

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「表面改質型焼結技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年3月

委託者 中国経済産業局

委託先 財団法人ひろしま産業振興機構

目次

第1章	研究開発の概要	
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	P2
1-1-1	研究開発の背景・研究目的	P2
1-1-2	研究目標	P2
1-2	研究体制	P5
1-3	成果概要	P6
1-4	当該プロジェクト連絡窓口	P6
第2章	複合材料放熱基板の焼結技術の開発	P7
2-1	表面改質による高密度焼結技術の開発	P7
2-2	最適焼結複合材の選定および焼結技術の開発	P10
2-2-1	グラファイト-Cu系複合材	P10
2-2-2	ダイヤモンド-Cu系複合材	P11
2-3	第2章 まとめ	P13
第3章	銅板ヒートシンクの拡散接合技術の開発	P13
3-1	プラズマ処理による接合温度の低温化	P13
3-2	拡散接合ヒートシンクの熱抵抗	P15
3-3	第3章 まとめ	P16
第4章	絶縁基板・放熱基板・ヒートシンクの一体成形技術の開発	P16
4-1	一体成形の効果	P16
4-2	絶縁基板と放熱基板の一体成形技術の開発	P17
4-3	一体成形品の試作	P18
4-4	一体成形品の熱サイクル試験	P19
4-5	一体成形ヒートスプレッダーの熱抵抗	P19
4-6	第4章 まとめ	P19
第5章	連続式表面改質型多軸通電焼結装置の開発	P20
5-1	完成した装置写真	P21
5-2	焼結制御ソフト	P21
5-3	試作焼結装置の昇温実験	P21
5-4	第5章 まとめ	P22
6	最後に	P22

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景・研究目的

自動車業界や電気業界では、エレクトロニクス部品の実装密度の増加やパワーデバイスの増加・高出力化にともない、発熱量の増加対策が課題となってきた。

大気中への熱の放散を助けるために使用する放熱部品は、今まで、アルミやアルミ系複合材が多く使用されているが、こうしたアルミ系材料では熱伝導に限界があること、あるいは熱膨張を抑制するための複合材化についても製法上、使用できる添加粒子が制限される。

そこで、材料選択の自由度が高く、板材から粉末材まで取り扱え、かつ複合材化のための添加粒子成分を問わない製法としての通電焼結法を活かして、高熱伝導率・高熱伝達率を可能とする焼結材料・焼結技術を開発し、放熱部品へ応用する。

また、従来バッチ式であった多軸型の通電焼結装置(図1-1-①)の、連続化を実現し、コスト低減と生産性向上を図る。

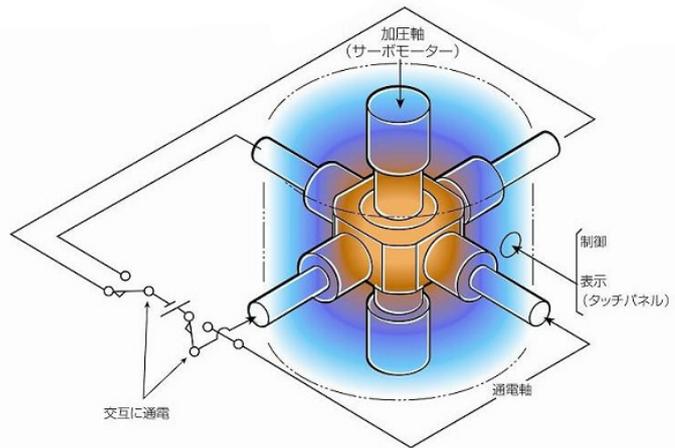


図1-1-① 多軸通電焼結方式

1-1-2 研究目標

1-1-2-1 複合材放熱基板の焼結技術の開発

※開発目標 熱伝導率：280W/m・K以上 熱膨張係数：11ppm/°C以下

放熱基板は図1-1-②に示すように平板状であるため、図1-1-③に示すように、特殊形状の型など必要とせず、通電焼結向きである。したがって、目標とする熱伝導率の向上および熱膨張の抑制とを両立させるには、熱伝導率の良い銅粉と高熱伝導・低熱膨張性の添加粒子とを、いかに高密度に焼結しその本来の性能を引き出すかがポイントとなる。

そこで、焼結密度向上に向けた粉末粒子球状化技術や粉末の湿式充填法の開発、さらには最適複合材を見出すことを研究・開発の中心とする。



図1-1-② 放熱基板例

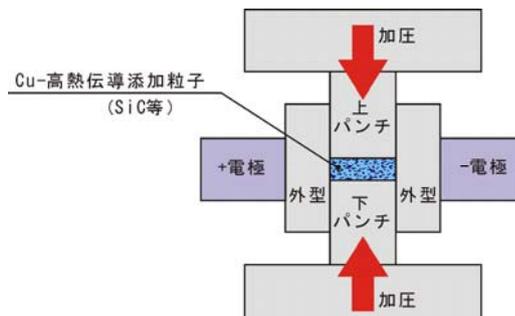


図1-1-③ 多軸通電焼結による放熱基板の製作

1-1-2-2 銅板ヒートシンクの拡散接合技術

※開発目標 アルミダイカスト製比：熱抵抗50%低減 拡散接合温度：600°C以下

現状のヒートシンクは図 1-1-④に示すように、アルミダイカスト製で複数のフィンが配置された立体形状となっているものが多い。こうしたヒートシンクを銅板の拡散接合に代替すべく試作した例が図 1-1-⑤に示すものである。この試作ヒートシンクは、外観上も接合強度もほぼ満足できるが、ハンドリング時に力を加えると変形を起しやすい。

この現象は、拡散接合時の銅板の軟化に起因するもので、これを防ぐために、低温での拡散接合を可能とする銅板表面の改質技術の開発を行う。また、アルミダイカスト製に対し、銅板製でサイズが小さくても、熱抵抗が50%以下を実現できることも検証する。



図 1-1-④ アルミ製ヒートシンク



図 1-1-⑤ 拡散接合銅板ヒートシンク

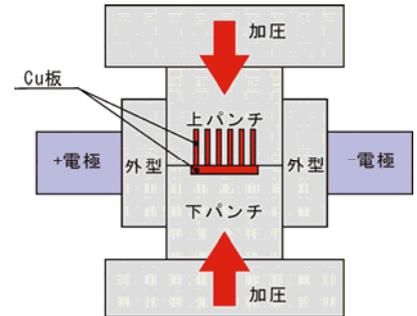


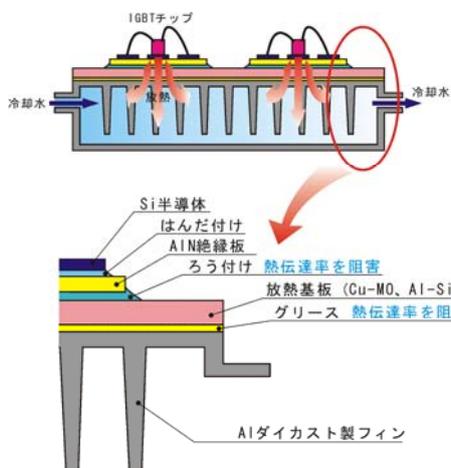
図 1-1-⑥ 多軸通電焼結によるヒートシンクの製作

1-1-2-3 絶縁基板・放熱基板・ヒートシンクの一体成形技術

※開発目標 絶縁基板・放熱基板・ヒートシンクの一体化品の熱抵抗：0.2K/W 以下

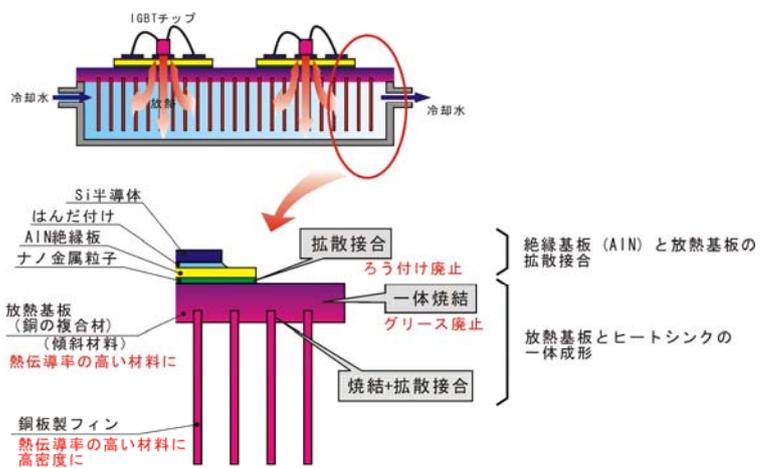
IGBT を狙いとし、熱膨張率の異なる材料（金属とセラミック）や形状の異なる材料（板と粉末あるいは繊維）を複数組み合わせ、三次元形状の積層体を通電焼結法で実現する。

現行の IGBT は図 1-1-⑦に示すように、AlN（窒化アルミ）製絶縁基板をろう付けにて放熱基板に接合し、それを、アルミダイカスト製のヒートシンクにグリースを介して取り付ける構造となっている



現行品の熱抵抗：0.45K/W

図 1-1-⑦ 現行の IGBT 断面



熱抵抗目標：0.2K/W 以下（≒現行比50%以下）

図 1-1-⑧ 開発構想の IGBT 断面

る。この構造は、ろう材やグリースがあるため、熱伝導や熱伝達が阻害される要因となっている。この状態で熱抵抗は、0.45K/Wとされている。

そこで通電焼結法を用いる本プロセスでは、図 1-1-⑧に示すように、グリースやろう材を廃止し、絶縁基板、放熱基板、放熱フィンを一体的に焼結・拡散接合する一体成形技術を開発し、熱抵抗が0.2K/W以下（現行比50%以下）のIGBTを実現する。

