

技術報告

NL1：接合性と耐食性に優れたAlボンディングワイヤ

NL1: Aluminum Bonding Wire with High Bondability and Corrosion Resistance

荒木 典俊*
Noritoshi ARAKI

小田 大造
Daizo ODA

須藤 裕弥
Yuya SUTO

山田 隆
Takashi YAMADA

抄 録

パワーモジュールに代表されるパワー半導体のインターコネクには Al 製のボンディングワイヤが一般的に用いられているが、近年、電気自動車等の E-mobility の急速な普及に伴い、リチウムイオン電池のバッテリーモジュールの接続材料としての Al ワイヤの需要も増加している。日鉄マイクロメタル(株)が開発した Al ボンディングワイヤ NL1 は、優れた接合性(広いプロセスウィンドウ)と耐食性を特徴としており、パワー半導体とバッテリーモジュール用途の両方に最適なワイヤである。本報告では、NL1 のプロセスウィンドウと耐食性にフォーカスして製品紹介を行う。

Abstract

Aluminum bonding wire is conventionally used as an interconnect for power semiconductors as represented by the power module. In recent years, the application of aluminum wire to the lithium-ion battery module is also increasing due to the rapid proliferation of e-mobility such as electric vehicles. Our aluminum wire, NL1 is characterized by a large process window and high corrosion resistance, and suitable for both power semiconductors and battery connection. In this paper, we introduce our NL1 wire with the focus on its process window and corrosion resistance.

1. 緒 言

ボンディングワイヤは半導体パッケージの半導体素子と外部端子を電氣的に接続するインターコネク材として広く使われている。ワイヤボンディングは配線の自由度が高くかつコストパフォーマンスに優れていることから、半導体パッケージの配線方法の主流として 50 年以上に渡り使用され続けており、ワイヤボンディングを使用した半導体パッケージは今後も増加し続けることが見込まれている¹⁾。半導体パッケージに使用されるボンディングワイヤの材質は 2010 年頃までは専ら Au であったが、日鉄マイクロメタル(株)が世界に先駆けて開発した Pd 被覆 Cu ボンディングワイヤ (EX ワイヤ) の台頭により、ボンディングワイヤ市場はこの 10 年余りで大きな変革を遂げ、当初不可能と考えられていた脱 Au 化の道を着実に進み続けている²⁾。

一方で、ボンディングワイヤは前述の半導体パッケージの他にも、パワーモジュールに代表されるパワー半導体の分野でも使用されている。高電圧・大電流の制御や変換を目的としたパワー半導体デバイスは、電力ロス低減の重要

な役割を担っていることから、今後の低炭素化社会のキーデバイスとして注目されており、その接続材料には Al 製のボンディングワイヤが一般的に用いられている。パワー半導体では大電流を扱うことから、ワイヤ径は 100~500 μ m と、半導体パッケージで使用されるワイヤ径に比べるとかなり大きい。また、ボンディングワイヤの接続方法には、ボール (Free Air Ball) を形成せずに常温で行うウェッジ方式の超音波接合が通常用いられる。図 1 に標準的なパワー半導体デバイスの模式図を示す。

Al ワイヤは、他のボンディングワイヤの材質に比べて安価であり、電氣的・機械的特性にも優れているため、パワー半導体デバイスのインターコネク材として長い歴史を有

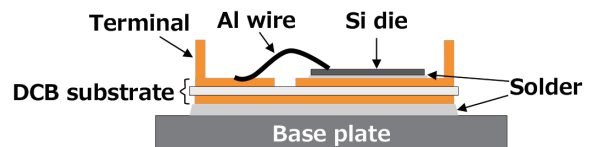


図 1 標準的なパワー半導体デバイスの構造
Basic structure of power semiconductor device

* 日鉄マイクロメタル(株) 技術開発部 次長 埼玉県入間市狭山ヶ原 158-1 〒358-0032

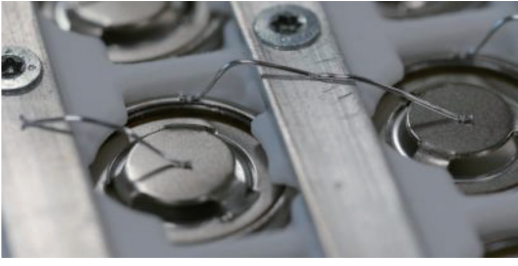


図2 ワイヤボンディングによるバッテリーセルの接合例
Example of connection of battery cell using wire bonding

