

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「次世代パワー半導体のための金属微粉末を用いた
低温焼結接合技術と製造装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成27年 3月

委託者 関東経済産業局

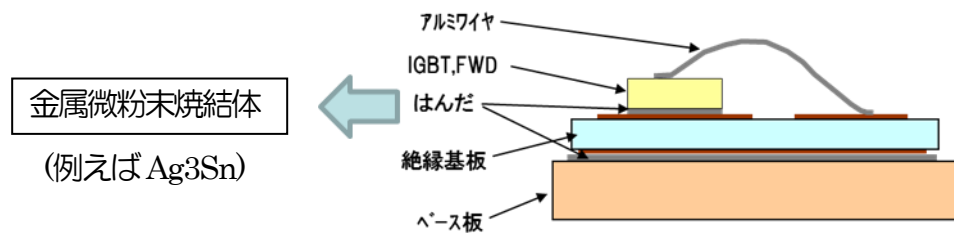
委託先 アルファードesign株式会社

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1-1 研究開発の背景	2
1-1-2 研究目的	3
1-1-3 研究目標	3
1-2 研究体制	5
1-3 成果概要	9
1-4 当該研究開発の連絡窓口	10
第2章 本論	11
2-1 シングル加圧・加熱装置の開発と Ag・Sn 微粉末ペーストの焼結条件の検討及び 簡易信頼性評価の検討	11
2-2 マルチチップ接合装置の開発とフィルムを用いた焼結条件の検討	19
2-3 可搬加圧・加熱ユニットの開発と焼結条件の検討	26
2-4 最適プロセスデザインの検討	31
2-5 特許出願	33
第3章 全体総括	34
用語の解説	36

第1章 研究開発の概要

本研究開発では、ミクロンサイズの銀・錫等の金属微粉末ペーストに圧力と温度を加えながら焼結することにより、従来はんだ接続よりも耐熱性・信頼性の高い Ag_3Sn 合金の焼結体による接続技術確立する。具体的には、パワー半導体(IGBT, FWD 等)の接続材料をはんだに代えて銀、錫等の金属微粉末の焼結体を使用する。例えば、銀：錫＝3：1 の比率の金属ペーストは、焼結後は Ag_3Sn の IMC(inter-metallic-compound)となる。 Ag_3Sn の融点は約 480°C であり、狙いとする動作温度では、液相を生じることがない。 Ag_3Sn の熱伝導率は、約 $70\text{W/m}\cdot\text{K}$ であり、はんだの約 $60\text{W/m}\cdot\text{K}$ より高い。



従来このペーストを焼結させ、IMC とするためには Sn の融点以上の温度で長時間加熱し、Sn を拡散させ Ag と合金化することが必要であった。

本研究開発の接合方法の具体的なプロセスは、まず基板の電極に Ag・Sn 微粉末ペーストを印刷する。次に、半導体チップを搭載してペーストの溶剤を揮発させて、ペーストを仮焼結させる。その後、チップに圧力(数 MPa)を加えながら、加熱することにより、Sn 粉末を溶融させると共に Ag 粉末に急激な動きを生じさせ、合金化を短時間に行う動的焼結であることを特徴とする。

従来の接合方法が、チップをピックアップしてはんだや導電性接着剤に載せ、温度を加えてはんだを溶融させて接合する「ピックアップアンドプレース」の手法であるのに対して、本研究の手法は、温度と圧力を加えながら、数分から数10分の時間をかけ、IMC を生成させ接合する新規なバッチ処理の手法である。焼結接合条件評価のための温度と圧力を所定の時間加えることができる条件設定用のシングルヘッドの加圧・加熱装置の製作を行うとともに、マルチチップ対応の均一加圧・加熱接合装置の開発を行い、Ag と Sn の混合微粉末の最適な粉末組成と焼結条件を調査した。

研究開発内容は、以下通りである。

- ①シングル加圧・加熱装置の開発と Ag・Sn 微粉末ペーストの焼結条件の検討と簡易信頼評価の検討
- ②マルチチップ接合装置の開発とフィルムを用いた焼結条件の検討
- ③可搬加圧・加熱装置の開発と焼結条件の検討
- ④最適プロセスデザインの検討
- ⑤プロジェクトの管理・運営

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

これまでパワー半導体の市場は産業用途が主であったが、近年の環境意識の高まりと化石エネルギーの高騰の影響もあり、ハイブリッド自動車や電気自動車の制御に使用される市場の大きな成長が見込まれている。更に、太陽光発電、小規模マイクロ発電等の再生エネルギー活用の機運の高まりにより、今後様々な電力制御用途のパワー半導体が必要となると予想されている。

パワー半導体・モジュールにおける接合技術は異種材料間をつなぐ要であり、電気的接続は勿論、機械的、熱的疲労にも優れ、長期間の使用に耐えることが求められる。現在、パワー半導体ではSi デバイスが主流であるが、SiC や GaN などワイドバンドギャップを有する次世代パワー半導体では、従来の Si 半導体に比べて、(1) 耐圧が高い、(2) 高温で動作する、(3) 電流密度を大きくできる、(4) スイッチングが高速である、(5) オン抵抗が小さい、など多くの優れた性能を有している。

搭載容量制約のあるハイブリッド自動車や電気自動車では高温化が重要なアイテムである。次世代パワー半導体の高温動作としては、200～250℃の動作温度が期待されている。そして、この温度領域では、従来の Pb フリーはんだ (SnAg 系) を用いた接合技術では、高い接続信頼性を得ることが難しいことが明らかになって来ている。

再生エネルギー分野においても、運転効率を上げるため次世代パワー半導体を使用する機運が高まっている。太陽光や地熱等、厳しい温度環境下で用いられる再生エネルギー発電では、運転効率だけでなく接続信頼性の高い新たな高耐熱接合技術の確立が必要となると予想される。

高温耐熱性に優れた新たな鉛フリーのはんだとして、SnZn 系、SnSb 系等の評価が始まっているが、200～250℃の動作温度に耐えられる決定的な材料は見つかっていない。また、近年銀ナノ粒子を低温で焼結させて、はんだに代えてパワー半導体のダイアタッチに応用する試みが多く行われているが、材料が高価で取り扱い難い、厚膜化が難い、接着強度にむらがある等の技術的課題がまだ解決されていない。

1-1-2 研究目的

本研究開発の目的は、従来のSi系半導体に比べてより高温の200～250℃で動作するSiCやGaN等の次世代パワー半導体のための、高耐熱で信頼性の高い接合技術と接合装置技術を確立することにある。上記の温度領域では、従来のPbフリーの溶融はんだ(SnAg系)を用いた接合技術では、高温時に熱歪や金属間化合物に起因する損傷を生成するため、良好な電気伝導性と熱伝導性を得ることが難しくなる。

本研究は、ミクロンサイズの銀・錫等の金属微粉末ペーストに圧力と温度を加えながら焼結することにより、従来はんだ接続よりも耐熱性・信頼性の高いAg₃Sn合金の焼結体による接続技術を確立することを目指す。

1-1-3 研究目標

電子部品・デバイスの実装に係る技術において達成すべき高度化目標として、次世代パワー半導体の高温動作時に接合部が劣化しない接合技術の確立と製造装置の開発を目標とする。具体的には、ミクロンサイズの銀、錫等の金属微粉末ペーストに圧力と温度を加えながら焼結することにより、耐熱性・信頼性の高い接続技術とその技術を実現する製造装置の確立を行うものとする。

研究開発の内容および結果は以下のとおりとする。

①シングル加圧・加熱装置の開発とAg・Sn微粉末ペーストの焼結条件の検討及び簡易信頼性評価の検討

焼結温度・時間・加圧力等を容易に設定可能なシングル加圧・加熱装置の開発を行い、Z方向の変位を精密に測定するシステムと、実験の再現性を高めるワーク自動供給ユニットを追加した。

また、AgとSnの混合微粉末の最適な粉末組成と焼結条件を調査し、ダイシェア試験にて40MPa以上の接合強度を満足することができ、断面をSEM・EDXにて分析を行った。しかしながら、信頼性試験までは実施に至らなかった。

②マルチチップ接合装置の開発とフィルムを用いた焼結条件の検討

生産性を上げるために、4ヘッド同時に加圧・加熱可能な多ヘッド加圧・加熱装置を開発し、また、複数のチップを一括に接合が可能なマルチチップ接合装置の開発を行った。また、接合時の金属微粉末等の動きをリアルタイムで観察可能な、観察ユニットを追加した。

