

パワー半導体用アルミニウム製冷却器のろう付技術

昭和電工株式会社
融合製品開発研究所 小山グループ 南 和彦

1. はじめに

近年、省エネルギーや地球環境保護の観点より、パワーモジュールへの関心が高まっており、市場の拡大が見込まれている¹⁾。パワーモジュールが用いられるハイブリッド車のような、燃費が良く環境にやさしいクルマにおいては、ガソリン車に加えて、モータやパワーコントロールユニット、電池などのユニットが追加で搭載されており、重量が重くなることから軽量化のニーズが挙げられている。パワーモジュールの高性能化により、従来品と比較して、軽量化、小型化が可能となることも報告されている²⁾。さらに、SiCなどの次世代半導体チップでは、従来のSiチップよりも高温作動が可能となり、小型化、高発熱密度化が進んでいる。作動温度が高まることによる熱応力を低減するために、チップやセラミックスの線膨張係数に合わせた低線膨張な材料^{3,4)}、そして高性能化に対応して、放熱性に優れた冷却器が求められている⁵⁾。

冷却器としてはDAB (Direct Aluminum Bonding) やDCB (Direct Copper Bonding) など、セラミックスにアルミや銅などの金属を接合した絶縁基板が使用されている。DABを使用したアルミニウム製冷却器では、セラミック絶縁基板、緩衝層、アルミニウム水冷ヒートシンクを一括で真空ろう付することで、金属接合による熱抵抗の低減を達成できる。アルミニウムの真空ろう付では600℃というアルミニウムにとって過酷な温度で炉中接合されるために、材料設計⁶⁾、接合継手設計⁷⁾、温度管理など多くの課題があり、我々はこれらを克服し、パワーモジュールの高性能化、小型化、軽量化に貢献してきた。

本稿ではアルミニウム製冷却器の紹介とその製造プロセスである真空ろう付技術及び冷却器を構成するアルミニウム材料について説明する。

2. 冷却器の概要

図1に冷却器の外観図を、図2に冷却器の断面構造を示す。本冷却器は、薄型軽量で、内部に冷却水を循環させる水冷ヒートシンクが本体であり、セラミック絶縁基板のある上面で走行インバータのパワー半導体素子を直接冷却する。上面には、アルミニウムとセラミックスの複合体である絶縁基板が、緩衝材を介しろう付によって直接ヒートシンクに接合されている。このセラミック絶縁基板はセラミックスの板の両面に、アルミニウム板を

接合し貼付けたものである。ろう付によって一体化された絶縁基板のアルミニウム配線層上には、パワー半導体素子をはんだ付される。パワー半導体素子で発熱した熱は、ろう付で一体化した各部材を通して冷却水に放散される。開発した冷却器では熱伝導経路がシンプルとなり、熱抵抗が小さい構造となった。半導体素子を取付ける基板内部に冷却水を流すことができるので、本冷却器はパワー半導体素子を直接冷却する機能を持った絶縁回路基板であるといえる。冷却器の組み立ては、一番上にセラミック絶縁基板その下に応力を緩和するための緩衝材、さらにヒートシンクを形成するコアプレートとフィンなどからなる。これらすべてを治具に組付けて真空炉で一括ろう付する。

3. アルミニウムの真空ろう付について

アルミニウムのろう付では、一般的にブレイジングシートと呼ばれるクラッド材を用いて母材と接合する。ブレイジングシートは心材となるアルミニウム合金の片面または両面にろう材を皮材として、張合わせたクラッド材のことである。

ろう材に要求される特性としては、①心材(母材)よりも融点が高いこと、②濡れ性と流動性が良好であること、などが挙げられる。これらを満たすろう材にはAl-Si系合金があり、通常Si添加量は7~12%である。

ろう付法は、フラックスろう付法と真空ろう付法に分類され、本製品である冷却器は真空ろう付法により製造されている。真空ろう付では一般的に真空度は $10^{-3} \sim 10^{-5}$ Pa、ろう付温度は585~620℃の範囲である。真空ろう付用ろう材には、酸化膜の破壊や真空度を維持するために通常ろう材中に0.5~2%のMgが添加されている^{8,9)}。

