

クラッド・めっき技術を応用した複合材料線材

Composite Metal Wires Made by Cladding and Plating

八木 洋光*
Hiromitsu Yagi

山崎 和郎
Kazuo Yamazaki

太田 肇
Hajime Ota

複合材料線材は複数の金属相を有することで異なる機能を比較的安価に合わせ持つことが可能である。当社はクラッドまたはめっき技術を応用した複合材料線材製品群を擁しており、本稿ではその技術と応用例を紹介する。

The composite metal wire is composed of multiple metallic phases and has multiple functions at a relatively low cost. The Sumitomo Electric Group offers a variety of composite metal wire products that are made by cladding and plating. This paper introduces the technologies and application examples of our wires.

キーワード：嵌合、クラッド、めっき、複合線、導体

1. 緒 言

エレクトロニクス産業の発展にともない電子部品用線材にはさまざまな特性が求められ、それに応じて多種多様な線材が生まれてきた。線材には単体の金属線や合金線の他に、複数の金属相を有する複合材料線材がある（図1）。単体の金属線や合金線は一般に一つの機能を発揮するには優れているが、複数の要求特性を同時に満たそうとすると、それぞれの特性がトレードオフの関係になる場合や、製造に多大なコストを要したりするなど困難なことも多い。複合材料線材は、機能の異なる金属相を合わせ持つことで比較的安価に複数の特性を同時に成立させることができる。

例えば、鉄ニッケル合金はガラスとの熱膨張率の差が小さくガラス封止部の貫通リード線として用いられてきたが、導電率が小さい。一方で銅は、導電率は大きい熱膨張率も大きく、そのままガラス封止に用いると膨張率の差によって封止部が破壊される。これら2種類の金属をクラッド（嵌合）により一体化することで、ガラスとの熱膨張率の差が小さく、導電率も大きい線材を製造することができ

る。この線材はジユメット（Dumet）線と呼ばれ、管球用のリード線としておよそ100年前に誕生した。

このようなクラッドあるいはめっき技術を用いた複合材料線材が広範な分野で使用されている。本稿では主に当社電子部品部の関係会社である住電ファインコンダクタ(株)、華友材料科技股分有限公司およびSumiden Electronic Materials (M) Sdn. Bhd. で扱う複合材料線材製品群とその応用例を紹介する。

2. クラッド線

2-1 クラッド線の特徴

当社のクラッド線製造方法は芯材をパイプ状の被覆材中に入れるダイレクト（Direct = DIR）法と、テープ状の材料を芯材の周りに連続溶接で被覆する連続溶接（Continuous Welding = CW）法の2種類に大別される。どちらも芯材と被覆材を合わせた状態でダイス引きすることで密着させ、線材として一体化させている。表1に当社クラッド線の主なラインナップを示す。

2-2 クラッド線の製造工程

(1) ダイレクト（DIR）法

DIR法では芯材をパイプ状の被覆材に直接入れて一体化させるため、簡便な工程となり（図2）、信頼性の高い線材を得ることができる。ただし、一旦パイプ材を直線状に伸ばした上で芯材を挿入する必要があることから、一般的に生産できる長さは設備長により制約される。当社では独自の長尺設備を持ち、量産性を確保している。また金属種によってはパイプ材の入手が困難な場合もある。後述する連続溶接法との連携で多品種化を図っている。