複数のチップを一括で接合するためにチップどうしの高さバラツキと、ステージヘッド間の平行度のバラツキを吸収するために、凹凸吸収フィルムの検討も実施した。

③可搬加圧・加熱ユニットの開発と焼結条件の検討

数10分の加圧・加熱による焼結を想定し、高温化環境において所定の圧力をデバイスに印加続けられる、可搬可能でコンパクトな治具を開発した。これは複数デバイスを

セットしたユニットをリフロー炉に複数入れ、加熱して所定の圧力を印加して複数のチップの焼結を行うものである。

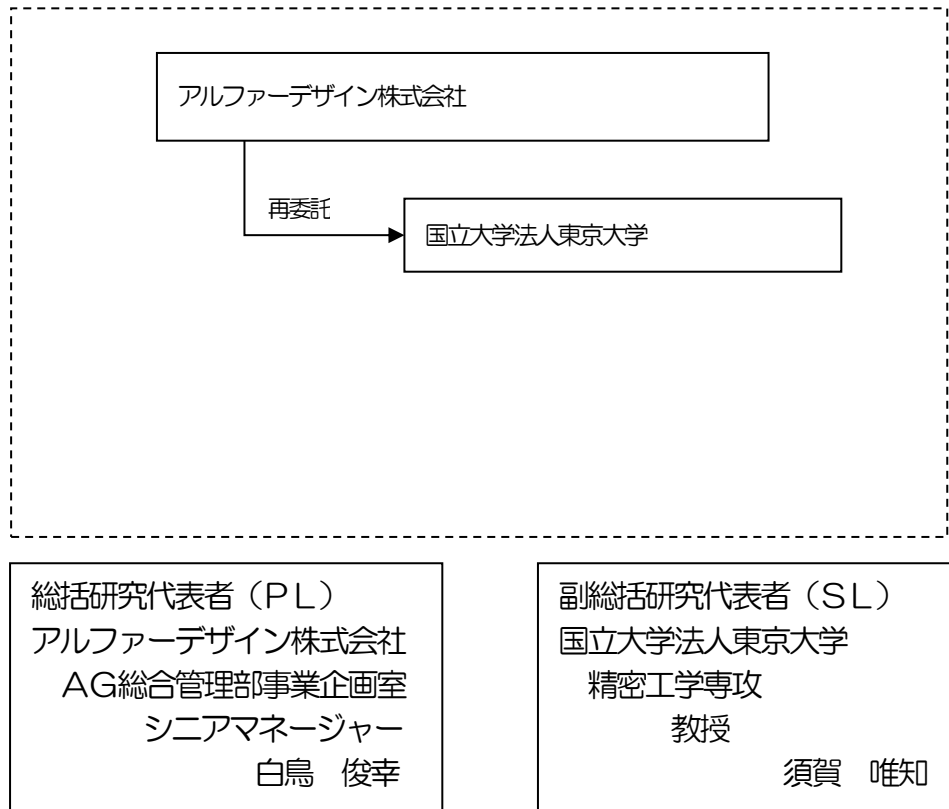
④最適プロセスデザインの検討

本開発の結果である、動的な焼結プロセス・静的な焼結システムについてそれぞれ量産性を考慮した生産プロセスを検討した。

⑤プロジェクトの管理・運営

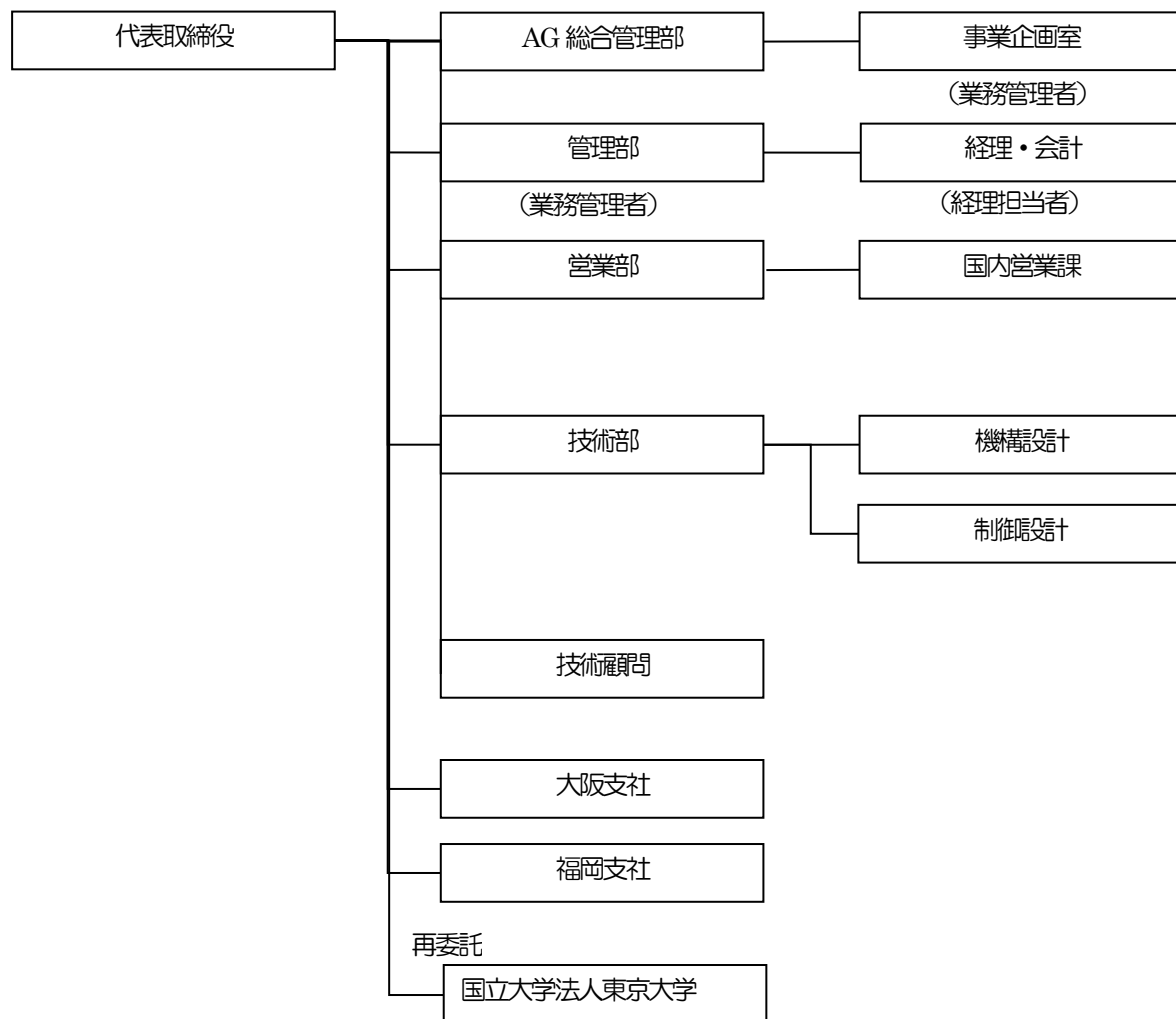
1－2 研究体制

1－2－1 研究組織

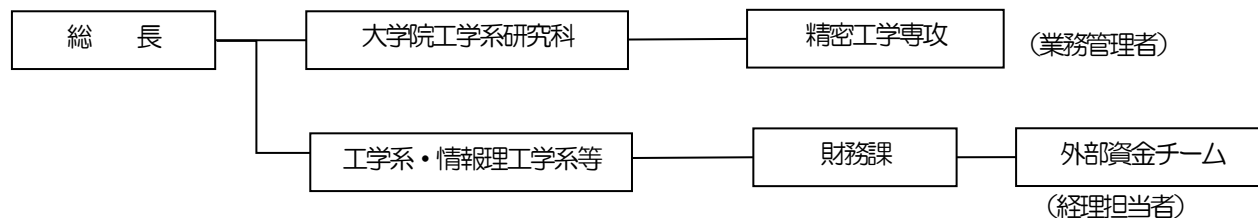


1－2－2 研究管理体制

[事業管理機関：アルファードesign株式会社]



[再委託先：国立大学法人東京大学]



1-2-3 監理員及び研究者氏名

【事業管理機関】 アルファードesign株式会社

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
白鳥 俊幸	AG総合管理部事業企画室 シニアマネージャー	⑤

② 研究員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
白鳥 俊幸 (再)	AG総合管理部事業企画室 シニアマネージャー	①②③④
川崎 亨	技術部機構設計 マネージャー	①②③④
伊藤 幸雄	技術部機構設計	①②③④
柳沢 知治	技術部機構設計	①②③④
伊達 政秀	技術部機構設計	①②③④
南屋 正	技術部制御設計	①②③④
森田 直樹	技術部制御設計	①②③④
荻原 章	技術部制御設計	①②③④
久保田 淳一	営業部国内営業課 マネージャー	①②③④
森澤 正良	代表取締役会長	①②③④
千葉 昇	代表取締役社長	①②③④
水越 正孝	技術顧問	①②③④

【再委託先】

(研究員)

国立大学法人東京大学

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
須賀 唯知	大学院工学系研究科 情報工学専攻 教授	①②④

1－2－4 協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
白鳥 俊幸	アルファードデザイン株式会社 AG総合管理部事業企画室 シニアマネージャー	委 PL
須賀 唯知	国立大学法人東京大学 大学院工学系研究科 精密工学専攻 教授	SL
近藤 宏司	株式会社デンソー 生産技術部 技術課長	アドバイザー
高橋 良和	電子実装工学研究所	アドバイザー
池田 良成	富士電機株式会社 技術開発部 電子デバイス研 究所 次世代モジュール開発センター マネー ジャー	アドバイザー
西田 秀行	NEP Tech S&S 代表取締役社長	アドバイザー
水越 正孝	アルファードデザイン株式会社 技術顧問	
川崎 亨	アルファードデザイン株式会社 技術部機構設計 マネージャー	委
久保田 淳一	アルファードデザイン株式会社 営業部国内営業課 マネージャー	委
森澤 正良	アルファードデザイン株式会社 代表取締役会長	
千葉 昇	アルファードデザイン株式会社 代表取締役社長	

1-3 成果概要

① シングル加圧・加熱装置の開発と Ag・Sn 微粉末ペーストの焼結条件の検討及び簡易信頼性評価の検討

①-1 シングル加圧加熱装置の開発

Ag・Sn 微粉末ペーストの焼結接合条件を容易に設定・実現可能な、シングル加圧・加熱装置の開発、製造を行った。また、焼結時のヘッドの Z 方向の変位の測定を加圧対象物から離れた位置で測定していたことから、温度変化により構成部材の伸縮の影響を除外する目的で、加圧部近傍で Z 方向の変位を測定・制御するユニットを追加した。

また、焼結実験を行う際に重要なパラメータである、デバイスをステージに搭載後のヘッドによる加圧・加熱タイミングの再現性を増すために、デバイスの自動セットユニットを追加した。

①-2 Ag・Sn 微粉末ペースト候補の検討

アドバイザーである株式会社デンソーの標準的組成のペーストについて、ガラス基板を用いて加圧・加熱時のペーストの厚さ変化や組織の状態について調査した。その結果をもとに 8 種類のペーストを決定した。

①-3 ディスペンサーを用いたペースト塗布での焼結条件の検討

焼結条件においては、先に圧力を加え次に温度を印加する条件が、ダイシェア強度に優れていることを見出した。更に温度の立ち上がりを急峻とすることにより、Sn 粉末を溶融させると共に Ag 粉末に急激な動きを生じさせ、合金化を短時間で行う動的焼結が行われている。

ディスペンサーによるペーストの塗布は、塗布厚み・量のばらつきが少なからずあり、定量的な評価結果を取得しづらかった。

①-4 ペーストの印刷による焼結条件の検討

ペーストの塗布を印刷に変更し、焼結条件の見直しとダイシェア試験の評価及び SEM/EDX による接合界面の合金形成や破断モードの調査を行った。

焼結温度は 230℃～300℃、加圧力は 5MPa として評価を行い、ダイシェア試験で Ag、Sn それぞれの含有量が 50% のペーストが 40MPa 以上の結果を満足することが確認できた。その配合の焼結体の断面は、Cu 基板と AgSn 焼結体の界面は Cu_3Sn が形成され、焼結体は Sn が均一に分散されていることがわかった。

② マルチチップ接合装置の開発とフィルムを用いた焼結条件の検討

②-1 油圧式 4 ヘッド加圧・加熱装置の開発

生産性を上げるために、4 ヘッドを同時に加圧・加熱可能な装置を開発した。安価で安定した加圧力を得るために、エアハイドロブースターを用いた油圧式とした。

②-2 マルチチップ対応加圧・加熱装置の開発

複数のチップを一括で焼結接合が可能な、大型ステージとヘッドによるマルチチップ対応加圧・加熱装置を開発した。

また、接合時の金属微粉末の動きをリアルタイムで観察が可能なユニットを構成し接合時の動画の撮影を行った。

②-3 凹凸吸収フィルムの検討

複数のチップを大型ヘッドで一括に接合するため、チップどうしの高さバラツキ・ヘッドとステージの平行度のバラツキ等を吸収できる、凹凸吸収フィルムの検討を行った。

③可搬加圧・加熱ユニットの開発と焼結条件の検討

③-1 可搬加圧・加熱ユニットの開発

数10分の加圧・加熱による焼結を想定し、高温化環境において所定の圧力をデバイスに印加し続けられる、可搬可能でコンパクトなユニットを開発した。これは複数デバイスをセットした装置をリフロー炉に複数入れ、加熱しながら所定の圧力を印加して複数チップの焼結を行うものである。

装置内の耐熱oilの熱膨張により、焼結温度になる前に要求加圧力を超えてしまったため、内部oilを逃がし圧力を調整可能な構造に改造を行った。

④最適プロセスデザインの検討

④-1 動的焼結条件によるマルチチップ一括接合プロセスの検討

生産性を向上させるために、複数のヘッドで焼結接合を行える装置の構想設計を行った。また、凹凸吸収フィルムを用いて、複数のチップを一括で焼結接合を行うギャングボンディング装置の構想設計を行った。

④-2 静的焼結条件による量産生産プロセスの検討

数10分のプロセス時間がかかる静的焼結での生産性を上げるために、可搬加圧・加熱ユニットを用いた量産生産プロセスを検討し、特許の出願及び米国での権利化が完了した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

アルファードesign株式会社 TEL : 0268-64-0088 FAX : 0268-64-0080

AG 総合管理部事業企画室 シニアマネージャー 白鳥 俊幸

E-mail : t-shiratori@alpha-design.co.jp

第2章 本論

2-1 シングル加圧・加熱装置の開発と Ag・Sn 微粉末ペーストの焼結条件の検討及び簡易信頼性評価の検討

2-1-1 シングル加圧加熱装置の開発

(1) 装置本体

Ag・Sn 微粉末ペーストの焼結条件を容易に設定・実現可能な、加圧・加熱装置を製作した (図1 加圧・加熱装置)。

《装置スペック》

- ・加圧力 : 10N~1000N
- ・ヘッド温度 : RT~300℃ (パルスヒート 450℃)
- ・ステージ温度 : RT~300℃ (パルスヒート 450℃)
- ・ステージサイズ : □30x30mm
- ・ヘッド・ステージ間の平行度自動制御システム

(加圧ヘッドに力センサを3点配置し、ヘッドに設けた自動ゴニオステージにて自動調整)



図1 加圧・加熱装置

(2) Z 変位測定システム

焼結接合時のヘッドのZ方向の変位の測定が、レーザー変位計にて加圧対象物から離れた位置で測定していたことから、温度変化により各構成部材の伸縮の影響を除外する目的で、加圧部近傍でZ方向の変位を測定・制御するユニットを追加した(図2 Z変位測定システム)。

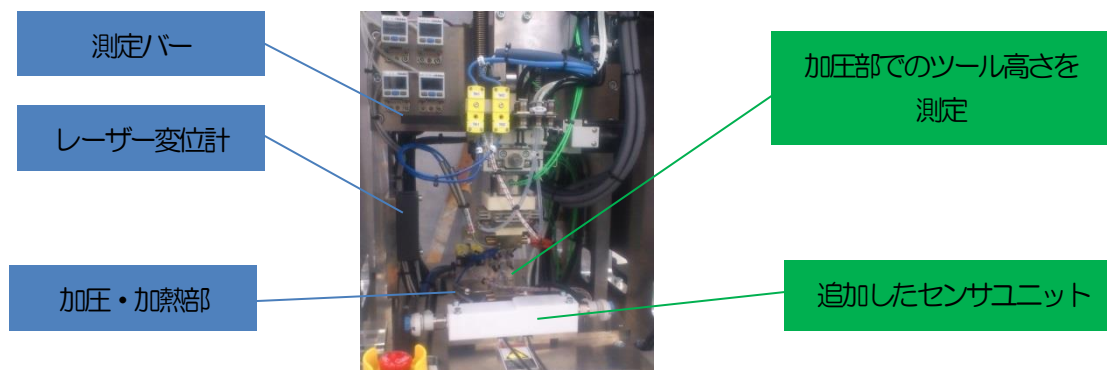


図2 Z変位測定システム

(3) 自動セットユニット

デバイスをステージに搭載後、ヘッドによる加圧・加熱のタイミングのバラツキをなくし実験の再現性を増すために、デバイスの自動セットユニットを追加した(図3 自動セットユニット)。



図3 自動セットユニット

2-1-2 Ag・Sn 微粉末ペースト候補の検討

アドバイザーである株式会社デンソーの標準組成のペーストについて、ガラス基板を用いて加圧・加熱時のペーストの厚さ変化や組成の状態について調査した。その結果をもとに8種類のペーストを決定した(表1 ペースト一覧)

No.	Ag 粉 製法	Sn 粉 製法	Ag%	Ag 粉 サイズ	Sn 粉 サイズ	備考
1	還元法	アトマイズ	65%	$\phi 0.3\mu\text{m}$	$>\phi 2\mu\text{m}$	Std
2	〃	〃	70%	〃	〃	
3	〃	〃	80%	〃	〃	
4	〃	〃	100%	〃	〃	
5	アトマイズ	〃	65%	$>\phi 2\mu\text{m}$	〃	
6	〃	〃	70%	〃	〃	
7	〃	〃	80%	〃	〃	
8	〃	〃	100%	〃	〃	

表1 ペースト一覧

2-1-3 ディスペンサーを用いたペースト塗布での焼結条件の検討

(1) 焼結プロファイルとシエア強度の検討

製作した加圧・加熱装置を用い、図3のように銅の基板にAgSnペーストをディスペンサーにて塗布し、圧力と温度を加え焼結した。焼結後、Siチップのダイシエア強度を測定した(図4,5)。

