

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「シリコンインゴット等切断用超薄型バンドソーの開発」

研究開発成果等報告書

平成22年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 よこはまティエルオー株式会社

## 目 次

I. 第1章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制	4
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	7
II. 第2章 本論	8
①1-1 基台製造、ロー材及び操炉条件の開発	8
1-1-1：ダイヤモンドを強固に固着させるための材料、形状開発。	8
1-1-2：Ni系ロー材を基本としたダイヤモンドとの濡れ性を良くした新ロー材の開発。	10
1-1-3：新規開発 Ni系ロー材の適正な処理温度条件の開発。	13
②1-2 強靱なダイヤモンド砥粒及び磨列の開発	15
1-2-1：高温破砕値の良好なダイヤモンド砥粒の開発。	15
1-2-2：高温破砕値の良好なダイヤモンド粒の評価方法。	15
1-2-3：切断効率の高いダイヤモンドの配置、角度等技術の開発。	16
1-2-4：チップの製作	17
③1-3 アッセンブリ技術の開発	19
1-3-1：ダイヤモンドを固着させた基台を高精度にバンドソーボディに取付ける方法の開発。	19
④1-4 切断効率の評価方法の確立	23
1-4-1：切断効率の実証方法の定量化。	23
III. 最終章 全体総括まとめ。	25

## 第1章 研究開発の概要

本研究開発では、シリコンインゴットの粗切断に使われているバンドソーに付けられるダイヤモンド砥粒及びその固定方式を従来方式と考え方を変え、強固なものとして全体としての性能を向上させ、切削性、寿命及び歩留まりを良好にした工具の開発を行う。この開発は従来方式の工具と全く違った方法で製作するものである。

まず、切削性及び寿命の向上には切れ刃として使用するダイヤモンド砥粒の強度を上げる事を実施する。このダイヤモンドの強度は（熱をかけた状態での破砕性：TTI値：#200の粒度で80以上；現状は50程度）TTI値で80以上を想定。

次に、このダイヤモンドを強力に固着反応させて載せる基台も強度、濡れ性を必要とするため、耐用性があり、変形に強い基台の選択を行う。

また、この切削性と寿命を満足させるためには、ダイヤモンド砥粒を保持する方法を機械的な固着より非常に高い固着が必要なため、高い固着力を有する高温での特殊ロー付け方法を開発する。  
（この際、更に固着を強固にするためロー付材の成分をダイヤモンド及び基台の両方と反応して、強力に固着するようなロー材を開発する。）

また、製品歩留まり向上には薄刃基台へのダイヤモンド砥粒を確実に固着する方法の開発を行う。

バンドボディと基台の接続方法の開発。（ダイヤモンド砥粒を固着したバンドボディと切断刃との精度確保。）が不可欠。

これらの方法を開発することによって、現状の問題点を大幅に改善することを目指す。

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

本研究開発の目的は、太陽電池市場規模の伸びに伴いシリコンインゴットをスライスしたウエハが求められているなかで、特に多結晶シリコンインゴットの粗切断用バンドソーの生産性が悪く、コスト高の原因になっている。この多結晶シリコンインゴットの表面は硬く、脆いため従来方式ではセグメントタイプのチップを使い、能率の悪い切断方法を取らざるを得ないのが現状である。これを踏まえて、切断スピード、歩留り、切断刃の寿命の技術的課題を解決する手段を確立することがコストダウンを容易にし、普及促進に大きな要素となる。このため、高スピードで歩留りが良く、長寿命化した高性能バンドソーの製品化がシリコン、をはじめとしたガラス等難削材、新素材等を扱う多岐分野の川下製造業者への素材の安定供給を可能にする。

