

令和2年度  
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業  
戦略的基盤技術高度化支援事業

「熱電素子を組み込んだ高効率 SiC パワーモジュールの開発」

研究開発成果等報告書

令和3年5月

担当局 近畿経済産業局  
補助事業者 公益財団法人ふくい産業支援センター

# 目次

第1章 研究開発の概要.....	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標.....	1
1-1-1 研究背景.....	1
1-1-2 研究目的.....	1
1-1-3 研究目標及び実施概要.....	2
1-2 研究体制.....	7
1-2-1 管理体制.....	7
1-2-2 研究開発スケジュール.....	8
1-3 研究成果概要.....	9
1-4 当該研究開発の連絡窓口.....	11
第2章 本論.....	12
【1】パワーデバイス皮膜の高耐熱化、高機能化.....	12
【1-1】量産提要可能な無電解ニッケル-低リンめっき皮膜の開発.....	12
【1-2】無電解銅めっき皮膜適用のためのめっき技術開発.....	14
【2】めっき技術を用いた熱電素子の開発.....	15
【2-1】ビスマスコートテルル粉体の開発、およびそれを用いたビスマス複合めっきの確立.....	16
【2-2】ビスマステルル熱電素子前駆体のパターンめっき.....	18
【2-3】配線形成済セラミック基板上での、前駆体焼成と、高耐熱性接合の一括プロセス法の開発.....	20
【2-4】熱電モジュールの作成と、熱電効率の測定.....	22
【3】めっきによる、微細構造を有する水冷冷却器の形成.....	23
【4】排熱回収機構を備えた次世代パワーモジュール構造の作成と実証評価.....	25
最終章 全体総括.....	26
1 目標達成状況.....	26
2 残課題の克服.....	26
3 事業化展開並びに成果展開.....	27

# 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 研究背景

近年の自動車業界では、電動化技術の重要性が増してきており、電力変換技術の中心を担うパワーデバイス分野では、高効率化に関する技術が開発されている。従来から用いられている、シリコン（Si）ベースのパワーデバイスでは、より高周波での動作が想定され、それに伴って生じる熱に対する耐性が必要となっている。また、Si ベースのパワーデバイスから、電気特性に優る炭化ケイ素（SiC）への転換も挙げられる。SiC ベースでのパワー半導体では、その特性から、高温動作が求められている。

また、一方で、搭載スペースの制限から、デバイスの小型化が望まれており、周辺部材、並びに接合材料の高耐熱化や、効率的な放熱性能を持つパッケージ技術の確立などが望まれている。

さらに昨年度、政府によるカーボンニュートラルの方針が明らかにされたことで、パワーデバイスにおける上記の技術ニーズは、今後さらに重要性を増してくると考えられる。

一方で、上記の高効率化や、放熱性の改善を行っても、電気エネルギーの一部が、熱エネルギーとなって逸散してしまうことには変わりはなく、パワーデバイスが半導体という特性上、どんなに効率化しても、ある程度の熱エネルギーの発生は抑えられない。そこで、この熱エネルギーを、別の手法によって回収するシステムが、高効率化に対して必要となると考えられる。

熱エネルギーを回収する方法としては、温度差で発電を行う、熱電素子が知られている。熱電素子自体は、古くから知られており、自動車の排気ガスの熱エネルギーを、熱電素子で回収するコンセプトは、20 年以上前から提唱されていたが、コストなどの問題から、実用化には至っていなかった。

近年のカーボンニュートラルの方針の発表など、省エネルギー意識の高まりや、CO<sub>2</sub> 削減を考慮したエネルギーコストの高騰から、熱電素子は近年特に注目を浴びており、自動車業界でも、排気ガスで発電するモジュールがサンプル販売されるようになってきている。

### 1-1-2 研究目的

本研究開発では、以下の4つの観点から、研究開発を行うこととした。

- ① SiC パワーデバイスの高温動作に対応した、高耐熱性めっき皮膜の開発を行う。
- ② パワーモジュールに熱電素子を組み込み、パワーデバイスで発生した熱を熱電素子にて電力変換するシステムを組み込む。
- ③ 冷却性に優れた小型水冷冷却器を組み込み、小型パッケージのパワーモジュールシステムを構築する。
- ④ 以上の要素を組み合わせ、高効率 SiC パワーモジュールを作製し、熱エネルギー回収の実証試験を実施する。

上記開発を行うことで、熱電素子を組み込んだ高効率 SiC パワーモジュールを開発し、パワーデバイス分野における、高効率化手法の一方法を提案する。

### 1-1-3 研究目標及び実施概要

本研究開発を、サブテーマとして、以下の 4 つの項目に分け、それぞれを必要に応じてさらに細分化することで、研究開発を行うこととした。

#### 【1. パワーデバイス皮膜の高耐熱化、高機能化】

##### 【1-1】 量産適用可能な無電解ニッケル-低リンめっき皮膜の開発

パワーデバイス上のアルミニウム電極に対して、耐熱性に優れた無電解ニッケル-低リンめっきの成膜について、量産適用可能な条件の検討を行った。基材としては、高温動作パワーモジュールの材料となる、SiC ウエハ上の、アルミニウム膜とした。量産条件に関しては、現在、SiC ウエハは、ウエハ品質の向上に課題を抱えており、4、5インチなどの、小径ウエハしか生産されていないので、将来の大口径化を見据え、8インチ SiC ウエハで評価を実施した（図 1-1）。

##### 【1-2】 無電解銅めっき皮膜適用のためのめっき技術開発

放熱性に優れた銅を皮膜として活用するために、銅ワイヤーによるワイヤーボンディングが可能なめっき皮膜を得ることを目標とした。無電解銅めっきとしては、かなり厚い皮膜を必要とすることがわかったため、諸条件を検討することで、SiC ウエハ上に、厚さ30  $\mu\text{m}$  の無電解銅めっきを安定的に行える条件を構築し、銅ワイヤーボンディングを行って、ワイヤープル試験を実施した（図 1-1）。

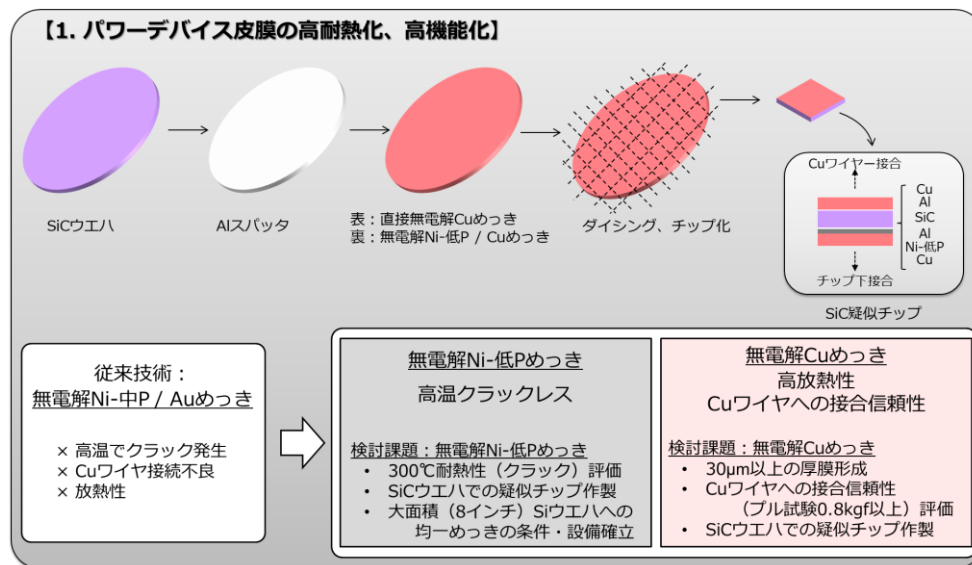


図 1-1 サブテーマ【1-1】【1-2】開発概要。

#### 【2. めっき技術を用いた熱電素子の開発】

熱電素子は、p型とn型を用意し、互いに $\pi$ 型に接合することで、モジュール化されていることが多い。本研究開発では、組み込む熱電素子として、現在最も広く用いられている、ピスマスーアンチモン-テルル系を選択した。それぞれの素子の組成の目標は、n型： $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 、p型： $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ とすることとした。

【2-1】 ビスマスコートテルル粉体の開発、およびそれを用いたビスマス複合めっきの確立

粉体めっき法によって、テルル（アンチモン）粉末上にビスマスめっきを行い、ビスマスコートテルル粉体を開発した。さらに、その粉体を用いて、ビスマス複合めっきを行い、テルル（アンチモン）が分散したビスマス皮膜（＝熱電素子前駆体）を形成した（図 1-2）。

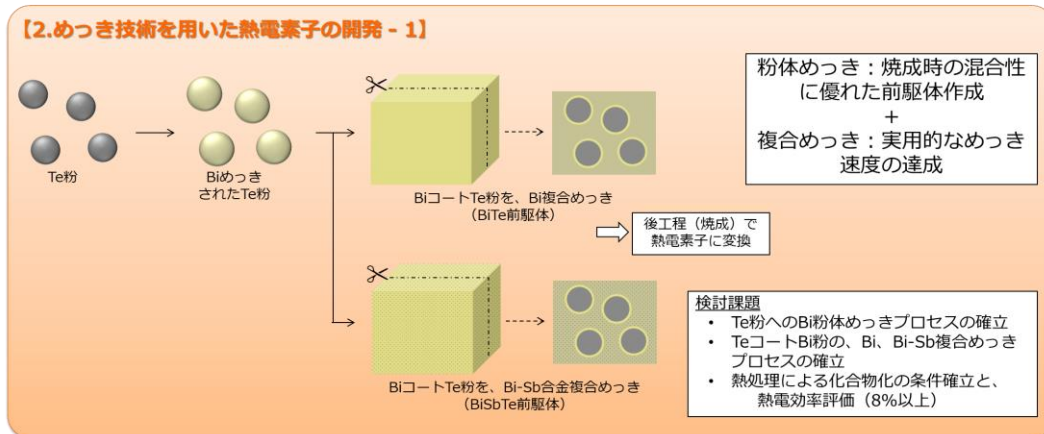


図 1-2 サブテーマ【2-1】開発概要。

【2-2】 ビスマステルル熱電素子前駆体のパターンめっき

熱電素子の配線となる金属皮膜パターンを、窒化アルミニウム基板の上にパターンめっきした。その後、サブテーマ【2-1】のめっき技術を用いて、厚さ 500 μm の熱電素子前駆体を、配線めっきを行ったセラミック基板に、パターンめっきとして行った。一方の基板に n 型（ビスマス-テルル）の前駆体チップを形成し、もう一方の基板に、p 型（ビスマス-アンチモン-テルル）の前駆体チップを形成した上で、それら 1 対を、サブテーマ【2-3】で焼成・接合を行った（図 1-3）。