この一体成形はかなりの困難が予想されるため、20年度は、図 1-1-⑧中に記載した二つの要素技術「絶縁基板（AlN）と放熱基板の拡散接合」、「放熱基板とヒートシンクの一体成形」の開発を行ない、21年度に全体の一体成形技術の開発を実施する。

特に絶縁基板（AlN）と放熱基板の拡散接合に関しては、焼結助剤としてナノ金属粒子、水素化チタンなどの先進材料を応用し、接合技術のブレークスルーを図る。

1-1-2-4 連続式表面改質型多軸通電焼結装置

※ 開発目標 生産速度：6分/1個（バッチ式比10倍） 材料特性：バッチ式

従来のバッチ式焼結炉から連続式へと改善することで、生産性の向上を図るとともに、コストダウンも実現する。しかもIGBTの生産が検証できるように焼結炉の大型化（200×200mm）も図る。

当然のことではあるが、連続式通電焼結で製造された一体化品の材料特性（密度、引張り強さ等）は、バッチ式通電焼結品の特性が再現できるものとする。

基本的な考え方としては図 1-1-⑨に示すように、必要機能・工程をセル単位に分解、それぞれをユニット化し、それらをつなぎ合わせた構造とする。こうして顧客の要望に応じて、機能の付加や省略ができるようにする。

また、通常の製造工程へのインライン化を実現できるようにコンパクトな構造とすること、生産性の低下を防ぐために信頼性、メンテナンス性、操作性を向上させることを念頭に開発する。

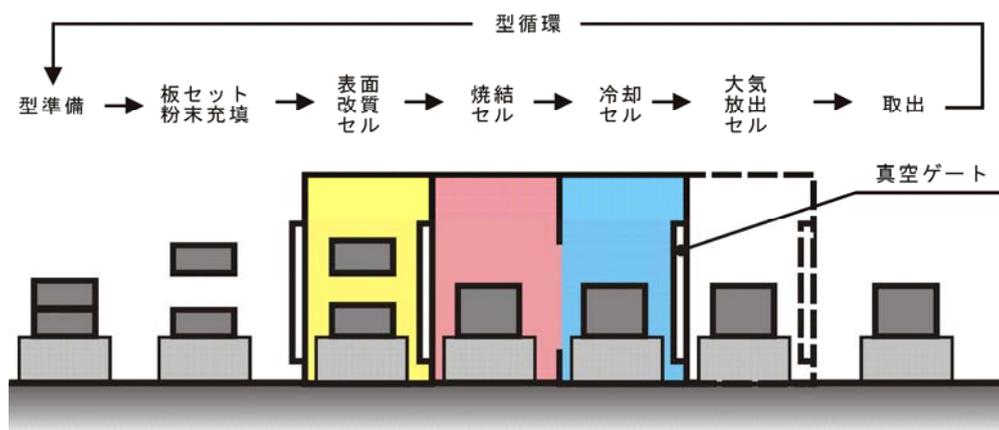
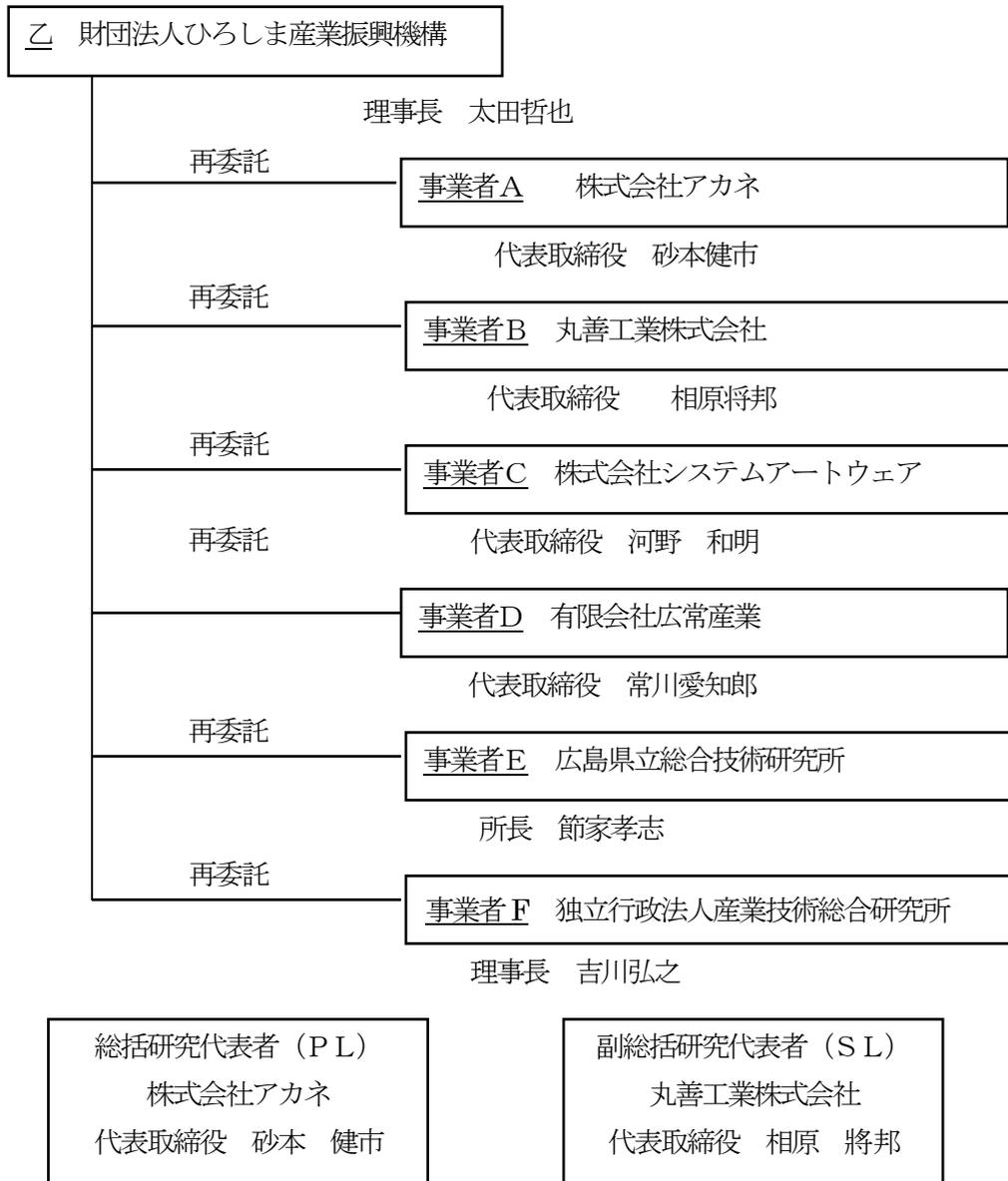


図 1-1-⑨ 連続式多軸通電焼結装置

1-2 研究体制



アドバイザー

マツダ株式会社 車両開発部 電子開発部部長 武田克巳
 株式会社 住商アビーム 自動車総合研究所 春口欣三
 広島大学大学院 工学研究科 教授 佐々木元

1-3 成果概要

1-3-1 複合材放熱基板の焼結技術の開発

Gr (黒鉛)-Cu 系複合材とダイヤモンド-Cu 系複合材の 2 種類で、目標とした熱伝導率 $280\text{W/m}\cdot\text{K}$ 以上、且つ熱膨張係数 11ppm 以下の材料を製作できた。

1-3-2 銅板ヒートシンクの拡散接合技術

Ar プラズマによる表面活性化を行った Cu 板の拡散接合の結果、図 1-3-①に示すように、接合部の剥離強度は大きく向上した。この結果から、今まで設定してきた拡散接合温度 800°C を 200°C 程度下げることが可能となった。

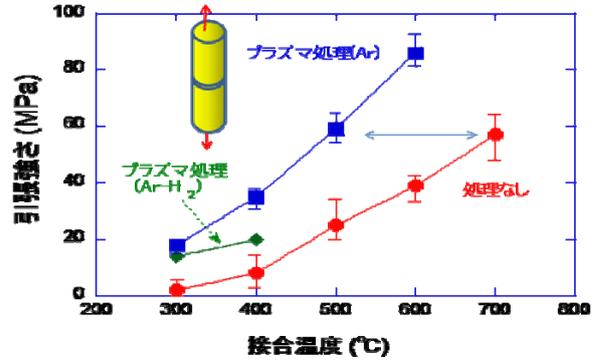


図 1-3-① プラズマ活性化による接合温度の低下

1-3-3 絶縁基板・放熱基板・ヒートシンクの一体成形技術

図 1-3-②に見られるように、AlN 絶縁基板・Cu 放熱基板・Cu フィンの一体成形は、基本技術の技術確立ができた。

開発したインサート材を中間材として利用することで、AlN 絶縁基板と Cu 放熱基板とをうまく接合できるようになった。この一体成形品は、アルミダイカスト製の非一体型に比べて、熱抵抗が半分程度になることも確認した。

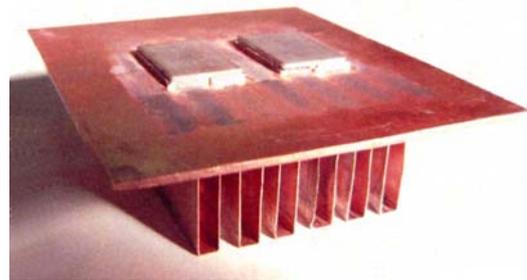


図 1-3-② フィンと放熱基板、絶縁基板の一体成形品

1-3-4 連続式表面改質型多軸通電焼結装置

連続式表面改質型多軸通電焼結装置は、図 1-3-③に示すものが完成した。生産性は当初の期待通り、バッチ式の 10 倍 (6 分/1 サイクル) を実現し、目標を達成した。



図 1-3-③ 連続式多軸通電焼結装置

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

財団法人 ひろしま産業振興機構 (担当 ; 山縣一郎・池田修)