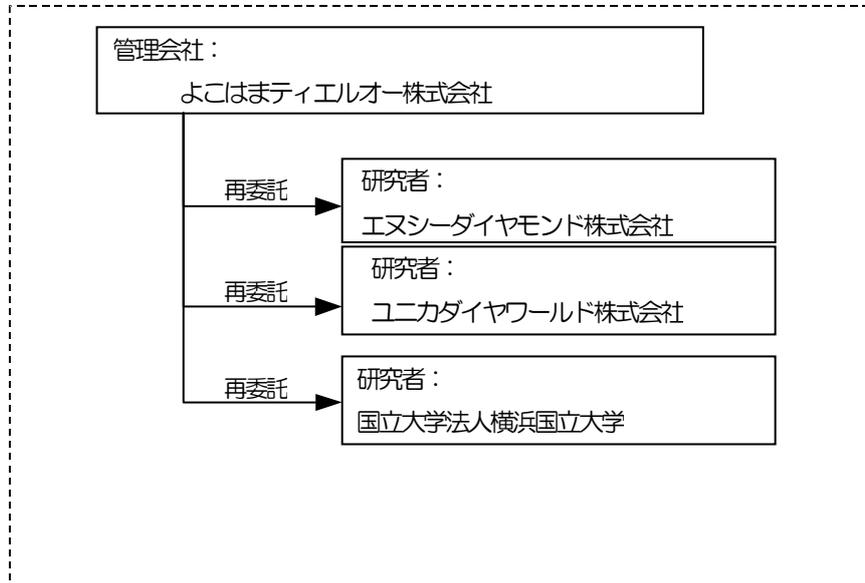
研究の目標として、まず切断速度を従来の約2倍を目標とし20mm/分を目指す。また歩留まり向上を考慮し、切断幅を従来の2/3、及び切断精度も約2倍を目標とする。

更に、工具寿命を約2倍としてトータルコストを下げることにする。

1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者) 研究者氏名、協力者)

研究管理体制



統括研究代表者 (PL)  
エヌシーダイヤモンド株式会社  
代表取締役 木澤 真一

副統括研究代表者 (SL)  
国立大学法人横浜国立大学  
工学研究院システムの創生部門・教授  
高木 純一郎

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
委託先 (管理会社)：よこはまティエルオー株式会社		
小管 明良	執行役員	⑤
再委託先：エヌシーダイヤモンド株式会社 (研究者名)		
木澤 真一	代表取締役	①②③④
鈴木 伸二	専務取締役	①②③④
小岩 政浩	取締役技術部長	①②③④
木澤 存文	技術部	①②③④
小笠原 直人	製造部	
再委託先：ユニカダイヤワールド株式会社 (研究者名)		
真崎 繁	代表取締役	③④
再委託先：国立大学法人 横浜国立大学 (研究者名)		
高木 純一郎	工学研究院システムの創生部門・教授	②④

## 1-3 成果概要

### 3) 実施内容

#### ①1-1 基台製造、ロー材及び操炉条件の開発（実施：エヌシーダイヤモンド㈱）

##### 1-1-1：ダイヤモンドを強固に固着させるための材料、形状開発。

- ・高温での処理後の変形が0.1mm以下で、材力が $350\text{N/mm}^2$ 以上あること。
- ・特に角部の形状を考慮し、基台ダイヤモンドが適正に固着されていること。

高温処理（熱処理曲線考慮）での変形に強い材料を選択し、特に基台角部形状を変化させてダイヤモンドの固着性を3次元顕微鏡で評価し決定する。

⇒成果：基台材質を数種類選択し、引張強度、変形を満足する材料及び形状の開発完了。

開発したろう材を使用してのロー付け（熱処理）後の変形も0.1mm以下に押さえることができた。

##### 1-1-2：Ni系ロー材を基本としたダイヤモンドとの濡れ性を良くした新ロー材の開発。

- ・市販のロー材にある種の元素を添加すると濡れ性が良好になる事確認済。

更に効果のありそうな元素を試験。実証はロー付け後引張試験で評価、開発。

⇒成果：ロー材は、効果のありそうな元素を2種類選択し、BNi-2 と BNi-7 を基本とした2種類の独自ロー材を開発し、ダイヤモンドとの濡れ性を真空ロー付け試験を行った結果、実体顕微鏡による評価及び、引張試験で確認された。

