

省エネルギー・小型化のニーズに対応する 矩形大容量 5 脚モルトラ

Rectangular Large-Capacity 5-Leg Type MOLTRA to Meet the Needs of Energy Saving and Downsizing

永露 友宏 NAGATSUYU, Tomohiro

宮田 智一 MIYATA, Tomokazu

カーボンニュートラルや脱炭素社会の実現に向けて、電気設備に対してはエネルギー効率の向上による温室効果ガスの排出量低減が求められている。近年、データセンター（DC）や半導体工場では、電力需要の高まりを受け、モールド変圧器の大容量化が進んでいるとともに、機器の小型化も求められている。これに応えるため富士電機は、矩形（くけい）大容量 5 脚モルトラ「V-ECO MOLTRA」を開発した。このモルトラは、鉄心とコイルを矩形にした 5 脚巻鉄心を採用している。これにより、従来品同等の省エネルギー性能および設置面積を維持しつつ、高さ寸法 15% の縮小を実現した。

Electrical facilities are being required to improve energy efficiency to reduce greenhouse gas emissions and achieve carbon neutrality. Meanwhile, data centers and semiconductor factories have recently become using larger capacity cast resin transformers (MOLTRA) to respond to rising power demand, however, also requiring downsizing. To meet this need, Fuji Electric has developed the “V-ECO MOLTRA,” rectangular large-capacity 5-leg type MOLTRA. It uses a 5-leg wound iron core whose core and coils are rectangular shaped. As a result, its height is 15% lower while maintaining the same energy-saving performance and footprint than that of the conventional product.

1 まえがき

2050 年カーボンニュートラルや脱炭素社会の実現に向けて、電気設備に対してはエネルギー効率の向上による温室効果ガス排出量の低減が求められている。

デジタル化社会の進展により、市場が拡大しているデータセンター（DC：Data Center）や半導体工場では、電力需要が高まる中、無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）の大容量化が進み、これに伴い変圧器の大容量化も進展している。また、これら受配電機器を屋内に設置する事例も増加しており、機器の小型化が重要になっている。

モルトラ^(注1)は「エネルギーの使用の合理化等に関する法

律」（省エネ法）の特定機器に指定されており、2014 年 4 月に施行された第二次判断基準に対応する製品（トップランナー変圧器^(注2) 2014）として、富士電機は「トップランナーモルトラ 2014」を展開している。

上述の大容量、高効率、小型化（屋内設置）というニーズに対して、富士電機は従来品同等の省エネルギー（省エネ）性能および設置面積を維持しつつ、高さ寸法を縮小した矩形（くけい）大容量 5 脚モルトラ「V-ECO MOLTRA」（図 1）を開発した。

2 大容量モルトラ

2.1 概要

富士電機はトップランナー変圧器 2014 に対応したトップランナーモルトラ 2014 を発売している。また、主に小・中容量向けには超高効率製品として「アモルファスマルトラ」、「スーパーエコモルトラ II」をそれぞれ発売している。製品ラインアップを図 2 に示す。

2.2 構造

トップランナーモルトラ 2014 の容量区分ごとのコイル形状と鉄心構造を表 1 に示す。1,000 kVA 以下の場合、図 3 (a)のようにコイル形状は矩形で、鉄心には 3 脚の巻鉄心を採用している（3 脚巻鉄心）。一方、1,000 kVA 超過の

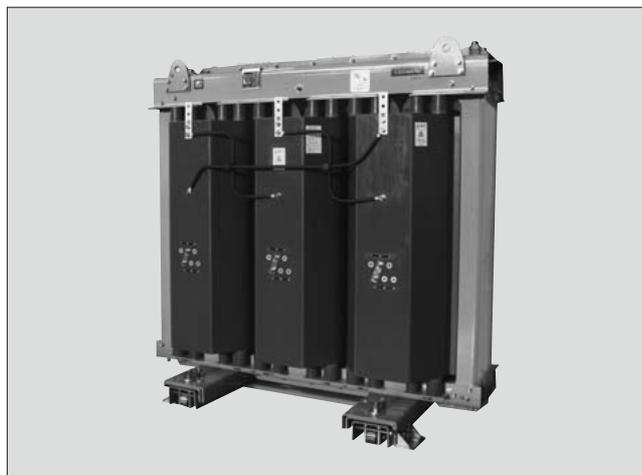


図 1 矩形大容量 5 脚モルトラ「V-ECO MOLTRA」

〈注 1〉モルトラ：富士モールド変圧器（富士電機株式会社の登録商標）

〈注 2〉トップランナー変圧器 2014：省エネ法特定機器変圧器の「変圧器の性能の向上に関する製造事業者等の判断の基準等」（平成 24 年経済産業省告示 71 号）に規定する第二次判断基準の基準エネルギー消費効率以上の効率を達成した変圧器の呼称