しているが、近年リチウムイオン電池のバッテリーモジュールの接続材料としての需要も増えてきている。その大きな理由は、近年のEVを始めとするE-mobility市場の急速な拡大にある。EV用バッテリーモジュールに用いられるリチウムイオン電池は大きく円筒型、プリズム型、パウチ型の3種類⁹⁾に分けられるが、その中でも円筒型の電池を使用したバッテリーモジュールの配線材にAIワイヤが用いられるケースが増加している^{3,7)}。バッテリーモジュールでは、ワイヤは電池とバスバー間の接続に用いられ、過電流等の異常時にはヒューズとしての機能も担っている^{7,8)}。図2にワイヤボンディングによるバッテリーセルの接合例を示す⁹⁾。

バッテリーモジュールでは、ボンディングワイヤの接続対象となる電池キャップの最表面にはNi、バスバーにはCuやAlが用いられている^{3,5)}。NiやCuは硬度が高くかつ酸化の影響を受けやすい素材であるため、半導体デバイスで一般的に用いられるAlの電極パッドに比べるとワイヤボンディングの難易度は高い。また、クリーンルーム内で徹底した汚染管理が行われる半導体デバイスに比べて、バッテリーモジュールの電池キャップやバスバーの表面は汚染物質が残存しやすいことも報告されている^{7,10,11)}。ワイヤボンディング部の接合強度のばらつきや接合部の不着は、歩留まり等の生産能力低下に直結するため、半導体デバイス同様、バッテリーモジュールにおいても、接合性はワイヤ選定における非常に重要なパラメータである。さらには、バッテリーモジュールは実使用環境において、大気中で高温・高湿環境に晒されるため、耐食性もワイヤ選定において重要な性能になる^{7,8)}。

日鉄マイクロメタルが開発したAIボンディングワイヤNL1は、優れた接合性(広いプロセスウィンドウ(接合可能な操業条件範囲))と耐食性を特徴としたパワー半導体とバッテリーモジュール用途の両方に適した汎用型のワイヤである。本報告では、NL1のプロセスウィンドウと耐食性にフォーカスして製品紹介を行う。

2. プロセスウィンドウの評価

2.1 評価方法

プロセスウィンドウの評価は、独立した第3者機関(独

Bond-IQ GmbH)と共同で行った¹²⁾。評価には、ワイヤ径300 μm のNL1の他に、比較材としてNL1と同等の機械特性を持つ3種類のAIワイヤを使用した。表1に各ワイヤのBL(Breaking load/破断強度)とEL(Elongation/伸び率)の値を示す。なお、3種類の比較ワイヤはボンディングワイヤとして市場で一般的に使用されているものである。ワイヤボンダーはF&S Bondtec社製のBondtec 5850を使用し、基板はコーティング等の無い無垢のCu板(OF Cu:純度>99.96%,厚み0.8mm)を使用した。Cuはバッテリーモジュールではバスバーとして³⁾、パワー半導体では基板側の素材^{13,14)}として一般的に使用されている。Cu板は基板毎の表面性状のばらつきを抑えるため、ワイヤボンディング前に酸洗処理を行い、表面汚れ及び酸化膜を除去してから使用した。図3にワイヤボンディングを行ったCu基板の写真を示す。

プロセスウィンドウの評価には、ボックス-ベンケン計画(Box Behnken Design of DoE)を採用した。荷重(Force)・超音波パワー(US power)・接合時間(Bond time)の3つの主要パラメータのマトリックスでボンディングを行い、条件毎に接合部の潰れ幅(図4)とシエラ強度の測定を行った。シエラ試験はボンドテスター(Bondtec 5600)を用いて、シエラ高さ約30 μm (ワイヤ径の10%)、シエラ速度300 $\mu\text{m}/\text{s}$ の条件(図5)で2ndボンドのみを使って行った。取得した潰れ幅とシエラ強度のデータを基に、専用のソフトウェア(Minitab)を用いて各ワイヤのプロセスウィンドウの測定を行った。