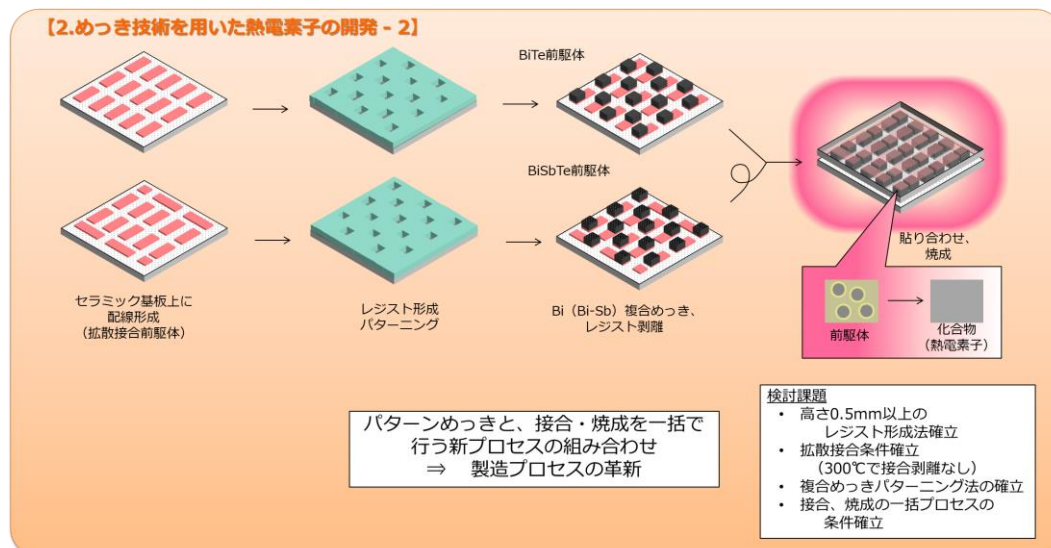


図 1-3 サブテーマ【2-2】～【2-4】開発概要。

### 【2-3】 配線形成済セラミック基板上での、前駆体焼成と、高耐熱性接合の一括プロセス法の開発

サブテーマ【2-2】で得られた前駆体チップのパターンめっきがされた基板 1 対に、接合媒体を塗って、貼り合わせ、焼成することで、前駆体を化合物化すると同時に、チップを電氣的に接合することで、熱電素子モジュールを作製することを検討した（図 1-3）。そのために、まず、チップ単位で、焼成の熱処理条件の検討を行い、前駆体が、熱電素子化合物に変化していることを確認した。また、一方で、耐熱接合媒体の選定や、その媒体を、各前駆体チップ上に均一に塗布するための手法について、検討した。最終的に、焼成と接合が同時に達成されていることの確認を行った。

### 【2-4】 熱電モジュールの作成と、熱電効率の測定

サブテーマ【2-3】で得られた熱電素子モジュールの評価を行い、目標とした発電効率が達成できているかを確認することを目標とした。測定機器については、我々が測定したいサンプル（チップ、熱電素子モジュール、冷却器付きモジュール）形状に対応できるようにするため、自作することとし、市販熱電素子チップを測定して、妥当性を確認した上で、使用することとした。

### 【3. めっきによる、微細構造を有する水冷冷却器の形成】

当社で前回（平成26、27年度）実施したサポインでは、銅製のパワーデバイス用空冷フィンを作製した。本研究開発では、市場トレンドを取り入れた、水冷冷却器を作製することとした。まずシミュレーションを行い、冷却に最も適した構造を割り出し、その構造について、フォトリソグラフィ法を用いて銅めっきを行い、構造体を作製した。最後に、通水・冷却試験を行って、所定の冷却器となっていることを確認した（図 1-4）。

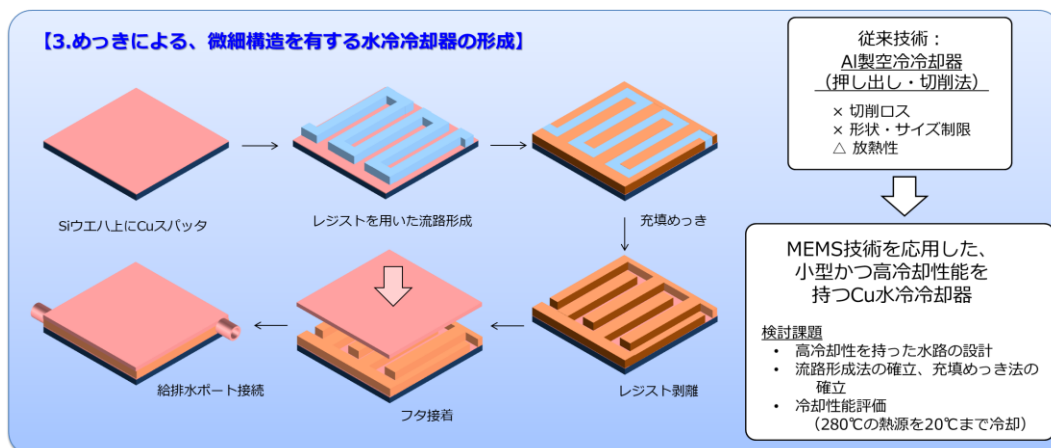


図 1-4 サブテーマ【3】 開発概要。

### 【4. 排熱回収機構を備えた次世代パワーモジュール構造の作成と実証評価】

サブテーマ【1】～【3】の成果物を組み合わせて、熱電素子付きの疑似パワーモジュールを作製した。パワーデバイス側を加熱し、冷却器で冷やすことで温度差を作り出し、その温度差で発電し、その発電特性を評価して、目標値を達成しているか、確認することとした（図 1-5）。

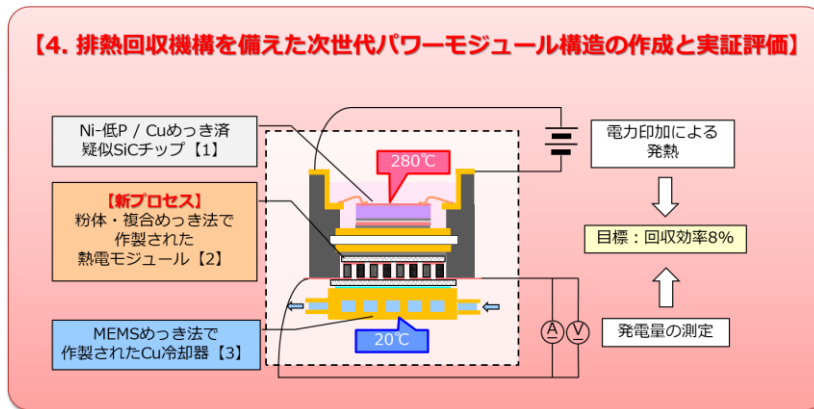


図 1-5 サブテーマ【4】開発概要。

これら本研究開発における実施概要、および目標値と、それに対応する、「中小ものづくり高度化法及び中小ものづくり高度化指針」に基づく高度化目標を表にすると、表 1-1 のようになる。

- 高度化目標  
 (七) 表面処理に係る技術に関する事項  
 1 表面処理に係る技術において達成すべき高度化目標  
 (3) 川下分野横断的な共通の事項  
 ②高度化目標

ア. 当該技術が持つ物理的・化学的な諸特性の向上

イ. 形成プロセスの最適化

キ. 品質の向上

ク. 生産性・効率性の向上

表 1-1 高度化目標と、本研究開発における、研究項目・実施概要・研究目標値。

高度化目標	研究項目	実施概要	研究目標値
ア、オ、キ	【1-1】 量産適用可能な無電解ニッケル-低リンめっき皮膜の開発	SiC ウエハへのめっきとチップ化。また、量産を見据え、大面積ウエハに、均一な品質でめっきを行う条件の構築。	SiC ウエハに皮膜形成。8 インチ Si ウエハにおいて、外周 10 mm より内側において、300℃にてクラックなきこと。
	【1-2】 無電解銅めっき皮膜適用のためのめっき技術開発	SiC ウエハへのめっきとチップ化。ワイヤーボンディング可能な無電解銅めっき皮膜の形成。	SiC ウエハに皮膜形成。膜厚 30 μm 形成。ワイヤープル試験にて、全モードワイヤー破断、かつ強度 0.8kgf 以上。
イ、キ	【2-1】 ビスマスコートテルル粉体の開発、およびそれをういたビスマス複合めっきの確立	粉体めっき、および、ビスマス(-アンチモン)複合めっきプロセスの確立。	粉体めっきにおいて、凝集なきこと。複合めっきによって、所定の組成 ±5% となること。
イ、キ	【2-2】 ビスマステルル熱電素子前駆体のパターンめっき	上記複合めっきによるパターンニングで、熱電素子前駆体を形成する。	素子厚さ 500 μm のビスマステルル前駆体を形成。

	【2-3】配線形成済セラミック基板上での、前駆体焼成と、高耐熱性接合の一括プロセス法の開発	焼成によって、前駆体の、ビスマステルル化合物の形成と、接合を実施。	ビスマステルル化合物の形成。および、300℃高温放置試験において、接合面の剥離強度が、30 MPa 以上。
	【2-4】熱電モジュールの作成と、熱電効率の測定	熱電モジュールを作成し、熱電評価特性を実施。	280℃-20℃の温度にて、熱電効率 8%。
イ	【3.】めっきによる、微細構造を有する水冷冷却器の形成	MEMS めっき技術を応用した銅製水冷冷却器の形成。	280℃の温度印加下で、20℃以下の冷却能力を有する。
ア	【4.】排熱回収機構を備えた次世代パワーモジュール構造の作成と実証評価	【1】～【3】の結果を元に、パワーモジュール構造体を作成。	接合面のクラックや、接合剥離といった不具合がないこと。また、280℃-20℃の温度にて、熱電効率 8%。

また、上記研究項目の目標値に対する実施結果は、表 1-2 の通りである。具体的な成果内容については、1-3の研究成果概要、並びに、第2章の本論で記述することとする。

表 1-2 各項目の、目標値に対する実施結果。

研究項目	研究目標値	実施結果
【1-1】量産適用可能な無電解ニッケル-低リンめっき皮膜の開発	SiC ウエハに皮膜形成。 8 インチ Si ウエハにおいて、外周 10 mm より内側において、300° Cにてクラックなきこと。	目標値達成。
【1-2】無電解銅めっき皮膜適用のためのめっき技術開発	SiC ウエハに皮膜形成。膜厚 30 μm 形成。ワイヤプル試験にて、全モードワイヤー破断、かつ強度 0.8kgf 以上。	目標値達成。
【2-1】ビスマスコートテルル粉体の開発、およびそれを用いたビスマス複合めっきの確立	粉体めっきにおいて、凝集なきこと。 複合めっきによって、所定の組成 ±5%となること。	粉体めっき：達成。 複合めっき：代替法（積層めっき）により達成。
【2-2】ビスマステルル熱電素子前駆体のパターンめっき	素子厚さ 500 μm のビスマステルル前駆体を形成。	目標値達成。
【2-3】配線形成済セラミック基板上での、前駆体焼成と、高耐熱性接合の一括プロセス法の開発	ビスマステルル化合物の形成。および、300℃高温放置試験において、接合面の剥離強度が、30 MPa 以上。	焼成プロセス：確立。 接合方法：課題があり、未達。
【2-4】熱電モジュールの作成と、熱電効率の測定	280℃-20℃の温度にて、熱電効率 8%。	【2-3】未達が原因で、未達。
【3.】めっきによる、微細構造を有する水冷冷却器の形成	280℃の温度印加下で、20℃以下の冷却能力を有する。	目標値達成。
【4.】排熱回収機構を備えた次世代パワーモジュール構造の作成と実証評価	接合面のクラックや、接合剥離といった不具合がないこと。また、280℃-20℃の温度にて、熱電効率 8%。	【2】に未達項目があるため、未達（目標値達成品と同じ材料を用いた完成モデルは作製）。