アルミニウムは強固な酸化膜に表面が覆われているた

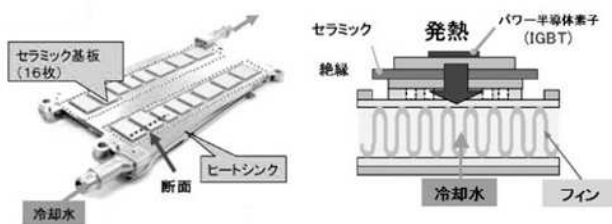


図1 アルミニウム製冷却器

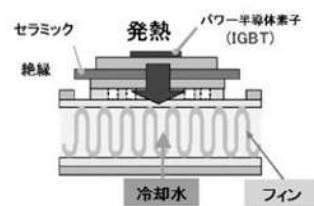


図2 冷却器の断面模式図

め、ろう付時に酸化膜の破壊と再酸化を防止しながら、アルミニウム同士がろう材により濡れる必要がある。真空ろう付では、ろう付の昇温時において、アルミニウム合金と酸化膜の線膨張係数差により、酸化膜にクラックが発生する。このクラックからMgが蒸発し、酸化膜の破壊が助長される(図3a)。その後、熔融ろうが破壊された酸化膜の間を濡れ始め、アルミニウム同士が接合される。その接合の間、Mgは蒸発し続け、蒸発したMgが雰囲気中の酸素と反応することで、ろう付部近傍の真空度、清浄度を維持する。以上のような過程を経て、ろう付が完了する(図3b)。このため、ろう付用アルミニウム材料にとって、合金組成、ろう材厚さ、酸化膜などは接合性に影響する因子であると考えられる。

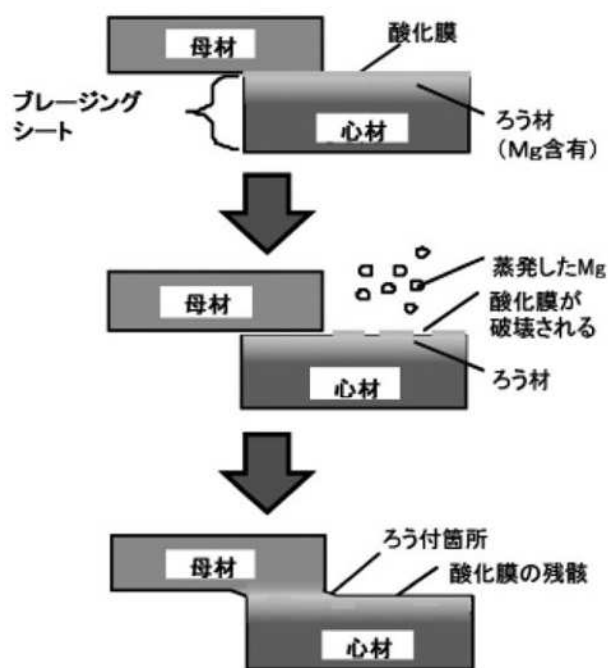


図3 真空ろう付プロセス説明図

4. 技術課題とアルミニウムろう付材料

パワー半導体用アルミニウム製冷却器では、パワー半導体、セラミック絶縁基板、冷却器が面で接合されており、その熱抵抗は金属接合されることで向上している。このため、セラミック絶縁基板と冷却器の面接合は高い面接合精度(面接合率)が求められている。

以上のことから、パワー半導体を冷却する冷却器では、点や線の接合で構成されていた従来の熱交換器(カーエアコン用エバポレータなど)と比較して、高精度に面で接合する技術が必要であり、その一部をろう付用材料の観点から紹介する。

4.1. 供試材と実験方法

供試材のプレージングシートはAl-Mn系心材にAl-Si-Mg系ろう材をクラッドしたクラッド材を用いた。相手側

の材料である母材はAl-Mn系合金を用いた。

ろう付状態は図4のように、プレージングシートと母材を重ね合わせて真空ろう付することで、面ろう付試験を行った。面接合時には圧力を加えて接合している。真空ろう付条件は真空度 10^{-3} Pa以下で $600^{\circ}\text{C} \times 10\text{min}$ で行った。

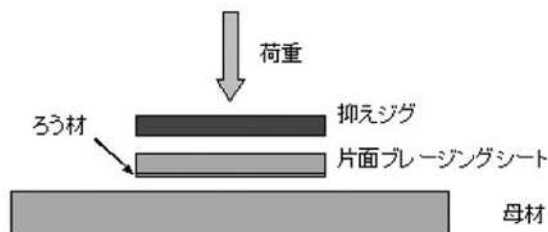


図4 接合試験片

4.2. 加圧力とろう材厚さの影響

図5に加圧力とろう材厚さの違いによる面接合率の関係を示す。加圧力の面接合率に対する影響は、ろう材厚さが薄い領域では、ろうの流動が少ない事と面状での毛細管力が強いことで顕著な差が見られるが、ろう材厚さが厚い領域ではろうの流動が起こりやすく、ほとんど加圧力は影響しない。