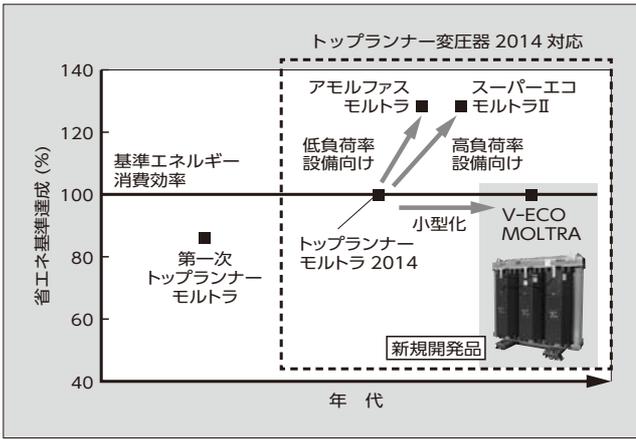


図2 製品ラインアップ

表1 「トップランナーモルトラ 2014」の coils 形状と鉄心構造

相数	容量	コイル形状	鉄心	
			脚数	種類
三相	1,000 kVA以下	矩形	3脚	巻鉄心
	1,000 kVA超過	円形	3脚	積鉄心

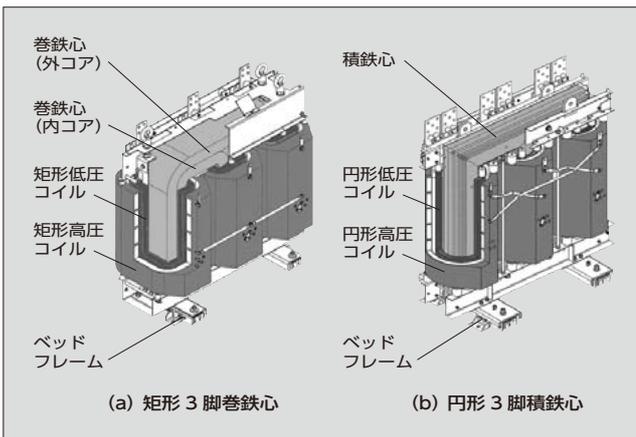


図3 モルトラの構造

場合、図3(b)のようにコイル形状は円形で、鉄心には3脚の積鉄心を採用している(3脚積鉄心)。

2.3 課題

DCや工場などで使用されるトップランナーモルトラ 2014は、一般的に図4のような配電盤に収納されている。図5はモルトラの収納状態である。この配電盤は、電気を使用するために発電所や変電所から供給される高圧の電気を低圧の電気に変圧する設備である。配電盤を設計する場合、電気室の広さや天井高、天井配線スペースの確保、および搬出入ルートなどの寸法の制約により、盤筐体(きょうたい)の高さを標準的な2,300mm以下とし、できる限り設置面積を小さくすることが望ましい。また、配電盤内への配線ケーブルなどの引込み方法は設置状況によりさまざまであるが、上部から引き込む場合、図5のようにモルトラと配電盤上部の間に配線スペースが必要である。そ