## 1-2 研究体制

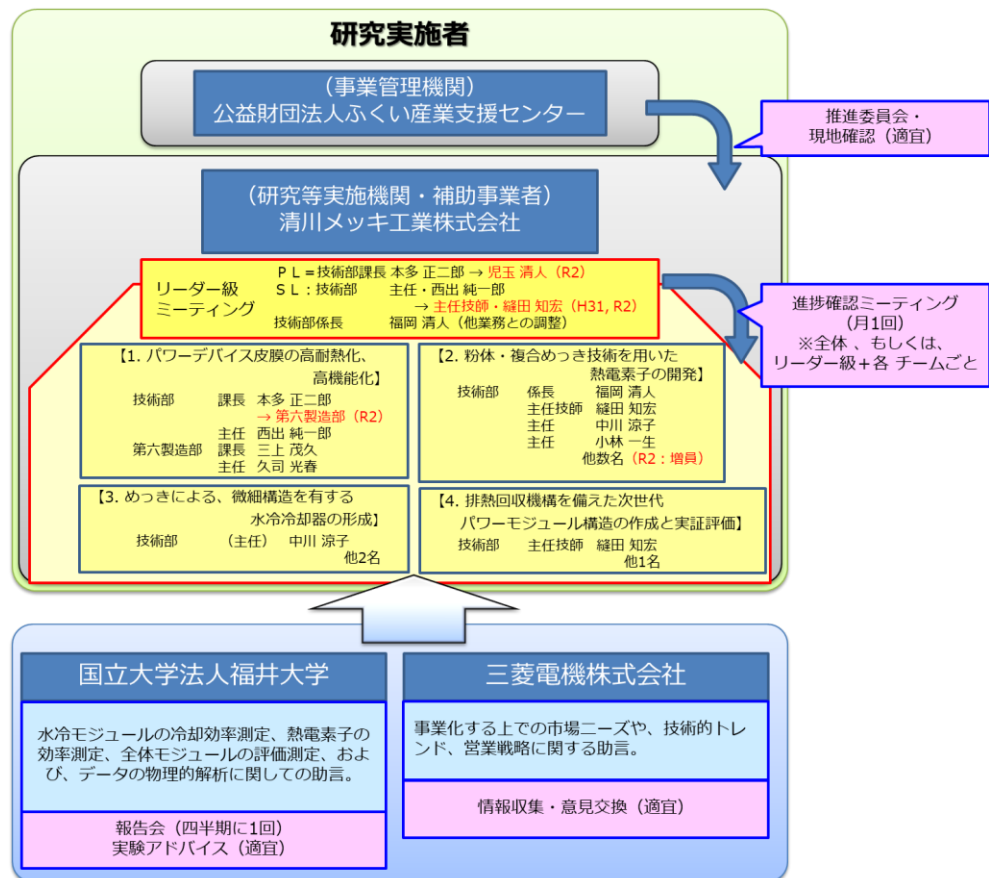
### 1-2-1 管理体制

管理体制を、図 1-6 に示す。本研究開発の事業管理機関は、(公財)ふくい産業支援センターであり、補助事業者として、清川メッキ工業(株)1社が、研究開発を行った。研究開発を行うにあたり、サブテーマに対応したチームを編成し、各々が研究開発を行うこととした。

研究開発チームは、サブテーマに応じて4つに分かれており、主として当社技術部が担うこととした。一部、量産検討に当たって、パワーデバイスへのめっきを行っている、第6製造部が担当することとした。また、最終年度は、人事異動により、プロジェクトリーダーが第6製造部に異動になったため、同前プロジェクトリーダーは、引き続き研究開発メンバーとして残留させるとともに、量産検討に対して、より強力で推進することとした。同時に、新任の技術部課長をプロジェクトリーダーとするとともに、それまでの各テーマの進捗を加味して、チームを柔軟に組み替え、対応した。

また、各チーム内の進捗管理のためのミーティングと、チーム間の相互確認のための全体ミーティングを、週1回～月1回行うことで、チーム全体としての進捗管理を行った。

アドバイザーとしては、学術面、および、本研究開発成果の事業化までをサポートしてもらうために、国立大学法人福井大学の産学官連携本部長・教授に就任してもらうこととした。また、パワーデバイス、およびパワーモジュールの技術トレンドや、業界の量産化トレンドに関する情報収集を行う意味で、三菱電機(株)の先端技術総合研究所パワーモジュール技術部・研究員に就任してもらうこととした。



1-2-2 研究開発スケジュール

表 1-3 のようなスケジュール（黒色矢印）で行うこととした。途中、進捗遅延が生じたため、スケジュールの見直し（赤色矢印で追記）を行った。さらに、結果的には、未達項目については、さらに期間を要する（赤色点線矢印）こととなった。

表 1-3 研究開発スケジュール。

【番号】実施内容	実施時期（年度・四半期ごと）											
	初年度				第二年度				第三年度			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
【1. パワーデバイス皮膜の高耐熱化、高機能化】												
【1-1】 量産適用可能な無電解ニッケル-低リンめっき皮膜の開発												
【1-2】 無電解銅めっき皮膜適用のためのめっき技術開発												
【2. めっき技術を用いた熱電素子の開発】												
【2-1】 ビスマスコートテルル粉体の開発、およびそれを用いたビスマス複合めっきの確立												
【2-2】 ビスマステルル熱電素子前駆体のパターンめっき												
【2-3】 配線形成済セラミック基板上での、前駆体焼成と、高耐熱性接合の一括プロセス法の開発												
【2-4】 熱電モジュールの作成と、熱電効率の測定												
【3. めっきによる、微細構造を有する水冷冷却器の形成】												
【4. 排熱回収機構を備えた次世代パワーモジュール構造の作成と実証評価】												

### 1-3 研究成果概要

#### 【1. パワーデバイス皮膜の高耐熱化、高機能化】

##### 【1-1】 量産適用可能な無電解ニッケル-低リンめっき皮膜の開発

前処理を含めた検討を実施した結果、300℃放置試験でもクラックが発生しない皮膜を開発することに成功した。また、その8インチ面内分布も、量産適用可能な数値を示した。

また、4インチSiCウエハに同様のめっきを行い、その皮膜が、Siウエハと同等の特性を持っていることを確認した。

##### 【1-2】 無電解銅めっき皮膜適用のためのめっき技術開発

SiCウエハ上に、厚さ30 $\mu$ mの無電解Cuめっきを安定的に行える条件を構築した。ワイヤーボンディング / ワイヤープル試験を実施した結果、破断モードは全て、接合箇所剥離ではなく、ワイヤー破断であり、かつ、その荷重が、目標とした0.8kgf以上であることを確認した。

最終的に、片面に無電解銅、もう片面に、無電解ニッケル-低リン / 無電解銅の積層構造を持つアルミニウムスパッタ済SiCウエハ（疑似パワーデバイス）を作製することで、本サブテーマの目標は、全て達成された。

#### 【2. めっき技術を用いた熱電素子の開発】

##### 【2-1】 ビスマスコートテルル粉体の開発、およびそれを用いたビスマス複合めっきの確立

熱電素子前駆体として、ビスマスめっきを行ったテルル粉体の作製に成功した。均一被覆性と、組成が目標値に入ること为目标に条件検討を行った。当初は、テルル粉が露出している部位が見られたり、凝集が見られたりしたが、粉体めっき工法の条件を最適化することで、所定の目標を満たす粉体めっきサンプルを作製することに成功した。

次に、この粉体めっきサンプルを、ビスマスめっきに複合することを検討した。様々な工法を用いたが、結果的に、空隙の多い皮膜しか得ることができず、【2-2】のフォトリソグラフィ工程に耐える皮膜を作るためには、さらなる時間を要する見通しとなった。そこで、複合めっきは、開発を続けつつも、本研究課題の目標達成を第一に見据え、代替手法を模索した。

様々な手法を検討した結果、ビスマス（、アンチモン）、テルルの単体を、繰り返し湿式めっきによって製膜する、積層めっき手法を新規に開発することで、目標をクリアすることができた。

##### 【2-2】 ビスマステルル熱電素子前駆体のパターンめっき

熱電素子のパターンによる形成を目的として、【2-1】のめっき工法を活用した、フォトリソグラフィ法によるパターンめっき工法の開発を行った。フォトリソグラフィ法としては、かなり厚いレジストを形成する必要があり、塗布、露光、現像の各工程で、条件の構築や、新規設備による検討が必要となった。

最終的に、厚さ500 $\mu$ mを超えるレジストパターンを得ることができたが、【2-1】の複合めっきに活用したところ、現像工程でめっき皮膜が剥離してしまった。複合めっき皮膜が脆すぎるのが原因であり、代替手法の積層めっき工法に適用したところ、目標としていた、厚さ500 $\mu$ mを超える、熱電素子前駆体のパターン

めっき品を得ることができた。

#### 【2-3】 配線形成済セラミック基板上での、前駆体焼成と、高耐熱性接合の一括プロセス法の開発

サブテーマ【2-2】で得られた熱電素子前駆体を焼成して、熱電素子化合物を得るとともに、p型前駆体を形成した配線付きセラミック基板と、n型前駆体を形成した配線付きセラミック基板上を、貼り合わせてリフローするプロセスを開発することを目標とした。

焼成条件については、温度プロファイルを工夫することで、比重の異なるビスマス、アンチモン、テルルが分相することなく、均一な化合物になる条件を確立した。

一方で、接合・リフロー条件については、接合媒体の塗布条件や、はんだ媒体の回りこみなどに課題を残しており、目標を達成することはできなかった。

また、はんだ媒体についても、当初予定していた、耐熱媒体を入手することができず、その観点からも、目標達成は困難となった。こちらについては、パワーデバイス業界で量産適用が開始された、銀焼結結合を入手・活用すれば、達成できる見通しである。

#### 【2-4】 熱電モジュールの作成と、熱電効率の測定

得られた熱電素子の特性評価を行い、目標とする発電能力を実証することを目標とした。測定システムの構築から行い、市販熱電素子チップで、測定システムの妥当性を確認し、本研究開発で得られた熱電素子材料の評価は行ったが、【2-3】の接合が達成できていないために、本研究開発で得たモジュールの評価は行えていない。また、熱電素子材料自体の評価においても、目標を下回っており、焼成条件などに立ち返った検討を必要としている。

#### 【3. めっきによる、微細構造を有する水冷冷却器の形成】

まず、冷却能力を最大とするためのシミュレーションを行い、最適構造を割り出した。その上で、フォトリソグラフィ法を用いて、片側 500 $\mu\text{m}$ の高さを持つ構造体を作製し、貼り合わせることで、通水厚さ 1mmの冷却器の作製に成功した。

最終的に通水試験を行い、水漏れがないことを確認した上で、冷却器の片面に 280 $^{\circ}\text{C}$ の熱源を設置し、冷却によって、他方の温度が 20 $^{\circ}\text{C}$ 以下となることを確認し、目標達成とした。

#### 【4. 排熱回収機構を備えた次世代パワーモジュール構造の作成と実証評価】

当初、【1】～【3】で得られた成果物を組み合わせて、疑似パワーモジュールを構築するとともに、その熱電変換特性を測定する予定であった。しかし、【2】で、発電特性を有する熱電素子構造体を構築することができず、目標を達成することができなかった。

ただし、本研究開発の成果物と同じ構成材料を用いて、パワーモジュール模型を作製することには成功している。サブテーマ【2】の課題が達成されれば、熱電素子モジュールを交換し、実証評価を行う予定である。

今後の事業化を見据え、達成できていない課題に関しては、解決を行っていくとともに、サブテーマ【1】については、皮膜単体での量産計画も現実味を帯びてきているため、積極的に注力していく予定である。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(補助事業者)

清川メッキ工業株式会社

技術部 児玉清人

TEL: 0776-23-2912

FAX: 0776-21-7402

E-mail: kodama@kiyokawa.co.jp

## 第2章 本論

### 【1】パワーデバイス皮膜の高耐熱化、高機能化

#### 【1-1】量産提要可能な無電解ニッケル-低リンめっき皮膜の開発

従来、パワーデバイス分野では、金属拡散を防ぐ下地バリア層として無電解ニッケル-中リンめっき皮膜が用いられてきた。しかし、昨今のパワーデバイスの高温度動作に伴い、同皮膜では、高温下でクラックが発生することが明らかになってきた。特に SiC パワーデバイスでは、高効率な動作を実現させるためには、高温での動作が求められているので、将来、この問題は深刻化する可能性がある。このクラックを抑制する方法として、無電解ニッケル-中リンめっき皮膜の代わりに、無電解ニッケル-低リンめっき皮膜を用いることで、クラック発生を抑制できることがわかってきている。しかし、無電解ニッケル-低リンめっき液は、従来の無電解ニッケル-中リンめっき液でのめっき条件や設備構造が適用できないため、新たに、量産を見据えた設備の設計や、管理法の確立が求められる。

また、現在の SiC パワーデバイスは、4 インチや 5 インチといった、比較的小径なウエハで量産が行われている。これは、SiC ウエハの品質問題に起因しているが、将来的には、大口径化していくことが予想される。

そこで本テーマでは、将来的な SiC ウエハ大口径化に対応すべく、8 インチのアルミニウムスパッタ済 Si ウエハを用いて、300℃、30 分の耐熱試験においてもクラックが発生しない無電解ニッケル-低リンめっき皮膜の開発のために、検討条件下でのデータ収集と評価を行い、条件の最適化を図った。また、4 インチ SiC ウエハにもめっきを行った。