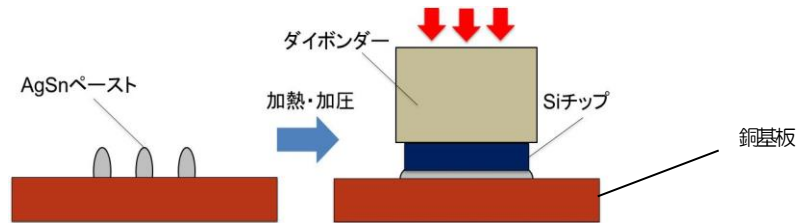


図3 焼結方法

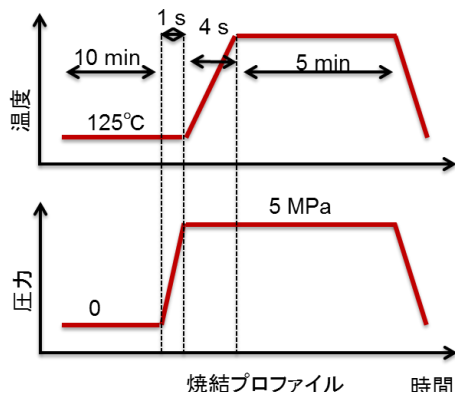


図4 圧力と温度のプロファイル

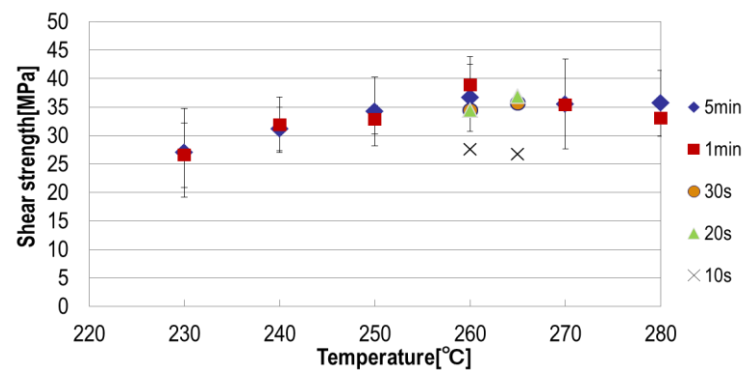


図5 設定温度及び保持時間とシエア強度

設定温度 260℃近傍で飽和する傾向が見られた。保持時間は、20sec 以上で5min まで同様の傾向が見られた。

(2) ダイシエア試験後の界面モードの検討

ダイシエア試験後の破断界面の写真(図6)から、温度が高くなるほど剥離界面にはシリコン破壊が生じていることがわかる。

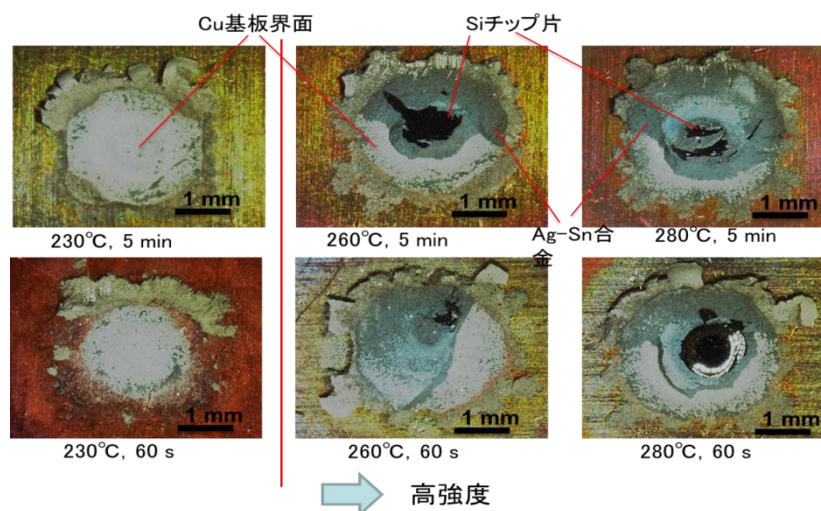


図6 界面剥離モード

(3) 焼結条件による緻密度と液相分布の検討

AgSn ペーストを焼結した断面の SEM・EDX 画像 (図 7) から、260℃60 秒保持のサンプルは Sn がほぼ均一に拡散していることがわかる。

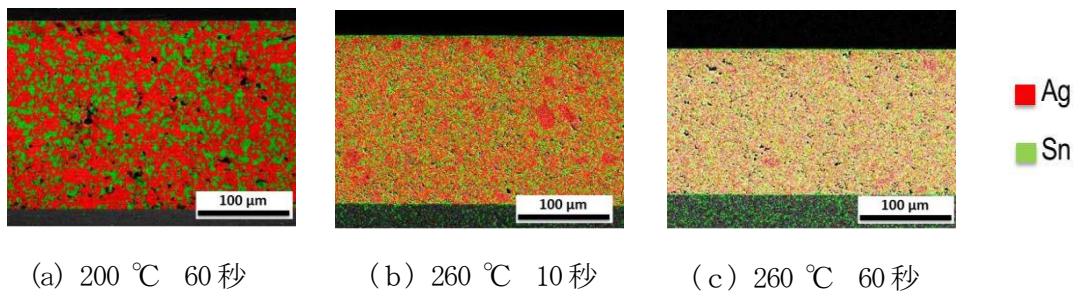


図 7 Sn の分布

(4) 焼結界面の金属間化合物の検討

焼結条件 260℃ 60 秒保持の Cu 基板と AgSn 焼結界面の SEM 像と EDX によるラインプロファイルの結果 (図 8) より、AgSn 焼結体と Cu 基板の間に約 1 μm の合金層が見られる。ラインプロファイルの結果より、この合金層は CuSn 合金と推定判断される。

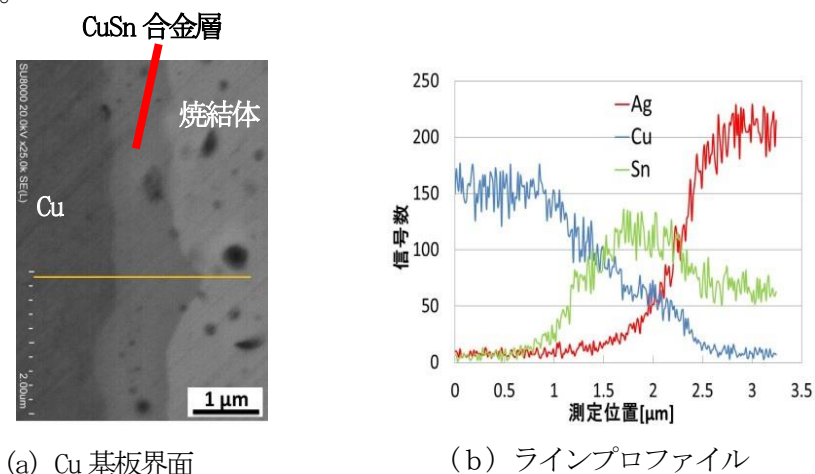


図 8 Cu 基板界面

同様に Si チップと AgSn 焼結体の接合界面も Si にメッキされた Ti・Ni の Ni 層と AgSn 焼結体との間に約 0.3 μm の合金層が見られ、ラインプロファイルから NiSn 合金であると推定される (図 9)。

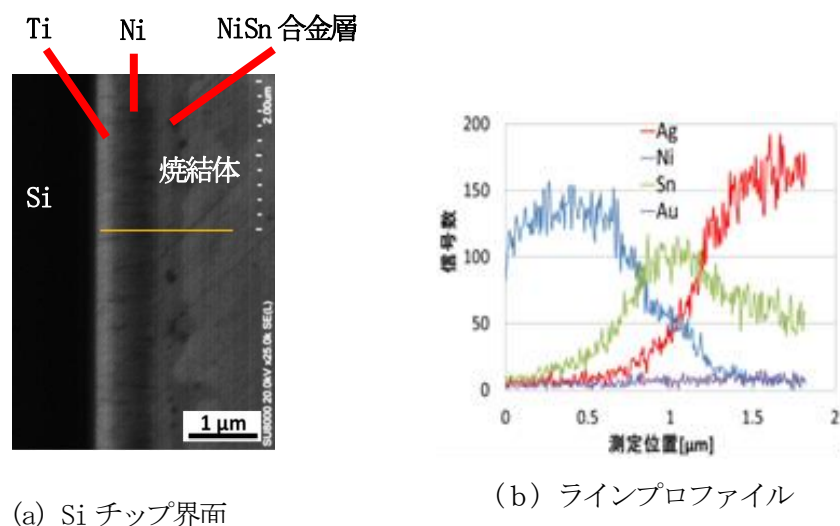


図 9 Si チップ界面

SEM・EDX による分析結果から、温度を急峻に立ち上げることにより Sn 粉末を溶融させると共に、Ag 粉末に急激な動きを生じさせ、合金化を短時間で行う動的焼結が行われていると推定される。

2-1-4 ペーストの印刷による焼結条件の検討

(1) 各ペーストの印刷によるシェア強度の検討

ディスペンサーによるペーストの塗布は、塗布厚み・量のバラツキが少なからずあったため、印刷法に変更した (図 10 ディスペンサーから印刷変更)。

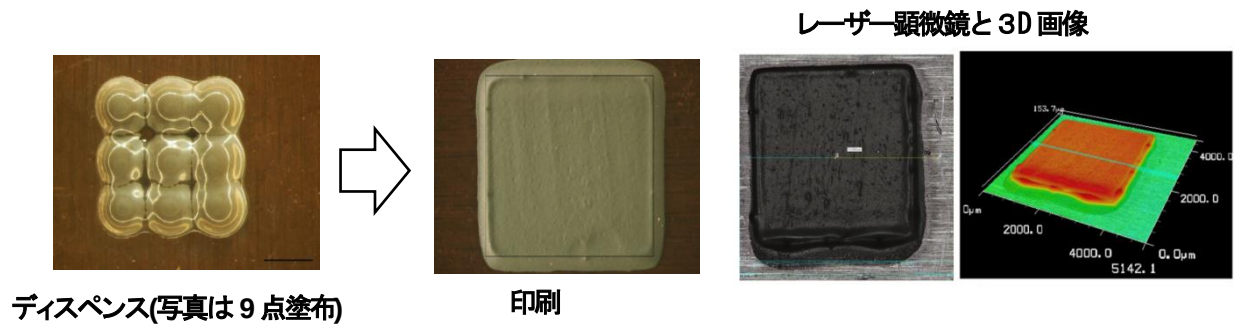


図 10 ディスペンサーから印刷に変更

AgSn ペーストの組成と粒径を変化させ、ダイシェア強度試験にて Sn の含有量を増やしたペースト (Ag-50Sn) が最も強度が高いことを確認した (図 11、12)。

ペーストの種類	Sn 含有量(質量%)	Ag 含有量(質量%)
A(Ag-30Sn)	30	70
B(Ag-40Sn)	40	60
C(Ag-50Sn)	50	50

}

アトマイズ法

}

還元法

図 11 各ペーストの組成

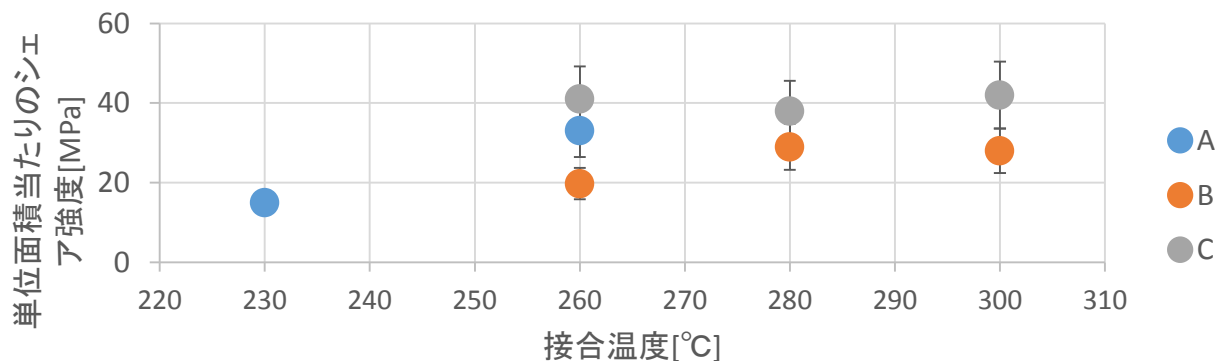


図 12 各ペーストのシェア強度比較

(2) シェア試験後の破断面の分析

ダイシェア試験後のCu基板側とSiチップ側の破断面には、Snの含有量が30%のペーストの焼結はチップの端の部分に未焼結領域が多く見られた。Snの含有量が50%のペーストは前面にわたって合金を形成している(図13)。Snが広く拡散し、Cuと拡散接合をしたと考えられる。

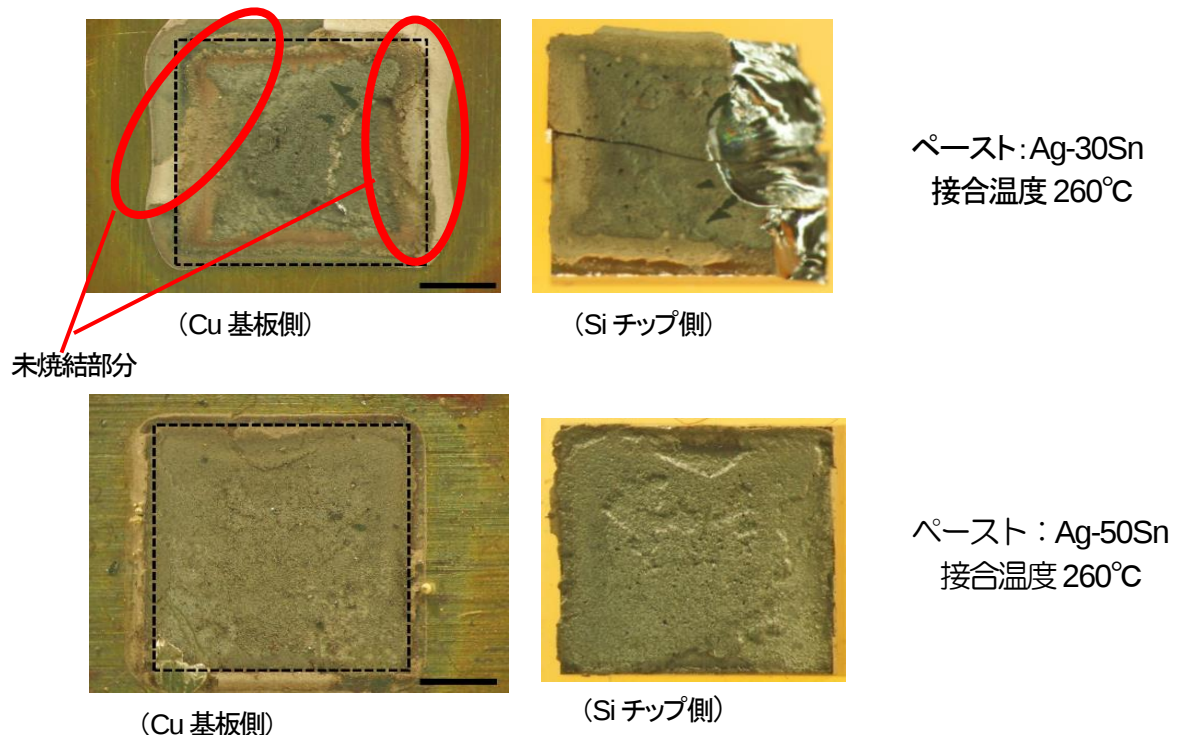


図13 ダイシェア試験後の破断面

破断面をEDXによる元素分析を行った。Cu基板側は、Cu及びSnが全面に分布し、Agは一部であった。広範囲にわたってCuSn合金が形成され、一部にAgSn焼結体が残った状態である(図14)。

