合を撲滅する。

## 解析シミュレーション技術



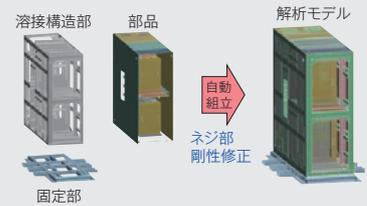
二次元・三次元併用解析によるPM モータのインバータ駆動時の磁石内渦電流損失計算法

数値解析分野は当社が注力している技術分野の一つである。例えば、電磁界解析分野では、モータの永久磁石の発熱量を高速に計算するため、二次元と三次元解析を併用した専用ソフトを開発している。また、製品設計に解析技術を確認

実に展開するため、社内規格で汎用解析ソフトウェアのANSYSとJMAGを基本ツールと位置付けて、技術とツールの共通化を進めている。さらに、解析の精度に重要な影響を及ぼす材料物性は、実機又は採取した試験片の材料試験

から取得し、非線形性や環境因子を考慮した材料モデルの構築や、金属疲労などの強度基準の作成を進めている。

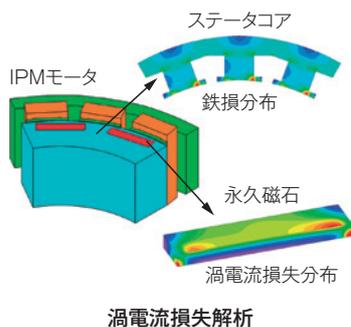
今後は、分子動力学などで劣化や破壊の解析技術を確立し、設備情報とリンクさせて損傷の予知や機器の保護を行い、自己修復などの仕組みを開発し、製品の信頼性の向上や新しい価値を創造していく。



フル三次元モデルによる詳細耐震解析

### 過去10年

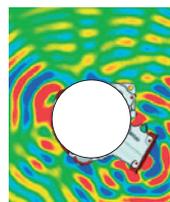
複合領域解析技術を開発し、機械的応力と電磁界及び熱流体の相互の影響を考慮した高精度な損失及び温度上算定を実現した。



渦電流損失解析

### 現在

モデルベース開発の一環として、電動機の内部を詳細にモデル化した有限要素法解析と実験モード解析を組み合わせることで、機器の振動特性を正確に再現し、この振動特性から騒音（音圧）を再現して低騒音化を進めている。



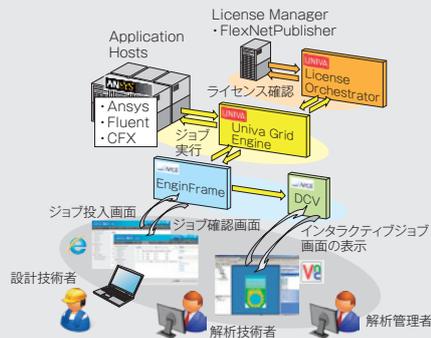
音圧分布解析結果

### 未来像

VR（仮想現実）技術が進展して、仮想試作が普及する。一方で、三次元プリンタの進化によって実機の試作も容易となる。

さらに材料や加工分野では、原子・分子レベルの研究が進んでいる。また、製品の運転状態では製品単体にとどまらず、システムや地域全体などの広い範囲での最適化が進んでいる。これらの組み合わせによって、性能や環境問題などの複数の課題を解決した革新的な製品やサービスを提供する。

## 熱流体解析特化型HPCシステム



ポータルシステムイメージ

現在、製品開発では解析技術の利用が一般的である。特に海外マーケット向けの大形発電機の開発には、コストダウン・小形化が必要で解析が不可欠である。

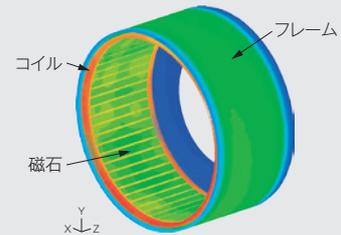
しかし、発電機内部は、形状や材質の異なる様々なパーツが組み込まれており構造が複雑で、解

析モデルが大規模となるため、既存の192コアHPCシステム（2013年度導入）による解析は性能的に困難であった。

そこで2016年度に新たな768コアのHPCシステムを導入した。このシステムは並列処理方法などを熱流体解析ソフト

ANSYS Fluentに特化して構成し、さらに通常のワークステーションで解析する場合と同じ操作性で解析できるポータルシステムを採用することで、解析者が違和感無く利用できるシステムとした。

これにより、既存システムでは大規模な解析に10日以上を要していた解析時間を1日に短縮した。



発電機内部の温度分布

### 過去10年

計算の高速化技術は、CPU単体の高速化の飽和によって、複数のコアやCPUに計算を分散・並列化するHPC技術に変化した。そこで、構造及び電磁界解析ソフトではマルチコア対応ソルバーの導入を推進した。