前処理工程としては、アルミニウムへのめっきとして一般的に用いられる、ジンケート（亜鉛置換）法を採用した。洗浄、エッチング、酸洗浄、1st ジンケート、ジンケート剥離、2nd ジンケートの順に前処理を行い、その後、無電解ニッケル-低リンめっきを行った（ダブルジンケート法）。酸洗浄までと、無電解ニッケル-低リンめっき液の条件を固定して、ジンケート液を変更したサンプルを作製した。試料は、一部にポリイミドで絶縁層を設けた、アルミニウムスパッタを行った 8 インチ Si ウエハとし、耐熱試験によるクラックの有無と、外観均一性を評価した。絶縁層は、実際のパワーデバイスウエハでも存在し、絶縁層と電極の境界で、クラックが進展するケースが多いため、絶縁層と電極の境界を重点的に調査した。

最終的な本研究開発の成果物として、SiC ウエハに無電解ニッケル-低リンめっきを行った試料も作製した。

前処理工程の検討結果を表 2-1、図 2-1 に示す。ジンケートの液の種類によって、無電解ニッケル-低リンめっき皮膜耐熱試験時に、クラックが入る時と入らない時があった。これは、ジンケートによって、アルミニウム基板上に生成される亜鉛核の状態によって、その後のニッケル-低リン皮膜の結晶成長性が異なるためと推察される。また、外観の均一性も、ジンケートの液種によって異なる結果となった。

最終的に、クラックがなく、外観が均一な、水準 B を採用することとした。

また、めっき膜厚を変えて試験を行ったところ、5  $\mu\text{m}$  まで、クラックが入らないことを確認した（表 2-2）。また、8 インチ Si ウエハ上で、含リン率を測定したところ、2.4~2.5 wt%で安定しており、量産可能な面内ばらつきに収まっていた（図 2-2）。

表 2-1 各前処理条件によって製膜した無電解ニッケル-低リンめっき皮膜の外観均一性、および耐熱試験後のクラック評価。

工程		水準				
		A	B	C	D	E
クリーナー エッチング 酸洗浄		共通				
1st ジンケート		①				
ジンケート剥離		共通				
2nd ジンケート		①				
無電解ニッケル-低リン めっき		共通				
評価	クラック	多	なし	少	少	少
	外観均一性	○	○	×	×	×

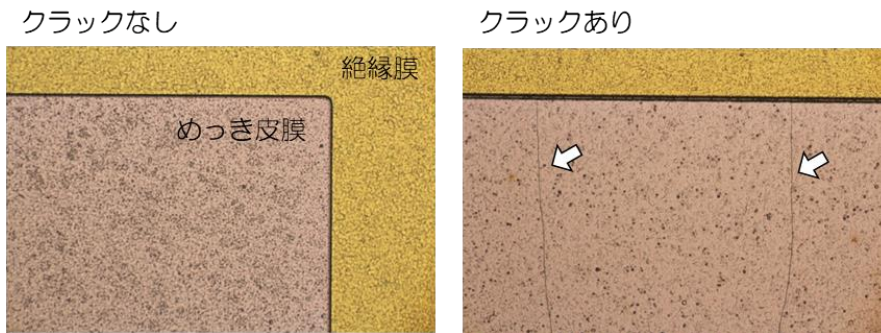


図 2-1 耐熱試験後のクラックがない皮膜（左）と、クラックが見られた皮膜（右）。

表 2-2 無電解ニッケル-低リン皮膜の膜厚と、クラックの有無。

膜厚 ( $\mu\text{m}$ )	1.2	3.0	5.0
クラック	なし	なし	なし

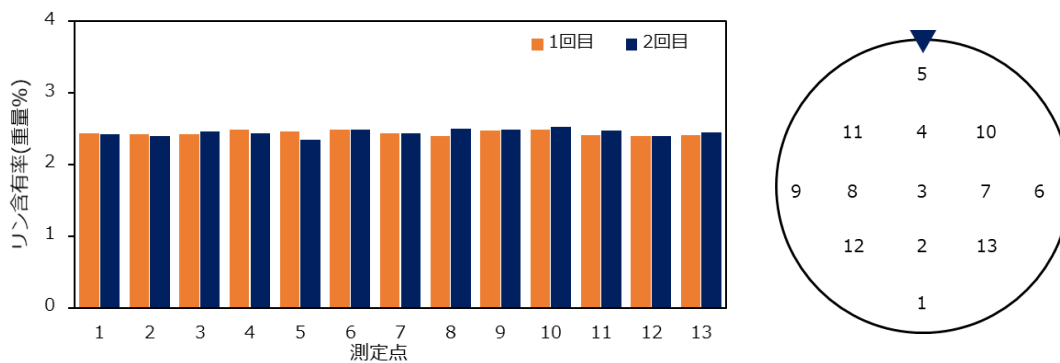


図 2-2 アルミニウムスパッタを行った 8 インチウエハ上の、無電解ニッケル-低 P めっき皮膜の含リン率の測定箇所とリン含有率。

## 【1-2】無電解銅めっき皮膜適用のためのめっき技術開発

近年、パワーデバイスでは、大電流を扱うため、放熱性が重要視され、接合用の皮膜として従来用いられていた、無電解ニッケルめっき皮膜の代わりに、より低抵抗（＝低発熱）かつ高熱伝導率の、銅めっき皮膜を用いる研究が進んでいる。また、接合方法についても、アルミ線を用いたワイヤーボンディングから、銅線、さらには、銅リボンを用いたワイヤーボンディングを採用する動きがある。銅をめっきするためには、電解めっき、無電解めっき、両方が想定されるが、前者は、フォトリソグラフィ法を用いることとなり、工程が、従来の無電解ニッケルめっき工程と大きく変わってしまうが、後者は、従来の工程からの変更は軽微であり、変更に対する障壁は少ない。

今回は、パワーデバイス向けに無電解銅めっきを行い、ワイヤーボンディング可能な皮膜を形成することを目的とした。アドバイザを通じた情報収集の結果、無電解銅めっき皮膜の厚さは、 $30\mu\text{m}$  必要であることがわかった。そこで、無電解銅めっきとしては比較的厚い膜となる、 $30\mu\text{m}$  の皮膜を安定に形成できる条件を模索し、さらに、ワイヤープル試験において、プル強度が  $0.8\text{ kgf}$  以上で、かつ、その破断モードが、ワイヤーであること（接合界面から剥離しない）ことを目標値として検討を行った。最終的に、サブテーマ【1-1】と組み合わせて、アルミニウムスパッタを行った SiC ウエハ上に、片面に無電解銅めっき、もう片面に、無電解ニッケル-低リンめっき / 無電解銅めっきを行ったサンプルを作製することとした。

いくつかのめっき液、およびその運用方法を検討した結果、アルミスパッタを行った 4 インチ SiC ウエハ上に、 $5\mu\text{m/h}$  という、現実的な析出速度を持った、厚さ  $30\mu\text{m}$  の皮膜を形成できる条件を見出した（図 2-3）。また、無電解ニッケル-低リンめっき上に無電解銅めっきを行ったサンプルと、アルミニウムスパッタ上に、直接無電解銅めっきを行ったサンプル、いずれのサンプルにおいても、銅ワイヤープル試験の結果、プル強度  $0.8\text{ kgf}$  以上で、かつ、ワイヤー破断モードであることを確認した（図 2-4）。

以上の検討より、サブテーマ【1】は、目標を達成していた。最後に、【4】に用いる成果物として、パワーデバイスを模した、パターン付き 4 インチ SiC 基板上に、片面に無電解ニッケル-低リン / 無電解銅めっきの積層膜、もう片方に、無電解銅めっき皮膜を形成したサンプルを作製した（図 2-5）。

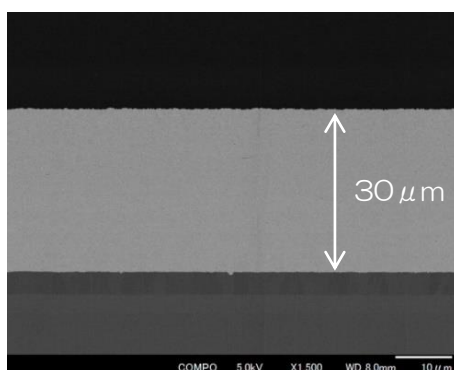


図 2-3 無電解銅めっき皮膜の断面電子顕微鏡像。

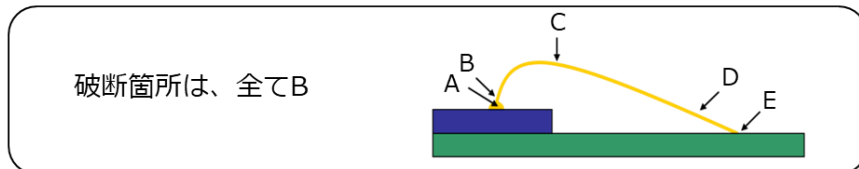
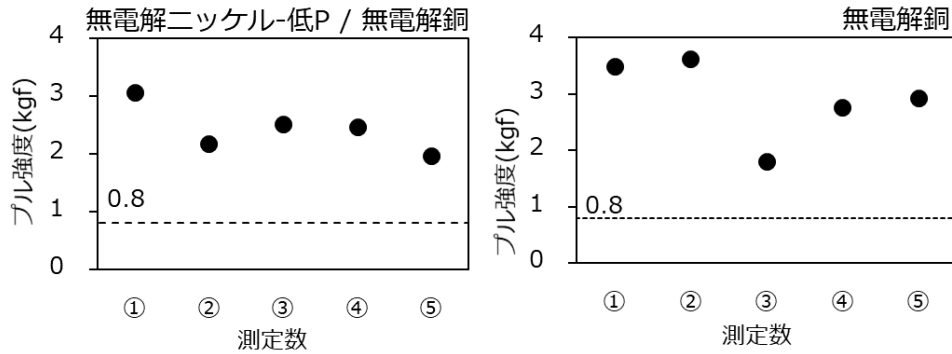


図 2-4 アルミニウムスパッタを行った SiC ウエハ上に形成した、無電解ニッケル-低Pめっき (3 $\mu$ m) / 無電解銅めっき (30 $\mu$ m) (左)、および無電解銅めっき皮膜 (右) に、ワイヤーを接続し、ブル試験を行ったときの破断強度およびその破断箇所。

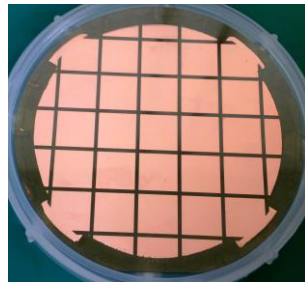


図 2-5 アルミニウムスパッタを行った 4 インチ SiC ウエハ上に無電解銅めっき (表面)、無電解ニッケル-低リンめっき / 無電解銅めっき (裏面) を行ったサンプル。

## 【2】めっき技術を用いた熱電素子の開発

熱電素子モジュールは、n 型と p 型の材料をチップ化して、それらを交互に接続する、 $\pi$  型構造が一般的である。熱電特性を示す材料は、使用する温度領域に応じて、様々な材料系が研究されている。今回は、300 $^{\circ}$ C までの領域で現在最も広く用いられている、化合物半導体ビスマス-アンチモン-テルル系を選択した。また、n 型、p 型、それぞれの素子の組成の目標は、 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 、 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  とすることとした。

現在広く行われている、本系の熱電素子作製法としては、まず、構成元素粉末を混合し、混練しつつ焼成する。得られた化合物のインゴットを、ウエハ上に加工し、その後、チップ化する。そのチップを、配線を描画した基板の上に並べて接合する。この方法の場合、チップ化におけるダイシング時に、切粉によって材料がロスしてしまうことや、チップを並べる工程によって、形状やサイズに制限がある。本研究開発では、これらの方法を、めっきによって簡略化する方法を模索した。

めっきを用いた  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 、 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  の作製方法としては、構成元素を全て水に溶かした水溶液から、電気化学的に合成をしつつ、化合物膜として製膜する方法が知られており、本研究開発で用いている、フォトリソグラフィ法を用いたパターンめっきを組み合わせた開

