

電子式 VT・CT の要素開発による モデル器の設計・試作と性能評価

■ 山口 達史
Tatsushi Yamaguchi

■ 藤野 守也
Moriya Fujino

■ 小川 晃一
Koichi Ogawa

■ 佐藤 祥輝
Yoshiki Sato

■ 宮崎 未知果
Michika Miyazaki

■ 布施 宏樹
Hiroki Fuse

■ 足立 純一
Junichi Adachi

従来の変電所は、施工時のケーブル敷設や運用時の保守メンテナンスに多大なコストを要するという課題がある。一方、欧米や中国で建設が進められているデジタル変電所は、多芯の光ファイバケーブルによる集線化を行うことで上記課題を解決し、またスマートグリッドの国際標準規格である IEC 61850 の適用により、設備のマルチベンダ化と信頼性向上および監視制御の高度化を図っている。国内の電力会社でも変電所デジタル化の取り組みを行っており、東光高岳においてもデジタル変電所向け製品の技術開発を行っている。その一つがデジタル化を図った次世代の計器用変成器となる電子式 VT・CT であり、今回要素開発としてモデル器を設計・試作し、その性能評価を行ったので紹介する。

1 はじめに

従来の変電所は、電気設備と保護制御装置間の信号伝送に制御ケーブルを使用しているため、施工時のケーブル敷設や運用時の保守メンテナンスに多大なコストを要するという課題がある。中でも計器用変成器と保護制御装置間の制御ケーブルは、本数が膨大で敷設に難がある。一方、欧米や中国で建設が進められているデジタル変電所は、信号伝送を多芯の光ファイバケーブルで行うことにより集線化が図れ、施工時や運用時のコストダウンが可能である。また、スマートグリッドの国際標準規格である IEC 61850 の適用により、設備のマルチベンダ化と信頼性向上および監視制御の高度化を図っている。

国内の電力会社でも変電所デジタル化の取り組みを行っており、東光高岳においてもデジタル変電所向け製品の技術開発を行っている。その一つである電子式 VT・CT は、次世代の計器用変成器であり、MU (Merging Unit)^{注1)} と組み合わせて IEC 61850-9-2LE 準拠によるデジタル化を図った装置である。東光高岳では、鉄心と巻線による従来形の VT・CT に替えて、VT 素子に容量分圧器、CT 素子にログウスキーコイル、信号伝送に光ファイバケーブルを適用することで、機器の大幅な小型・軽量化と設置面積の省スペース化を目標に取り組んでいる。

本稿では、電子式 VT・CT の要素開発としてモデル器を設計・試作し、その性能評価を行ったので紹介する。

2 モデル器の仕様検討

モデル器の基本仕様を表 1 に示す。仕様検討に当たり、海外の主な重電機器メーカーの NCIT (Non-Conventional Instrument Transformer)^{注2)} の調査を行い、具備すべ

き標準的な仕様を反映した。

(1) 電圧・電流検出方式および絶縁構造

電圧検出は容量分圧器、電流検出はログウスキーコイル方式とする。容量分圧器は絶縁構造により高压側、低压側の静電容量が変化するため、モデル器は海外の 132 kV 三相一括形 GIS 適用を想定した構造とする。

(2) 定格一次電圧および絶縁方式

大規模な高電圧の試験装置を用いず、交流標準電圧電流発生器により電子式 VT の誤差試験を実施可能とするため、定格一次電圧を従来の 1/100 とする。また、定格一次電圧が比較的低いことから、環境に配慮して絶縁方式を気中絶縁とする。

(3) その他

海外の主な重電機器メーカーの NCIT を調査した結果、どのメーカーにもほぼ共通している仕様があり、それは計

表 1 モデル器の基本仕様

項目	仕様	
	電子式 VT	電子式 CT
参考規格	IEC 60044-7	IEC 60044-8
検出方式	容量分圧器	ログウスキーコイル
絶縁方式	気中絶縁	
相数	単相	
定格一次電圧	1.45/√3 kV	—
定格一次電流	—	1,000A
周波数	50 Hz	
計測用確度階級	IEC Class 0.2	IEC Class 0.2S
保護用確度階級	IEC Class 3P	IEC Class 5TPE
使用温度範囲	電子式 VT・CT : -40~+70℃ MU : -10~+55℃	
外形寸法	電子式 VT・CT : Φ420 × 480 mm MU:480 (W) × 221.5 (H) × 360.5 (D) mm	
電源電圧	DC 110V (MU)	