一方、ハードでは複数の計算機を集合させた計算サーバや高性能ワークステーションの導入と、多数の計算機を用いながら計算をリモートで容易に実行できる解析ポータルシステムを開発した。

### 現在

高速化・大規模化への対応のため、熱流体解析に特化した768コアのHPCシステムを導入している。



新HPCシステム

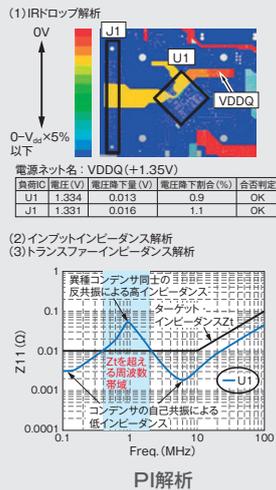
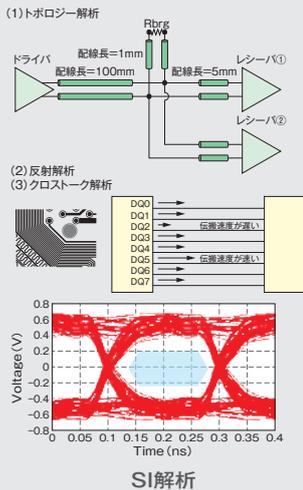
### 未来像

大規模かつ高速計算を推進し、分子レベルの解析を実用化する。

一方、一つの計算には時間がかかるが、得られた結果を関数化することで、迅速に全体特性の把握を複数の関数を組み合わせで行う1D解析も進める。

また、実験によって取得した膨大なデータから、特徴の抽出（定式化）を行う技術や実験と数値計算との組み合わせについて適用研究を進める。

## SI/PI解析技術



SI解析, PI解析

LSI（大規模集積回路）の高速・高周波化及び低電圧化によって、電子機器の雑音（ノイズ）が深刻な問題となってきた。従来の勘や経験に頼った設計手

法では、SI/PIに関する課題を解決できない。そこで当社は2013年にSI/PI解析を導入した。SI解析では、主に(1)トポロジー解析（信号のタイミング検証を

実施し、伝送線路の特性インピーダンスや配線長及び対策部品を決定）、(2)反射解析（インピーダンス不整合で発生する反射による伝播遅延等を確認）、(3)クロストーク解析（隣接や交差する信号間から受けるノイズ及び与えるノイズを確認）などを行っている。

PI解析では、(1)IRドロップ解析（基板のパターン抵抗による電源電圧低下を確認）、(2)インプットインピーダンス解析（LSIの電源ピンへの電流の流入確認）、(3)トランスファーインピーダンス解析（LSI動作時の電源-GNDのインピーダンス変化を確認）などを行っている。

### 過去10年

10年前のプリント板設計は、勘や経験を基に行っており、大きな問題は起こっていなかった。近年、電子回路の集積化技術の進歩で電子部品が高速・低電圧化し、ノイズによる機器の誤動作が懸念されてきた。そこで2013年からSI/PI解析を導入した。複数の評価ボードを解析しながら製作し、実測した結果を解析にフィードバックして精度を向上してきた。SI/PI解析を適用することで、設計段階でノイズの見える化ができ、開発のフロントローディングに貢献した。

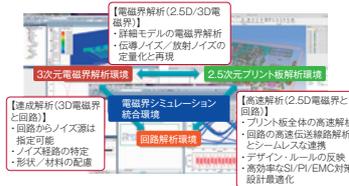
### 現在

EMI（電磁妨害）はSI/PIと密接な関係にあり、低ノイズ製品を創出するために必要な技術である。SI/PIに加え、EMIを含めた電磁界連成解析技術に取り組んでいる。さらに、ノイズ問題を未然に防止するため、蓄積したノウハウを基に有効な設計ルールを充実させている。

### 未来像

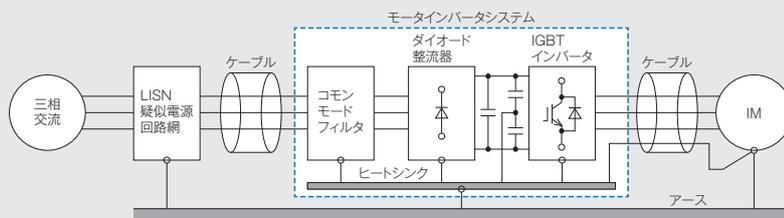
SI/PI/EMI問題に対して三次元電磁界解析が有効であることから、現在の部分的な回路を短時間で精度よく解析する技術を向上させる。将来は、三次元電磁界解析技術が改善され実用レベルになった場合、フルモデル解析に発展させる。

またEMC（電磁両立性）を満足した製品を早期に開発するため、現在のEMI解析だけではなく、静電気放電などのEMS（電磁感受性）解析技術に取り組む。そうすることでSI/PI/EMCに関する全てのノイズ現象に対応する。