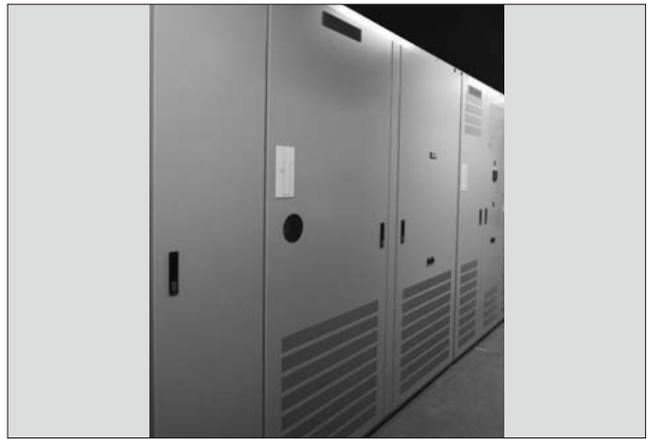


図4 配電盤

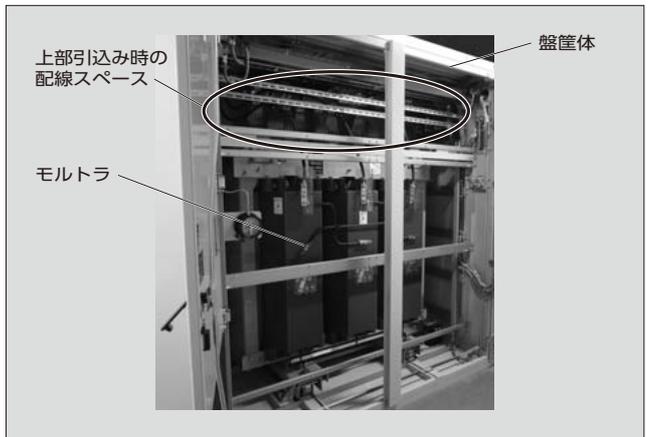


図5 モルトラの収納状態

のため、モルトラには、標準高さの盤筐体に納まるだけでなく、配電盤上部に配線スペースを確保できる寸法とすることが求められている。したがって、大容量になるにつれて、外形寸法の小型化が課題となっている。こうした小型化は、受配電機器を屋内に設置する事例が増えていることから重要となっている。

③ 矩形大容量5脚モルトラ「V-ECO MOLTRA」の概要

2.3節で述べた課題に対応するため、1,000kVA超過の大容量モルトラを対象にトップランナーモルトラ 2014と同等のエネルギー消費効率で、高さ寸法を縮小したV-ECO MOLTRAを新たに開発した。

3.1 小型化

1,000kVA超過のトップランナーモルトラ 2014に対して、高さ寸法を15%縮小し、盤筐体の標準的な高さ2,300mmに納まる構造とした。また、設置面積は従来品と同等の小型化を実現した。次にその具体的な手段について述べる。