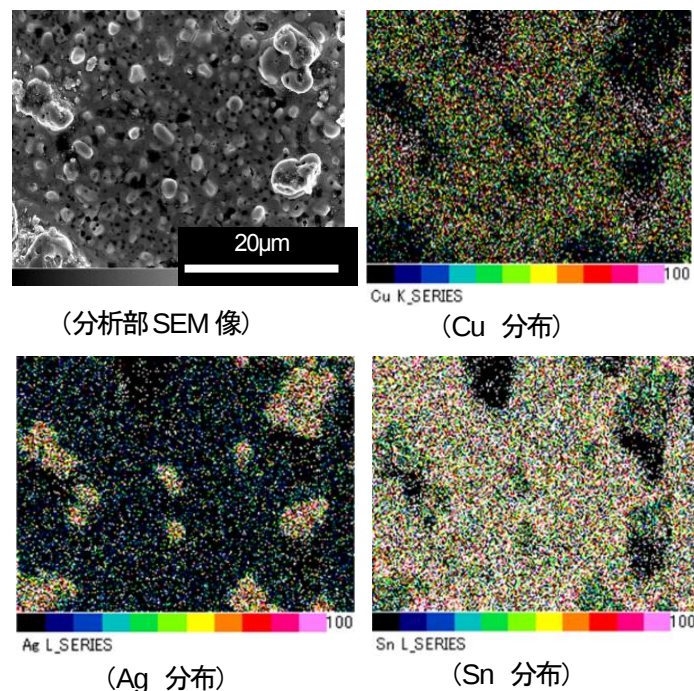


図14 Cu基板側EDX像 (Ag-50Sn、接合温度 260°C)

Si チップ側は、広い範囲で Ag、Sn を検出し Cu はほとんどない状態であった。
AgSn 焼結体と考えられる (図 15)。

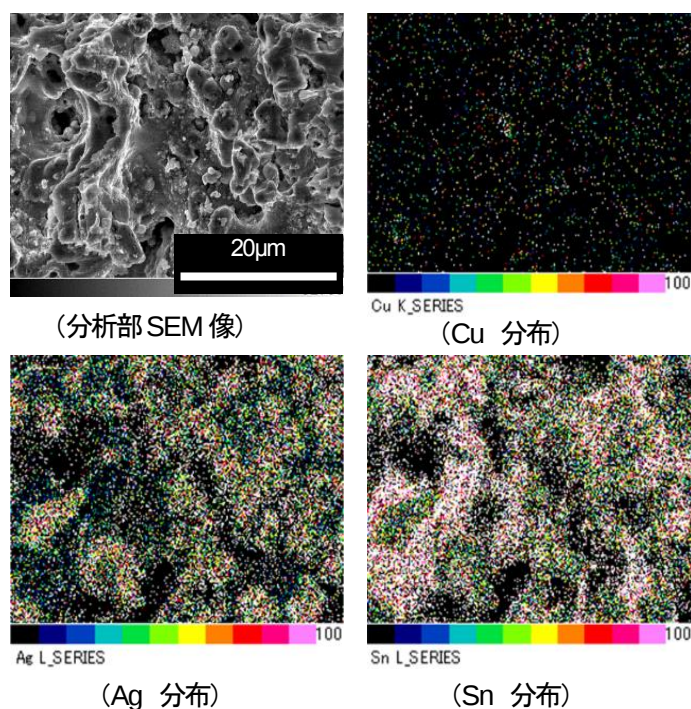


図 15 Si チップ側 EDX 像 (Ag-50Sn、接合温度 260°C)

以上より破断は AgSn 焼結体と CuSn 合金の境界または焼結体の母材破壊が支配的
だと考えられる。

(3) 焼結接合した界面の分析

接合した試料の Cu 基板と AgSn 焼結体の界面を EDX にて分析を行った。接合温度
が 260°C の場合は、AgSn 焼結体に Sn が溶け残っている状態であった (図 16)。

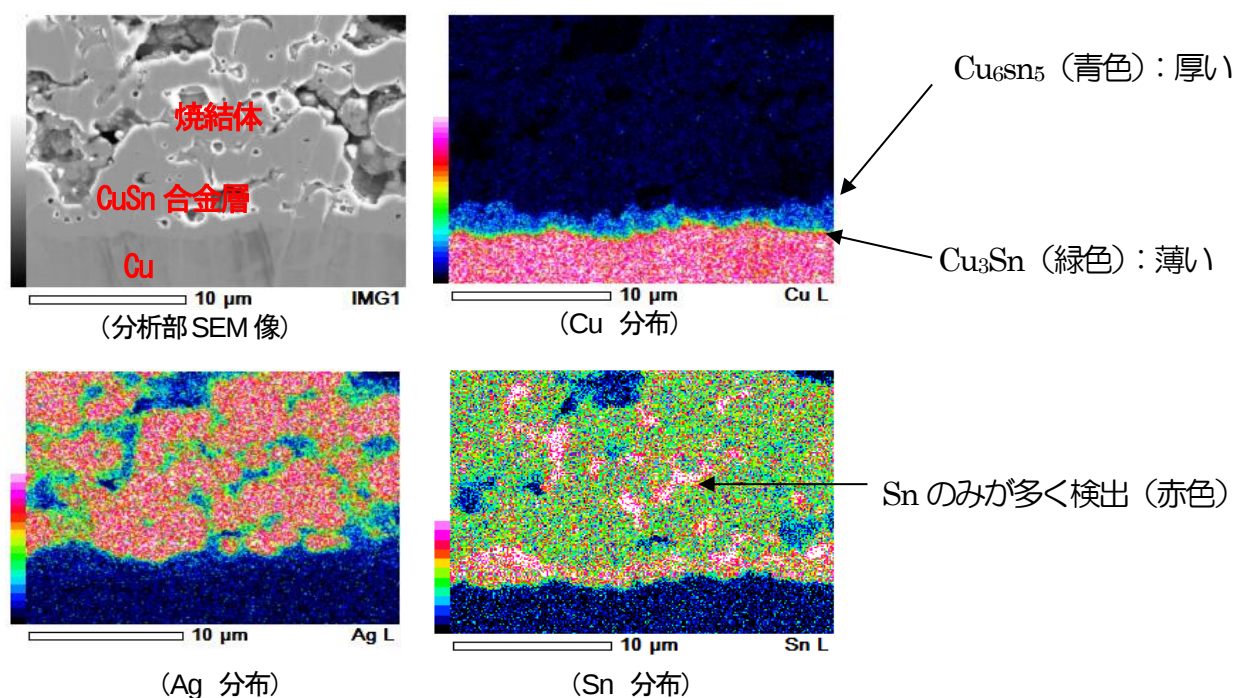


図 16 Cu 基板側 EDX 像 (Ag-50Sn、接合温度 260°C)

接合温度が 300℃の場合は、過剰な Sn が残留するところがあった (図 17)。
(もっともシェア強度が高い)

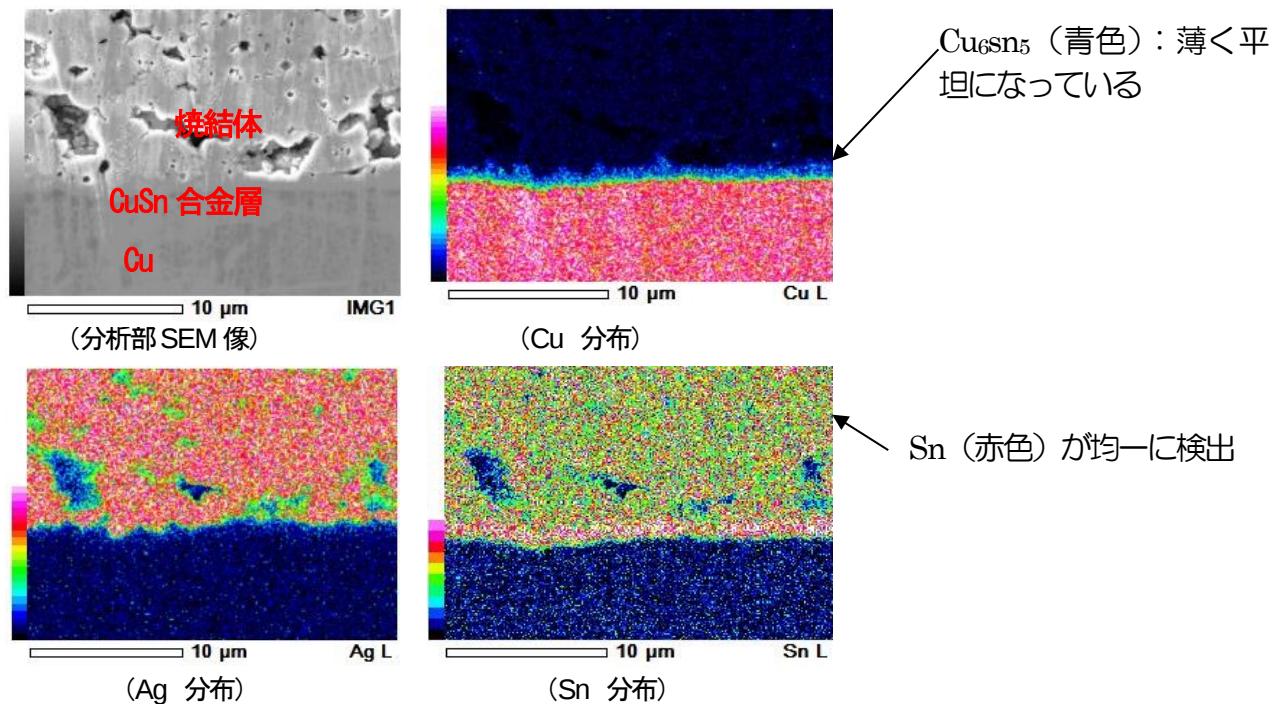


図 17 Cu 基板側 EDX 像 (Ag-50Sn、接合温度 300℃)

- *Ag の含有量が 50%、Sn の含有量が 50%のペーストを焼結したとき、約 40MPa の強い接合強度が得られた。
- *上記ペースト (Ag-50Sn) では、Si チップ前面にわたって合金が形成できている。
- *破断モードの多くは、AgSn 焼結体と CuSn 合金の界面または AgSn 焼結体の母材破壊であった。
- *Ag-50Sn ペーストでは 260℃、保持時間 1 分にて焼結体の一部に Sn が残留してしまう場合があったが、300℃では均一な焼結体が形成されていることが確認できた。
- *以上より Ag-50Sn ペーストで 300℃での焼結が安定している。

2-2 マルチチップ接合装置の開発とフィルムを用いた焼結条件の検討

2-2-1 油圧式4ヘッド加圧・加熱装置の開発

(1) 装置本体

生産性を上げるために、4ヘッドを同時に加圧・加熱可能な装置を開発した。安価で安定した加圧力を得るために、エアハイドロブースターを用いた油圧式とした。

(図18 4ヘッド油圧式加圧・加熱装置)

《装置スペック》

- ・最大圧力 : 10MPa/チップ
- ・ヘッド温度 : RT~300℃
- ・ステージ温度 : RT~300℃
- ・ステージサイズ : □30 x 30mm/1ヘッド
- ・加圧方式 : エアハイドロブースター (油圧)



図18 4ヘッド油圧式加圧・加熱装置

2-2-2 マルチチップ対応加圧・加熱装置の開発

(1) 装置本体

複数のチップを一括で焼結接合が可能な、大型ステージとヘッドによるマルチチップ対応加圧・加熱装置を開発した。(図 19 マルチチップ対応加圧・加熱装置)

《装置スペック》

- ・加圧力 : 100N~5000N
- ・ヘッド温度 : RT~300℃ (パルスヒート 450℃)
- ・ステージ温度 : RT~300℃
- ・ステージサイズ : □100mm x 100mm