測用の確度階級が電子式 VT: Class 0.2, 電子式 CT: Class 0.2S, 使用温度範囲の下限値が -40°C , MU 出力が IEC 61850-9-2LE 準拠ということであった。モデル器ではそれらの仕様を踏襲しつつ, 電子式 VT は IEC 60044-7⁽¹⁾, 電子式 CT は IEC 60044-8⁽²⁾ を参考規格とする。

3 モデル器の設計

3.1 装置構成と動作概要

モデル器の装置構成を図 1 に示す。モデル器は電子式 VT・CT と MU に分けられる。電子式 VT・CT は, 金属製の管路に容量分圧器およびログウスキーコイルを内蔵したものである。MU は金属製の筐体に電源ユニット, 信号処理基板, CPU 基板および光通信 I/F 基板を内蔵したものである。次にモデル器の動作内容を示す。容量分圧器は一次電圧を 100 V 以下の低電圧に分圧し, ログウスキーコイルは一次電流を電圧信号に変換して, とともに MU の信号処理基板に入力する。信号処理基板は, 入力信号をアナログ信号処理部で増幅・フィルタリング後, A/D 変換を行いデジタル信号処理部に入力する。この信号処理部は, FPGA を用いて高速演算処理を実現している。なお, 容量分圧器の入力部はさらに固体コンデンサと抵抗分圧器が備わる。FPGA は, 外部から光通信 I/F 基板に入力される同期パルス (1PPS) に同期して演算処理を行い, CPU 基板に入力する。CPU 基板は, 入力信号を IEC 61850-9-2LE で規定された SV (Sample Value) パケット^{注3)}に変換して光通信 I/F 基板に出力する。光通信 I/F 基板は, SV パケットを光信号に変換して MU から外部へ出力する。

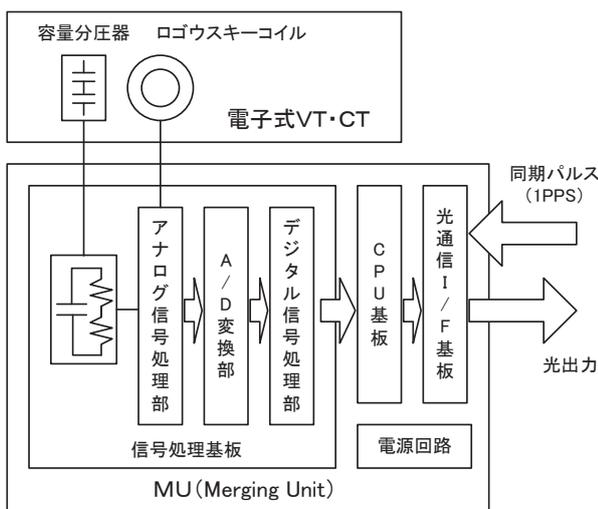


図 1 モデル器の装置構成

3.2 容量分圧器の原理および設計方針

容量分圧器の原理図を図 2 に示す。容量分圧器は, 一次導体-空間電極間の静電容量 (C1) と空間電極-

接地間の静電容量 (C2) の分圧構造となっており, 外部に C2 と並列に固体コンデンサ (C3) を接続する。

設計上の課題は, 静電容量の温度特性による出力変動である。静電容量の温度特性は, 容量分圧器を構成する各部品の線膨張による形状変化と固体コンデンサの温度特性から発生する。そこで, 容量分圧器を構成する各部品の材質をすべて統一し, 温度変化による相対的な形状変化を抑制して出力変動を低減した。また, 固体コンデンサは誘電体の種類による温度特性を調査し, 容量分圧器の特性に合う最適なものを選定した。

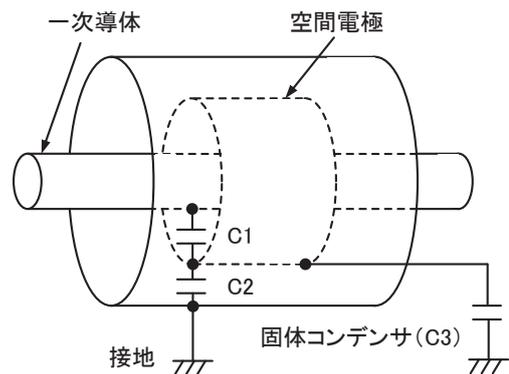


図 2 容量分圧器の原理図

3.3 容量分圧器の温度特性シミュレーション

図 2 に示す静電容量 C1, C2 は, 一次導体, 空間電極および接地間の物理的距離と空間電極の長さでほぼ決定される。このため, モデル器の構造設計は海外の 132 kV 三相一括形 GIS 適用を想定して行った。なお, 絶縁設計および静電容量の温度特性シミュレーションは, 有限要素法による電界解析および熱応力解析により行った。