TEL. 082-240-7712 FAX. 082-504-7317

第2章 複合材料放熱基板の焼結技術の開発

2-1 表面改質による高密度焼結技術の開発

SiC-Cu系複合材に添加するSiC粒子の表面をプラズマ処理することで、球状化を図り焼結密度を向上させる。

目標：SiC-Cu系複合材料の焼結密度99.5%以上を達成する。

2-1-1 SiC粉末の球状化

球状化実験に使用したSiC粉末の例をSEM写真の図2-1-①に示す。

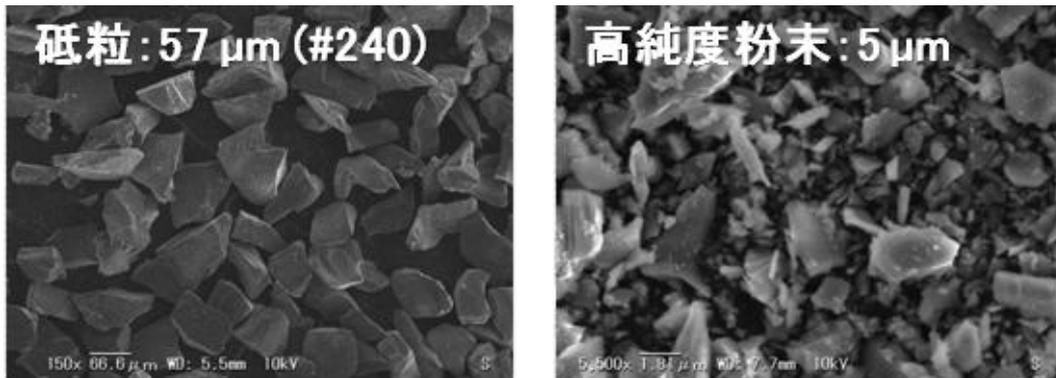


図2-1-① 使用したSiC粉末

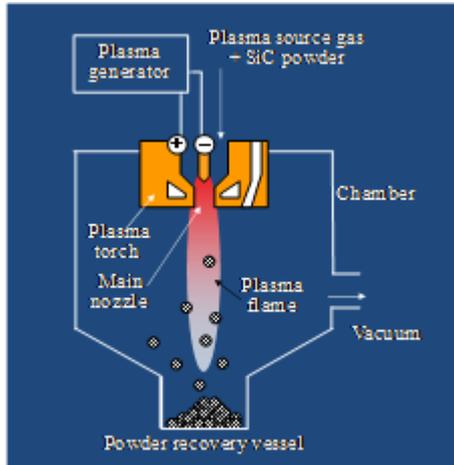


図2-1-② プラズマ処理装置の構造模式図

球状化を行ったプラズマ処理装置の模式図を、図2-1-②に示す。使用した装置の仕様は、最大20KWのAr-He-H₂熱プラズマの発生が可能である。この熱プラズマ炎中にSiC粒子を投入し球状化を行う。

球状化実験では、Ar、Ar-He-H₂ガスを使用し、電流400A~490Aの範囲で行った。

球状化処理後に得られたSiC粒子の例を、図2-1-③、図2-1-④に示すが、砥粒20μ以上のものは、球状化がほとんどできなかった。プラズマ処理装置の能力の限界もあり、大きな砥粒については、これ以上球状化が望めず、中止した。

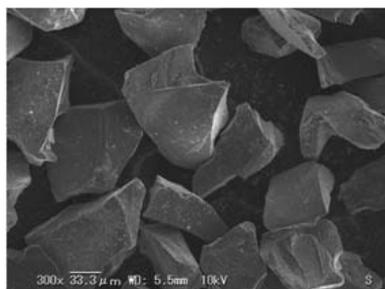


図2-1-③ 球状化処理後のSiC粒子
(57μm: Ar-He-H₂ガス)

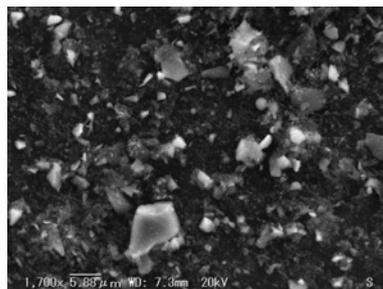
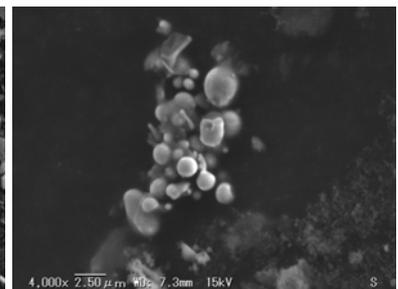


図2-1-④ 490Aで処理した高純度SiC粒子
(5μm: Arガス)



ただ 砥粒 5μ のものについては、球状化粉が得られたので、この粒子を SiC-Cu 系複合材の密度向上実験用として使用した。

2-1-2 球状化 SiC 粉の焼結

砥粒 5μ の球状化粒子を用い、SiC-Cu 系複合材の焼結実験を行った結果を、図 2-1-⑤ に示す。

この図に見られるように、球状化処理した 5μ 粉末と処理しないものとで、焼結密度に差は無かった。しかも他の球状化しない $100\sim 300\mu$ の粒子よりも、低い値を示した。焼結密度は粒子サイズの影響を受けることしかもある程度の大きさがないと向上しないことから、 5μ 粒子を用いての密度向上実験も打ち切った。

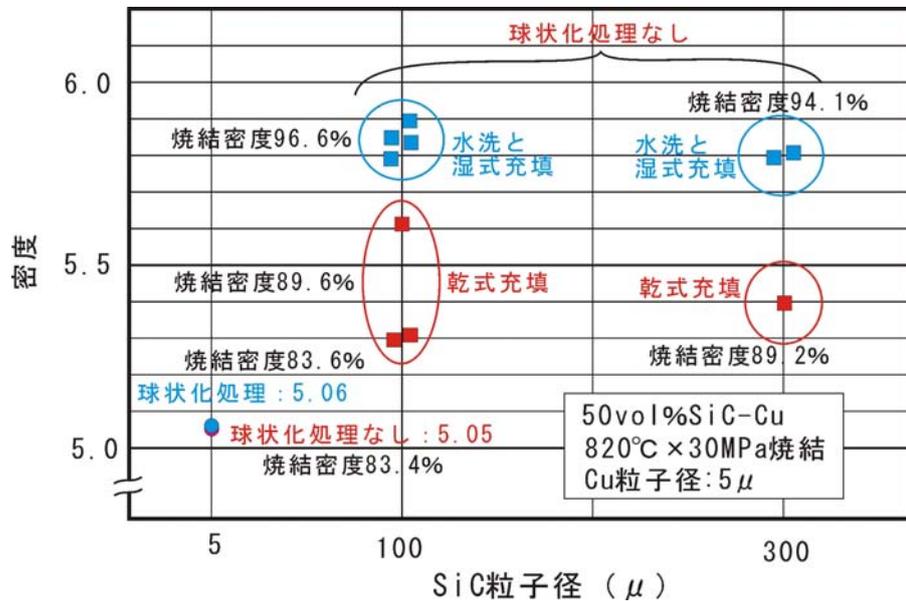


図 2-1-⑤ 球状化粒子と非球状化粒子の焼結密度への影響/湿式充填の効果

球状化粒子の複合実験は中止したが、密度向上のための基本的考え方やその方向を明らかにするため、SiC 粒子の水洗の効果と湿式/乾式充填の焼結密度への影響についての基礎実験を行った。

2-1-3 SiC 粒子を水洗した時の粒度分布への影響

今まで、SiC 粒子を何度も水洗することで粉末中の小さい粒子が取り除かれ、焼結密度があがるとの思いがあり、複合材実験では、水洗過程を必須として織り込んできた。

そこで、今回、水洗の有無による SiC 粒子 (100μ サイズ) の粒度分布の違いを計測した。結果は、水洗前後で SiC の粒度分布の差は無く、水洗により微粉を取り除く効果は全く無いことがわかった。 300μ サイズの SiC 粒子でも結果は同じであった。

2-1-4 湿式充填と乾式充填の焼結密度への影響

湿式充填法と乾式充填法とでは、焼結密度に大きな違いがある。今回はその差を定量的に把握した。また、金属組織の面からも明確にした。

まず、焼結密度に及ぼす充填法の効果を調べた。その結果は、既に図 2-1-⑤ に示しているのもので、もう一度戻って見ていただきたい。この図からわかるように、湿式充填は、乾式充填よりも明らかに焼結密度の向上に効果がある。また、焼結後の密度のバラツキも少ないようである。

この差を金属組織からも調査した結果、次のような傾向が見られた。

- ① 乾式充填の場合は、SiC 粒子が均一に分散しておらず、マトリックス (Cu) 中に SiC が分散していない部分がある (いわゆる偏析がある)。
- ② 乾式充填の場合は、組織中のマトリックス部分 (Cu の部分) に、Cu の充填不良の黒い穴が多く見える。