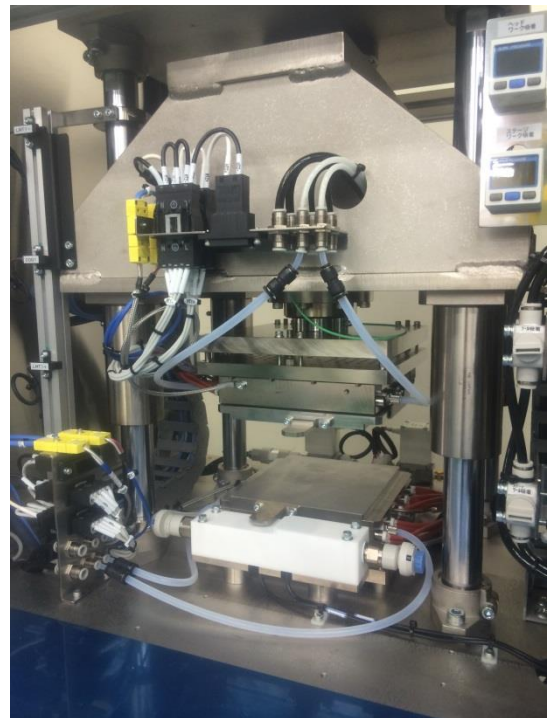


図 19 マルチチップ対応加圧・加熱装置

(2) 接合観察ユニットの追加

接合時の観察が可能な石英ガラス製ステージと光学系を構成し、接合過程をリアルタイムで観察でき、動画を録画可能なシステムを追加した（図 20 接合観察ユニット）

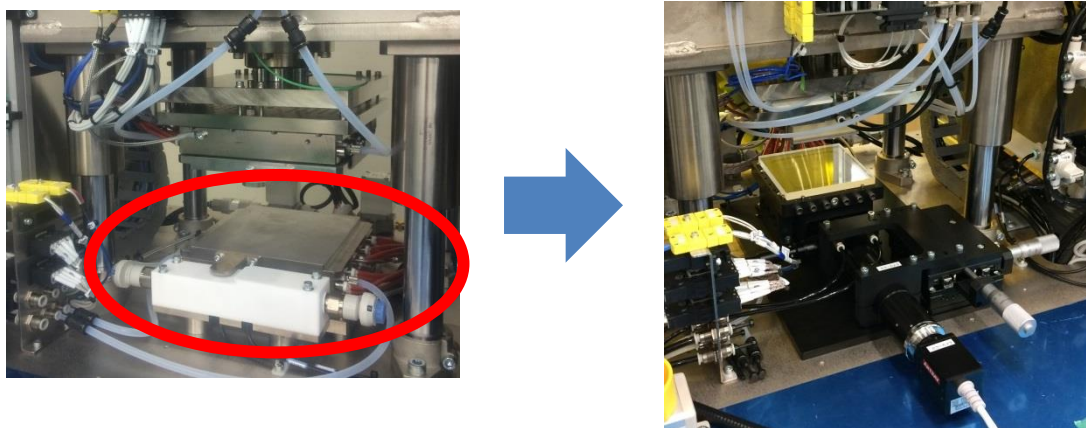
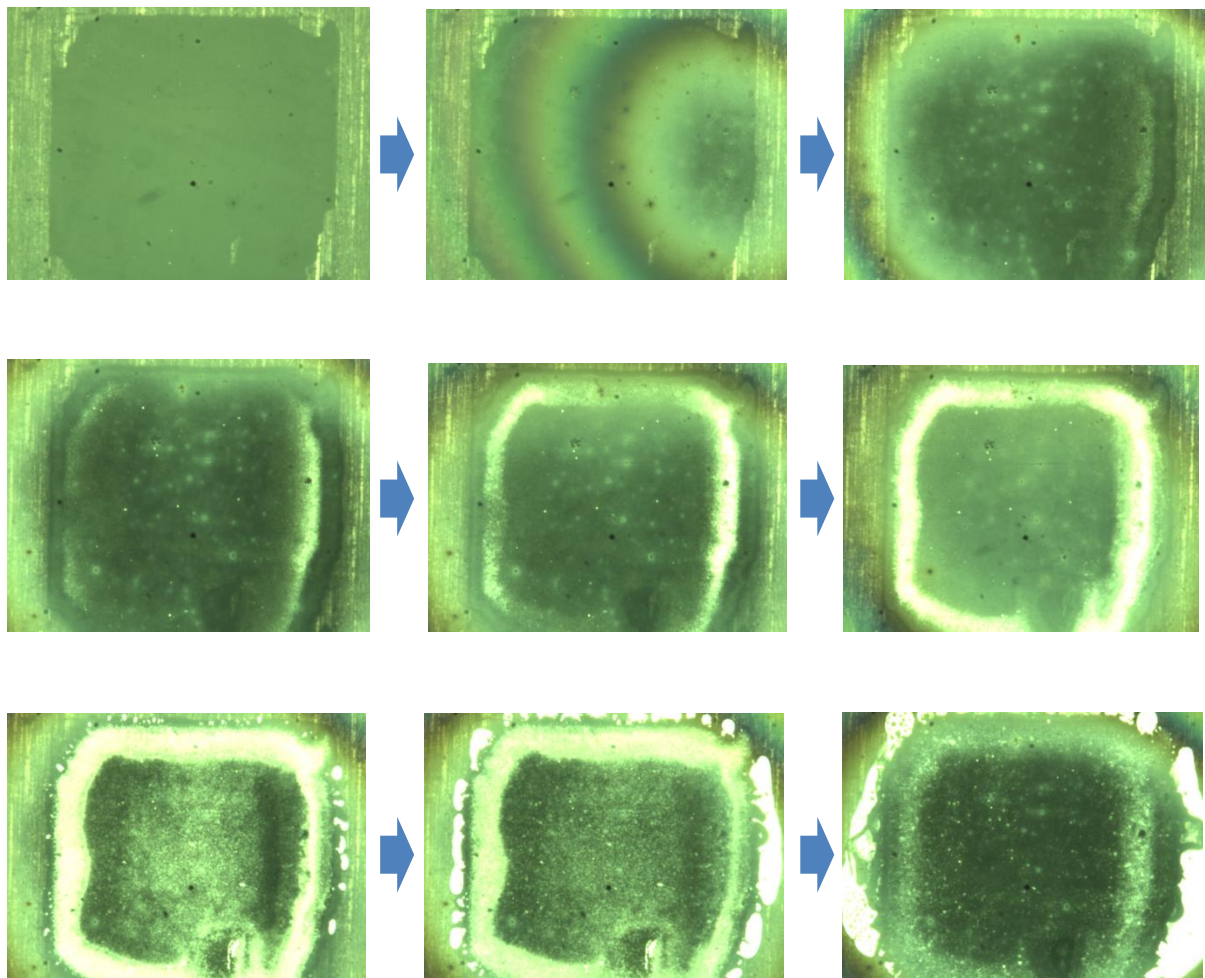


図 20 接合観察ユニット

以下に録画した接合状時の画像を示す。



2-2-3 凹凸吸収フィルムの検討

複数のチップを大型ヘッドで一括に接合するため（ギャングボンディング）、チップどうしの高さバラツキ・ヘッドとステージの平行度のバラツキ等を吸収可能な、凹凸吸収フィルムの検討を行った。

（1）凹凸吸収フィルムの要求仕様

焼結温度よりも低い温度でフィルムを軟化させチップになじませた後に結晶化を行い、水平な押圧面が形成されたのちに、焼結に必要な温度と圧力を印加する。（図 21、22）

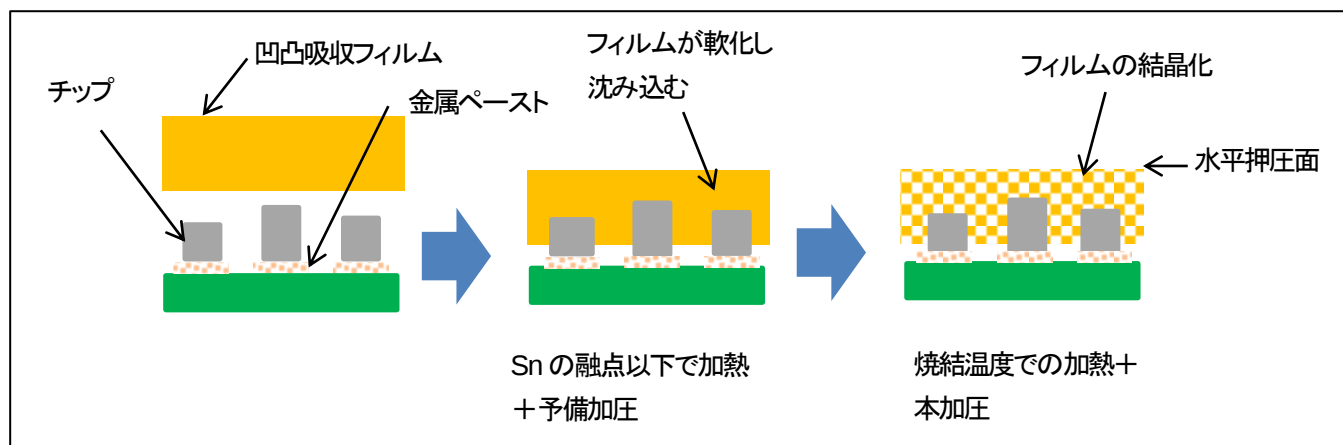


図 21 凹凸吸収フィルムの使用形態

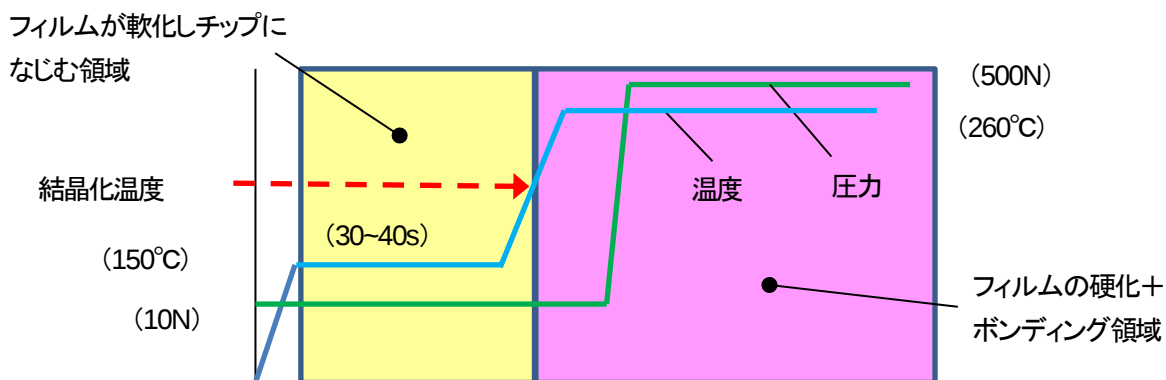


図 22 凹凸吸収フィルムの要求仕様

(2) 各種熱可塑性フィルムの特性の検討

AgSn ペーストの焼結条件から、230℃以上の熱可塑性フィルムについて調査を行うこととした。表2 各種フィルム特性 から5種のフィルムを選定した。

フィルム No.	メーカー	メーカー 型格	ガラス 転移点 (°C)	結晶化 温度(昇) (°C)	融点(°C)	結晶化 温度(降) (°C)	弾性率 (MPa)	調査 プロファイル 1
1	A 社	a	88	155	239	173	3311	①⑤
2	↑	b	72	96	279	247	1852	②③⑦
3	↑	c	66	104	214	162	2047	
4	↑	d	61	119	192	134	1683	
5	↑	e	50	83	208	154	1168	
6	↑	f	13	70	204	156	700	
7	↑	g	28	73	208	164	765	
8	↑	h	17	53	202	169	320	
9	B 社	i	20	?	230	190		⑧
10	C 社	j	?	?	?	?	?	④⑥
11	D 社	k	?	?	327	?	?	⑩

表2 各種フィルムの特性

本開発にて製作したシングル加圧・加熱装置に、図23のように資料をセットし、225℃～300℃の範囲で5MPaを印加し、フィルムの状態を検証した。

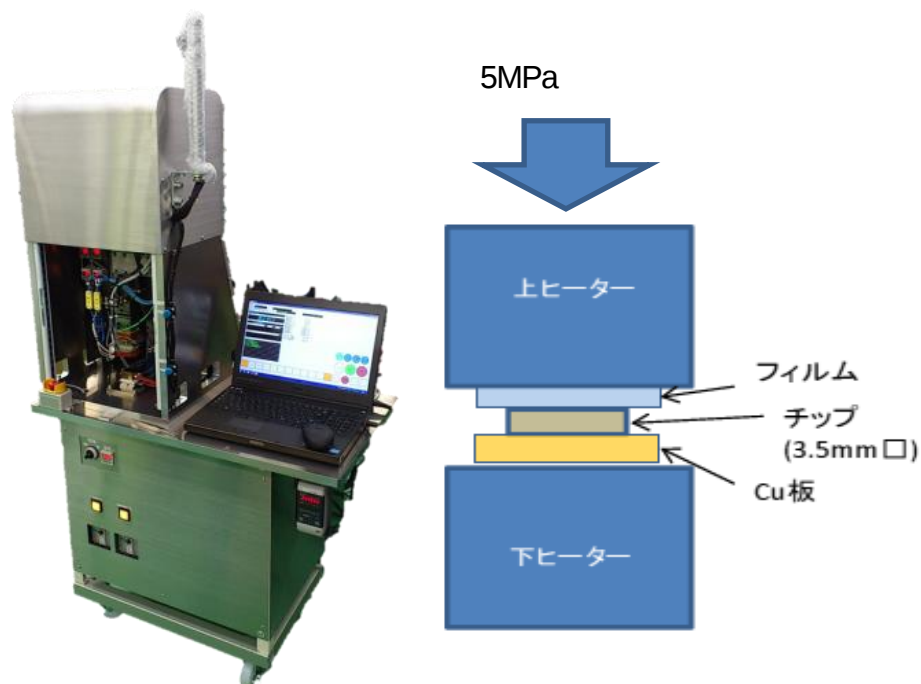


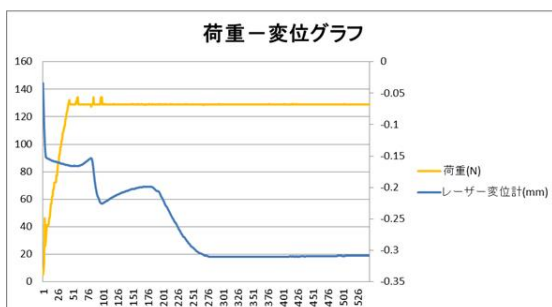
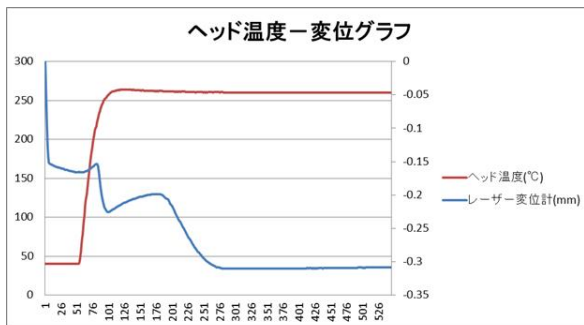
図23 フィルム検証方法

各種フィルムの評価結果は以下の通り（表 3）。

実験 No.	フィルム	プロファイル	結果
①	a・1 枚	5MPa-260℃	フィルムは溶融(透明)・・・NG
②	b・1 枚	5MPa-260℃	溶融なし
③	b・5 枚	5MPa-260℃	厚さは約 180 μ m 変化⇒データ参照
④	j・2 枚	5MPa-260℃	溶融はしないがフィルムは接着
⑤	a・5 枚	5MPa-225℃	フィルムは溶融(白濁)・・・NG
⑥	j・2 枚	5MPa-225℃	溶融はしないがフィルムは接着
⑦	b・5 枚(再)	5MPa-260℃	厚さは約 140 μ m 変化
⑧	i・5 枚	5MPa-225℃	全て溶融、チップはフィルム突き抜ける・・・NG
⑨	b・2 枚 a・5 枚 ミ・フィル・1 枚	5MPa-260℃	ミ・フィル(PI)とチップ接着 a は全てチップ周辺に流れる⇒データ参照
⑩	k・1 枚	5MPa-260℃	溶融することなく柔軟に変化⇒データ参照