製造における当社の特徴は芯材と被覆材の密着力を高め、界面への異物混入を防ぐ機構を有することである。芯

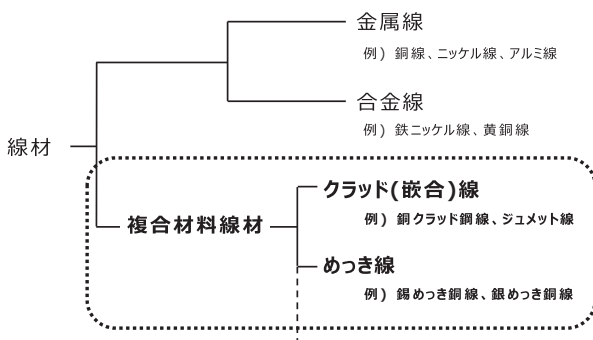


図1 線材の種類

表1 当社クラッド線の主なラインナップ

品名(略称)	組成	断面模式図
特長・主な用途		
銅クラッド鋼線 (CCS) 高導電率、高熱伝導率、銅線よりも強度・疲労特性に優れる ⇒電子部品用リード線	銅クラッド 鋼	
銅クラッドアルミ線 (CCA) 軽量、高強度、高導電率 ⇒軽量ハーネス	銅クラッド アルミ	
銅クラッド鉄ニッケル線 (ジュメット、Dumet、ノーボレジュメット) ガラスに近い熱膨張率、高導電率	銅クラッド 鉄ニッケル合金	
ボレーテッドジュメット線 表層のホウ砂+亜酸化銅層による良好な耐熱性とガラス密着性 ⇒電球用リード線、サーミスタ	ホウ砂+亜酸化銅層 銅クラッド 鉄ニッケル合金	
オキシダイズジュメット線 亜酸化銅層のみを表層に形成 ホウ砂の汚染がない ⇒ダイオード	亜酸化銅層 銅クラッド 鉄ニッケル合金	
銅クラッドステンレス線 (CCSUS) 開発中 高導電率、高強度	銅クラッド ステンレス	
ニッケル基超合金クラッドニッケル線 開発中 高温耐酸化性と導電率の両立	ニッケル基超合金 ニッケル	

材と被覆材の界面に異物を挟み込むと密着力が低下し、被覆材の破壊・脱落や断線に繋がる。これを防止するためには芯材とともにパイプ材の内側を清浄に保つ必要があり、物理的・化学的方法によって洗浄を行い、独自の締付嵌合によってクラッドすることで、クラッド界面の密着性を非常に高め、気密封止に適した線材を提供している。

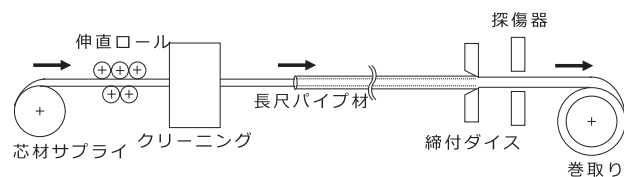


図2 ダイレクト法模式図

(2) 連続溶接 (CW) 法

芯材周りにテープ状の被覆材を連続溶接で管状に成形(フォーミング)するため、DIR法とは違って生産長さが設備に制約されず、また被覆材も管状である必要がない

(図3)。そのため、パイプ材として入手しにくい材料との組み合わせも可能となり、複合の選択範囲も広がる。被覆材の材質、サイズに応じたフォーミング条件を設定する必要があるが、当社は国内外に各種条件に応じたフォーミング設備を保有し対応している。また連続締付ダイスによるクラッドは、上記DIR法同様に独自の方法を用いている。

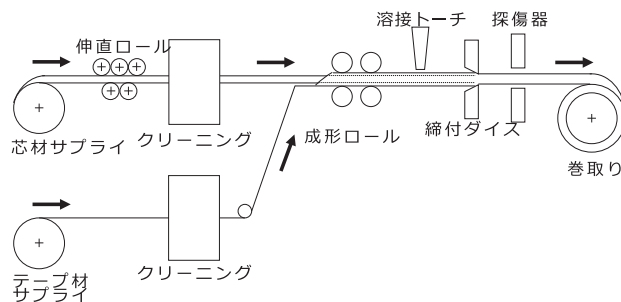


図3 連続溶接法模式図

2-3 クラッド線の製品紹介

(1) 銅クラッド鋼線 (CCS)

強度に優れた低炭素鋼の芯材に熱・電気伝導性の良い銅を被覆したクラッド線。銅線よりも強度や耐疲労性が求められる部位に使用される。当社のCCSは広い範囲で銅と鋼の比率を変えることができるため、さまざまな導電率と強度を選択することができる(表2)。また芯材が鋼であるため強磁性を示すのも特徴の一つで、例えばリードピンのような微細な部品に用いられる場合に自動組立機に対応することができる。

表2 主なCCS線

製品名	導電率	銅断面積比	特長・用途
30CCS	約30%IACS*1	約20%	ガラスダイオードのリード線や各種めっき線の母線に使用される 加工硬化を加えた物は同軸ケーブルの芯線としても使用される
40CCS	約40%IACS	約30%	30CCSでは導電率が不足する場合に適用
60CCS	約60%IACS	約55%	ダイオードから発生する熱を効率良く逃がすために開発され、ガラスダイオードや樹脂モールドダイオードのリード線に使用される
70CCS	約70%IACS	約66%	
80CCS	約80%IACS	約77%	