1,000kVA超過のモルトラは、一般的に図6(a)のような3脚積鉄心を適用しているが、高さ寸法を縮小する手段と

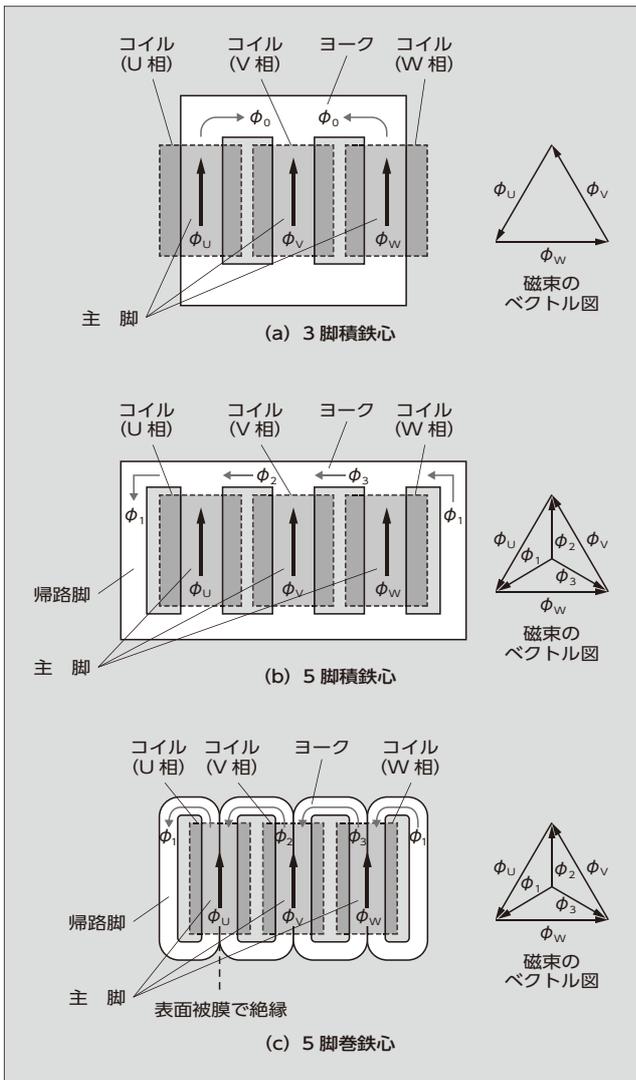


図6 3脚鉄心および5脚鉄心の構造

して5脚鉄心を検討した。なお、図6では鉄心内の磁束を、矢印とベクトル図で表している。

5脚積鉄心は、図6(b)のようにコイル(U相、W相)の外側にも鉄心(帰路脚)が配置される構造である。一方、5脚巻鉄心は、図6(c)のように巻鉄心を四つ並べた構造であり、鉄心間が表面被膜で絶縁されている。それぞれ構造が異なるが、磁束のベクトル図は共通であり、同じ磁束分布を持っている。

3脚積鉄心は主脚とヨークに流れる磁束量が全て一様で、両者の関係は式(1)で表される。

$$|\overline{\phi_0}| = |\overline{\phi_U}| = |\overline{\phi_V}| = |\overline{\phi_W}| \dots\dots\dots(1)$$

ϕ_U 、 ϕ_V 、 ϕ_W : 主脚の磁束量 (Wb)
 ϕ_0 : ヨークの磁束量 (Wb)

これに対し、5脚積鉄心や5脚巻鉄心は、磁束が帰路脚にも流れるため図6(b)、図6(c)のベクトル図のとおり、ヨークと帰路脚に流れる磁束量が主脚より少なくなる⁽²⁾。主脚とヨーク、帰路脚の磁束量の関係はそれぞれの磁気抵抗の差によっても異なるが、磁気抵抗の大きさが同じである

と仮定すると式(2)で表される。

$$|\overline{\phi_1}| = |\overline{\phi_2}| = |\overline{\phi_3}| = \frac{1}{\sqrt{3}} |\overline{\phi_U}| = \frac{1}{\sqrt{3}} |\overline{\phi_V}| = \frac{1}{\sqrt{3}} |\overline{\phi_W}| \dots\dots\dots(2)$$

ϕ_U 、 ϕ_V 、 ϕ_W : 主脚の磁束量 (Wb)
 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 : ヨークと帰路脚の磁束量 (Wb)

また、主脚の磁束密度 B_1 (T) およびヨークと帰路脚の磁束密度 B_2 の計算式は、それぞれ式(3)、式(4)で表される。なお、占積率は一律と仮定する。

$$\overline{B_1} = \frac{\overline{\phi}}{S_1 \times \text{占積率}} \dots\dots\dots(3)$$

$$\overline{B_2} = \frac{\overline{\phi}}{S_2 \times \text{占積率}} \dots\dots\dots(4)$$

B_1 : 主脚の磁束密度 (T)
 B_2 : ヨークと帰路脚の磁束密度 (T)
 S_1 : 主脚の鉄心断面積 (m^2)
 S_2 : ヨークと帰路脚の鉄心断面積 (m^2)

主脚とヨークの磁束密度を均一な設計とする場合、3脚積鉄心では主脚とヨークの断面積を同じにする。一方、5脚積鉄心や5脚巻鉄心で主脚とヨーク、帰路脚の磁束密度を均一にするためには、式(2)よりヨークと帰路脚の磁束量が主脚の $1/\sqrt{3}$ 倍であることから、式(3)、式(4)よりヨークと帰路脚の断面積は主脚の $1/\sqrt{3}$ 倍とすればよい。したがって、5脚積鉄心や5脚巻鉄心は3脚積鉄心よりもヨークの高さが低減可能となり、モルトラの高さ寸法が縮小可能となる。

このように5脚鉄心の適用で、モルトラの高さ寸法が縮小可能であることが分かったが、その一方でコイルの外側にも鉄心が配置される構造であるため、特に5脚積鉄心は、図6(b)のように3脚積鉄心と比較して幅寸法が大きくなる欠点がある。