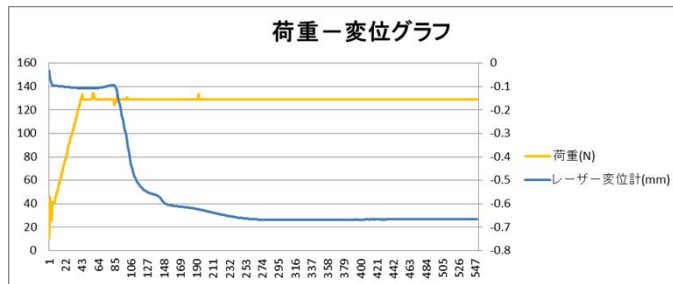
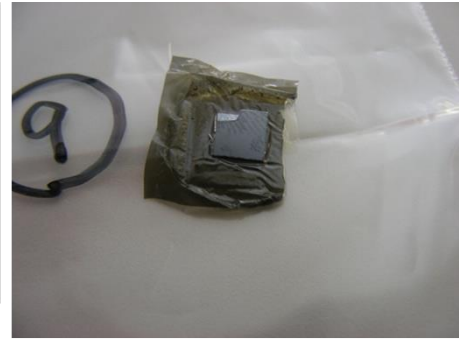
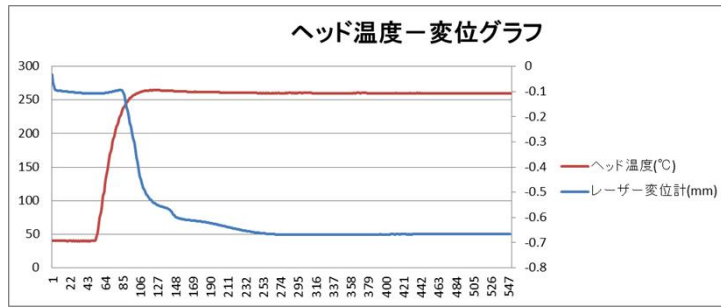
表 3 フィルム評価結果

実験 No. ③（フィルム b 5 枚 260℃）の試験結果



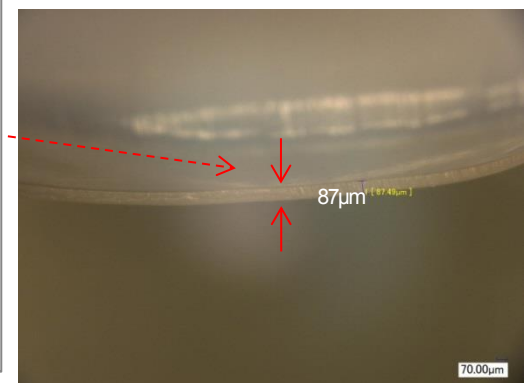
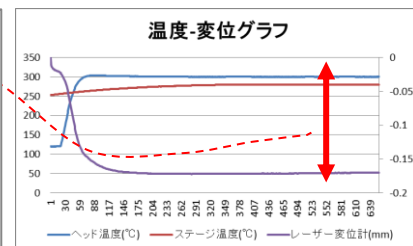
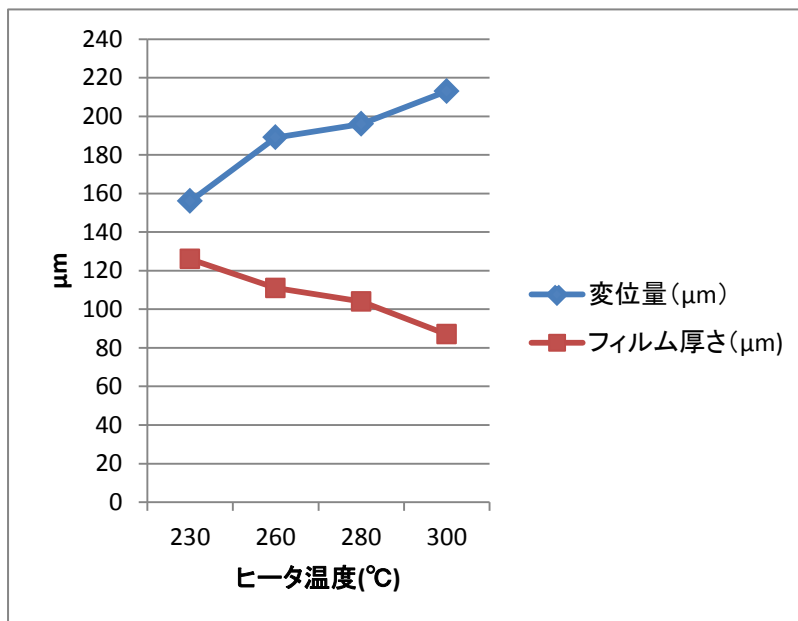
フィルムの融点は 279℃と設定温度よりも高い。
 昇温時結晶化温度 (96℃) の上にも変曲点がある。
 約 200 μ m の残存厚がある。

実験データ⑨ (フィルム複合(b: 2枚+a: 5枚+ミドフィル(PI)) 225℃)



フィルムaは全て流れた。残存圧はフィルムbの数10 μ m程度か? ミドフィルは接着した。

実験データ⑩ (フィルムk t=300 μ m、5MPa) の試験結果



5MPa の圧力下で、230~300℃の範囲で溶融することなく、温度に比例して柔軟に変化した。

2-3 可搬加圧・加熱ユニットと焼結条件の検討

2-3-1 可搬加圧・加熱ユニットの開発

数10分の加圧・加熱による焼結を想定し、高温化環境において所定の圧力をデバイスに印加続けられる、可搬可能でコンパクトなユニットを開発した。これは複数デバイスをセットしたユニットをリフロー炉に複数入れ、加熱しながら所定の圧力を印加して複数チップの焼結を行うものである（図26）。

《装置スペック》

- ・ワークセット部 : $\phi 60\text{mm}$ 以上
- ・加圧力 : 5MPa
- ・耐熱温度 : 300°C
- ・油加圧面 : SUS
- ・上下反転置きを可能

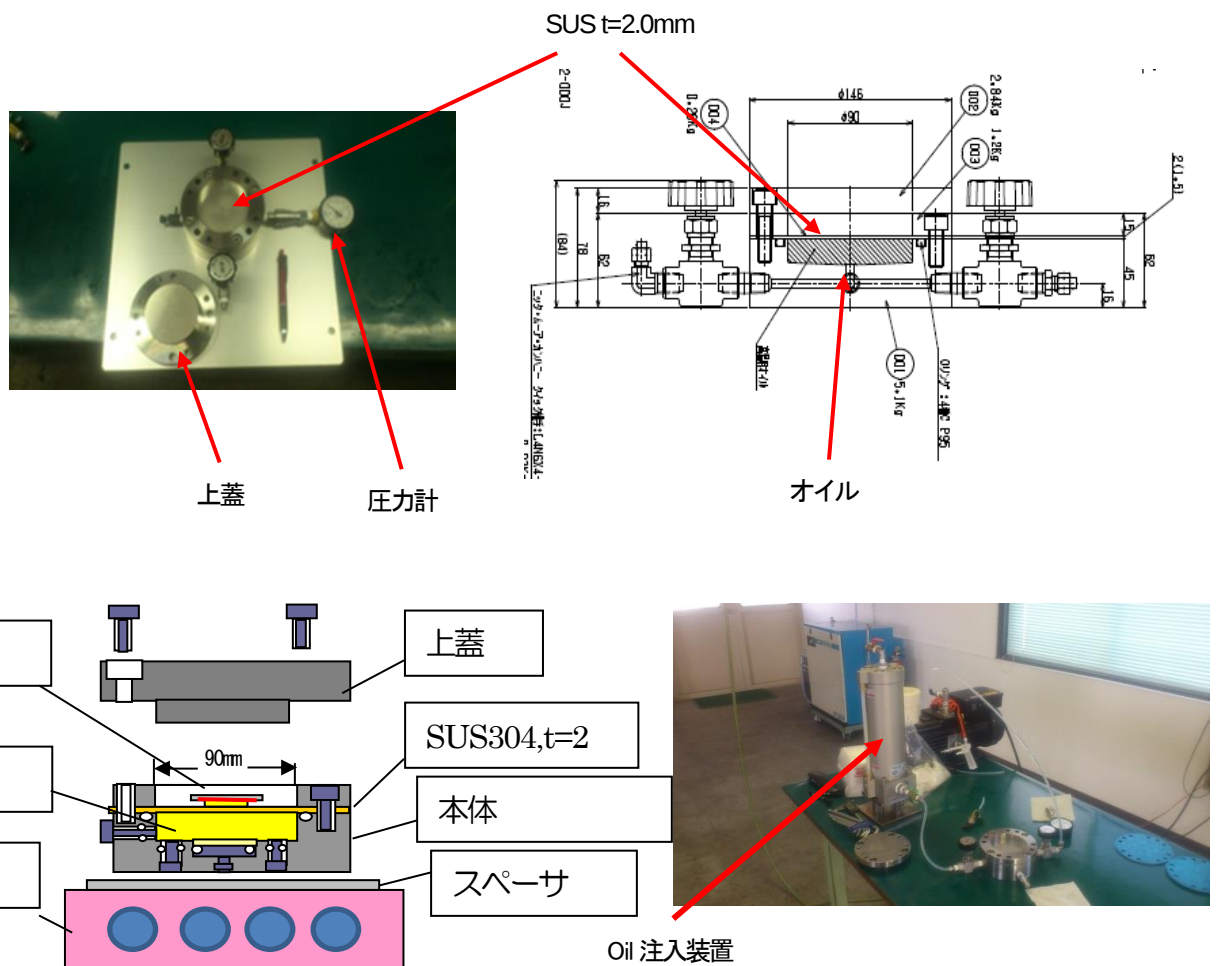


図26 可搬加圧・加熱ユニット

(1) 基本性能確認試験

図 27 に示すように、加圧部中央に□30mm (厚さ 1mm) の窒化アルミ基板を置き、油圧部分を熱電対で測定しながら昇温させオイル圧力を確認した。(加熱は下ヒータのみ)

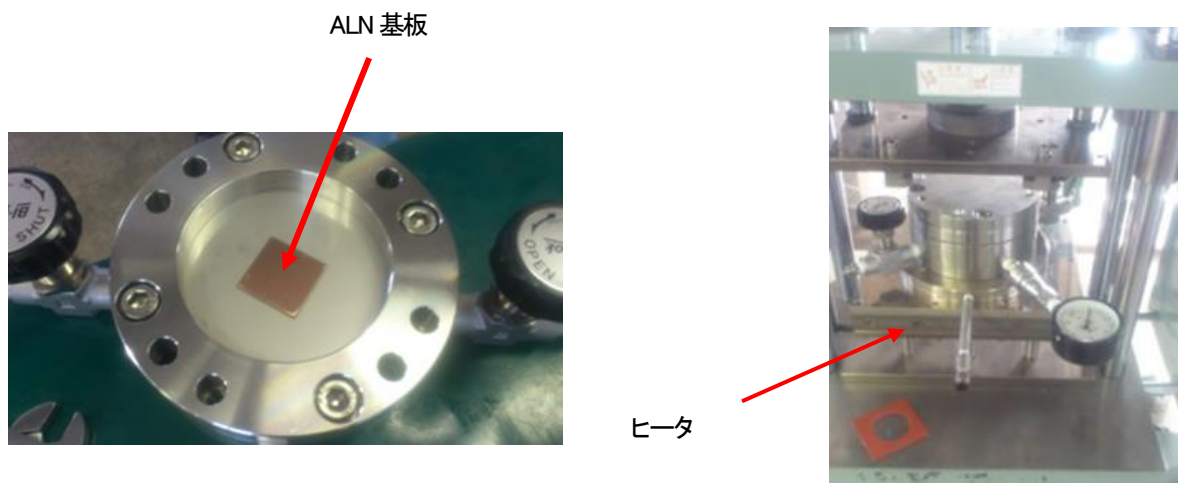


図 27 基本性能確認試験

温度－圧力調査の結果、初期加圧なしのオイルの膨張のみで図 28 に示すように、約 70℃で 4MPa に達した。圧力－温度特性により、適切な熱膨張率のオイルを選択することにより、外部から圧力を加えずに要求の圧力仕様を満足する可能性があることが判った。