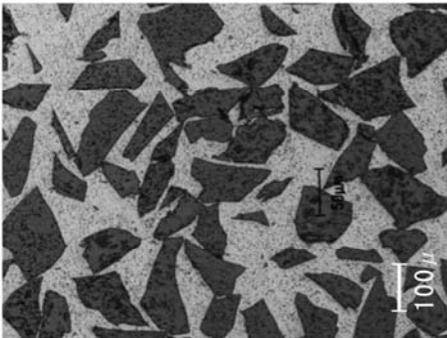
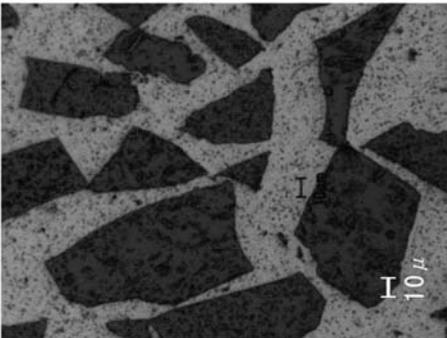
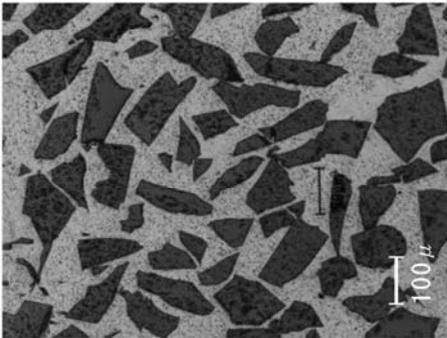
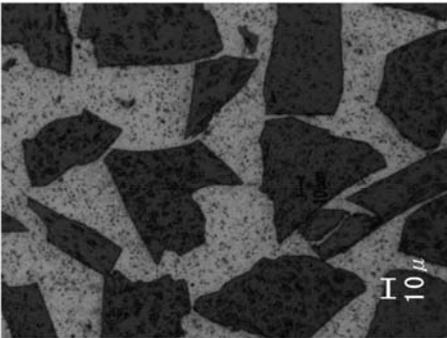
こうしたことが、密度の高低、バラツキに影響しているものと考える。

2-1-5 焼結密度向上品

以上のことを考慮し、大きめの SiC 粒子を湿式充填し、さらに加圧力も高めて SiC-Cu 複合材を試作した。その結果を表 2-1-①に示す。

この表から、Cu-SiC 系複合材のテストピースでの焼結密度は、98.1%まで到達したが、目標の 99.5%には届かなかった。

表 2-1-① 焼結密度向上品の金属組織

	倍率小		倍率大		
金属組織					
	相対密度	98.1% 注: SiC密度=3.17 Cu密度=8.94で計算	熱膨張率	$10.2 \times 10^{-6} / ^\circ K$	熱伝導率
焼結条件	Cu/SiC体積比: 50/50 焼結サイズ: φ25.4mm円板×約4mm厚さ 焼結温度: 900°C 加圧力: 70MPa 使用粉末: Cu (20μ)/市販SiC粉 (120μ)				

ただ、高密度化の真の狙いは、熱伝導率の向上にある。この表中の SiC-Cu 系複合材の熱伝導率はまだ 200W/m·K に留まっており、これ以上密度を向上させても、今の SiC 砥粒 (不純物が多く熱伝導率が低い) を使用する限り、目標の 280W/m·K を達成することは無理と判断し、むしろ、より高熱伝導性の添加粒子の複合化焼結実験 (次の 2-2 項) に注力した。

2-2 最適複合材の選定及び焼結技術の開発

熱伝導性がよく、しかも焼結が容易なセラミック粒子等を見出し、コストや生産性、放熱性能のバランスのとれた焼結複合材を選定する。このテーマに関し、二つの材料（黒鉛とダイヤモンド）を柱に据えて、開発を実施した。

目標：SiC-Cu 系複合材料、あるいは Cu 粉と各種高熱伝導添加粒子の組み合わせにより、熱伝導率 280W/m・K 以上、熱膨張係数 11ppm 以下の材料、焼結条件を見出す。

2-2-1 グラファイト（以下 Gr と省略）-Cu 系複合材

最近、熱伝導性が良い鱗片状の Gr が登場している。この Gr は図 2-2-①に示すように、鱗片状になっており、銅粉と混合した状態で焼結すると加圧方向に対し、直角に並ぶ性質がある。

このようにして得られた Gr-Cu 系複合材の熱伝導率は、図 2-2-②に示すように大きな異方性を示す。つまり、Gr の鱗片の長手方向に熱伝導率が大きく、その直角方向は小さいという性質を持っている。従って、複合材の板の厚み方向に熱伝導の高い板を作ろうと思えば、図に示すように、焼結後に板を切り出す必要がある。

こうしたコストアップ要因や工程が複雑化する要素があるが、複合材製造が容易、材料が安い、熱伝導率が良いといった魅力のある材料である。

実際に、熱伝導率の異方性を計測したデータを表 2-2-①に示す。この表から、鱗片の並び方の

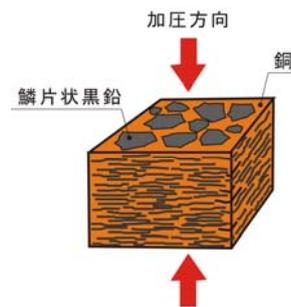


図 2-2-① 鱗片状 Gr と Cu 複合材の模式図

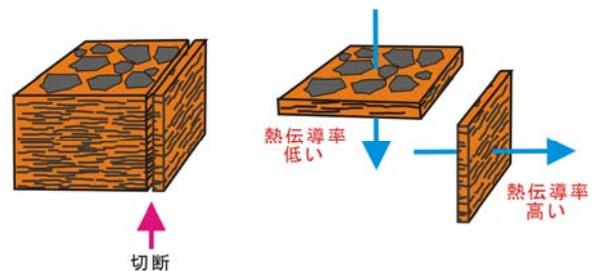


図 2-2-② Gr-Cu 系複合材の異方性

表 2-2-① Gr-Cu 複合材の異方性

	熱伝導率 (W/m・K)	計測方向
40vo 1%Gr+60Cu	178	 この方向で計測
	66.6	 この方向で計測

Gr: 鱗片状黒鉛A
焼結条件: 加圧30MPa
850°C×2min. キープ

表 2-2-② Gr-Cu 複合材に対する圧縮の影響

	熱伝導率 (W/m・K)	計測方向
40vo 1%Gr+60Cu	358	 この方向で計測
	291	14% 圧縮後 この方向で計測

Gr: 鱗片状黒鉛B
焼結条件: 加圧30MPa
920°C×2min. キープ

違いにより熱伝導率に倍以上の差が生じることがわかる。

また、Gr-Cu 複合材を圧縮した場合のデータも、表 2-2-②に示す。この表から、圧縮を加えると熱伝導率が悪化することがわかる。通常の、例えば SiC 粒子-Cu 系複合材などでは、一般的に圧縮により熱伝導率が向上する現象が見られ、この場合の理由として、焼結密度が向上するためと考えられている。しかし、表 2-2-②の Gr-Cu 系複合材では逆効果となっている。この理由としては、鱗片状の黒鉛が圧縮により傾き、角度的に熱伝導性に劣る面が生じてくるためと考えられる。

図 2-2-③に Gr 量を変えた場合の、Gr-Cu 複合材の熱伝導率を、図 2-2-④に熱膨張係数を示す。これらのデータから Gr が 50vol%以上であれば、本サブテーマの目標とする熱伝導率も熱膨張係数も同時達成できることがわかった。

この熱伝導率を見ると、Gr-Cu 系複合材は、放熱基板材としては非常に優れた特性を持っている。

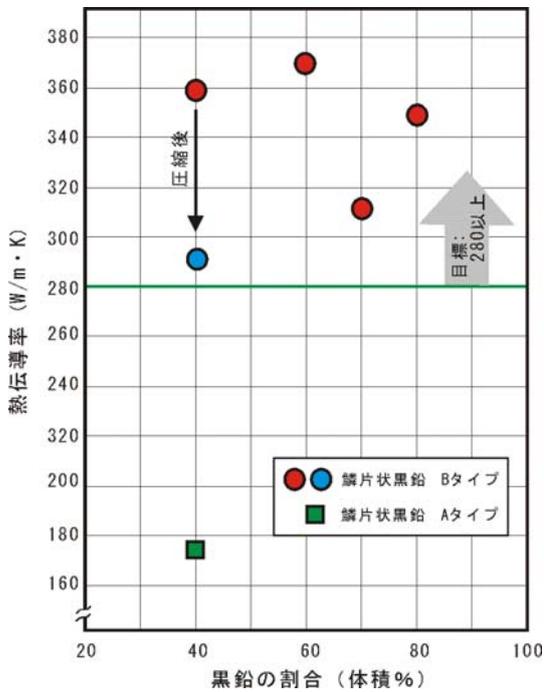


図 2-2-③ Gr-Cu 複合材の熱伝導率

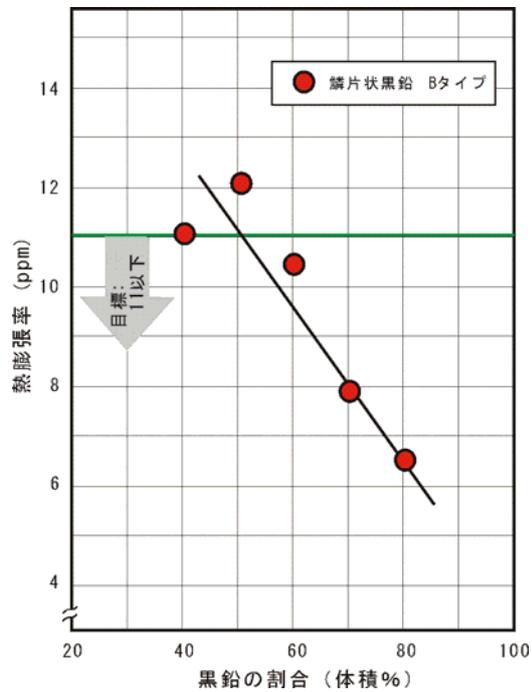


図 2-2-④ Gr-Cu 複合材の熱膨張係数

2-2-2-2 ダイヤモンド-Cu 系複合材

ダイヤモンドは極めて高い熱伝導率を持つ。高純度の単結晶は 2000W/m·K とも言われる。そこで、高熱伝導複合材料開発のターゲットとして、60vol%ダイヤモンド-Cu 系複合材を取り上げた。

Cu 粉は平均粒径 10 μ m のものを、ダイヤモンド粒は #30~#40 (400~500 μ m 相当) の大きさのものを原材料とした。ダイヤモンド粒子は廉価で入手しやすい低純度の研磨用ダイヤモンドである。