(1) 解析モデル

容量分圧器の解析モデルを図 3 に示す。タンク, 一次導体, 空間電極, 接地電極および電界シールドなどの

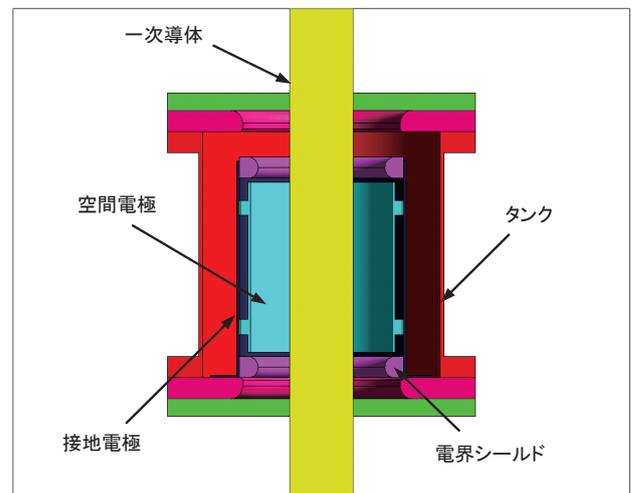


図 3 容量分圧器の解析モデル

材質はすべて同一とした。

(2) 解析結果

静電容量 C1, C2 の温度特性の解析結果を図 4 に示す。なお、電界解析結果について本稿では割愛する。周囲温度 $-40 \sim +80^{\circ}\text{C}$ の C1 の変化率は $\pm 0.14\%$ (20°C 基準) であり、C2 の変化率は $\pm 0.10\%$ (20°C 基準) であった。その結果、C1, C2 により分圧される C2 の分担電圧の変化率 ($C1 / (C1 + C2)$) は $\pm 0.03\%$ (20°C 基準) であり、容量分圧器を構成する各 부품の材質をすべて統一することにより、温度特性を十分小さくできることが確認できた。

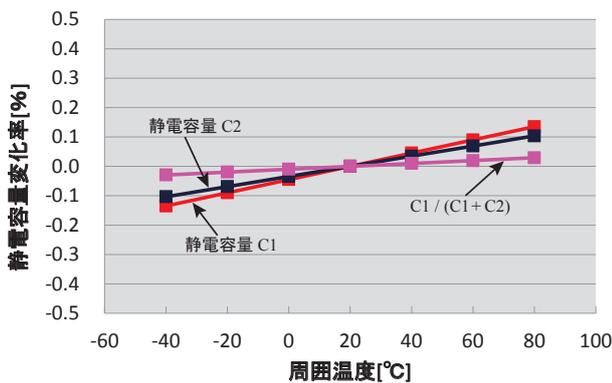


図 4 C1, C2 および $C1 / (C1 + C2)$ の温度特性解析結果

3.4 ログウスキーコイルの原理および設計方針

ログウスキーコイルの原理図を図 5 に示す。ログウスキーコイルは、一次電流 ($I(t)$) を電圧信号に変換して計測するものである。コイルで誘起される電圧 ($e(t)$) は、一次電流の微分波形となり、この誘起電圧を積分することで一次電流に比例した電圧信号 ($v(t)$) を出力する。

設計上の課題は、コイルで誘起される電圧の温度特性と外部磁界の影響による出力変動である。まず温度特性は、温度変化によりコイル形状の変化が発生しインダクタンスが変化すること、およびコイル抵抗に温度依存性があることにより発生する。そこで、ログウスキーコイルをプリント基板で製作することで温度変化によるコイルの形状変化を抑え、インダクタンスの変化を低減した。また、パターン幅および巻数の最適化を行い、コイ