表1 評価ワイヤの破断強度と伸び率
Breaking load (BL) and elongation (EL) of tested wire

Wire	NL1	Wire A	Wire B	Wire C
BL (cN)	355.6	361.3	326.3	372.0
EL (%)	21.8	18.3	18.5	24.0

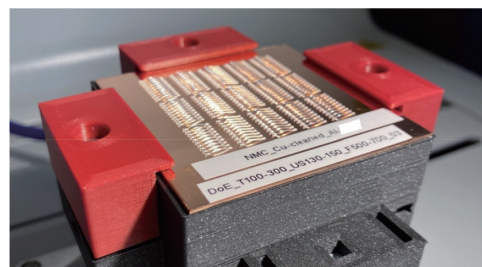


図3 ワイヤボンディング後のCu板
Cu plate after wire bonding

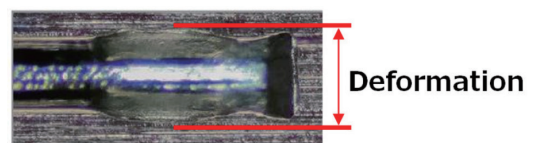


図4 ウェッジ接合部の潰れ幅
Deformation width of wedge bond

2.2 プロセスウィンドウの定義

AI ワイヤの接合性は、ドイツ溶接協会が定めた DVS-2811 に基づいて評価を行った¹⁵⁾。同基準では、ワイヤ径 300 μm のシヤ強度は、平均値 >950 cN (センチニュートン)、最低値 >750cN、潰れ幅は、ワイヤ径の 1.6 倍未満が推奨と定められている。これに対して、本試験では、各ワイヤの潜在的な能力の差異を明確にするために、シヤ強度の平均値は >1250cN、最低値は >1000cN とより高い値を基準値に設定した。また、潰れ幅については、過度な潰し過ぎは接合部のヒール部の強度低下に繋がるリスクがあること、短時間接合 (潰れ幅小) が生産性に優位であるこ

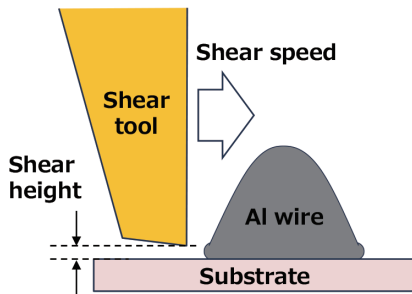


図5 ワイヤ接合部のシヤ試験条件
シヤ速度 = 300 $\mu\text{m}/\text{s}$, シヤ高さ $\approx 30 \mu\text{m}$ (ワイヤ径の 10%)

Shear test condition
Shear speed = 300 $\mu\text{m}/\text{s}$. Shear height $\approx 30 \mu\text{m}$ (10% of wire diameter).

とを考慮して、ワイヤ径の 1.3 倍未満と DVS-2811 より小さい値を基準に採用した。本評価ではこれらのより厳しい基準の下でワイヤ間のプロセスウィンドウの比較を行った。

2.3 結果

図6 に各ワイヤのプロセスウィンドウの評価結果を示す。ここでは荷重を 700cN に固定した時の結果を一例として表示している。グラフの横軸は接合時間 (ms)、縦軸は超音波パワー (単位無し) であり、グラフ中の赤の実線はシヤ強度 >1250cN の境界を示しており、赤線より右側の領域ではシヤ強度は 1250cN より高くなる。また、青の点線は、潰れ幅 < ワイヤ径 $\times 1.3$ の境界を示しており、青線より左側の領域では潰れ幅はワイヤ径の 1.3 倍より小さくなる。即ち、グラフ中の白色のエリアが本試験で定義するシヤ強度 >1250cN、潰れ幅 < 線径 $\times 1.3$ の両方を満たすプロセスウィンドウとなる。なお、シヤ強度の最低値に設定した 1000cN のラインは当グラフの範囲外になる。4 種類のワイヤのプロセスウィンドウを比較すると、NL1 が最も広いウィンドウを有していることが分かる。ワイヤ C は NL1 に比べるとやや劣位ではあるものの、比較的広いウィンドウを有している。ワイヤ A とワイヤ B は他の 2 種類のワイヤと比較すると、ウィンドウが大幅に狭くなっていることが分かる。この結果は、NL1 は他のワイヤに比べて、より弱い接合条件または短い接合時間で高い接合強度を実現できることを示唆しており、生産性向上への寄与以外に、接合対象