(1) ダイヤモンド-Cu 系複合材の焼結

ダイヤモンド粒子と Cu 粉末を 60vol.%ダイヤモンド-Cu になるよう混合し、通電焼結法で固化成形した。焼結温度は 900°C で 2 分保持した。加圧力は 30MPa である。得られた焼結体をアルキメデス法で密度測定するため水中浸漬したところ、気泡がたくさん発生した。この焼結体の表面を図 2-

2-⑤に示す。ダイヤモンド粒子と焼結されたCu粉末の間に隙間が見える。この隙間が気泡発生の原因と思われる。こうした空隙や隙間は熱伝導率の低下を招くため、減らす必要がある。しかし、Cuとダイヤモンドは粒度や密度が違うこと、ダイヤモンド量が多いことから、型に充填したときに型内での偏析が避けられず、単なる混合粉末の充填と通電焼結のプロセスでは解決できない。

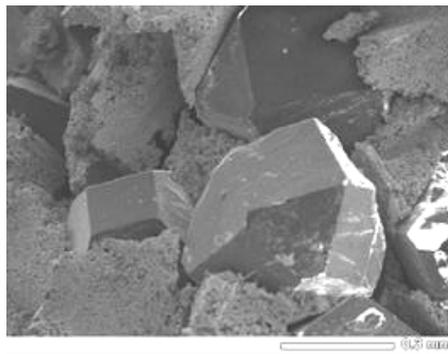


図2-2-⑤ ダイヤモンド-Cu 焼結体の表面状態

(2) ダイヤモンド-Cu 系複合材の溶融成型

複合材料の作製方法に溶融成型法がある。溶融金属は流動性がよく、緻密な複合材を得やすい。そこで、ダイヤモンド-Cu 複合材にも 1100°C加熱の溶融成型法を適用した。

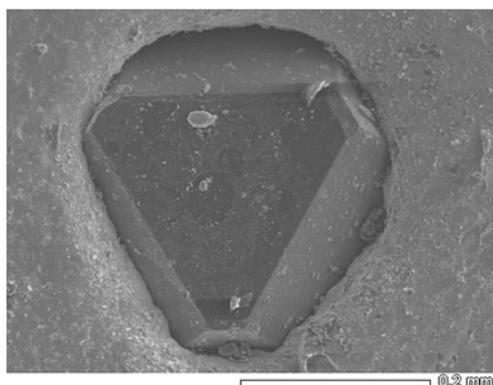
ただ、溶融成型は基本的に、液相のCuが黒鉛型の隙間から流出し、加圧が効かなくなる問題を抱えている。そこで、型構造、型温度の分布に工夫を織り込み、溶融Cuの流出を防いだ。



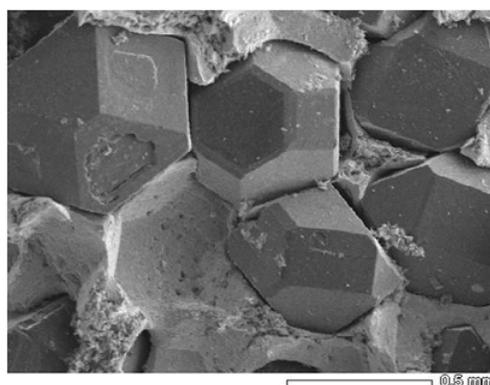
図2-2-⑥ 溶融成型したCu-ダイヤモンド複合材の外観

溶融成型後の複合材を、図2-2-⑥に示す。型の隙間に若干のバリが発生しているが、これは、むしろCuが完全に液相状態であったことを示している。

成形温度、保持時間および加圧力を変化させ、60vol.%ダイヤモンド-Cu 複合材を溶融成型した。各種実験した結果の中では、成型条件：1100°C×40sec×1.5Mpa で作ったテストピースが、最も高密度(5.44Mg/m³)であった。このテストピースの表面状態と破断面を図2-2-⑦に示す。



表面状態



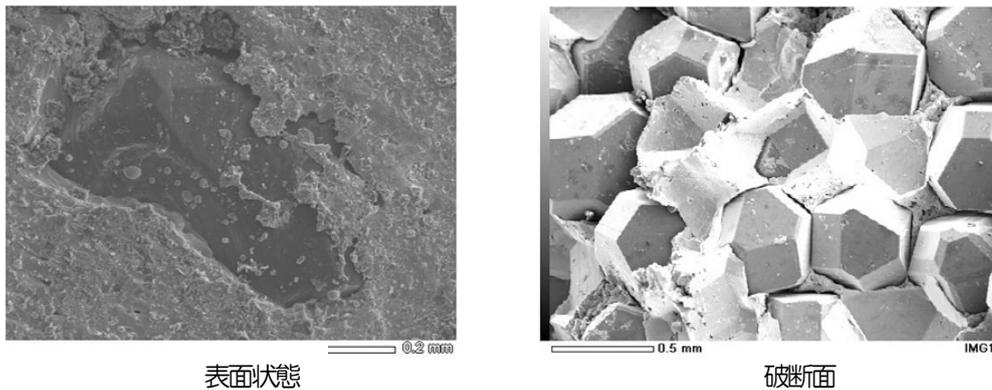
破断面

図2-2-⑦ 溶融成型した複合材体の表面状態と破断面

破断面からは、Cuとダイヤモンドあるいはダイヤモンド同士の隙間に空隙がまだ見られる。Cu

と炭素(ダイヤモンド)の親和性が低いことは一般的によく知られており、より緻密化するにはその対応が必要である。

そこで、ダイヤモンドと Cu の親和性を向上するため、添加元素を検討した。図 2-2-⑧に添加元素入り 60vol.%ダイヤモンド-Cu 組成の複合材の表面状態および破断面を示す。表面状態は、図 2-2-⑦に示した無添加複合材と比べてダイヤモンド粒子周辺の接触角は低く、添加元素により親和性が改善されている。この複合材の熱伝導率は 422W/m・K と高く、熱膨張率は 6.5ppm であった。



⑧ 添加元素が表面状態と破断面に

2-3 第2章 以上述べたように (Gr) -Cu 系複合材と 11ppm 以下の目標を達
複合材では、当初の目標を達成
ド-Cu 系複合材の 2 種類で、熱伝導
が、グラファイト
K 以上、熱膨張係数

第3章 銅板ヒートシンクの拡散接合技術の開発

ヒートシンク市場では、アルミダイカスト製やアルミ押し型材製のものが多用されているが、より放熱性を向上させるために、銅製のヒートシンクがその候補材としてある。しかし、銅はアルミに比べて価格が高く競争力に劣る。そこで、低温でしかも短時間で銅板同士が拡散接合できる技術を開発し、価格競争力を持たせる。

目標 1：600℃以下の低温焼結を可能とする銅板表面の改質技術を確立する。

目標 2：アルミダイカスト製ヒートシンクに対し銅板製ヒートシンクが、熱抵抗 50%以下となることを検証する。

3-1 プラズマ処理による接合温度の低温化

3-1-1 プラズマ処理を利用した銅板拡散接合

図 3-1-①に、使用した装置を示す。この装置のチャンバー内には、図 3-1-②に示すように、上下にテストピースをセットし、そのテストピース間で、あるいは別の中間電極とテストピースとの間でグロー放電を起こすようにしている。

実際にプラズマ処理を行っている様子を図 3-1-③に示す。

◆ 主な仕様

- ・ 通電加熱機構：横軸通電式 (DC12V、～4000A)
- ・ グロー放電プラズマ発生機構：DC, AC1000V
- ・ 加圧機構：油圧 (～3000kgf)
- ・ 真空排気機構：DP, RP (～ 10^{-5} Torr)

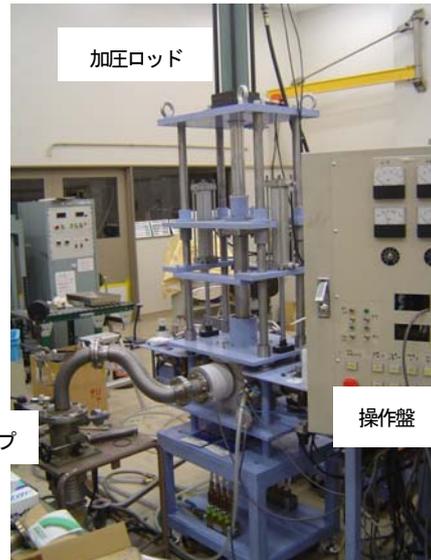


図 3-1-① プラズマ表面処理・接合装置

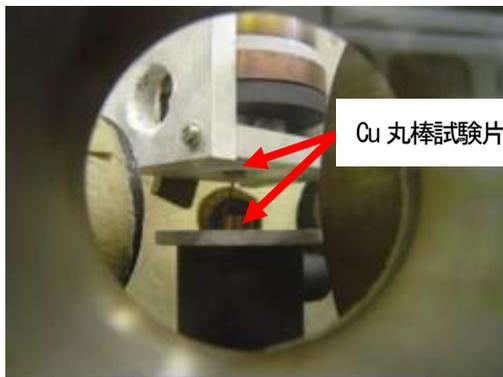


図 3-1-② チャンバー内の様子

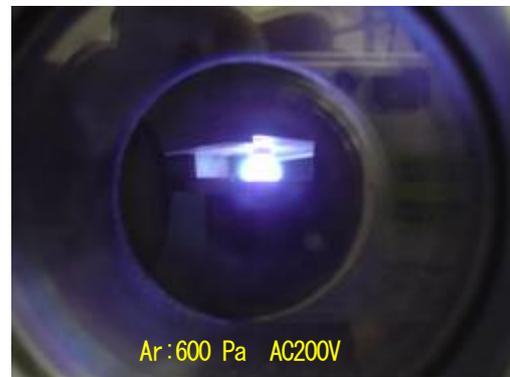
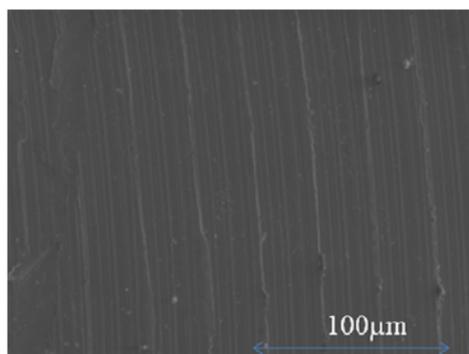