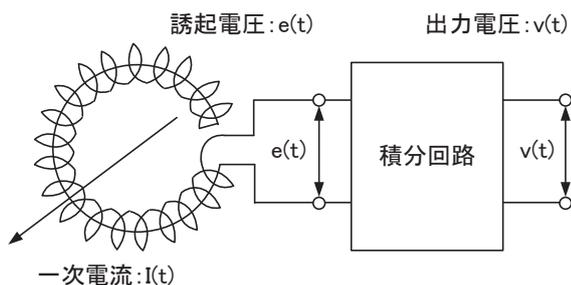


図 5 ログウスキーコイルの原理図

ル抵抗を低く抑えることで温度変化によるコイル抵抗の変化を低減した。次に外部磁界の影響については、4層のプリント基板を使用して表面および裏面で主コイルを形成し、内層に戻しコイルを形成することで外部磁界によるコイルの発生電圧をキャンセルした。

4 モデル器の試作

4.1 電子式 VT・CT

電子式 VT・CT の外観を図 6 に示す。金属製の管路の両端に絶縁板を取り付け、中心部に一次導体を貫通させた構造とした。また、内部に容量分圧器およびログウスキーコイルを取り付けている。



図 6 電子式 VT・CT の外観

4.2 MU

MU の外観を図 7 に示す。MU は、鉄製の筐体に電源ユニット、信号処理基板、CPU 基板、光通信 I/F 基板を内蔵したものである。過去に開発した光 CT 用の MU に容量分圧器およびログウスキーコイルの入力部を追加して適用した。

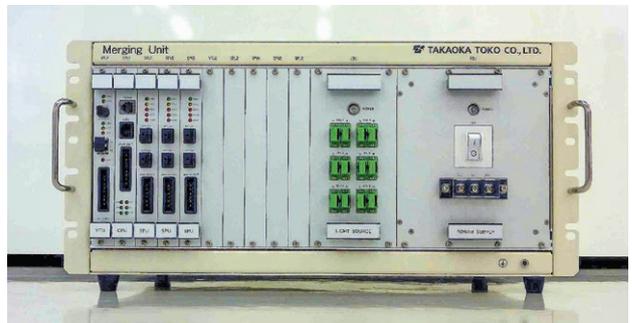


図 7 MU の外観

5 モデル器の試験と性能評価

5.1 基本誤差試験

基本誤差試験は、IEC 60044-7 および IEC 60044-8

の各規格に規定された測定ポイントにおいて試験を行った。試験構成を図 8 に示す。試験電圧は交流標準電圧電流発生器により印加し、試験電流は大電流発生装置により通電した。また、試験電流値は標準 CT の二次側に標準抵抗を接続して電圧に変換後、デジタルマルチメータで測定した。試験による比誤差の算出方法は次のとおりである。MU から出力された SV パケットは、メディアコンバータにて電気信号に変換後イーサネット経由で PC (パソコン) に取り込んだ。PC では、SV データに DFT (Discrete Fourier Transform)^{注4)} 処理を行い、50 Hz 成分を抽出して比誤差を算出した。なお、今回は比誤差のみの評価とし、位相角は別途試験環境を整備して評価することとした。

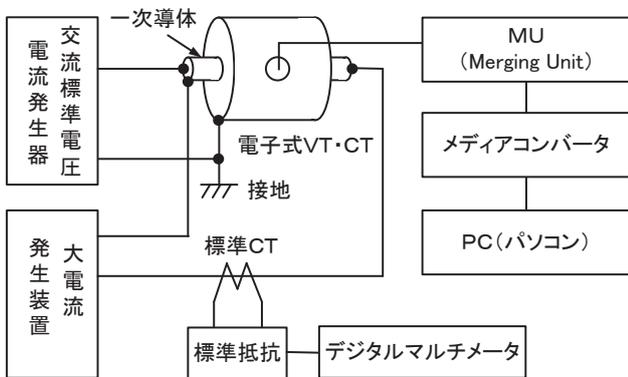


図 8 基本誤差試験構成

図 9 に電子式 VT の基本誤差特性 (比誤差) を示す。定格電圧の 80~120% の測定ポイントにおいて比誤差は $\pm 0.02\%$ 以下であり、確度階級を十分満足して良好な特性が得られた。