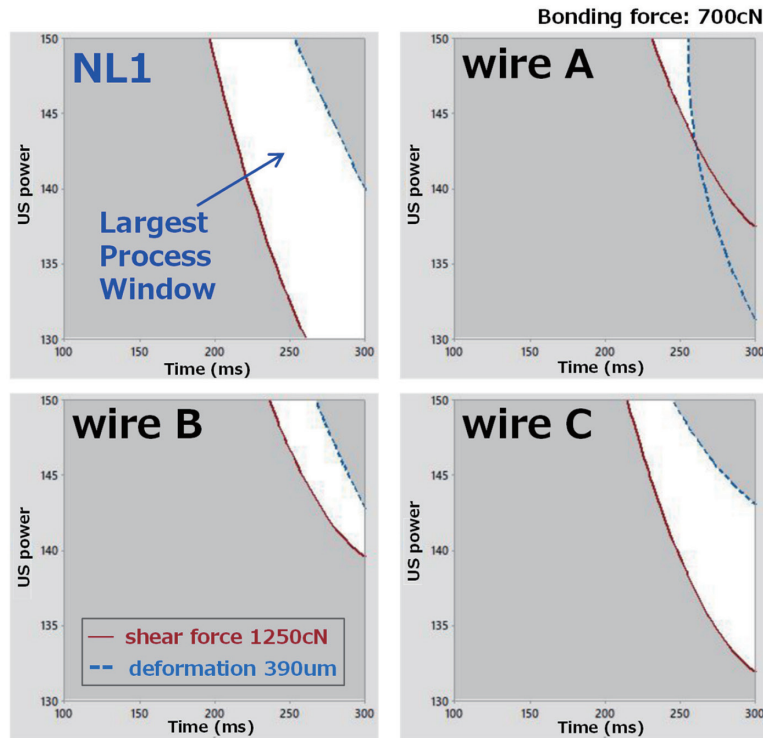


図6 各ワイヤのプロセスウィンドウ (白色部)
赤の実線：シヤ強度 = 1250 cN 青の点線：潰れ幅 = 線径 $\times 1.3$
Process window (white area) for each wire
Red line: shear force = 1250 cN. Dashed blue line: deformation = 1.3 \times wire diameter.

物へのダメージが懸念される環境(脆弱な半導体素子構造等)でもその優位性を発揮することが期待される。

3. 耐食性試験

3.1 評価方法

NL1の耐食性は、プレッシャクッカー試験(PCT)で評価を行った。評価には、プロセスウィンドウ試験と同様、線径 $300\mu\text{m}$ のNL1を使用した。比較材には、パワー半導体で一般的に使用されている純Alワイヤ(純度 $\geq 99.99\%$)を用いた。ワイヤを 121°C 、相対湿度100%の環境に20, 100, 1000h暴露した後に、各時間後のワイヤサンプルをアルゴンイオンビームで断面加工(JEOL製クロスセクションポリッシャ)し、ワイヤ断面をSEM(JEOL製JSM-7800)で観察して腐食の進展を比較した。

3.2 結果

PCT後のワイヤ断面のSEM像を図7に示す。純Alワイヤでは、20h後で既に結晶粒界に沿って表面から数 $10\mu\text{m}$ の深さまで腐食が進展している様子が確認された。100h後では、腐食は著しく進みワイヤは原形を留めないほどに変形している様子が確認されたため、1000h後の試料の観察は中止とした。一方で、NL1の断面観察結果は、純Alワイヤと大きく異なっていた。20h, 100h, さらには1000hまで試験を延長した試料でも、NL1には顕著な腐食の内部進展は確認されず、結晶組織にも目立った変化は無く、純Alワイヤに比べて耐食性が大幅に改善していることが実証された。