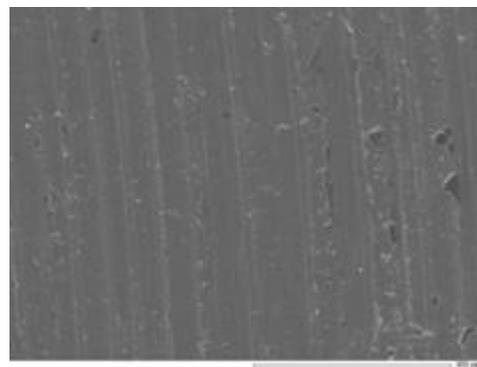
図 3-1-③ プラズマ処理の様子

3-1-2 プラズマ処理が銅板表面に及ぼす影響

処理前後の銅板表面の SEM 写真を図 3-1-④ に示す。プラズマ処理条件は、図 3-1-③ と同じ。SEM 写真で縦方向に走っている条痕は、旋盤加工のツールマークである。この表面を触針式表面形状測定器で測定した中心線平均粗さ Ra は処理前 1.1 に対し 180 秒間プラズマ処理した後の表面は 0.7 であった。



処理前



処理時間 180 秒

図 3-1-④ プラズマ処理前後の表面状態

このように、プラズマ処理中のアルゴンイオンで Cu 板表面が明らかにスパッタリングされていた。

3-1-3 プラズマ処理が接合強度に及ぼす影響

銅丸棒の表面をプラズマ処理した後、チャンバー内を真空に引き、そのまま処理面同士を圧接し、通電加熱して拡散接合した。プラズマ処理条件は、チャンバー内圧力:600Pa、処理時間:180 秒、印加電圧:200V、ソースガス:Ar、Ar-5% H_2 (どちらも純度 99.999%) である。拡散接合温度は 300°C~700°C、昇温速度は3.3°C/秒、接合温度での保持時間は60 秒、加圧力は20MPa とした。

図 3-1-⑤に接合温度と接合強度の関係を示す。この図から、接合温度の上昇に伴って接合強度が高くなっているのがわかる。

プラズマ処理の有無を比べると、Ar プラズマ処理が最も高く、次に Ar-5% H_2 プラズマ処理、最も低いのは未処理材である。また、プラズマ処理(Ar)の400°C接合材の強度が未処理材の600°Cと同等レベルであり、プラズマ処理の導入で、接合温度が200°C低減できる。

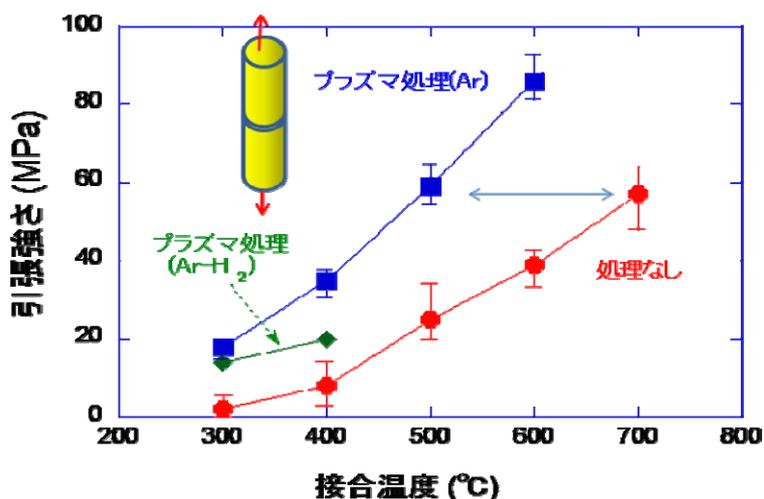


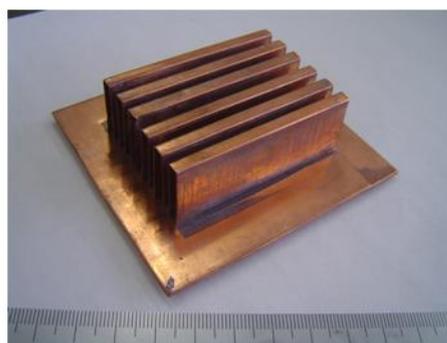
図 3-1-⑤ プラズマ処理が拡散接合強度に及ぼす影響

3-2 拡散接合ヒートシンクの熱抵抗

銅板接合ヒートシンクとアルミダイカスト製ヒートシンクの熱抵抗値を比較した。供試したヒートシンクの外観を図 3-2-①に示す。



(a) アルミダイカストヒートシンク



(b) 銅板接合ヒートシンク

図 3-2-① ヒートシンクの外観

ヒートシンクは送風機で風冷し、風速を変数として評価した。結果を図 3-2-②に示す。無風状態では銅板接合ヒートシンクの熱抵抗値が低い、風速が高くなると両者の差は小さくなる。風速が4m/秒よりも高くなると熱抵抗値はほぼ同じ値である。従って、このCu製ヒートシンクは開発目標未達であった。

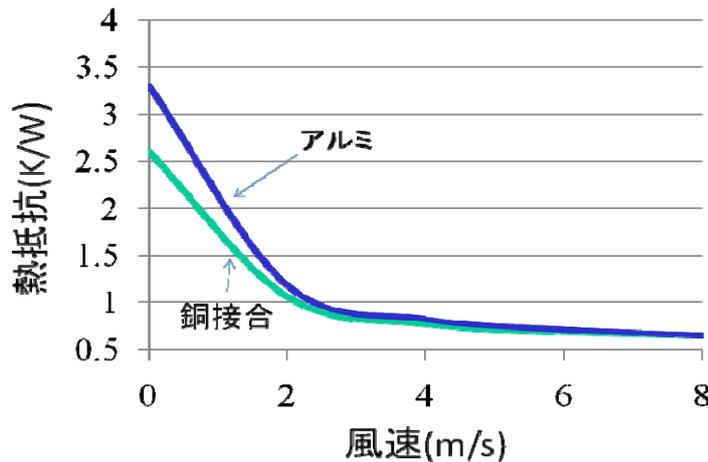


図 3-2-② 熱抵抗値に及ぼす風速の影響

3-3 銅板ヒートシンクの拡散接合技術の開発 まとめ

接合温度を 600°C以下にする手法として、プラズマによる銅板表面の活性化手法を確立できた。

ただ、銅板製ヒートシンクがアルミダイカスト製に対し、熱抵抗低減に大幅に有効であるというデータは得られなかった。

第 4 章 絶縁基板・放熱基板・ヒートシンクの 一体成形技術の開発

IGBT を狙いとして、その構成要素の「AlN 絶縁基板」、「Cu あるいは Cu-Mo 放熱基板」、「ヒートシンク」をすべて一体成形し、その中間材としての「ロウ付け」、「グリース挿入」を廃止することで、大幅な熱抵抗低減を図る。言葉がわかり難いので、以後、この絶縁基板～放熱基盤～ヒートシンク (=もう一つの放熱基板+放熱フィン) 全体を「ヒートスプレッダー」と呼ぶことにする。

目標 1 : AlN 絶縁基板と Cu 放熱基板、あるいは AlN 絶縁基板と Cu-Mo 放熱基盤との接合技術を確立する。

目標 2 : IGBT を年頭に置いた 200×200mm の大型ヒートシンクが一体成形可能となるようにする。

目標 3 : ヒートスプレッダーの 3 つの構成部材 (絶縁基板・放熱基板・ヒートシンク) を同時一体成形する技術を確立する。

目標 4 : 一体型ヒートスプレッダーで、アルミダイカスト製ヒートシンクを使った場合と比較して、熱抵抗を 50%以下とする。

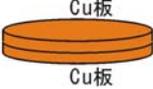
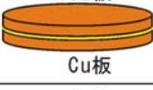
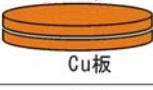
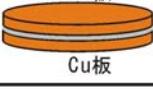
4-1 一体成形の効果

ヒートスプレッダーの一体成形を行うと、熱伝導・熱伝達が顕著によくなることは想像できるが、どの程度向上するのかの定量データが無かった。そこで、改めて各種の接合仕様と熱伝導率との関係を調べた。その結果を表 4-1-①に示す。

この表からわかるように、銅板の間にサーマルグリスを挟んで熱を逃がすよりも、ロー付けや拡散

表 4-1-① 銅板の各種接合仕様と熱伝導率の関係

接合により一体成形した方が、格段に熱伝導性に優れることがわかる。

接合仕様	熱伝導率 (W/m. K)	備考
Cu板 	378	
Cu板  ← 拡散接合 Cu板	376	
Cu板  ← ロー付け Cu板	350	ロー材 : BCuP-5 (Cu-5P-15Ag)
Cu板  ← グリス (1~2 μ) Cu板	76.7	サーマルグリス YG6260・5 (株アルファ)
Cu板  ← グリス (約10 μ) Cu板	69.7	サーマルグリス YG6260・5 (株アルファ)

4-2 絶縁基板と放熱基板の一体成形技術の開発

4-2-1 検討した接合方法

予備実験も含め、次に示す5種類の方法を検討した。

- (イ) AlN 基板と Cu 基板の直接接合実験 (AlN/Cu 基板)
- (ロ) Cu ナノコーティングを施した AlN 基板と Cu 基板の接合実験 (AlN/Cu ナノ/Cu)
- (ハ) AlN 基板と Cu 基板との間に純 Al 中間材を挟んだ実験 (AlN/Al/Cu)、またこの派生型として、Cu 基板に替えて Cu-Mo 基板を用いた実験 (AlN/Al/Cu-Mo)
- (ニ) AlN 基板と Cu 基板との間にロー材を挟んだ実験 (AlN/ロー材/Cu)
注 ロー材 : 本開発の中で見出した材料であるが、詳細は記載せず
- (ホ) AlN 基板と Cu 基板との間にインサート材を挟んだ実験 (AlN/インサート材/Cu)
注 インサート材 : 本開発の中で見出した材料であるが、詳細は記載せず