(2) 銅クラッドアルミ線 (CCA)

軽量のアルミニウム合金の芯材に銅を被覆したクラッド線。主に動作部分など導電率とともに軽量性が求められる部分に使用される。全体に対する銅の断面積比による特性の変化を図4に示す。銅線と同じ導電性能を満たした場合

の銅線に対する軽量化の割合も併せて同図に示した。例えば銅断面積比50%の場合、CCAは銅線に対して21%軽量化できる。

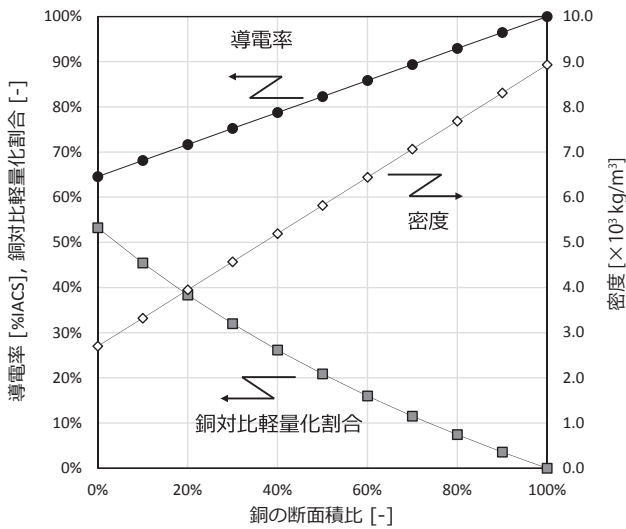


図4 CCAにおける銅断面積比と特性の関係

しかし製造プロセス中の熱処理に加え、ガラス封止時の加熱により黄銅層が拡散して空孔を生じることがわかり、また製造方法の改善によって黄銅層がなくても十分な密着力が確保できるようになったことから、当社では鉄ニッケル合金線を前述のDIR法やCW法によって直接銅材で被覆している。また黄銅を用いないことで、合金元素の垂鉛などからの汚染を防止している。

銅はそのままではガラスとの馴染み（濡れ性）が悪いため、表面を改質する必要がある。ボレーテッドジュメット線では線材表面にホウ砂 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) を焼付け（ボレーション）、ホウ砂ガラス ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) 層と亜酸化銅 (Cu_2O) 層を形成させることで、高温雰囲気でも良好なガラス密着性を実現している。オキシダイズジュメット線はダイオードなどナトリウムの汚染を嫌う用途に向けて、亜酸化銅 (Cu_2O) 層のみを表面に連続的に形成させることでガラス封止部の密着力を向上させている⁽⁵⁾。当社ではこの他、用途に応じて表面改質を実施しないノーボレジュメット線と後述のニッケルめっきを施したニッケルめっきジュメット線を提供している。

3. めっき線

3-1 めっき線の特徴

めっき線とは母材となる線材に対してニッケルや銅、銀、錫などをめっきにより被覆した線材である（表3）。主に電気めっき法が用いられ、錫に関しては溶融めっき法も適用される。クラッドに比べ外層を薄くしやすいため、表面性状のみを改良したい場合などに用いられる。

(3) 銅クラッド鉄ニッケル線（ジュメット、Dumet、Du）元々Dual Metal線と呼ばれていたものが略されDumet（ジュメット）線になった。熱膨張率がガラスと近い鉄ニッケル合金に銅を被覆することでガラス封止性と導電率を両立させている（図5）。サーミスタやダイオードなどのガラス封止部を貫通するリード線に用いられている。