##### 1-1-3：新規開発 Ni系ロー材の適正な処理温度条件の開発。

- ・処理温度 $1,000^\circ\text{C}$ 以下で上記条件を満たす事。
- ・評価は3次元顕微鏡観察による。

ダイヤモンド砥粒とロー材のかぶり寸法と形状を顕微鏡で測定。現状では実際の加工での評価で砥粒の半分までロー材が盛り上っている事及び盛り上りカーブで判断可能。

⇒成果：BNi-2 $\bar{\lambda}$ - $\lambda$ 及びBNi-7 $\bar{\lambda}$ - $\lambda$ で試験。BNi-7 $\bar{\lambda}$ - $\lambda$ では、 $1,000^\circ\text{C}$ 以下迄処理温度を下げることに成功、高C向けに適する。また、BNi-2 $\bar{\lambda}$ - $\lambda$ では $1,000^\circ\text{C}$ 以下までは行かなかったが、温度は現状より下げられた。

このことは、3次元実体顕微鏡によるダイヤモンド砥粒に対するロー材の盛り上がり程度で判断した。今回の使用材料は客先の要望により、SUS系としたためBNi-2 $\bar{\lambda}$ - $\lambda$ を使用した。

②1-2 強靱なダイヤモンド砥粒及び配列の開発（実施：エヌシーダイヤモンド(株)、  
横浜国立大学）

1-2-1：高温破砕値の良好なダイヤモンド砥粒の開発。

- ・高温破砕値は：80以上（TTI値）、目標に近い砥粒が見えてる。従来は：50

⇒成果：我々の目標としている TTI 値80以上（硬質+#120/140で TTI 値80以上）の砥粒が開発され、購入し使用した。

1-2-2：高温破砕値の良好なダイヤモンド粒の評価方法。

- ・破砕値の評価方法はカプセルに一定量のダイヤモンド砥粒と鋼球を入れ、一定時間振動を与えた後の破砕状態を測定する。

⇒成果：ダイヤモンド製造・販売先で測定した結果、上記が確認された。

1-2-3：切断効率の高いダイヤモンドの配置、角度等技術の開発。

- ・効率的な工具としてのダイヤモンドの配列方法の開発は横浜国立大学との共同研究で把握している角度・配列をベースに数種類を選択して行く。（トライ＆エラー）

⇒成果：横浜国立大学でのダイヤモンド配列角度の試験を3種類に振って試験した結果、最も良い切削性が得られた角度を採用した。

③1-3 アッセンブリ技術の開発（実施：エヌシーダイヤモンド株式会社、  
ユニカダイヤモンド株式会社）

1-3-1：ダイヤモンドを固着させた基台を高精度にバンドソーボディに取付ける方法の開発。

- ・精度確保（0.1mm以下）を確保するための治具製作。取付け方法の検討、開発する。

⇒成果：コノ字形状に設計・製作し、バンドボディへセットし、低入熱接合により固定した。この方法は、接合時の熱が殆ど発生しないため接合後の矯正処理が不要となった事は非常に大きな成果であった。また強度もあり実用に耐えられることがわかった。

また、精度確保のための治具を製作、何度かの調整で完成した。

さらに、次の方法として更に薄い基台を目指し、0.5mmの基台にダイヤモンドを真空ロー付け（刃厚：0.8mm）し低入熱溶着による試験を行った結果も切削速度は良好であった。

④1-4 切断効率の評価方法の確立（実施：エヌシーダイヤモンド株式会社、  
横浜国立大学、ユニカダイヤモンド株式会社）

1-4-1：切断効率の実証方法の定量化。

- ・切断試験を実施し、切断効率（スピード、寿命）で判断。

⇒成果：今まで、セグメント方式では切断出来るが、電着方式では全く歯が立たない多結晶シリコンの表層部の切断に関し、セグメント方式に対し約 2 倍の切断スピードが実現できた。但し、寿命の点でまだ不足。ダイヤモンドのコンセン  
トレーションを上げるなどで対処可能。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

エヌシーダイヤモンド株式会社  
取締役 技術部長  
小岩 政浩  
TEL：045-924-4577  
FAX：045-921-1508  
E-mail：koiwa@ncdiamond.co.jp

## 第2章 本論

### ①1-1 基台製造、ロー材及び操炉条件の開発

#### 1-1-1：ダイヤモンドを強固に固着させるための材料、形状開発。

当社の今までの経験で基台材質としては S45C もしくは SS400 がロー材の濡れ性及びダイヤモンド砥粒との三者間の相性が良く安心して使用できた。

従って加工精度を確保しやすいことから S45C を主に選定していたが、従来品との差別化をはかるため、シリコンインゴット切断中に錆を発生させない工具にまで発展させることになったため、SUS 系材料の採用とした。