4-2-2 各種接合方法の実験結果

5種類の方法の結果を簡単に述べる。

(イ) AlN 基板と Cu 基板の直接接合実験

直接接合実験では十分な接合強度を得ることはできなかった。

(ロ) Cu ナノコーティングを施した Al 基板と Cu 基板の接合

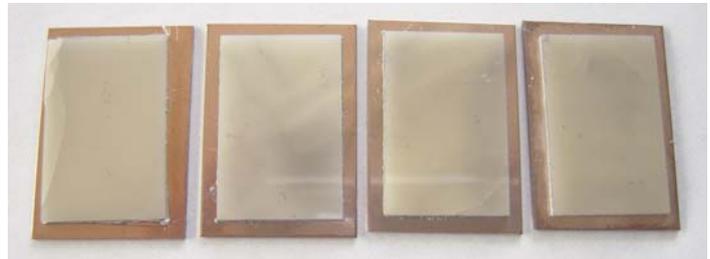
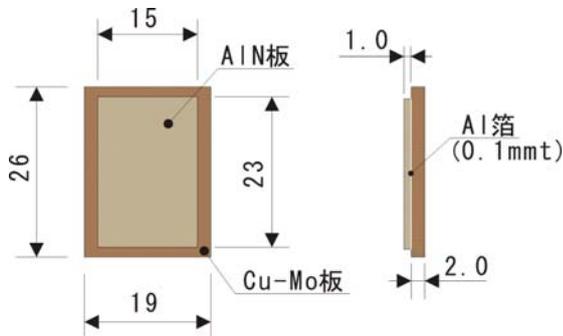
直接接合よりも、接合強度を著しく改善することができた。しかしながら、AlN と Cu の線膨張係数 (AlN : $4.5 \times 10^{-6}/K$, Cu : $17 \times 10^{-6}/K$) に大きな差があるため、場合によっては AlN 基板に著しい割れが生じた。

(ハ) AlN 基板と Cu 基板との間に純 Al 中間材を挟んだ実験

線膨張係数のミスマッチによる熱応力の緩和を狙い、純 Al 中間材を用いた実験では、Al 中間材と Cu 基板の接合界面部で化合物が生成し、基板強度の低下や界面剥離等が見られた。

ただ、この組合せの派生型として、Cu 基板の代わりに 35Cu-65Mo を使った場合には、良好な結果が得られることが多かった。AlN と Cu-Mo の熱膨張係数 (Cu-Mo X:7. $2 \times 10^{-6}/K$, Y: $9.2 \times 10^{-6}/K$) が近いためであると考えられる。

作成したテストピースの例を図4-2-① (Al 材として 0.1mm 厚さの箔を使用) に示す。



2 枚同時焼結 630°C×4 分保持 圧力 44MPa

図4-2-① AlN 板/Al 箔/Cu-Mo 板を接合したテストピースの外観

(二) AlN 基板と Cu 基板との間にロー材を挟んだ実験 (AlN/ロー材/Cu)

AlN 基板と Cu 基板の熱膨張係数のミスマッチが緩和できること。熱伝導率が高いこと。焼結温度 600°C 以下で半熔融状態になること。といった 3 つの条件を満たすべく、ロー材の合金設計を行ない、それを基に、ロー材を作製し、接合実験を行なった。

こうしたテストの結果、AlN 板と Cu 板接合の中間材として今後十分期待できる材料が得られた。

(ホ) AlN 基板と Cu 基板との間にインサート材を挟んだ実験 (AlN/インサート材/Cu)

開発したインサート材を中間材として用いた。インサート材の詳細は省略するが、この中間材が今のところ、もっとも優れた接合性能を有しているようである。そこで、このインサート材を使用し、フィンも含めた一体成形品の試作を行った。その結果を次項以下に示す。

4-3 一体成形品の試作

開発したインサート材を中間材として用いたヒートスプレッダーの一体成形品の写真を図 4-3-① に示す。AlN 基板は 2 個を同時成形し、サイズは 90×90×40mm とした。

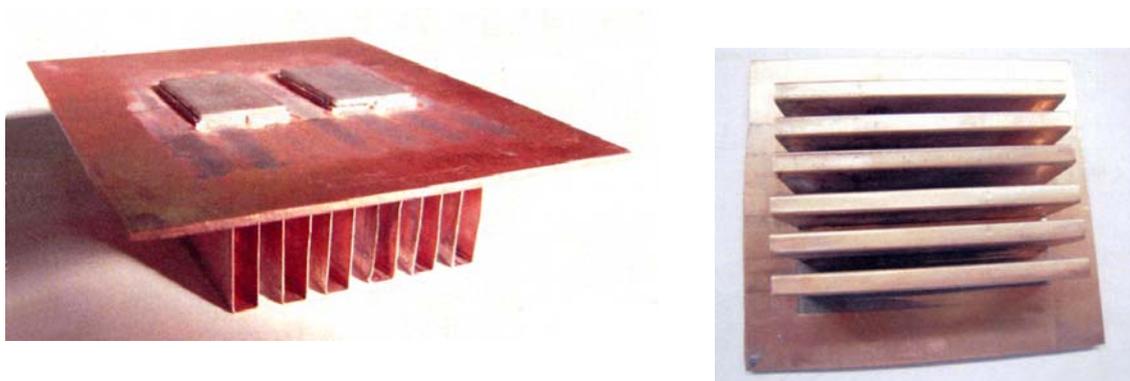


図4-3-① 開発インサート材を中間材として用いた一体型ヒートシンク

製作後は、外観上、AlN 基板の割れや剥がれは無かった。そこで、この試作品を熱サイクル試験に供試した。

4-4 一体成形品の熱サイクル試験

熱サイクル試験条件は、 $-30^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 150^{\circ}\text{C}$ の繰り返し（空気雰囲気）×合計 300 サイクル（約 100 時間）である。熱サイクルテスト後の一体成形品の外観を図 4-4-①に示す。テスト後も AlN 基板の割れや剥離は無かった。

この熱サイクルテスト品は、テスト後に切断し、金属組織を調査した。結果、AlN 基板とインサート材との接合界面部にクラックは見られなかった。また、インサート材と Cu 放熱基板間の接合、あるいは、Cu 放熱基板と Cu フィン間の接合もきれいにできているのを確認した。

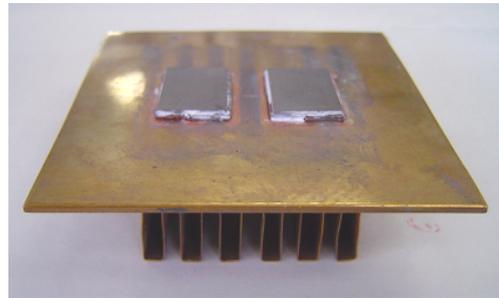


図 4-4-① 熱サイクルテスト後の外観

4-5 一体成形ヒートスプレッダーの熱抵抗

拡散接合により作製した一体型ヒートスプレッダーの放熱特性評価のため、熱抵抗の測定を行った。

熱抵抗計測に用いた一体型ヒートスプレッダーを図 4-5-①に示す。

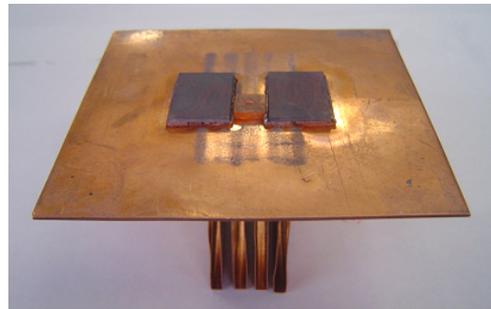
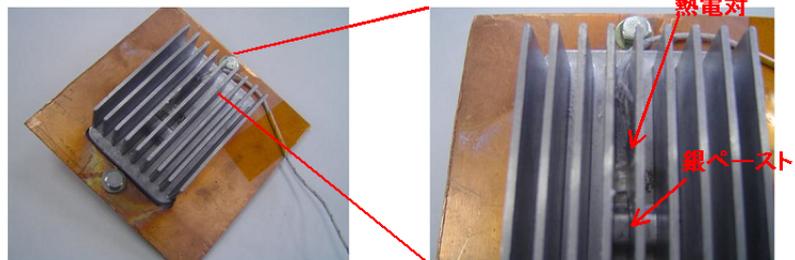


図 4-5-① 熱抵抗を計測した一体型ヒートスプレッダー

熱電対の取り付け方法を図 4-5-②に示す。比較用に使用した非一体型のアルミダイカスト製ヒートシンクは、この写真に写っているものである。



Cu ヒートシンクには、熱電対をスポット溶接した



Al はスポット溶接できないので、 $\phi 1.2$ (深さ 1.5 程度)の穴をあけ、その中に熱電対を入れて銀ペーストで固定した

図 4-5-② 熱電対の取り付け

無風状態での熱抵抗の測定結果を表 4-5-①に示す。この表から、一体型のヒートスプレッダーは、一体型でないものに比べて大幅に熱抵抗が下がることがわかる。特に現行の IGBT システムで使用されている Al ダイカストヒートシンクとサーマルグリスの組合せよりも、一体型は 45%も熱抵抗が下がっている。