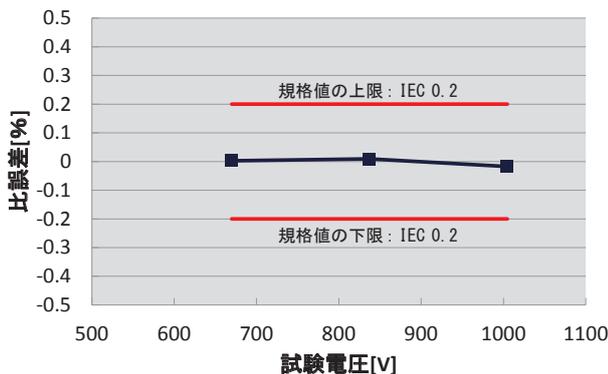


図 9 電子式 VT の基本誤差特性 (比誤差)

図 10 に電子式 CT の基本誤差特性 (比誤差) を示す。定格電流の 1~120% の測定ポイントにおいて比誤差は $\pm 0.04\%$ 以下であり、確度階級を十分満足して良好な特性が得られた。

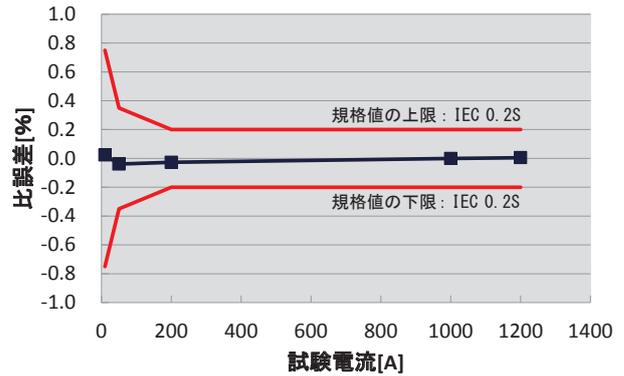


図 10 電子式 CT の基本誤差特性 (比誤差)

5.2 温度特性試験

温度特性試験は、恒温槽を用いて電子式 VT・CT と MU の周囲温度を変化させることとし、装置内部まで温度が安定する様、目標の温度に到達した後 3 時間放置して試験を行った。また、試験は電子式 VT・CT のみ温度変化を与える単体試験 (周囲温度: $-40 \sim +80^\circ\text{C}$) と、MU も含めて温度変化を与える組合せ試験 (周囲温度: $-10 \sim +55^\circ\text{C}$) の 2 種類について行った。電子式 VT の試験電圧は定格一次電圧、電子式 CT の試験電流は定格一次電流として、各温度における比誤差を算出した。

図 11 に電子式 VT の温度特性 (比誤差) を示す。比誤差が単体試験では $\pm 0.03\%$ 以内、組合せ試験では $\pm 0.05\%$ 以内の変化であり、確度階級を十分満足して良好な特性が得られた。

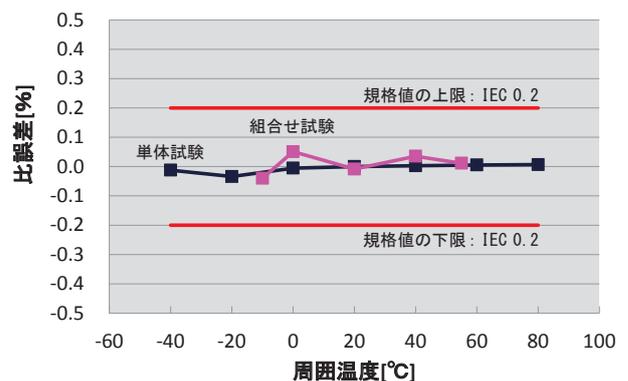


図 11 電子式 VT の温度特性 (比誤差)

図 12 に電子式 CT の温度特性 (比誤差) を示す。比誤差が単体試験では $\pm 0.06\%$ 以内、組合せ試験では $\pm 0.05\%$ 以内の変化であり、確度階級を十分満足して良好な特性が得られた。

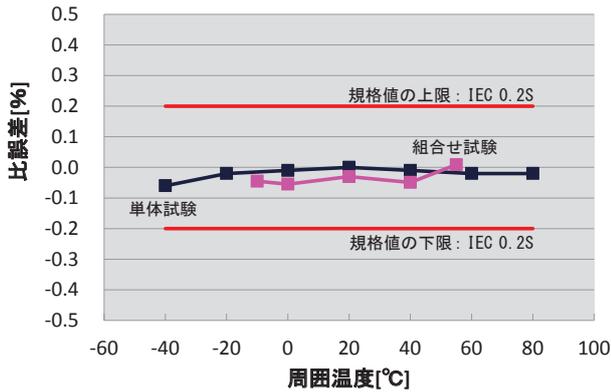


図 12 電子式 CT の温度特性 (比誤差)