発例も見られる。しかし、めっきを用いた直接合成・製膜する方法は、製膜速度や、膜質、熱電変換性能に課題を残している。

本研究開発では、当社の技術を生かした粉体・複合めっき方法によって、単体の混合物の構造体（前駆体）を形成し、その後、焼成によって化合物化する手法を採用することで、上記成膜に関する課題の解決を図った。さらに、ダイシング、および、熱電素子チップを並べる工程を省くことを目的として、フォトリソグラフィ法によるパターンニング検討を行った。さらに、パターンニングした、p型、n型それぞれの前駆体チップ付き基板を、焼成しつつ互いに接合するという一括プロセスについて検討を行い、得られた構造体が、実際に熱電素子モジュールとして機能するか、評価を行うこととした。

### 【2-1】ビスマスコートテルル粉体の開発、およびそれを用いたビスマス複合めっきの確立

当社において、銅粉末にスズめっきを行った粉体は、銅とスズの粉末同士を混ぜた状態よりも、合金化の進行が速いという結果が得られている。今回は、そのコンセプトを利用し、テルル粉体、およびアンチモン粉体に、ビスマスめっきをすることで、得られた粉体めっき粒子を用いた場合、後工程の熱処理で、単体粉体よりも、化合物化の進行が早まることを期待して、粉体めっき技術を用いた、ビスマスコートテルル粉体、および、ビスマスコートテルル・アンチモン混合粉体の開発を行った。

前処理液、めっき液、およびその工法の検討を行った。図 2-6 に、ビスマスコートテルル粉体の、電子顕微鏡による表面・断面像を示す。めっき液に関して、めっき液 A を用いた場合、得られた粉体めっき品を電子顕微鏡によって観察したところ、ビスマスが針状結晶となっていた。また、一部、テルルが露出している箇所が見受けられた。さらに、一部で凝集も見られ、複合めっきに使用する粉体としては、不適であった。そこで、めっき液を、A から B に変更し、その上で、粉体めっき条件を最適化した結果、均一な被覆性を持ち、凝集が見られない粉体めっき品を得ることができた。また、重量法と、誘導結合プラズマ質量分析（ICP-MS）を用いた組成分析により、組成が、狙い値の±5%になっていることを確認した。

以上より、いずれの条件も満たす、ビスマスコートテルル（アンチモン）粉体を得ることができたと判断した。

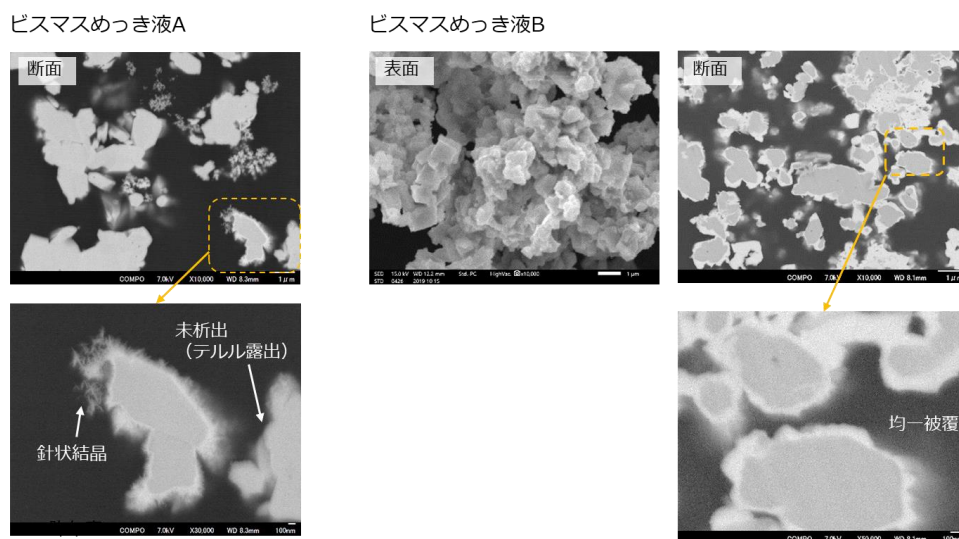


図 2-6 ビスマスコートテルル粉体の、電子顕微鏡像断面像。  
（左）条件検討不十分、（右）条件最適化後。

さらに、その粉体を（ビスマスコートテルル（アンチモン）粉）用いて、ビスマス複合めっきを試みた。本手法では、目的の組成を得るためには、50%以上という、複合めっきとしては、かなり多い共析量を確保する必要がある。また、サブテーマ【2-2】の、フォトリソグラフィ法に耐えられる皮膜強度を確保している必要がある。

上記目標を達成するために、様々な工法を用いて検討を行った。めっき液に粉体を単純に分散する方法では、ほとんど共析が見られなかった。そこで、様々な工法を検討して、複合めっき皮膜は得られるようになったものの、共析量としては、テルル 15wt%にとどまっておき、さらなる共析量のアップが必要である。また、サブテーマ【2-2】のパターンめっきも行っているが、共析量が目標に達しないとともに、パターンの底に空隙が多く見られるようになり、現像工程で皮膜が脱落してしまった（図 2-7）。

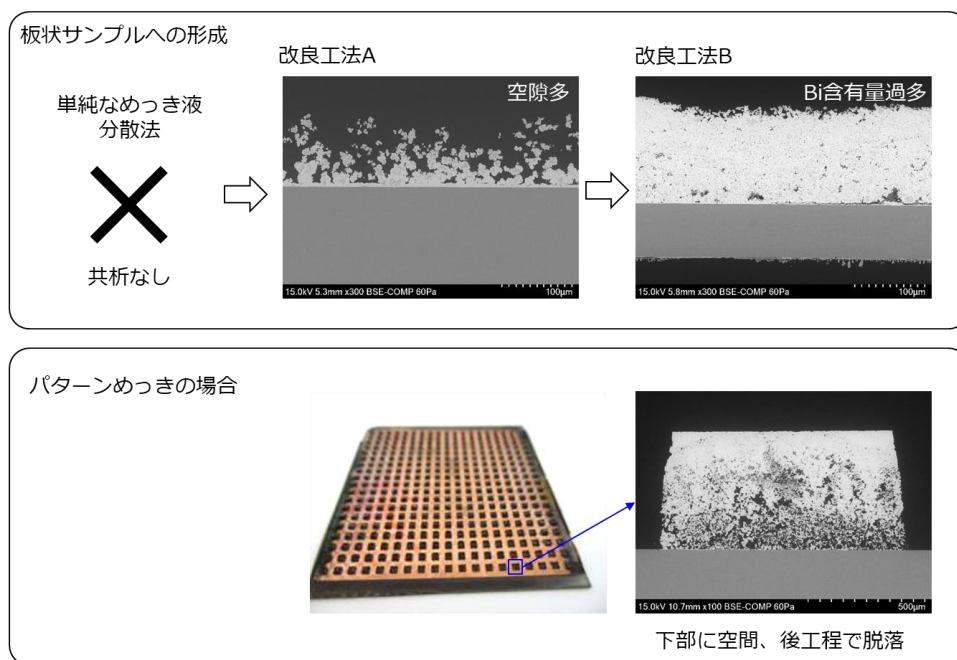


図 2-7 ビスマス-テルル複合めっきサンプルの電子顕微鏡像断面像。

複合めっきによる方法は、工法改良に時間がかかることが予想されるため、開発の方向性は残しつつも、補助期間内での目標達成を優先し、代替手法を模索することとした。500  $\mu$  m 皮膜を形成するための、現実的な製膜速度と、現像工程で剥離・脱落しないことを念頭に、種々の方法を検討した結果、ビスマス / アンチモン / テルルの各単体皮膜を順に製膜する、積層めっき法を採用することとした。

ビスマスめっき液については、粉体めっきで用いた液 B を用いることとした。アンチモン、およびテルルのめっき液については、既出の学術文献が一定数見られるが、本研究開発では、下地が、ビスマスやアンチモン、テルルといった、学術検討では用いられない素材であることと、これらの下地を互いに侵さないことが必要になるため、新規でめっき液、およびその工法について開発することとなった。

積層の繰り返しピッチに関しては、サブテーマ【2-3】における、焼成条件とセットで条件検討を行った。積層周期を長くすると、めっきの操作は減るが、熱処理による化合物化に時間を要することとなり、短くすると、めっきの入れ替えが頻繁になり、作業性が損なわれる。そこで、現実的な時間内で、十分に化合物化され、かつなるべく周期が長くなるピッチ条件を求めた。得られたビスマス / テルル積層皮膜の断面電子顕微鏡像、およびその元素マッピング図を図 2-8 に示す。断面電子顕微鏡像では、濃淡の周期構造が見られ、元素

マッピング層から、色の濃い部分がビスマス、薄い部分がテルルであることがわかり、規則的な周期構造を持った積層膜が得られていることがわかった。

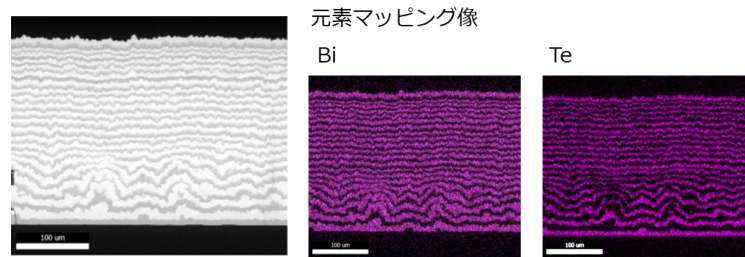


図 2-8 ビスマス-テルル積層膜の電子顕微鏡断面像と元素マッピング像。マッピング像により、電子顕微鏡像の、明部分がビスマス、暗部分がテルルであると判別される。

### 【2-2】 ビスマステル熱電素子前駆体のパターンめっき

フォトリソグラフィ法によるめっき工程は、1. シード金属膜形成、2. レジスト膜形成、3. 露光、4. 現像でパターンを形成し、5. めっき、6. レジスト剥離、7. シード金属層除去という流れで行われる。今回は、窒化アルミニウム基板上に、1 段階目として、熱電素子チップ同士を電氣的に接合するための配線パターンを形成し、2 段階目として、熱電素子チップを形成する、2 段階のフォトリソグラフィを行うこととした（図 2-9）。後者では、