表 4-5-①熱抵抗の測定結果

	一体型ヒートスプレッダー	非一体型ヒートスプレッダー	
構造	<p>出力：5W ヒーター（発熱体） サーマルグリス 窒化アルミ（1mm厚み） インサート材（1mm厚み） Cu板（1mm厚み） Cuヒートシンク</p>	<p>出力：5W ヒーター（発熱体） サーマルグリス 窒化アルミ（1mm厚み） Cu板（1mm厚み） Cuヒートシンク</p>	<p>出力：5W ヒーター（発熱体） サーマルグリス 窒化アルミ（1mm厚み） サーマルグリス Alダイカストヒートシンク Al鋳物（7mm厚み）</p>
熱抵抗	<p>熱抵抗：0.31K/W</p> <p>-32%</p> <p>-45%</p>	<p>熱抵抗：0.45K/W</p>	<p>熱抵抗：0.56K/W</p>

4-6 絶縁基板・放熱基板・ヒートシンクの一体成形技術の開発 まとめ

(1) 放熱基板とヒートシンクの一体成形について

銅板拡散接合技術の開発成果を応用すれば、十分に可能である。

(2) AlN 絶縁基板と Cu 放熱基板の一体成形技術の開発について

- ・ロー材は、接合特性が良好であり、中間材としての有力候補材である。
- ・今のところ、開発したインサート材が中間材として非常に有用である。熱サイクル試験でも割れ、剥離等の問題は発生しておらず、接合技術としては良いレベルにある。ただ、今のところサンプル数が少なく確信を持てるレベルには至っていない。

(3) IGBT を念頭に置いた 200×200 の大型品が一体成形可能となるようにすることについて

連続式通電焼結装置の開発の項でも述べるが、装置開発ができたこと、また、必要な要素技術を各種用意できたことから、十分に可能であり、目標を達成できると判断している。

(4) 一体型のヒートスプレッダーの熱抵抗について

Gr-Cu 系複合材を用いた一体型ヒートスプレッダーの熱抵抗値は、無風状態ではあるが、相対的な目標である“アルミダイカスト製ヒートシンク比 50%の低減”に対して、ほぼ半減できており、目標を何とかクリアできたと考えている。

第 5 章 連続式表面改質型多軸通電焼結装置の開発

焼結部品の生産性向上、ひいてはコスト低減を図るため、連続式の通電焼結装置を完成させる。

目標 1：生産性を、従来のバッチ式の 10 倍（6 分/1 個）に向上させる。

目標 2：焼結面積 200×200mm が生産可能とする。その時の材料特性はバッチ式並。

5-1 完成した装置写真

完成した「表面改質型連続式多軸通電焼結装置」の写真を図5-1-①に示す。この装置のサイズは写真の方向から見て幅 5290mm×奥行き 2350mm×高さ 3500mm である。電源は、6V/12000A までの能力を保有。真空度は50Pa。

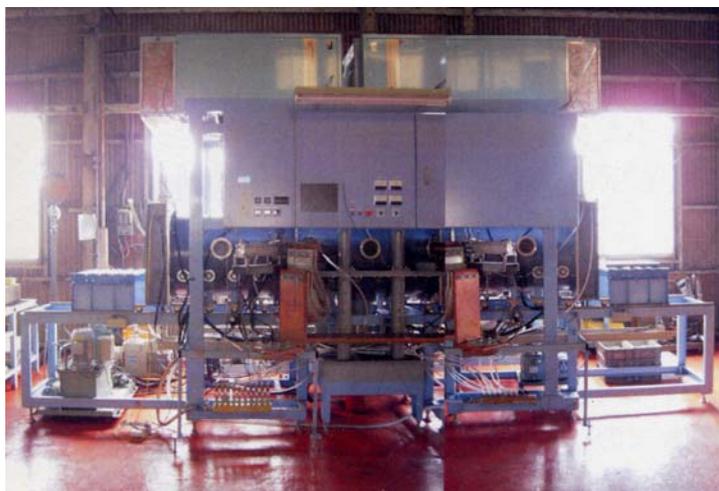


図5-1-① 連続式多軸通電
焼結装置

5-2 焼結制御ソフト

ソフトウェアの中には焼結状況が、モニター画面から把握できるように、可視化のためのソフトを開発し織り込んだ。主に、「加熱中」、「焼結中」等のステップが4種類あり、温度上昇カーブや圧力上昇カーブ、あるいは変位カーブの状況からの計算で、自動表示できるようにし、作業者がどの作業ステップに居るのかを目視できるようにしている。

5-3 試作焼結装置の昇温試験

連続式通電焼結装置の昇温試験を行った。昇温試験に用いた黒鉛型は、従来のバッチ式焼結炉で使用している最大のサイズである。これを用いることで、連続装置とバッチ炉の昇温性能を1対1で比較した。

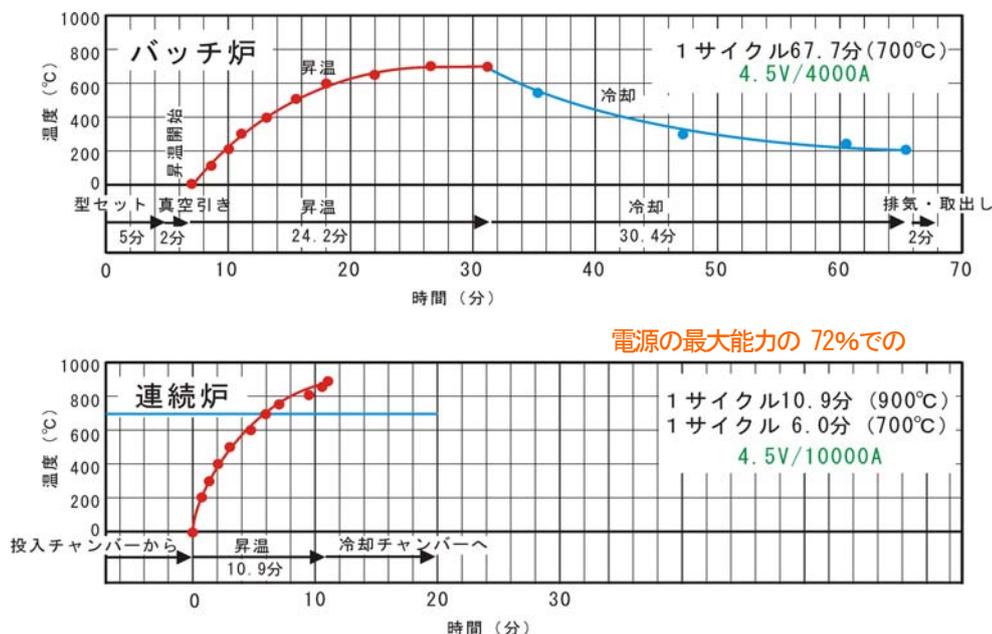


図5-3-① 昇温試験結果

得られた昇温データを、従来のバッチ式と比較して、**図5-3-①**に示す。また、昇温試験時の黒鉛型の加熱の状況を**図5-3-②**に示す。

図5-3-①の昇温データから、700℃で焼結を行った場合のサイクルタイムは、バッチ式が約68分、連続装置が約6分である。従って、目標とした10倍の生産性は十分に達成できている。

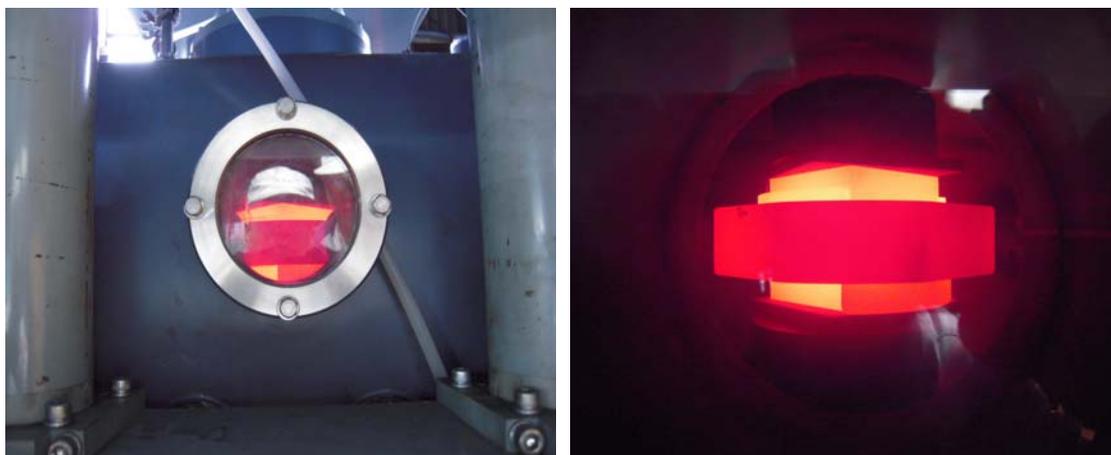


図5-3-② 黒鉛型の加熱状態

5-4 第5章 まとめ

成果として、次のことがあげられる。

(1) 連続式多軸通電焼結装置の製作

また、耐久性は未確認であるが、連続式の通電焼結装置を開発・完成させることができた。

(2) 連続式多軸通電焼結装置の評価

昇温試験の結果は良好で、当初予定していた通りの性能であり、生産性目標：バッチ式比10倍を達成した。また、電源能力に余裕もあり、サイクルタイムのさらなる短縮も可能と思われる。

(3) 表面改質装置の付加

プラズマ活性化処理を行えば、600℃の低温でも銅板の拡散接合が十分にできることが検証できた。従って、表面改質チャンバーを付加すれば、さらに生産性の向上が見込めることがわかった。

6 最後に

2年間に渡る本開発でもって、ほぼ当初の期待通りの成果が得られた。ほとんどの項目も目標を達成した。しかしながら、開発は、未だまだら模様の状態にある。材料一つとっても、基礎データが不足している部分、応用展開には少し自信が持てない部分、あるいは装置を見ても、連続生産には耐久性その他の知見が不足している等々。

今後さらに補完研究を実施し、何とか部品販売、装置販売に結び付けたい。