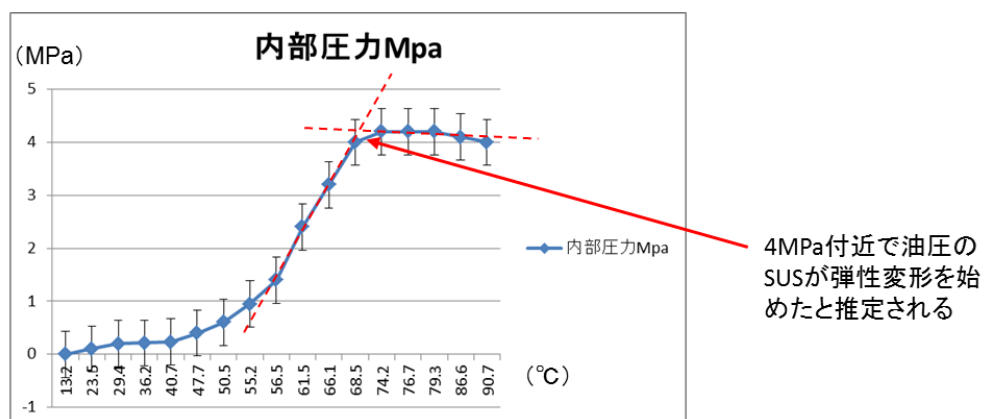


図 28 圧力-温度特性

(2) 複数チップを用いた加熱・加圧試験・・・①

図 29 のように窒化アルミ (ALN) 基板とチップをセットして上下を締結し、下側から加熱して内部 Oil の膨張による圧力増加を確認しながら実験を実施。

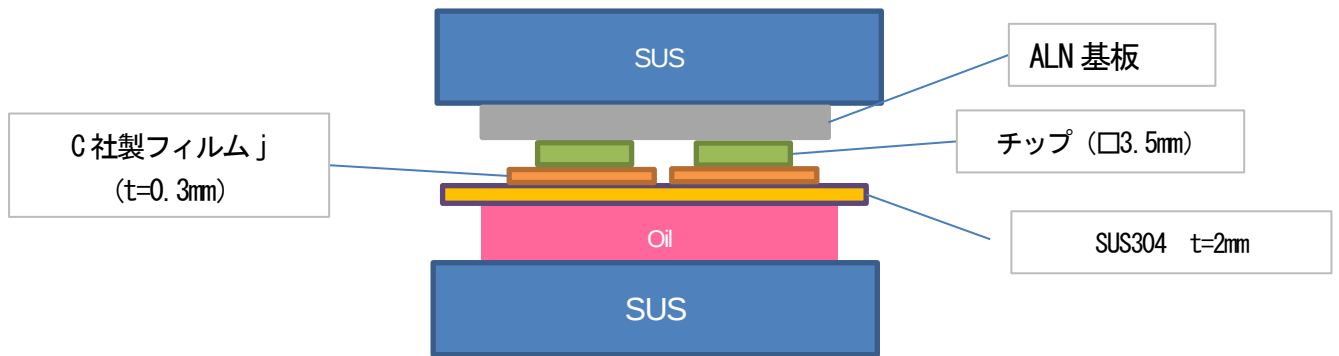


図 29 複数チップでの加圧・加熱試験 模式図

175℃で 5MPa に達したため実験を中止。

フィルムは溶け、チップはフィルムを貫通し割れていた。SUS 板は変形していた (図 30)。

⇒変形しない SUS 板の選定または、応力集中を緩和する構造が必要。

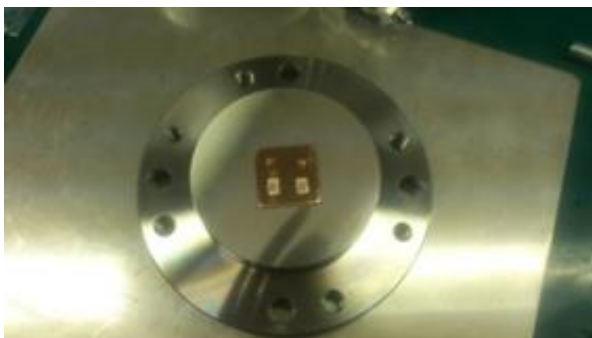


図 30 複数チップでの加圧・加熱試験結果

(3) 複数チップを用いた加熱・加圧試験・・・②

SUS 板の上に耐圧耐熱ゴムを構成し、耐熱性の高い (融点 327℃) ニトフロン (日東工業製) を使用して、加圧・加熱試験を実施 (図 31)。

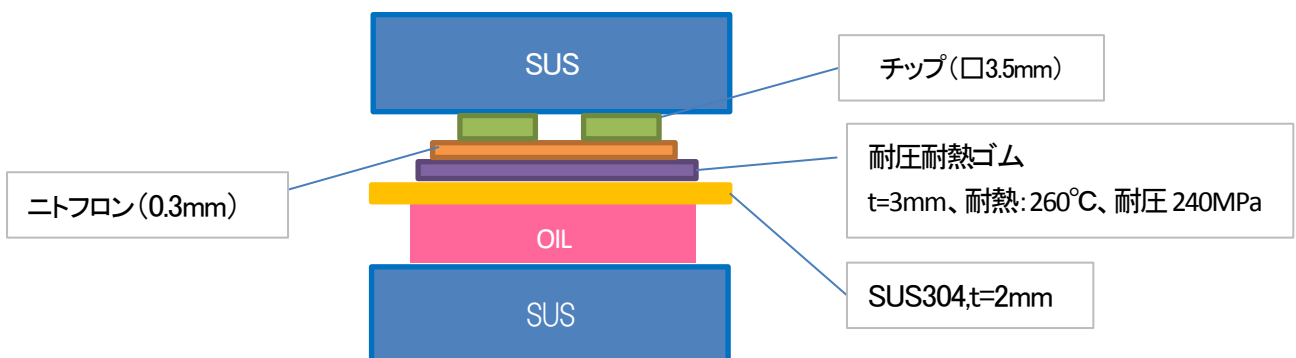


図 31 耐圧ゴムでの加圧・加熱試験 模式図

フィルム（ニトフロン）は変形のみで溶融はなく、耐圧耐熱ゴムも圧痕のみで問題は見られなかった（図 32）。

⇒低熱膨張オイルを使用するが、105℃にて 5MPa となったため、内部圧力を調整可能な構造が必要。

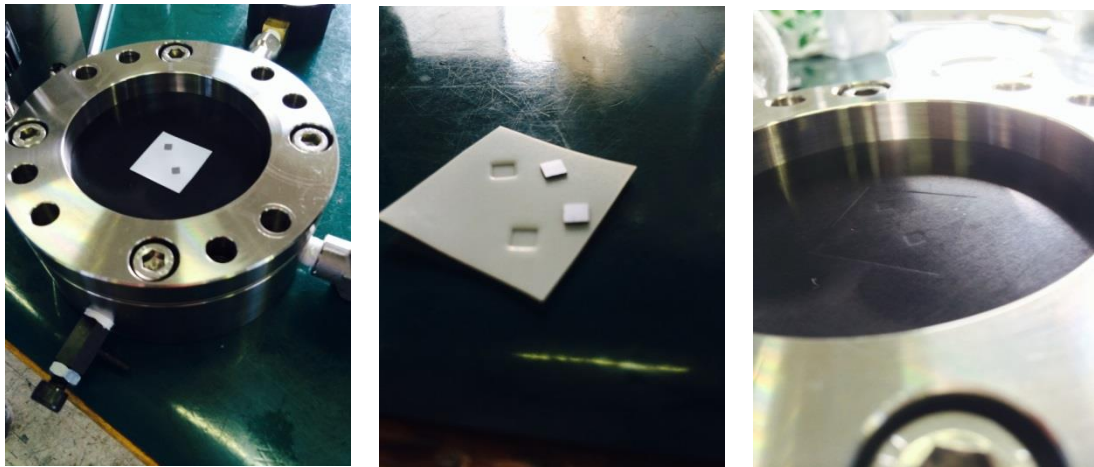


図 32 耐圧ゴムでの加圧・加熱試験結果

（４）圧力調整機構追加改造の検討

耐熱オイルの熱による膨張は想定以上で、焼結温度に至る前に要求圧力の 5MPa を超えてしまう。よって、膨張したオイルを外部に逃がし、内部圧力を自在に調整可能な構造に改造を行った（図 33）。

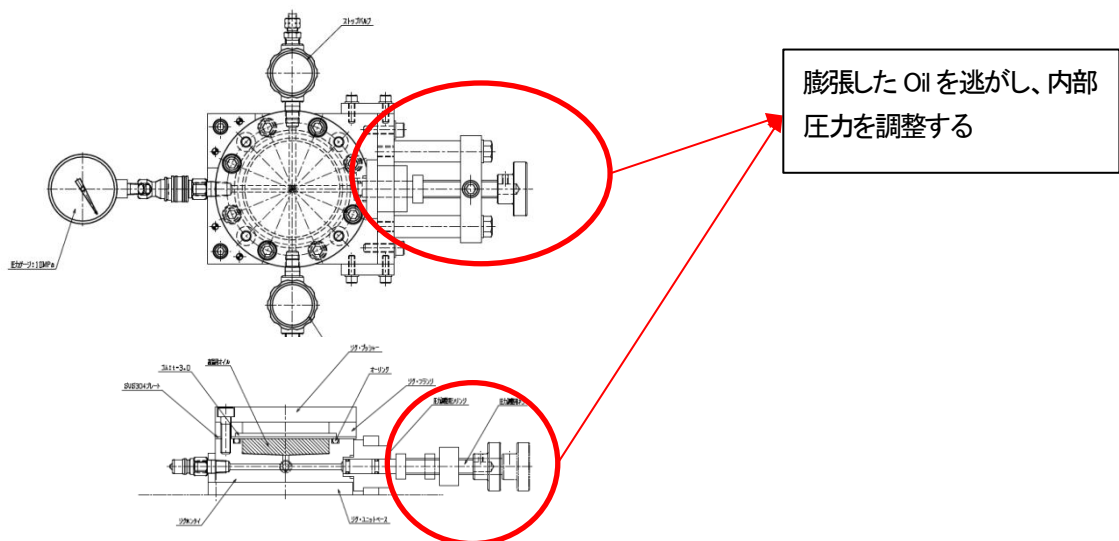


図 33 追加した内部圧力調整機構

圧力調整機構を追加した装置に、実デバイスを複数装着し加熱・加圧試験を実施
(図 34) 230°C-5MPa、30 分間放置

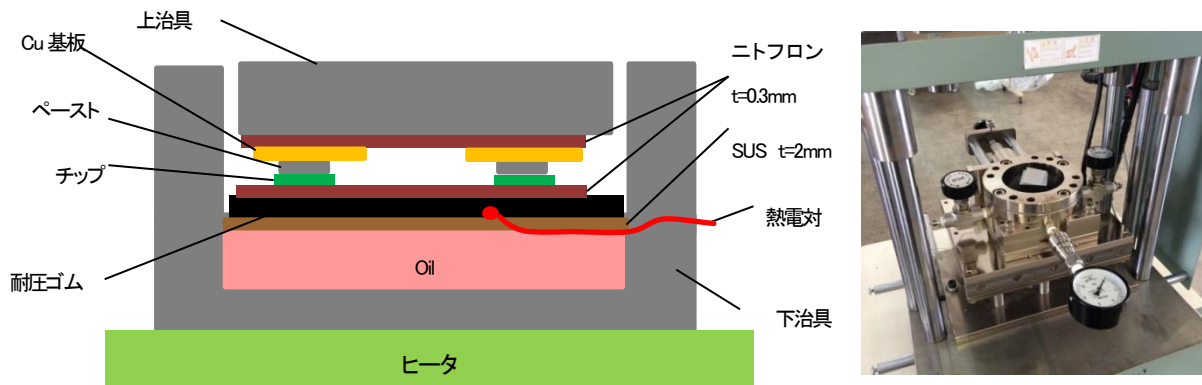


図 34 実デバイスでの接合実験

チップの接合は行われていたが、チップにクラックが入ってしまい、シェア強度試験等は実施しなかった。

ニトフロンは溶融することなくエッジの応力を吸収することはできたが、応力を分散させることはできなかった。プロセス途中で結晶化が可能なフィルムでの再評価が必要と考える (図 35)。

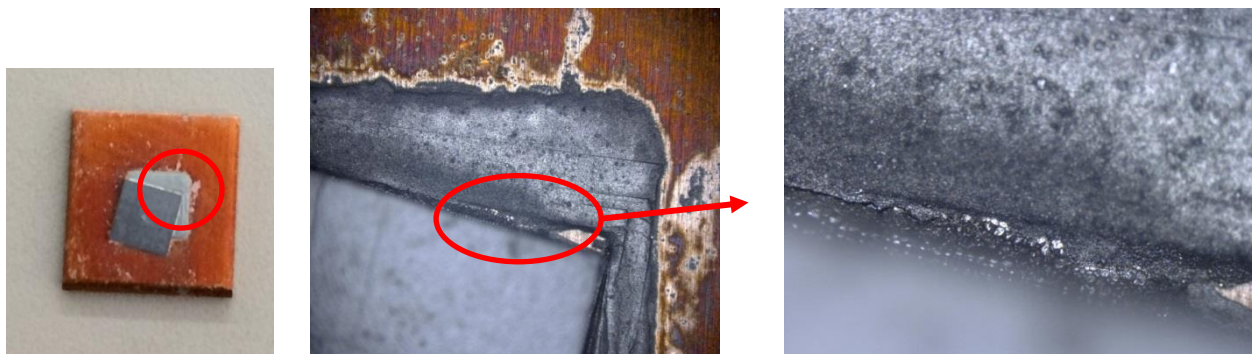


図 35 実デバイスの接合実験結果

2-4 最適プロセスデザインの検討

2-4-1 動的焼結条件によるマルチチップ一括接合プロセスの検討

2-1-2、2-1-3の研究より数分で焼結が完了する結果となり、数10分の固相拡散でIMC (inter-metallic-compound) を生成する従来の方法から大幅に時間短縮が可能となる。しかしながら、1By1でボンディング装置を拘束するのでは生産性が悪いため、複数のヘッドで焼結を個別に行える装置を考案した(図36)

本図は4つのヘッドを構成しているが、ウェハサイズ等から効率の良いヘッド数を設定すればよい。各ヘッドは個別に加圧・加熱が可能であり、個々のデバイスの高さバラツキに対応した荷重制御等プロファイルを個別に設定・実現可能である。

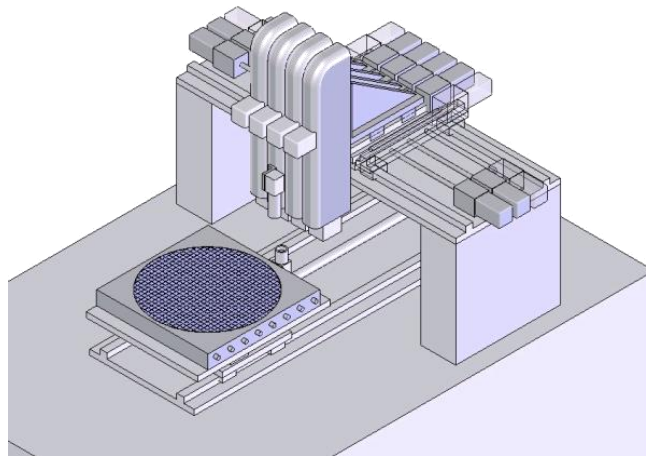


図36 多ヘッドボンディング装置

また、2-2の研究結果より、複数のデバイスを一括で接合を行ういわゆるギャングボンディングの実効性は高いと考える。加圧力が5MPa程度必要となる焼結プロセスにおいては、各チップ高さのバラツキ、ヘッドとステージ間の平行度バラツキ等がチップに及ぼす影響が大きいため、2-2-3で研究した凹凸吸収フィルムの必要性が高いと考え、有効性も確認できた。