5.3 外部磁界の影響試験

電子式 CT を三相一括形 GIS に適用した場合、他相磁界の影響を受けて測定精度に影響を与える可能性がある。本試験は、その影響度合いを調査するために行った。

三相一括形 GIS の相配置を模擬した試験器具に、一次導体および一相分のログウスキーコイルを取り付けた状況を図 13 に示す。一次導体の直径は $\Phi 80$ mm、相間距離は約 280 mm で三相配置した。試験は、ログウスキーコイルに無通電の状態では他相の一次導体に電流を通電した時、ログウスキーコイルで検出される電流値を測定した。その結果、試験電流 2,000 A (定格一次電流の 2 倍) において、ログウスキーコイルで検出された電流値が 2 A 程度であった。これは他相に通電した試験電流の 0.1% 程度の影響度合いであり、基本誤差試験や温度特性試験の比誤差を加味した場合でも、精度階級を十分満足して良好な特性が得られた。したがって、3 章で述べた外部磁界の影響対策が有効に機能していることが確認できた。

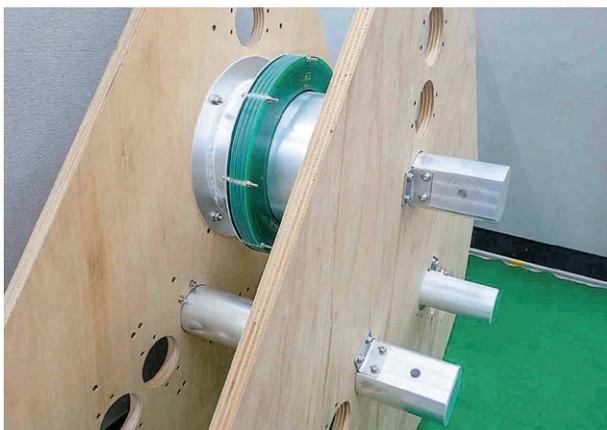


図 13 一次導体、ログウスキーコイル配置状況

6 おわりに

電子式 VT・CT の要素開発としてモデル器を設計・試作し性能評価を行った。その結果、基本仕様をほぼ満足し良好な特性が得られた。次のステップとして試験環

境を整備し、位相角の評価を行う必要がある。

電子式 VT・CT はデジタル変電所への適用を目的とし、MU と組み合わせて IEC 61850-9-2LE 準拠によるデジタル化を図った装置である。これにより、機器の大幅な小型・軽量化と設置面積の省スペース化が実現可能である。

今後は、三相一括形 GIS に直結可能な電子式 VT・CT のプロトタイプ器の開発を行い、社外に紹介していく予定である。

■参考文献

- (1) IEC 60044-7:1999, Instrument transformers-Part 7:Electronic voltage transformers
- (2) IEC 60044-8:2002, Instrument transformers-Part 8:Electronic current transformers

■語句説明

- 注 1) MU (Merging Unit) : 変電所内で計測した電圧・電流をデジタルデータに変換して IED (Intelligent Electronic Device) に出力する装置。また IED は、変電所内外で発生する各種故障を検出し、遮断器へトリップ指令を出力する保護演算装置。
- 注 2) NCIT (Non-Conventional Instrument Transformer) : 非従来型計器用変成器であり、光 VT・CT や容量分圧器、ログウスキーコイルなどの新しい計器用変成器。
- 注 3) SV (Sample Value) パッケージ : デジタル化された電圧・電流の瞬時値データを IEC 61850-9-2LE に準拠して分割されたデータ。
- 注 4) DFT (Discrete Fourier Transform) : 離散フーリエ変換であり、主に信号処理などで離散化されたデジタル信号の周波数解析などに使われるもの。

山口 達史

戦略技術研究所
技術開発センター ICT 技術グループ 所属

藤野 守也

戦略技術研究所
技術開発センター ICT 技術グループ 所属

小川 晃一

戦略技術研究所
技術開発センター ICT 技術グループ 所属

佐藤 祥輝

戦略技術研究所
技術開発センター ICT 技術グループ 所属

宮崎 未知果

戦略技術研究所
技術開発センター ICT 技術グループ 所属

布施 宏樹

戦略技術研究所
技術開発センター ICT 技術グループ 所属

足立 純一

戦略技術研究所
技術開発センター ICT 技術グループ 所属