そこで、V-ECO MOLTRAには、図6(c)のような巻鉄心を四つ並べた5脚巻鉄心を採用し、コイル形状は矩形とした。矩形コイルは円形コイルと比較して、図7(a)のように奥行寸法は大きい幅寸法は小さい。このため、図6(b)の5脚積鉄心のような幅寸法増加が抑制でき、コンパクトな設計が可能となるためである。さらに、5脚積鉄心と比較して製造が容易な利点もある。

しかし、矩形形状の低圧コイルは、図8に示すように幅方向の導体間に空隙が発生しやすく、そのままでは幅寸法の削減効果は小さい。また、この空隙により巻線内の熱伝導による熱の移動が阻害され、コイルの放熱性能が低下する。そこで、図8に示すように低圧コイルの幅方向に対し、専用の治具を使用して矢印の方向から圧縮力を加えることにより、導体間の空隙の発生を抑制した。その結果、低圧コイルの幅寸法を縮小し、図9(a)に示すように、5脚巻鉄心においても3脚積鉄心と同等の幅寸法を実現した。

なお、モルトラの奥行寸法は図9(b)に示すようにベッド

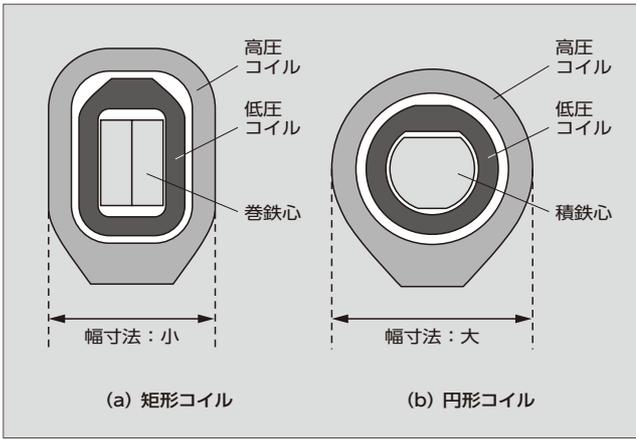


図7 コイル部断面図

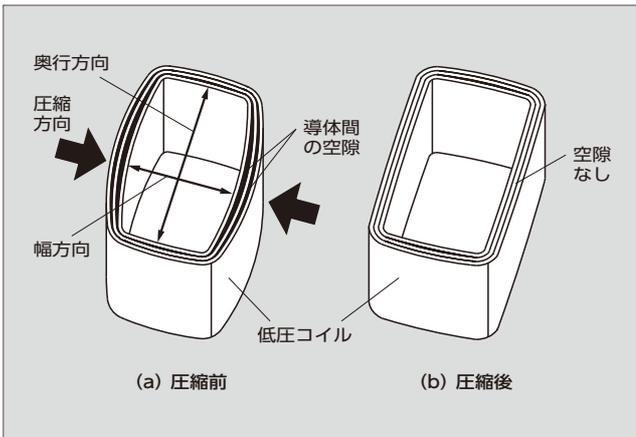


図8 低圧コイルの圧縮（簡略図）

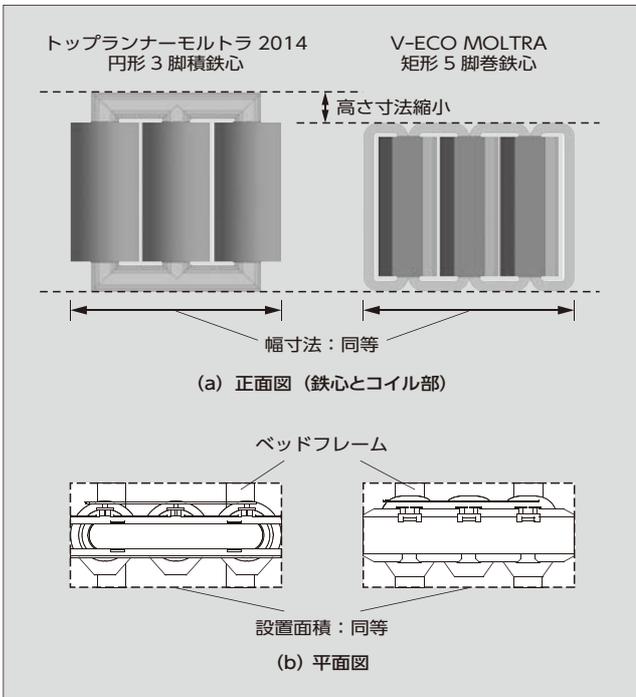


図9 モルトラの外形寸法比較

フレームが最大となる。ベッドフレームは配電盤へのモルトラ据付けと転倒防止を目的として使用する。5脚巻鉄心

構造は3脚積鉄心構造と比較して、磁路長が長くなるため質量が重くなるが、重心の高さが低いため、地震などの加振時にベッドフレームの据付ボルトなどに働くモーメントは小さくなる。そのため、従来品である3脚積鉄心構造のトップランナーモルトラ 2014 と同じサイズのベッドフレームで安定した据付けが可能となり、従来品同等の設置面積を実現した。

また、5脚巻鉄心は、幅方向の外側が非充電部（鉄心）であるため、外側が充電部（高圧コイル）である従来の3脚積鉄心に対して、盤側面との絶縁距離（離隔距離）を短く抑えることができる。この結果、設置面積は従来機種と同等だが、モルトラを収納する盤の幅寸法を縮小した。

3.2 設計の最適化

開発した V-ECO MOLTRA は、1,000 kVA 超過のトップランナーモルトラ 2014 に対して、同等の省エネ性能を持っている。次に5脚巻鉄心の設計の最適化と省エネ性能について述べる。

5脚積鉄心の鉄心は、主脚、帰路脚、ヨークごとに電磁鋼板を積み重ねて、図6(b)に示すような一体型とする。このため、主脚や帰路脚では電磁鋼板の幅方向の寸法を、ヨークでは電磁鋼板の高さ方向の寸法をそれぞれ変えることで、主脚、帰路脚、ヨークの断面積の調整が可能である。したがって、ヨークと帰路脚の断面積を、主脚の $1/\sqrt{3}$ 倍にすることは容易である。