初期のジュメット線は鉄ニッケル合金芯材と銅被覆材の間に密着力を上げるため薄い黄銅を中間層として挟み、黄銅層を介した拡散接合によって一体化を図っていた⁽⁴⁾。し

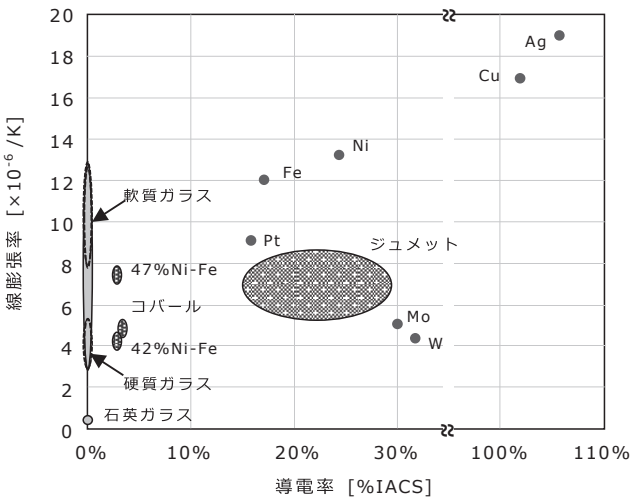


図5 導電率と膨張率の関係^{(1)~(3)}

表3 当社めっき線の主なラインナップ

品名(略称) 特長・主な用途	組成	断面模式図
ニッケルめっき銅線 (NPC) 高導電率、高耐熱性 ⇒耐熱電線	ニッケルめっき 銅	
銀めっき銅線 (AgPC) 高導電率、耐酸化性、純銀線より安価 ⇒高周波導体、シールド	銀めっき 銅または銅合金	
錫めっき銅線 (TPC) 良好な半田接続性、高導電率 ⇒カード電線、機器配線	錫めっき 銅または銅合金	
ニッケルめっきジュメット (NP-Du) 良好なガラス密着性、半田接続性 ⇒ガラス封止部用リード線	ニッケルめっき 銅クラッド 鉄ニッケル合金	
銀めっき銅クラッド鋼線 高導電率、高熱伝導率、高強度、 耐酸化性 ⇒高周波導体	銀めっき 銅クラッド 銅	

3-2 めっき線の製造工程

(1) 電気めっき法

電気めっき法は電流と時間を調整することでめっき厚を制御しやすく、比較的薄い膜厚でも均一な被覆が可能である。図6に電気めっきラインの模式図を示す。線材は脱脂および酸洗によって表面の汚れを十分に落とし、めっきが密着しやすくなるよう活性化される。下地めっきは素線とめっきの密着力を上げる役割や相互拡散を防止するバリア層として追加される場合もある。各槽間には薬液を次の槽へ持ち込むのを防ぐために水洗槽が置かれる(図6)。

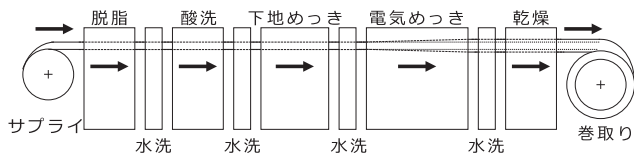


図6 電気めっき法模式図

水洗水を含めた各薬液の状態によって、品質が大きく左右されるため、日々の管理が重要である。また硫酸や塩酸、シアン化物などの毒劇物を使用することも多いため、当社では専用の廃液処理システムを構築している。

(2) 溶融めっき法

錫のような低融点金属を溶融させためっき槽に線材をくぐらせる方法(図7)。めっき厚の制御は難しいが、附着した溶融金属ごとダイスを通すことで製品の線径を一定にすることができる。電流制御が不要であるなど設備が簡便なため、電気めっき法に比べると安価に製造できる。

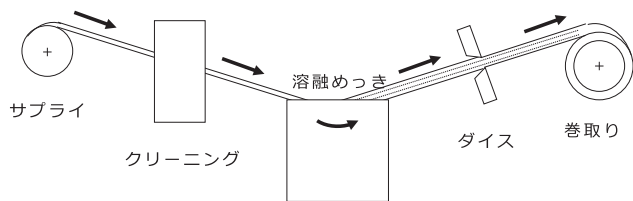


図7 溶融めっき法模式図

3-3 めっき線の製品紹介

(1) ニッケルめっき銅線 (NPC)

銅線をニッケルでめっきすることで、70%IACS以上の導電率と500℃までの耐熱性を両立している。特に高温で使用される場合には体積比で28%の厚めっきを施した線材を提供している。自動車のエンジン周りのような高温環境

下で使われるリード線などに用いられる。

(2) 銀めっき銅線 (AgPC)