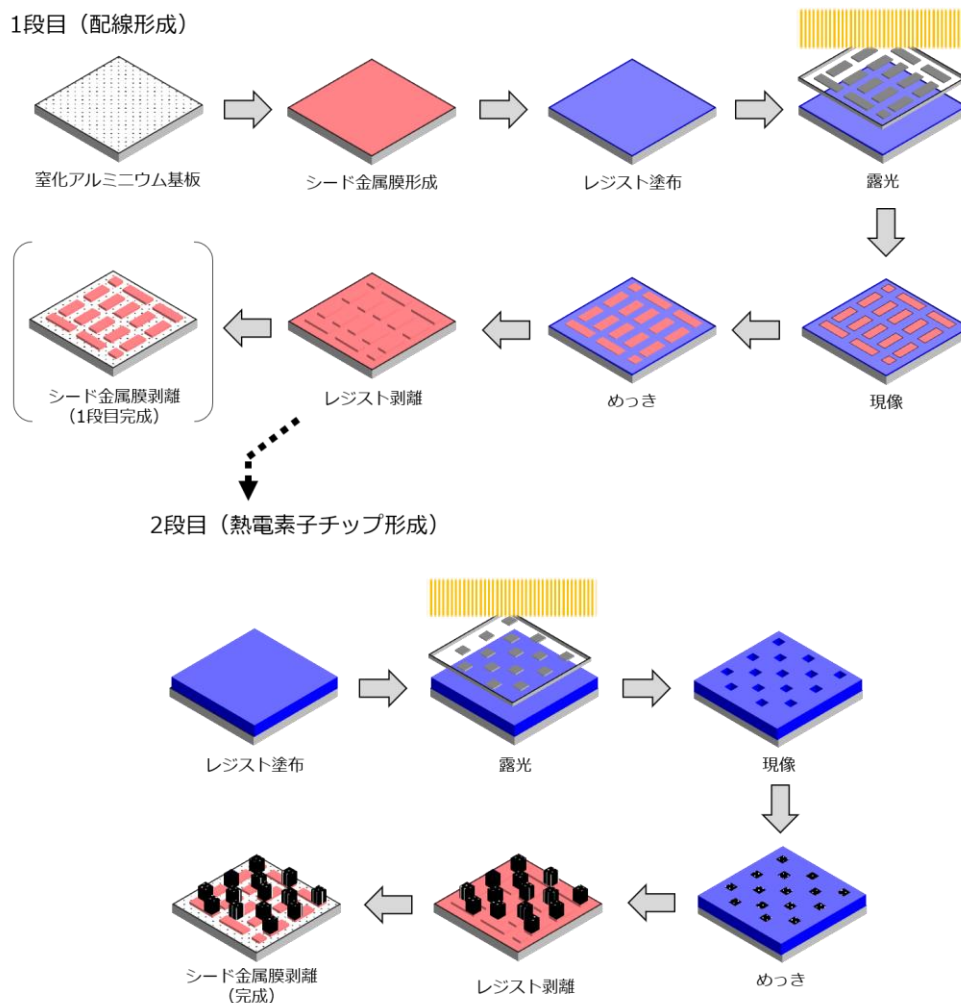
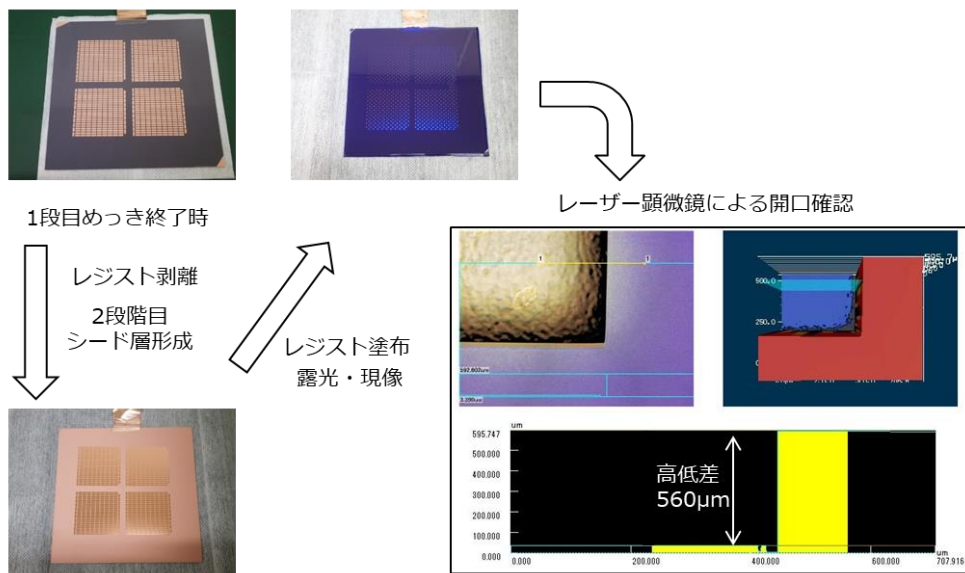


図 2-9 サブテーマ【2-2】の工程（2 段階フォトリソグラフィ法）。

高さ  $500\mu\text{m}$  という、フォトリソグラフィ法としては、かなり厚いレジスト膜を形成する必要がある。また、厚いレジスト膜を、露光によって、めっきを付けたい場所だけ開口させる必要がある。この時、いかに垂直にパターンが形成できるかが、ポイントとなる。さらに現像工程では、めっき皮膜にダメージを与えないような条件で、レジスト膜を除去する必要がある。本研究開発では、加えて、脆いめっき皮膜を扱うこととなるため、詳細な条件設定が必要になった。まずは、比較的知見の多い銅めっきで検討を進め、その後、【2-1】の進捗に合わせて、ビスマス-アンチモン-テルル系のめっきを行うこととした。

1 段階目の検討については、当社のスタンダードな条件の範囲で、問題なく配線パターンをめっきすることができた。2 段階目については、レジスト塗布方法や、露光時間、現像方法、さらには、1 段階目の、肉眼で確認できないレジスト残渣の影響も見られたため、1 段階目のレジスト除去工程に戻って条件の再検討を行った。最終的には、高さ  $560\mu\text{m}$  のレジストパターンを形成することができた。また、銅めっきで、実際にめっきが可能か検証を行い、厚さ  $500\mu\text{m}$  の銅パターンがめっきできることを確認した (図 2-10)。

### フォトリソグラフィ法2段階目の条件出し



### 銅めっきによる、2段階フォトリソグラフィ法の検証

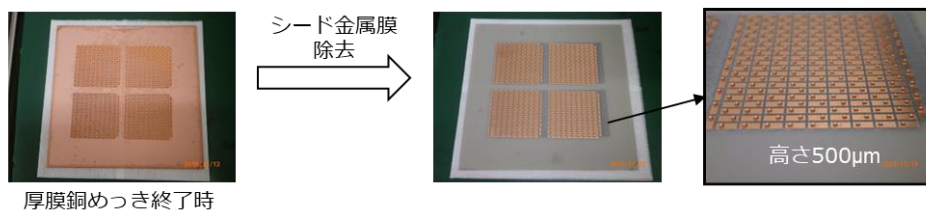


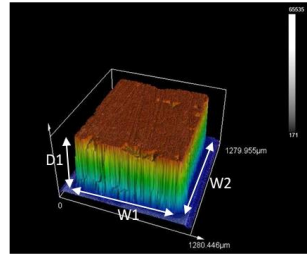
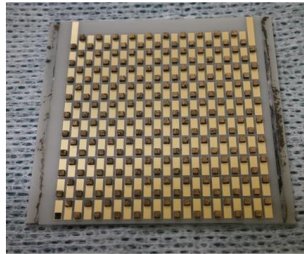
図 2-10 2 段階目 (熱電素子形成用) のレジスト形成、および、銅めっきによるパターンめっきの検証。

ビスマス-アンチモン-テルル系のめっきについては、当初は、複合めっきへのサンプル提供を行っていたが (図 2-7)、代替手法である積層めっきに移行したことに伴い (図 2-8)、積層めっきのパターン性の検討を行うこととなった。パターンのない積層めっきでは、皮膜は緻密な状態となっていたが、パターン品にめっきを行うと、皮膜が粗になる現象が見出された。そこで、工法の再検討を行ったところ、完全ではないもの、粗な状態は若干改善され

た。この皮膜をレジスト剥離すると、剥離時に、皮膜の脱落はほとんど見られず、チップ構造を維持した基板を作製することができた。また、その高さを測定したところ、目標としていた  $500\mu\text{m}$  を超える値となっていた (図 2-11)。

外観写真

チップ形状測定結果 (5個抽出)



	D1	W1	W2
1	510.8	990.4	1097.8
2	540.2	997.7	1089.5
3	529.4	995.9	1089.5
4	547.8	997.7	1098.7
5	537.4	994.1	1089.5
ave.	533.1	995.2	1093.0

図 2-11 窒化アルミニウム基板上の配線上に、積層めっきにより形成された、ピスマス-テルル前駆体と、レーザー顕微鏡を用いた形状測定図、ならびに 5 点抽出した測定結果。D1 が高さを示している。

### 【2-3】配線形成済セラミック基板上的での、前駆体焼成と、高耐熱性接合の一括プロセス法の開発

本サブテーマでは、サブテーマ【2-2】で得られた前駆体チップを、焼成して化合物化するプロセスと、基板上的前駆体チップを、反対側の基板へ接合するプロセスを統合した、一括プロセスを構築するため、まずは、粉体混錬品を用いた前駆体焼成条件の探索と、チップサンプルの接合に分けて検討を行った。

前駆体焼成条件を検討するために、ピスマス (、アンチモン)、テルルの各市販粉体を、ボールミルで解砕・混錬し、ペレット成型した後に、アルゴン雰囲気炉で焼成を行った。この時、最終的にはチップ形状で焼成することから、ペレット形状を維持する (溶融・変形しない) ことを前提条件とした。条件が最適でない状態では、断面観察を行うと、電子顕微鏡の元素マッピングで、構成元素が分相している状態が見られたが、焼成条件を修正することで、適正に化合物化が進行していることを確認した (図 2-12)。

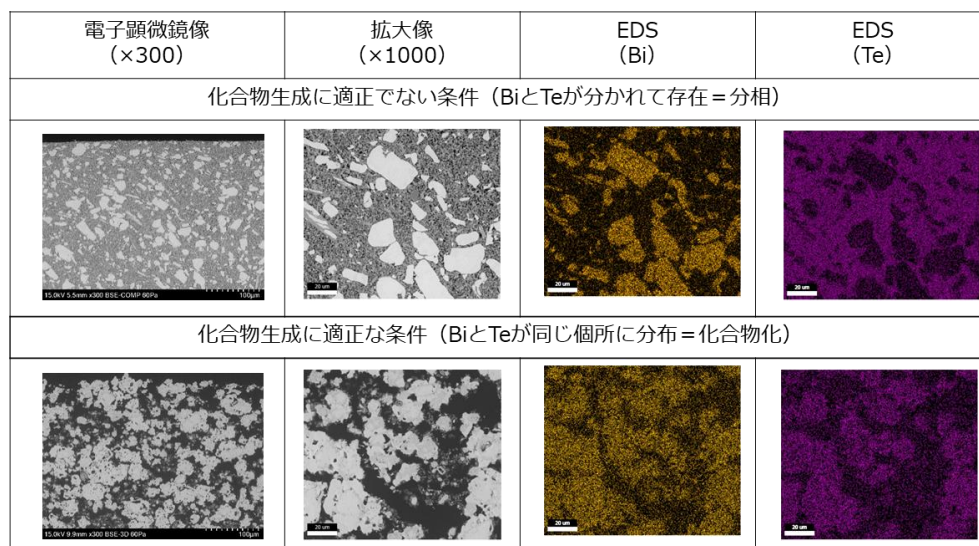


図 2-12 電子顕微鏡による、ピスマス-テルル前駆体焼成後の組成分布図。上：条件が不適切 (ピスマスとテルルが分相)、下：条件が適切 (ピスマスとテルルが同じ場所に存在 = 化合物化が進行)。

また、図 2-13 に、前駆体焼成前後のサンプル、および、市販の熱電素子を砕いて測定し

た X 線回折パターンを示す。焼成前の粉体を混錬した状態では、原料のビスマス粉、アンチモン粉 (p 型のみ)、およびテルル粉由来のピークが重畳したパターンが得られた。焼成後は、これら原料のピークが消失し、ビスマス、テルル粉からは、 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  のピークが得られた。ただし、一部、酸化物由来のピークも観察された。これは、アルゴン雰囲気焼成を行っているものの、粉体表面の酸化層や、吸着していた酸素などが、素材と反応したものである。粉体の酸化層を除去する前処理や、焼成条件をより還元雰囲気にするすることで、低減できると考えている。

一方、ビスマス、アンチモン、テルル粉からは、 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  のパターンが得られた。また、既に一部が化合物化していた。これは、アンチモンは拡散しやすい元素であるため、混錬の機械的エネルギーで、化合物化が進行したと思われる。また、 $\text{Sb}_2\text{O}_3$  のピークも観察された。こちらは、n 型同様、サンプルの還元度が足りなかったものと思われる。

次に、サブテーマ【2-1】で得られた積層めっき品の焼成を行った。未反応元素が最も少なくなる焼成条件、および繰り返し膜厚について検討を行った。単層膜、および、積層膜を焼成した膜の X 線回折パターンを図 2-14 に示す。ビスマス-テルル系、ビスマス-アンチモン-テルル系