4. 結 言

本報告では、パワー半導体とバッテリーモジュールの両方の用途に適したAlボンディングワイヤNL1の紹介を行った。NL1は広いプロセスウィンドウと高い耐食性を特徴と

した汎用型のボンディングワイヤである。NL1は、その優れた接合性により生産性向上に寄与すると共に、高い耐食性でデバイスの長寿命化にも貢献することができ、今後も幅広い分野での採用が期待される。

日鉄マイクロメタルでは、NL1の他にも、パワー半導体市場の新たなニーズに対応した新材料を次々と開発中である。SiCデバイス向けの熱疲労耐性に優れた高信頼性Al合金ワイヤLX1, Alワイヤの代替として需要が高まってきているパワー半導体用軟質CuワイヤBXIV, ワイヤに比べて電流容量の大幅増加が可能なCuボンディングリボン等、日鉄マイクロメタルは新材料開発を通して次世代半導体のイノベーションに引き続き貢献していく。

参照文献

- 1) Prismark Partners: private report (2022)
- 2) SEMI, et al.: Global Semiconductor Packaging Materials Outlook (2023)
- 3) Zwicker, M.F.R. et al.: Journal of Advanced Joining Processes. 1, 100017 (2020)
- 4) Bielszczuk, K. et al.: Coatings. 14, 445 (2024)
- 5) Bielszczuk, K. et al.: Journal of Advanced Joining Processes. (9), 100197 (2024)
- 6) Unger, A. et al.: International Symposium on Microelectronics. 1, 217 (2020)
- 7) Ank, M. et al.: eTransportation. 18, 100284 (2023)
- 8) Das, A. et al.: World Electric Vehicle Journal. 9, 22 (2018)
- 9) Hunstig, M. et al.: Proceeding CIPS (2020)
- 10) McKeown, M. et al.: Charged electric vehicle magazine. July (2020)
- 11) Klaerner, P. et al.: Charged electric vehicle magazine. December (2021)
- 12) Schmitz, S. et al.: International Symposium on Microelectronics. 1,

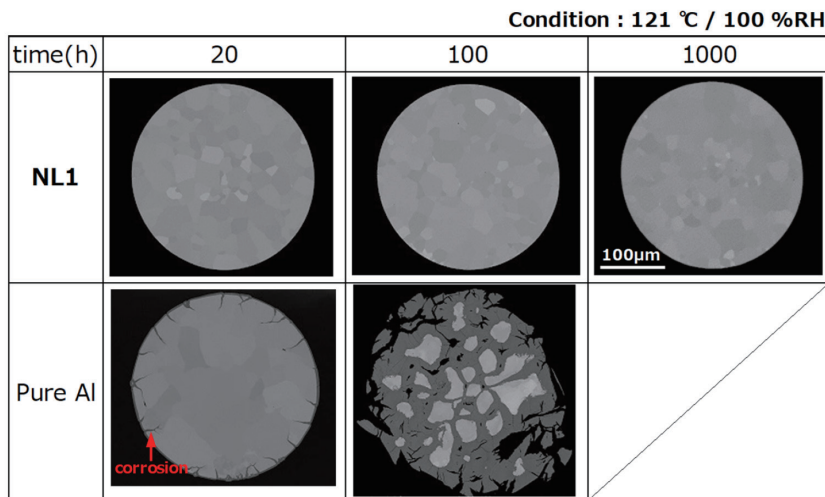


図7 プレッシャクッカー試験後のワイヤ断面SEM像
SEM images of wire cross-section after pressure cooker test

332 (2021)

13) Luo, D. et al.: Electronics. 10, 194 (2021)

14) Pahinkar, D.G. et al.: Advanced Engineering Materials. 20,
1800039 (2018)

15) DVS 2811 Test Procedures for Wire Bonded Joints (2017)



荒木典俊 Noritoshi ARAKI
日鉄マイクロメタル(株)
技術開発部 次長
埼玉県入間市狭山ヶ原158-1 〒358-0032



須藤裕弥 Yuya SUTO
日本製鉄(株)
先端技術研究所 主任研究員



小田大造 Daizo ODA
日鉄マイクロメタル(株)
技術開発部 部長



山田 隆 Takashi YAMADA
日鉄マイクロメタル(株)
代表取締役社長 博士(工学)