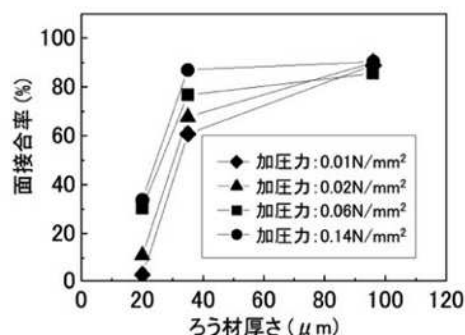


図5 加圧力とろう材厚さの違いによる面接合率の関係

4.3. 母材中のFe量の影響

アルミニウム合金にはFeが不純物として存在しており、そのアルミニウム合金(母材)中のFe量と面接合率の関係を図6に示す。母材中にFeを1%添加すると面接合が悪くなる結果であった。母材中のFe量が増加したことで、ろう材が母材表面を濡れ広がる際に、母材中のAl-Fe系化合物を浸食しながら、濡れ広がるものと考えられた。図7a、図7bにFeを0.2%添加した母材とFeを1.0%添加した母材のろう付フィレット部の断面を示す。断面組織から1.0%添加した母材ではフィレット部に共晶組織が見られず(母材表面へ流れた)、0.2%添加した母材ではフィレット部に共晶組織が確認できる(ろう材は十分に存在している)。以上より、Feを1.0%添加した母材ではろう材の濡れ広がりにより、共晶ろうが母材表面に流れ出し、面接合すべき部分のろう材量が低下したために欠陥が発生しや

すくなったものと考える。

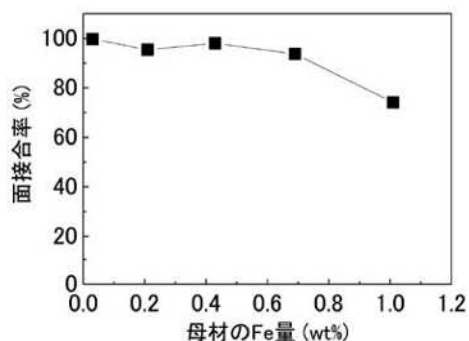


図6 母材中のFe量と面接合率の関係

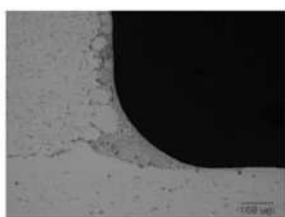


図7a 0.2%Feのフィレット断面

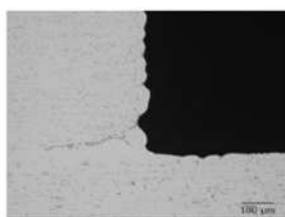


図7b 1.0%Feのフィレット断面

5. まとめ

アルミニウムは軽量で熱伝導性が良いことから、自動車等の熱交換器用材料として幅広く用いられている。今回はパワー半導体という熱源を冷却する冷却器において製造プロセスであるろう付技術について紹介した。今後、更なるパワーモジュールの出力密度増加、信頼性向上に

対応していくために、軽量で高性能、高信頼性のアルミニウム製冷却器は必要であり、そのためには冷却器の構造設計だけでなく、製造プロセスを考慮したアルミニウム材料を含めて進化していくものと考える。

参考文献

- 1) “Technology and Market Trend of Power Modules and main components 2017”, Japan Marketing Survey, (2017)
- 2) 森, 藤, 柳本, 古川: 軽金属 古川: 軽金属, 第61巻, 第3号, 119, (2011)
- 3) K. Minami, I. Ota, S. Wakabayashi and K. Hirose, PCIM Europe 2018 June, 1388, (2018)
- 4) K. Hirose, I. Ota, S. Wakabayashi and K. Minami, PCIM Europe 2019 May, 972, (2019)
- 5) “Package Technology Trend of Power Modules”, Journal of Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.16, 341, (2013)
- 6) 南: MATERIAL STAGE, vol.14, p40, (2015)
- 7) K. Minami, Y. Furukawa, “WBG Power Device with Advanced interconnects for Green Technology”, 84, (2015)
- 8) 納: 軽金属, 第48巻, 第9号, 439, (1998)
- 9) 難波, 杉山: 住友軽金属技報, vol.26, No.3, 145, (1985)

(材料物性 平成11年卒)