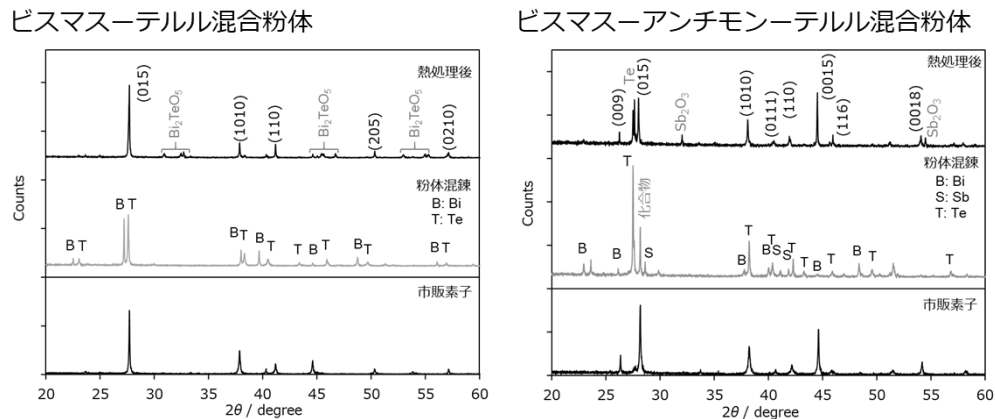


図 2-13 (左) ビスマスとテルルの粉体、および、(右) ビスマスとアンチモン、テルルの粉体を混錬して焼成した際の、焼成前後の試料の X 線回折パターンと、それぞれの市販素子の X 線回折パターン。括弧書きの数字は目的化合物の面指数を示し、粉体混錬パターンは、各構成元素の結晶由来のピークを示している。

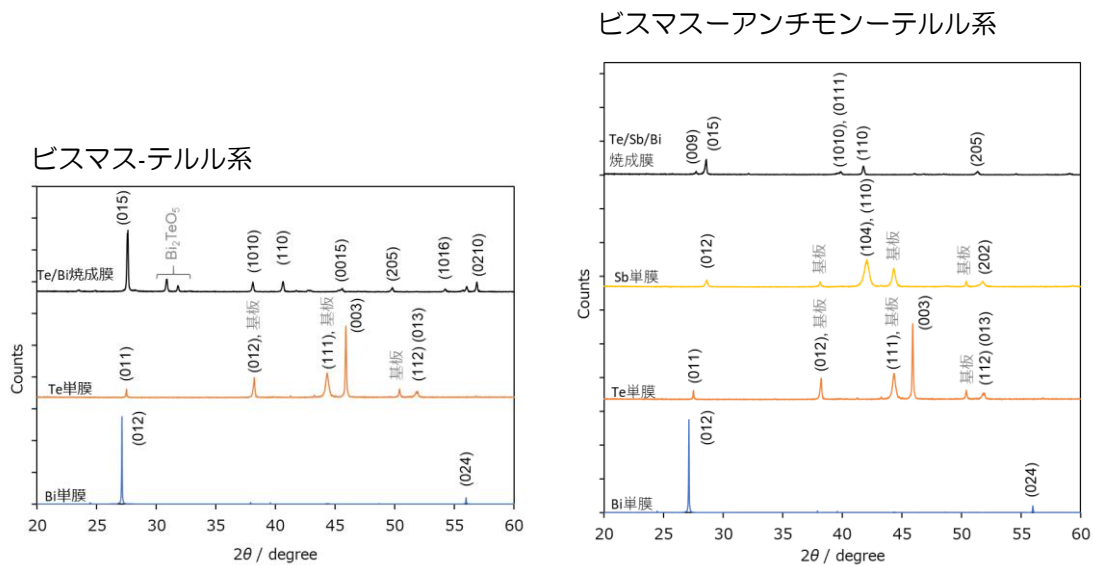


図 2-14 積層めっき品を前駆体とした場合の、焼成後の X 線回折パターン。括弧書きの数字は、結晶の面指数を示している。

チモン-テルル系いずれにおいても、ビスマス、アンチモン、テルルといった単体元素のピークは消失していた。ビスマス-アンチモン-テルル系では、 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  単相が得られた。また、図 2-13 で見られた、 $\text{Sb}_2\text{O}_3$  のピークは観察されなかった。粉体混錬サンプルと、積層皮膜では、内包する酸素量に違いがあるためと思われる。ただし、ビスマス-テルル系では、 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  が主相であったが、粉体混錬同様、一部酸化物が生成していた。今後、焼成条件を、より還元雰囲気にして、酸化物生成を抑えていく予定である。

焼成の条件としては、前駆体の大部分が、目的とした化合物となっていたので、焼成条件が確立されたとして、一旦固定とすることとした。

接合の条件検討に関しては、接合媒体の選定から開始することとした。300°Cの状態でも安定して接合状態を保てる材料として、当初はニッケルペーストを想定していたが、焼成温度や、塗布性を満たす、入手可能な媒体は見つけれなかった。そこで、代替策として、高鉛はんだを用いることとした。しかし高鉛はんだをもってしても、300°Cでは強度が落ちると予想され、目標値の達成は困難と予想された。接合に関しては、現在パワーデバイスの分野で量産適用が始まった、焼結銀接合が、有望であると考えられる。今回は、入手ができなかったが、将来的には、使用を検討していきたいと考えている。

実際に、高鉛はんだを用いて、サブテマ【2-2】で得られた、前駆体チップが配列したパターン基板 1 対 (p 型、n 型) の接合を試みたが、導通を得ることができなかった。理由としては、1. 高鉛はんだペーストがの塗布量が十分ではなく、接合チップと電気的な接合できていない。2. チップ上には、はんだ材料のチップへの拡散を防止するために、バリア金属をめっきしているが、塗布ペースト量が多すぎて、周囲から回り込み、チップ材料とはんだ材料が拡散・反応してしまい、体積収縮が起こって、導通が失われた。3. 熱処理時の基板 (窒化アルミニウム) の熱膨張と、配線金属、もしくはチップの熱膨張が合わず、チップが破壊された、などが考えられる。

今後、これらの解決を図り、熱電素子モジュールの作製を行っていく予定である。

#### 【2-4】熱電モジュールの作成と、熱電効率の測定

本研究開発で作製した熱電素子チップ単体や、その熱電素子を並べた、熱電素子モジュール、および、SiC チップと熱電素子モジュール、および冷却器を組み合わせた、【4】の成果物など、これら全てのサンプル形態に対応した測定システムを構築し、実際に測定を行った。アドバイザーの指導の下、断熱のための真空チャンバーや、マルチメーターなどを用いて、サンプルを真空下に設置し、一方を電気ヒーターで加熱し、もう一方を水冷冷却ブロックで冷却しながら、電流-電圧 (電力-電圧) 曲線を描き、その最大値を熱電変換による最大出力とし、その値を、ヒーターに印加した電力で割ることで、簡易的に、熱電変換効率を求めることとした。

市販の熱電素子チップで測定を行ったところ、電流-電圧曲線が得られ、その値は、一般的に知られている値と、そこまで大きなずれは見られなかった。従って、セットアップとしては正常と判断して、条件出しとして作製した熱電素子 1 チップの測定を行ったが、非常に低い変換効率しか得られなかった。おそらく、【2-3】の焼成条件の最適化がされておらず、 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 、 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  の、熱電素子となり得る結晶相にはなっているものの、結晶方位や結晶性が、熱電素子としては不相当であるからと思われる。また、サブテマ【2-2】で作製した、p 型、n 型それぞれのパターン基板 1 対を接合した熱電素子モジュールの測定も行ったものの、サブテマ【2-3】に記したように、導通が取れておらず、測定することはできなかった。

補助期間終了後も、【2-2】の膜質改善、ならびに、【2-3】の焼成・接合の検討を継続し、熱電素子チップ、およびモジュールの測定を実施していくものとする。

### 【3】 めっきによる、微細構造を有する水冷冷却器の形成

パワーモジュールの冷却技術は、半導体であるパワーデバイスを、安定した温度で動作させるために、重要な技術である。当社では、平成 26、27 年度のサポイン事業において、めっき技術を用いた、空冷冷却フィンの作製を行った。しかし、特に車載向けの、小型化、高密度化したパワーモジュールでは、高効率なパッケージと高性能を両立させるために、現在は水冷が主流となっている。そこで今回は、当社のめっき技術を用いて、高放熱性の、銅製の水冷冷却器を作製することとした。具体的数値として、280℃の温度印加下で、20℃以下の冷却能力を有することとし、シミュレーションによる構造決定の後、めっきを行い、冷却器を組み上げ、通水試験・冷却試験を行うこととした。

まず、熱流体解析によるシミュレーションによって、四角形の冷却空間の、二次元構造を決定した。その結果を図 2-15 に示す。冷却媒体の赤色の領域が広い方が、より熱交換が進んでおり、冷却効率が高いことを示している。従来多くみられる、くし歯型の流路を持つ構造（上段左、中）よりも、柱が等間隔に設置されていて、その間を通水する構造の方（上段右）が、効率よく冷却できることがわかった。ただし、入口・出口を対角線に配置した構造では、流速が、対角線を結ぶ線上に集中し、入口・出口のない四隅付近に流速がないために、このエリアでの冷却性能が、十分に得られていなかった。そこで、冷却水の入口・出口を、四角形の頂点から辺の中央に移した上で、面全体で流速が均一化され、効率的に冷却するために、入口・出口付近に、三角形の整流構造を設けることとした。その結果、流速が面内に広く分布し、最初のくし歯構造と比較して、26%の冷却効率アップが見込める結果となった。そこで、本構造を最適構造として、構造体を作製することとした。

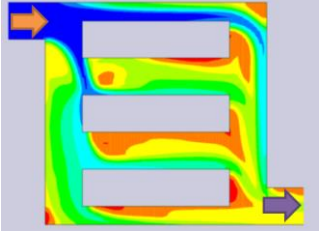
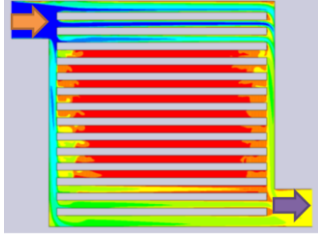
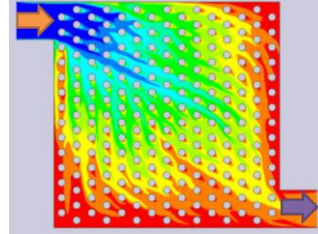
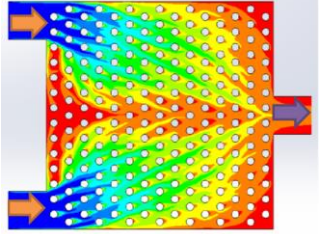
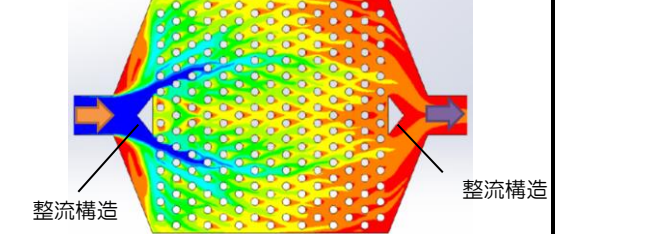
冷却器 構造 及び 流体温度 分布			
吸熱量 比	100% (基準)	99.9%	121.6%
冷却器 構造 及び 流体温度 分布			
吸熱量 比	121.9%	126.1% (採用)	

図 2-15 各冷却器平面構造に対する、冷却器シミュレーション結果。矢印は、冷却媒体の流れを示している。青～赤の色付けされた部分は、冷却器の、冷却媒体の流れる空間を示し、その色は、冷却流体の温度分布を示している（青：低温、赤：高温）。また、下段の数値は、左端の構造体を基準とした吸熱量を示す。

得られた構造を、フォトリソグラフィ法を用いて、めっきで作製することとした。タテ・ヨコ 4cm の平面構造を持ち、タテ方向は、高さ 1mm の、水を流す空間を作ることとした。この際、一方の面に高さ 1 mm の構造体をめっきで作製することは、フォトリソグラフィ法では困難であることがわかり、高さ 500μm の構造体を 2 枚作製して、貼り合わせるこ

ととした。フォトリソグラフィの工程は、サブテーマ【2-2】で得た条件を元に行った。作製した 2 枚の構造体を、互いに向かい合うようにはんだ接合し、その後、給排水ポートを接合することで、冷却器を作製した（図 2-16）。得られた冷却器に水を通して、漏れは見られなかった。また、片面にヒーターを設置して、冷却試験を行ったところ、280℃の温度印加下で、20℃以下の冷却能力を有することを確認したので、本サブテーマは目標達成とした（図 2-17）。