一方、5脚巻鉄心の鉄心は、電磁鋼板を渦巻状に巻き重ねて成形した巻鉄心を、図6(c)に示すように四つ並べて利用する。このため、一つ一つの巻鉄心の断面積は、どの部位においても同一であることから、主脚の断面積は、巻鉄心二つ分の断面積に相当する。このため、ヨークと帰路脚の断面積は主脚の $1/2$ 倍となり、5脚積鉄心よりさらに高さ寸法を縮小できる。その一方で、5脚巻鉄心のヨークと帰路脚は、磁束量が主脚の $1/\sqrt{3}$ 倍であり、断面積が主脚の $1/2$ 倍であるため、式(3)、式(4)より磁束密度は主脚の $2/\sqrt{3}$ 倍となる。このためヨークと帰路脚の磁束密度が主脚より大きくなることを考慮し、鉄心が飽和して変圧器としての機能を損なうことがないように、主脚の磁束密度を低めに設計した。また、5脚巻鉄心は3脚積鉄心よりも質量が大きくなることで損失が増加するため、損失の増加を抑制するために、磁束密度の低減に加え、低損失の鉄心材料を採用した。

こうした設計の最適化を行った結果、トップランナーモルトラ 2014 と同等のエネルギー消費効率（1990年代型式品に対してエネルギー消費効率を40%改善）を維持することができた。

3.3 その他の特徴

省エネ・小型化への対応に加え、V-ECO MOLTRA は次のような特徴を持っている。

- (a) 1990年代型式品に対して大幅な低騒音化（-10 dB）を実現した。

- (b) 高い難燃性を実現し、IEC 60076-11の形式認定を取得した。
- (c) 真空環境下で注型したモールド巻線を適用することで、部分放電の発生を抑制し、高絶縁信頼性を実現した。

4 あとがき

省エネルギー・小型化のニーズに対応する矩形大容量5脚モルトラについて述べた。

今後もお客さまのニーズを捉え、最適なモルトラの製品開発を進めていく所存である。

参考文献

- (1) 安本浩二ほか. 大容量UPSを用いたデータセンター向け共通予備システム. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.1, p.72-

77.

- (2) 大岡登, 前川定雄. 標準電気機器講座〈第6巻〉変圧器. 第1版. 東京電機大学出版局. 1968, p.409.



永露 友宏

モールド変圧器の設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部千葉工場設計第一部。



宮田 智一

モールド変圧器の設計・開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部千葉工場設計第一部課長。





*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。