銅線に銀めっきを施した線材で、銀の耐酸化性を持ちつつ純銀線より安価である。また全金属中で最も電気抵抗の小さい銀が表面を被覆するため高周波特性が良好である。高周波回路におけるリード線やシールドとして使用される。

(3) 錫めっき銅線 (TPC)

電気めっき法と溶融めっき法が適用されることがある。溶融めっき法で作られた錫めっき銅線は電着応力の影響がなく、ウィスカー^{※2}が発達しにくい。表層の錫が半田付けとの相性が良いことから抵抗器やコンデンサーなど実装部品のリード線に使用される他、摩擦抵抗が小さいことを活かしてコネクター用ピンにも使用される。

(4) ニッケルめっきジュメット線 (NP-Du)

ジュメット線にニッケルめっきを施した線材。ポレーテッドジュメット線やオキシダイズジュメット線はガラスとの密着性を良くするため、表面にホウ砂や亜酸化銅の層を形成しているが、これらは導電率が低くリード線として外部に接続する際は接続部の表層を除去したり、別種のリード線を溶接したりする必要がある。ニッケルめっき層はガラスとの密着性と外部への接続性を両立させることから、表層除去の工程が不要となる。また高温環境下での使用に際し耐熱・耐酸化性を発揮する。リード線がそのまま接続端子となるウェッジ球に用いられる。

NP-Duはガラス封止部に使用されるため、特に表面平滑性が重要視される。表面に凹凸があると封止部でリーク不良が発生してしまう。当社では工程におけるキズ発生を撲滅するよう設備設計から見直し、またガラス封止工程を再現する検査機器を開発することにより、予め線材の段階でリーク不良の対策を実施している。この品質管理をジュメット線の上工程であるクラッドから最外層のニッケルめっき、伸線、軟化などの一貫工程に反映することで、当社のNP-Duは高品質・安定性を武器に大きな世界シェアを占めるに至った。

4. 新製品

これまでクラッドやめっき技術が適用されてこなかった材料との組み合わせや、導体以外の用途を視野に入れた新製品を紹介する。

4-1 ニッケル基超合金クラッドニッケル線

エンジンなどの高温腐食環境下で使用される耐熱電線としてはニッケル線などが用いられているが、長期間高温環境下で使用されていると酸化によって有効断面積が小さくなり導体抵抗が大きくなる。これに対してニッケルにクロムや鉄、イットリウムを加えたニッケル基超合金は耐熱性・耐腐食性に優れ、高温環境下でも有効断面積がほとんど減少しない反面、導電率が小さい⁽⁶⁾。これらを当社のクラッド技術で一体化することにより、導電性能と長寿命を両立

する耐熱電線を作製した。

4-2 ニッケルクラッドアルミ線 (NCA)

ニッケルとアルミニウムの合金は耐熱性や耐酸化性に優れ、中でもNi:Al=1:1の合金は融点1683℃とそれぞれの単体よりも融点が高く(図8)、またアルミニウムの割合が大きいことから比較的軽量であり、航空機用タービンなどに使用されている。しかしながらその融点の高さもあって加工が難しく、特に肉盛り溶接用の溶接線はアーク中で溶融させてしまうにも関わらず、その難加工性のために高コストである。

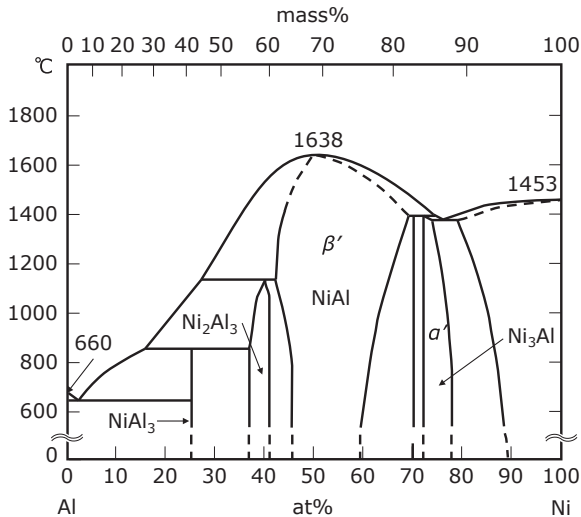


図8 Al-Ni二元系状態図⁽⁷⁾

そこで当社ではアルミニウム芯材にニッケル外層を所定の割合で被覆することで、合金組成と同じ断面積比を持つ線材を作製した。アーク放電で溶融したニッケルクラッドアルミ線は、溶接部でNiAl合金として凝固する。