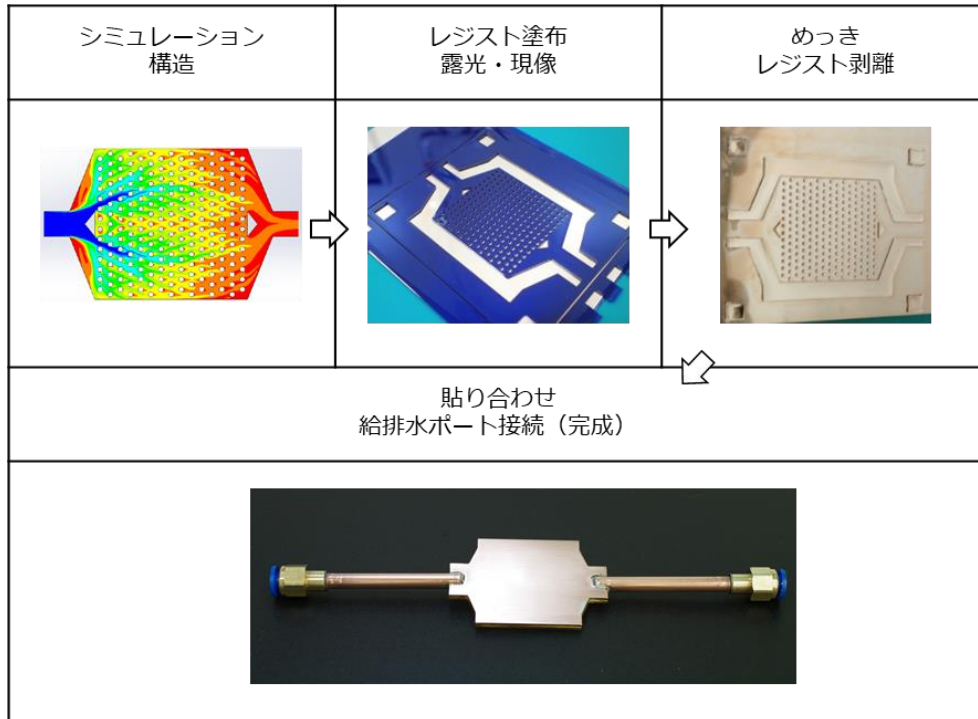


図 2-16 冷却器作製スキーム。

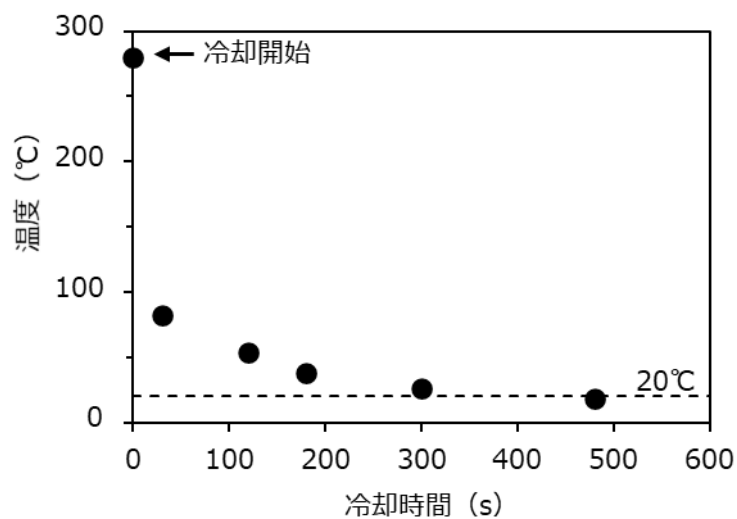


図 2-17 冷却試験結果。

#### 【4】 排熱回収機構を備えた次世代パワーモジュール構造の作成と実証評価

サブテーマ【1】～【3】の成果物を組み合わせて、疑似パワーモジュールを作製し、そのモジュールの発電効率が、目標を達成することを目標とした。しかし、サブテーマ【2】が未達であることから、発電効率の測定は困難となった。そこで、サブテーマ【2】で、パターンめっき、および接合兼焼成は行ったものの、導通が取れなかった、熱電素子構造体を用いて、疑似パワーモジュールの模型を作製した（図 2-18）。この形が、本研究開発で目標としていた形である。現在は、熱電変換性能を有していないが、サブテーマ【2】については、引き続き開発を行う予定で、熱電変換性能を有する熱電素子モジュールができた後に、該当部を差し替えて、評価試験を行うと共に、本来の成果物とする予定である。

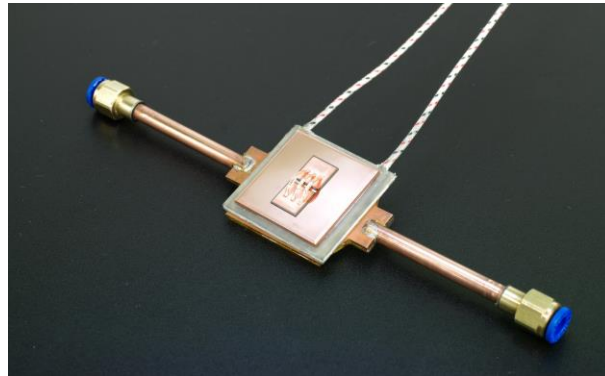


図 2-18 疑似パワーモジュール模型（熱電素子モジュール部分は未完成のため、当該部は、サブテーマ【2-3】にて導通不良だったモジュールサンプルを使用）。

## 最終章 全体総括

本研究開発では、熱電素子を組み込んだ高効率 SiC パワーモジュールを開発し、パワーデバイス分野における、一つの高効率化手法の実証例とすることを目標とし、4つの研究テーマに沿って、研究開発を推進した。その結果、以下の成果を得ることに成功した。

- ・ SiC パワーデバイスを模した、アルミニウムスパッタを施した SiC ウエハ上に、300℃でもクラックを生じない無電解ニッケル-低リン皮膜の成膜に成功した。また、量産を見据えて、8 インチ SiC ウエハでも、同等の皮膜が、分布よく製膜できることを確認した。今後、SiC ウエハの大口径化にも対応可能であると考えている。
- ・ SiC パワーデバイスを模した、アルミニウムスパッタを施した SiC ウエハに、銅ワイヤーボンディング可能な、無電解銅めっき皮膜の成膜に成功した。
- ・ 均一被覆されており、かつ、凝集のない、ビスマスコートテルル（アンチモン）粉の開発に成功した。
- ・ 複合めっき法の代替手法として、湿式めっきによる、ビスマス/アンチモン/テルルの積層めっき皮膜を製膜し、熱電素子前駆体を形成した。
- ・ レジスト高さ 500 $\mu$ m 以上のパターンめっきを行い、熱電素子前駆体のチップを、直接形成することに成功した。
- ・ 片面 500 $\mu$ m の銅構造体を作製し、貼り合わせることで、水冷冷却器を作製した。冷却試験において、所定の冷却能力を示すことを確認した。

### 1 目標達成状況

本研究開発で掲げた目標の達成状況は、以下の通りである。サブテーマ【1】、【3】は達成しているが、サブテーマ【2】については、未達項目があり、課題を残しており、そのため、サブテーマ【4】も達成できていない状況である（表 3-1）。

表 3-1 各項目の、目標達成状況。

研究項目	実施結果
【1-1】量産適用可能な無電解ニッケル-低リンめっき皮膜の開発	目標値達成
【1-2】無電解銅めっき皮膜適用のためのめっき技術開発	目標値達成
【2-1】ビスマスコートテルル粉体の開発、およびそれを用いたビスマス複合めっきの確立	粉体めっき：達成 複合めっき：代替法（積層めっき）により達成
【2-2】ビスマステルル熱電素子前駆体のパターンめっき	目標値達成
【2-3】配線形成済セラミック基板上での、前駆体焼成と、高耐熱性接合の一括プロセス法の開発	焼成プロセス：確立（達成） 接合方法：課題があり、未達
【2-4】熱電モジュールの作成と、熱電効率の測定	【2-3】未達が原因で、未達
【3】めっきによる、微細構造を有する水冷冷却器の形成	目標値達成
【4】排熱回収機構を備えた次世代パワーモジュール構造の作成と実証評価	【2】に未達項目があるため、未達（目標値達成品を用いた完成モデルは作製）

### 2 残課題の克服

未達となった、サブテーマ【2】、【4】に関しては、補助事業終了後も、残課題の克服について、次年度での終了を目途に、検討計画を立案している。また、知的財産権取得のため

の、補助データ取得についても、継続して行っていくとともに、並行して、当社が普段から依頼している弁理士と、取得戦略に関しての打ち合わせも進めており、次年度での取得を目指している。

### 3 事業化展開並びに成果展開

#### 事業化展開

HV（ハイブリッド自動車）や PHV（プラグインハイブリッド自動車）、BEV（バッテリー駆動電気自動車）といった電動車の市場規模は拡大しており、自動車メーカーも、電動車へのシフトを強めている。富士経済の 2019 年版 HEV、EV 関連市場徹底分析調査によれば、2035 年には、2018 年と比較して、HV は 3.4 倍、PHV は 17.8 倍、BEV は 16.9 倍の世界市場の伸びが期待される。また、他の調査会社の結果も、これら電動車の生産は、順調に伸びていくことを示している。さらに 2020 年度には、「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が発表され、2030 年代半ばまでに、自動車について、100%電動車とする方針が明らかにされた。そのような世界情勢の中で、高効率なパワーデバイスへのニーズは、増々拡大していくものと思われる。

また、熱電素子は、本来捨てていた廃熱を、電力として取り出す方法として、近年注目を浴びている。2020 年度末には、排気ガスを利用する、車載向け熱電発電モジュールが発表されるなど、自動車以外の業界でも、カーボンニュートラルの一手段として、導入に向けた検討が加速している。

そういった中で、本研究開発の成果となり得る、熱電素子付きパワーモジュールは、有望な可能性の一つとして、位置付けられると考えている。特に SiC パワーデバイスは、高効率なパワーデバイスとして、今後も規模が拡大していく分野とされており、市場の拡大が期待される。

実際の事業化に際して、モジュール全体の製造・販売については、現行取引のあるパワーデバイスメーカーへ委託し、めっき加工業である当社は、めっき加工についてのみ行うことを想定している。また、熱電素子についても、製造については、ライセンス付与という形で委託し、めっき加工について当社で実施する予定である。そのために、現在、本研究開発を通して得た結果を元に、知的財産権の取得を目指して、継続検討を行っている（図 3-1）。

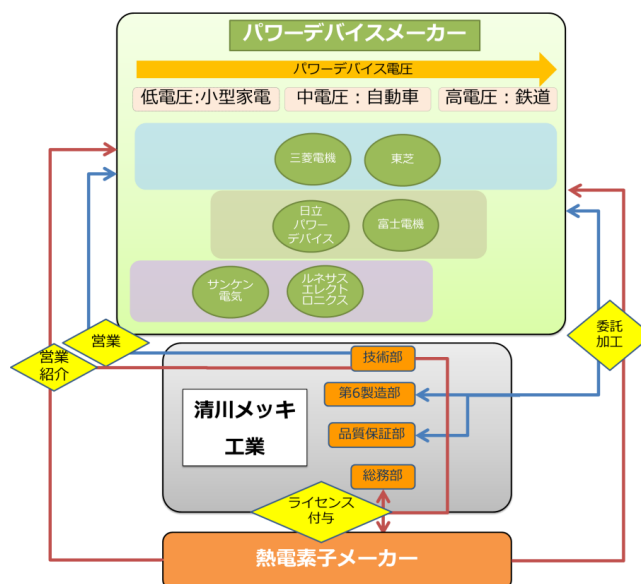


図 3-1 事業化スキーム。

## 成果展開

サブテーマ【1】の無電解ニッケル-低リンめっき技術、および無電解銅めっき技術については、具体的な量産計画に基づいた試作依頼が来ており、テーマ全体の成果物であるモジュールや、他のサブテーマの成果物に先んじて、量産化の検討を進めている。