SI/PI/EMC電磁界連成解析

## パワーエレクトロニクス機器のEMI解析技術



ノイズ解析システム構成図

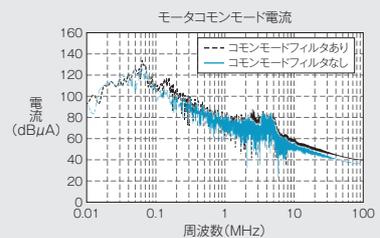
近年、パワーエレクトロニクス機器における半導体デバイスの高速化に伴い、高周波ノイズの問題が顕在化している。EMC対策の重要性の高まりから、IECやJISなどでEMCの標準規格が進み、特に欧州では厳しく規制されている。このような厳しい規格に適合させるため、設計と試作の繰り返しが必要となり、開発コスト

の増大や期間の長期化が課題となっている。

この課題を解決するために試作前からEMI解析を実施し、その結果からノイズ発生量・経路を予測してEMC規格に準拠するノイズ対策を施した設計を行う。

このように設計段階でノイズ対策を確立することで、EMC対策のための設計と試作の繰り返し

なくなるため、手戻りのない開発コストを最小とする製品を開発できる。当社では、モータインバータシステムなどのパワーエレクトロニクス機器で、システム全体の電気回路及び回路各部の電磁結合を集中定数回路や分布定数回路でモデリングし、伝導ノイズの発生量と経路をシミュレーションで求める研究に取り組んでいる。



モータインバータシステムのEMI解析例

### 過去10年

パワーエレクトロニクス機器は、現在も大半の機器がそうであるように、伝導ノイズや放射ノイズという観点ではなく、電圧・電流波形のひずみという観点で規制されていた。ノイズ問題の解決は、経験則から現場で対応する考え方のため、機器評価時の計測によって初めてノイズが顕在化し、規格非適合となることがあった。設計変更を最小限とし、フィルタコアなどで対症療法的に対処するため、手戻りが多く発生し、開発効率には改善の余地があった。

### 現在

モータインバータシステムで、半導体スイッチング素子・EMIフィルタ・ケーブル・モータなどの電気回路と回路各部の浮遊容量及び浮遊インダクタンスをモデリングし、回路解析ツールや電磁界解析ツールによるEMI解析で、伝導ノイズの発生量と伝搬経路を予測している。

現在はこれらのモデリング技術及び高周波帯域の解析技術が向上し、設計段階で最適なEMI対策ができるよう研究を進めている。

### 未来像

SiCを代表とする次世代デバイスによる機器が一般化すると、EMC問題がより顕著になり複雑化する。またIoTが重要設備に普及すると、通信データへの信頼性要求が高まるため、データへの影響を避けるために製品一般に対するEMC規制が厳しくなる。厳しいEMC規制に適合するために、電気回路解析・電磁界解析・熱回路解析を連成し、温度依存性を考慮した電磁ノイズ及びESD（静電気放電）の解析を設計段階における事前検討に活用する。

## 大電力技術



遮断試験の様子

遮断器・変圧器・避雷器などの変電配電機器は、短絡事故時の大電流に耐えられるか、遮断器であれば大電流を実際に遮断できるかなどの検証試験を行うことが規定されており、当社では短絡試験用発電機などを備えた大電力試験所で検証試験を実施している。近年

では、これらの試験結果の信頼性を客観的に説明することが求められており、試験所の中立性・試験能力が一定の水準以上にあることを示すため、「ISO/IEC17025」に基づく試験所認定を取得した。認定取得にあたり、特に大電流・高電圧を測定する最新機器を導入

し、トレーサビリティの確保、測定系の不確かさ評価に注力した。さらに大電流を計測するシャントは、巡回シャントプロジェクトに参画し、他試験所との比較試験を行っている。

今後は、大電流アークの基礎研究と連携して製品競争力を高めていく。



内部閃絡試験の様子

### 過去10年

「ISO/IEC17025」に基づき日本適合性認定協会（JAB）から試験所認定を取得した。



認定証

### 現在

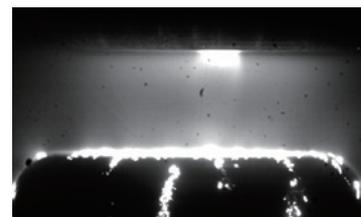
1962年以来使用してきた短絡試験用発電機をはじめとして、コンデンサバンク自動開閉試験設備の立ち上げ、内部閃絡試験用台車の導入など設備の大規模更新・改修に着手し、検証試験を確実に実施でき体制を整備している。



既設短絡発電機

### 未来像

アーク延長設備の改良や回復電圧試験波形の改善など試験技術の高度化に加え、真空アークの基礎研究などと測定手法に関して連携を深め、変電配電機器の製品競争力を向上する。



真空アーク