よって、図37のように複数のデバイスの上に凹凸吸収フィルムを置き、広面積で一括で焼結・ボンディングする装置を考案した(図38)。

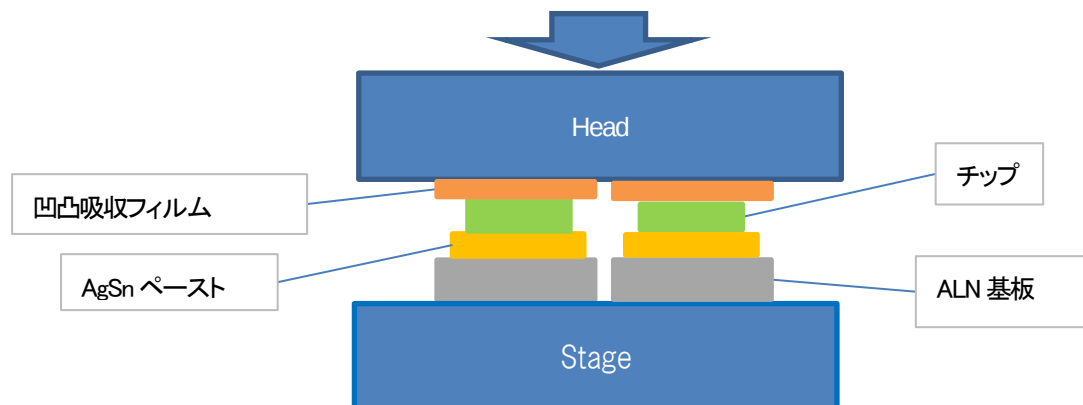


図37 マルチチップ一括接合の模式図

2-4-2 静的焼結条件による量産生産プロセスの検討

数10分の焼結時間がかかることを想定し、2-3可搬加圧・加熱装置の検討を行った。個々のデバイスにかかる応力・使用する緩衝フィルム等々詳細を検討する必要があるが、内部圧力が自在に調整可能となり、接合の保持温度と圧力を自由に設定することにより、図39に示す量産プロセスの実現性は高い。

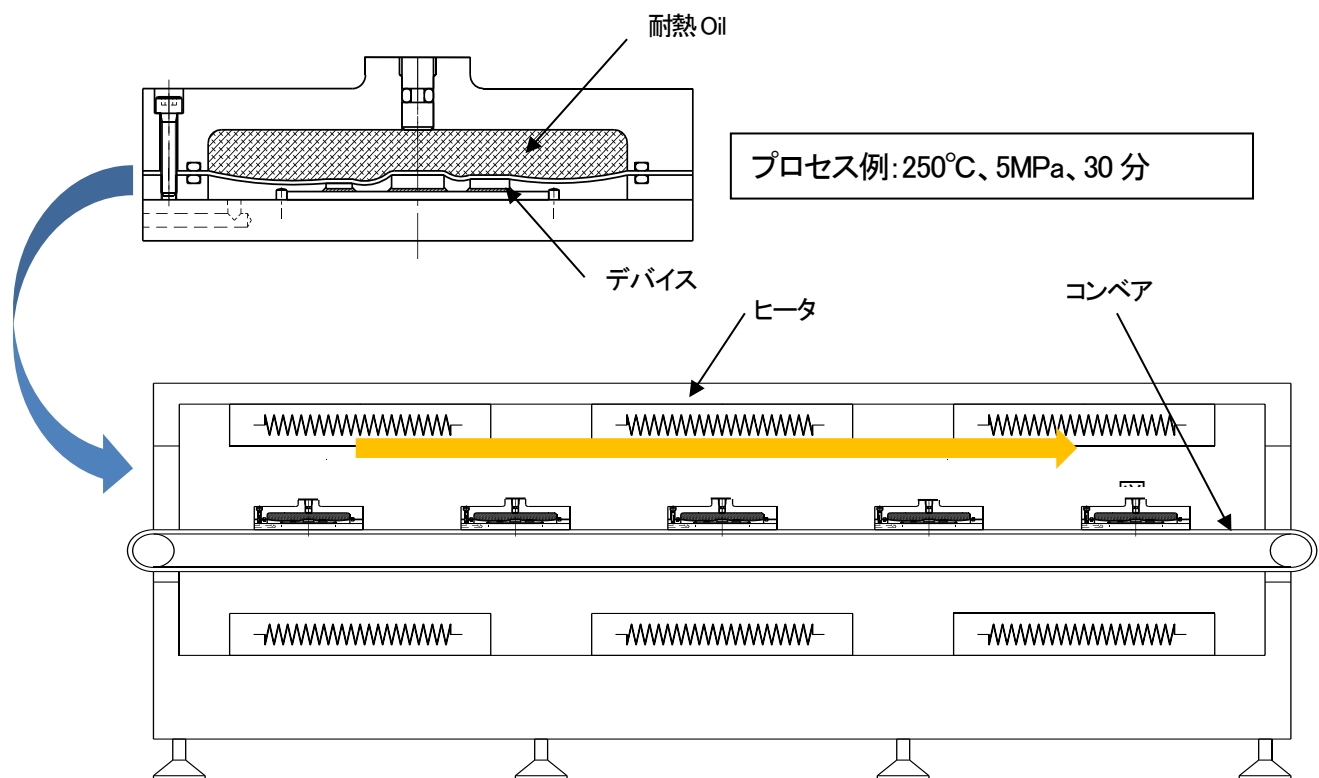


図39 可搬加圧・加熱ユニットを用いた量産プロセス

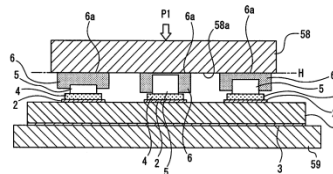
2-5 特許出願

(1) 国内特許 5 件出願済み

①特願 2013-51679 電子部品の接合方法

⇒平成 25 年に米国に出願

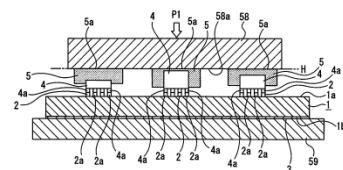
⇒平成 26 年に米国にて権利化



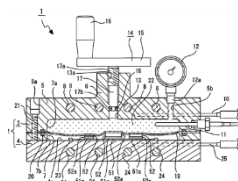
②特願 2013-51680 電子部品の接合方法

⇒平成 25 年に審査請求実施

⇒平成 26 年に国内で権利化



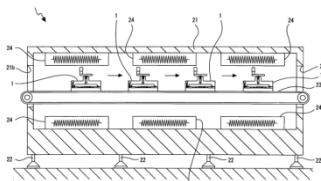
③特願 2013-51681 部品接合装置



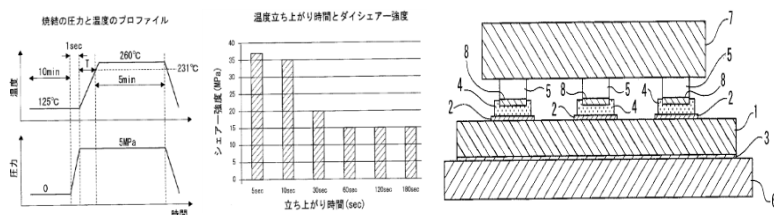
④特願 2013-51682 部品加圧装置及び部品加圧装置を用いた加熱システム

⇒平成 25 年に米国に出願

⇒平成 26 年に米国にて権利化



⑤特願 2014-41601 金属微粉末ペーストを用いた接合方法



第3章 全体総括

本研究開発では、平成24年度から平成26年度までの3年間、次世代パワー半導体のための、高耐熱で信頼性の高いダイアタッチ接合技術と接合装置技術を確立するために開発を推進してきた。具体的には、株式会社デンソーが事業展開しているPALAP技術で採用しているAgとSnの合金をベースに、従来はんだよりも耐熱性・信頼性の高い Ag_3Sn の焼結体を大気中で行う技術と、それを実現する接合装置の開発を行った。

その結果、塗布したAg・Sn金属微粉末ペーストに先ず高い圧力を加え、次に急峻に温度を上昇させることで、Sn粉末を溶融させると共にAg粉末に急激な動きを生じさせ、短い時間で合金を得られる「動的焼結」の概念を見出し開発を行った。この焼結方法により接合したチップの接合強度は強く、接合界面には、Snの液相がほとんど見られなかった。

焼結により得られた Ag_3Sn の合金は、融点が約 480°C と高耐熱である。開発した装置は、 $1000\text{N}\sim 5000\text{N}$ と従来の装置に比べ、10倍以上の加圧を可能にするものである。本研究開発による動的焼結は、はんだペーストの合金生成に適しているのみならず、Agナノペースト等の焼結の最適化にも有効であると考えている。

また、Snの融点以上で長時間加熱しSnを拡散させ、Agと合金化する従来の焼結手法についても、新たに油圧駆動で加圧・加熱する概念を導入して装置を開発し調査を行った。この調査においては、凹凸吸収フィルムを併用し、その凹凸吸収能力についても各種フィルムの調査を行った。この手法はまだ途上であるが、高圧力を用いる半導体チップの接合に有効であると考えている。

各年度の研究開発の成果は以下の通りである。

平成24年度：

焼結条件プロファイルを簡便に設定・実験可能な、加圧・加熱装置を開発した。加圧力は 10MPa まで印加できることを想定し、MAX印加荷重を 1000N とし、研究室の机の横に置いて実験できるようコンパクトな装置とした。それと同時に、生産性を高めるために、複数のヘッドで焼結が行える生産プロセスを検討し、4ヘッドを搭載し、 5000N まで印加可能な油圧駆動の加圧・加熱装置を開発した。

Ag・Sn金属微粉末ペーストは、PALAPで採用している組成をベースに8水準を選び評価し、組成を絞り込んだ。

平成25年度：

当初数10分の時間をかけ焼結を行うことを想定していたが、急峻な温度の立上げにより数分のプロセス時間で焼結が完了すること（動的焼結現象）が判明し、事業の計画変更を行った。

SEM・EDXによる焼結組織の評価の結果、強度の強い焼結条件はSnの液相が小さく少ない。明らかにSnが消費され、 Ag_3Sn 化が進んでいることが判った。焼結組織と基板側Cuとの間には、Cu-Sn合金層が、シリコン側Niとの間には、Ni-Sn合金層が見られた。

また、複数のデバイスを一括で接合する生産プロセスデザインの検討を加え、平成24年度に製作した高荷重の装置のヘッドとステージサイズを大きくし、加圧力の増加とそれに伴い高剛性な構成に改造を行った。また、複数のデバイスを一括で接合するためには、個々のデバイスの高さバラツキ・ヘッドとステージの平行度のバラツキ等を吸収する緩衝

材が必要と考え、凹凸吸収フィルムの検討を行った。

更に、長時間を要する焼結のための量産性を考慮し、コンパクトな容器に耐熱オイルを充填し、加熱することによりそのオイルの熱膨張でデバイスの焼結に必要な圧力を加える新たな生産プロセスを考案し、利便性を合わせ持つ可搬可能な加圧加熱ユニットを製作した。しかしながら、焼結温度に至る前に要求圧力に達成してしまうという課題が判明した。

平成 26 年度：

高荷重の装置に、焼結接合時の金属微粉末の挙動を観察可能な、石英ガラス製ステージと光学系を搭載し、リアルタイムで接合の状態を観察・録画できるシステムを開発した。

可搬可能な、オイルを用いた加圧加熱ユニットについては、内部オイルを逃がし、加熱に対して自在に圧力を調整可能な構造に改造し、実デバイスでの焼結を実現した。

Ag・Sn 金属微粉末ペースト焼結については、塗布方法をディスペンサーから印刷法に変更し、より定量的な観点で評価を進め、Ag と Sn の最適な配合と接合プロファイルを導き出した。最適な Ag・Sn 微粉末ペーストの焼結体を SEM・EDX で分析を行い、焼結体と Cu 基板の界面に CuSn 合金が形成され、焼結体の Sn が均一に分散されていることが確認できた。シェア強度は 40MPa 以上を満足することができた。

今後の課題：

見出した AgSn 焼結に関する信頼性評価を行い、200℃～250℃の高温下で使用する次世代パワー半導体での使用に問題ないか検証することが重要になる。よって、川下企業と協力し、要求される信頼性を明確にすると共に、実用化に向けた取り組みを行っていきたい。また、本研究開発装置による動的焼結は、はんだペーストの IMC 生成に適しているのみならず、Ag ナノペースト等の焼結の最適化にも有効であると考ええる。

凹凸吸収フィルムについては、高加圧接合時に半導体チップの厚さバラつきを吸収する手法として、同様に川下企業と協力し応用の仕方を検討していく。

可搬可能なオイルを用いた加圧加熱ユニットについては、今回の研究開発より課題を抽出して、実用化に向けて検討していく。

用語の解説

- ・ SiC(シリコン・カーバイド) :
Si に比べて(1) 耐圧が高い, (2) 高温で動作する, (3) 電流密度を大きくできる, (4) スイッチングが高速である, (5) オン抵抗が小さい、という特徴を持つ半導体
- ・ GaN(ガリウムナイトライド) :
上記 SiC と同様な特性を持つ半導体
- ・ 熱歪 :
温度の変化にともない、材料に伸び縮みが生じること
- ・ 金属間化合物=IMC(Inter-metallic compound) :
2種類以上の金属によって構成される化合物 はんだでは、 Cu_3Sn や Cu_6Sn_5 、 Ag_3Sn などが知られる。
- ・ IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) :
電力制御用途に使用されるバイポーラトランジスタ
- ・ FWD (Free Wheel Diode) :
負荷電流を転流させるためのダイオード、還流ダイオードとも呼ばれる
- ・ Ag_3Sn :
Ag と Sn の間で生成する融点が約 480°C の安定した金属間化合物。
- ・ カーケンダルボイド :
金属の相互拡散の不均衡や金属間化合物層の成長に伴い、発生するボイド
- ・ 高温はんだ :
一般的に融点が 300°C の近傍にあるはんだをいう。



この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。