ニッケルとアルミニウムのような強度の大きく異なる金属のクラッドでは、強い側の金属(ニッケル)の反発力によってダイス引き後の断面積比が変動しやすく、芯材(アルミニウム)の断線が起きやすいが、当社独自の製造方法によってこれを克服した。

4-3 めっきアルミ線

アルミ線は軽量導体として注目されているが、表面を不導体の酸化膜で緻密に覆われているため、接続には特別な処理が必要である⁽⁸⁾。また銅クラッドアルミ線などのクラッド線では外層の断面積比を10%以下にすると破断しやすくなるなど製造が難しく、軽量化に限界があった。アルミニウムへのめっきはダブルジンケート法によるものが実用化されているものの、線材への適用例は少ない。

当社では試作用めっきラインを設置し、アルミ線に各種めっき(Sn, Ni, Cuなど)を実施できる環境を整え製品開

発を行っている。例えば半田接続性を持たせた錫めっきアルミ線や、当社独自のめっき法により500℃近くでも高いめっき密着力を持つニッケルめっきアルミ線のサンプル出荷を開始している(表4)。

表4 めっきアルミ線作製例

構成断面	錫めっきアルミ線 	ニッケルめっきアルミ線 	アルミ線(芯材)
線径 [mm]	0.5~1.2	0.5~1.2	0.5~1.2
めっき厚 [μm]	1~10	1~10	-
めっき断面積比	1%~8%	1%~8%	0%
密度 [g/cm ³]	2.7~3.1	2.7~3.2	2.7
引張強さ [N/mm ²]	芯材とほぼ同じ	芯材とほぼ同じ	軟材130~180 硬材300~400
導電率 [%IACS]	56~59	58~61	65
特長	良好な半田付け性	500℃付近までの表面耐熱性	-

5. 結 言

銅・鉄・ニッケル・アルミニウムなどの一般的な材料を当社独自のクラッド・めっき技術により一体化した複合材料線材は、導電率・熱伝導率・強度・耐熱性・ガラスとの密着性などといった複数の特性を同時に安価に実現することが可能である。複合材料線材は今後もエレクトロニクスにとどまらず多彩な分野で活躍することが期待される。

用語集

※1 %IACS

国際標準軟銅線(International Annealed Copper Standard, 293 Kでの比抵抗: $1.7241 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$)の導電率を100%IACSとし、これに対する比率で対象の導電率を表す⁽⁹⁾。

※2 ウィスカー

経時的に成長する針状結晶。端子部で発達すると短絡を引き起こす。

・コバール(KOVAR)はCRS HOLDINGS, INC.の米国登録商標です。

参 考 文 献 -----

- (1) (社)日本金属学会 編、“ガラスと金属封着”、電子管用金属材料、丸善(株)、p.288-291 (1958年)
- (2) (社)日本金属学会 編、“基礎的な物性”、改訂4版 金属データブック、丸善(株)、p.13 (2004年)
- (3) 山崎和郎、「鉄ニッケル系リード材料の基本特性と応用」、住友電気第125号、p.125-133 (1984年)
- (4) (社)日本金属学会 編、“銅複合材料”、電子管用金属材料、丸善(株)、p.117 (1958年)
- (5) 工藤和直 他、「オキシサイズドジユメット線の特性について」、住友電気第116号、p.177-184 (1980年)
- (6) 丹治亮 他、「高性能ニッケル基電極材料の開発」、SEIテクニカルレビュー第171号、p31-35 (2007年)
- (7) (社)日本金属学会 編、“変態図および状態図集”、改訂4版 金属データブック、丸善(株)、p.515 より改変 (2004年)
- (8) 小林宏平 他、「アルミハーネス拡大に向けた開発」、SEIテクニカルレビュー第194号、p.8-13 (2019年)
- (9) (社)日本金属学会 編、“銅とその合金”、改訂5版 金属便覧、丸善(株)、p.621 (1990年)

執 筆 者 -----

八木 洋光* : 住電ファインコンダクタ(株)



山崎 和郎 : 住電ファインコンダクタ(株) 技師長



太田 肇 : 住電ファインコンダクタ(株) グループ長



*主執筆者