アッセンブリ精度の向上を目的としてコノ字型とストレート型の2種類を考案した。

#### 1-1-1-1 コノ字型チップ用基台の開発

コノ字型はストレートに加工されたバンドソーボディにチップを固定できる形状であり、加工精度と治具精度で簡単に工具精度を出せるようにした形状で、従来の銀ローを使用したロー付け以上に精度を確保できるしくみである。

図1にコノ字型チップを使用したバンドソー完成図をそれぞれ示す。

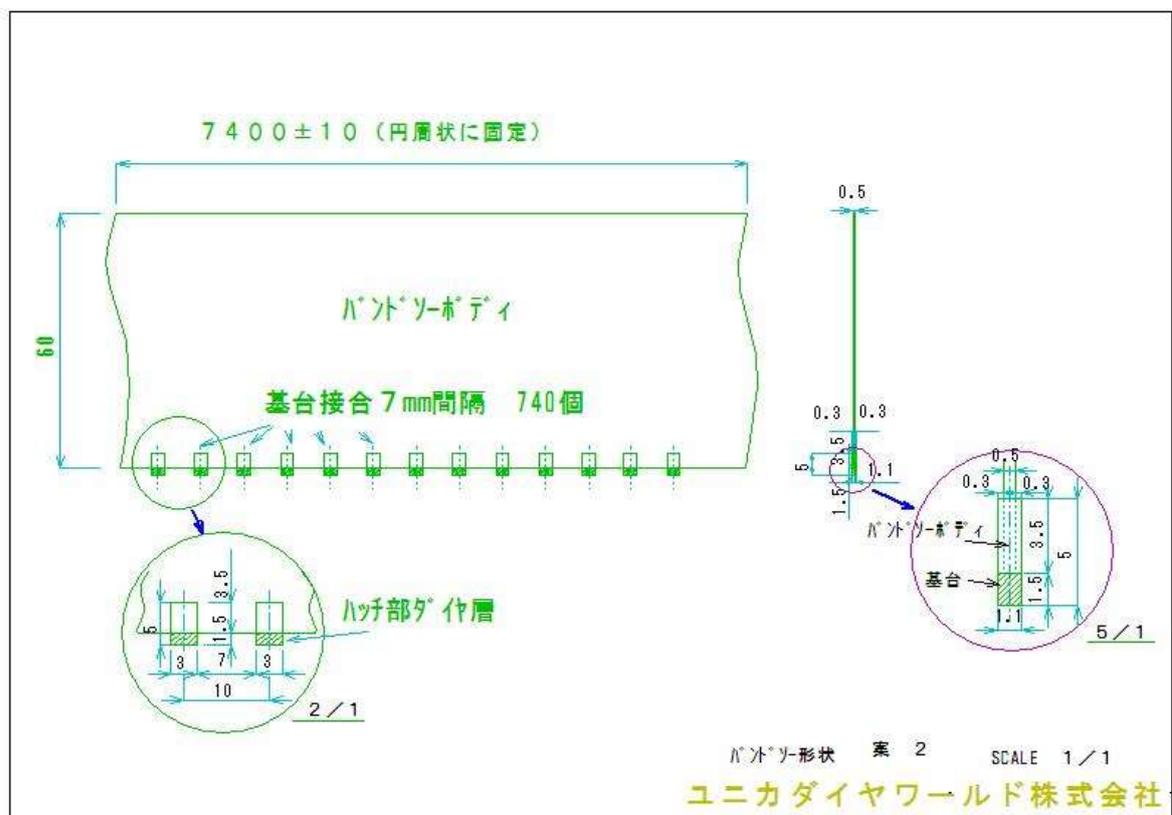


図1 コノ字型チップを使用したバンドソー完成図

このコノ字型チップ用基台では、加工精度が重要となり、この加工精度を確保するために、SUS系快削鋼であるSUS303を採用した。

このSUS303はダイヤモンド砥粒のロー付け固定時の熱処理後の強度も熱処理前とほとんど変わらず、熱処理条件次第で加工歪みによる変形も押さえられることが分かった。

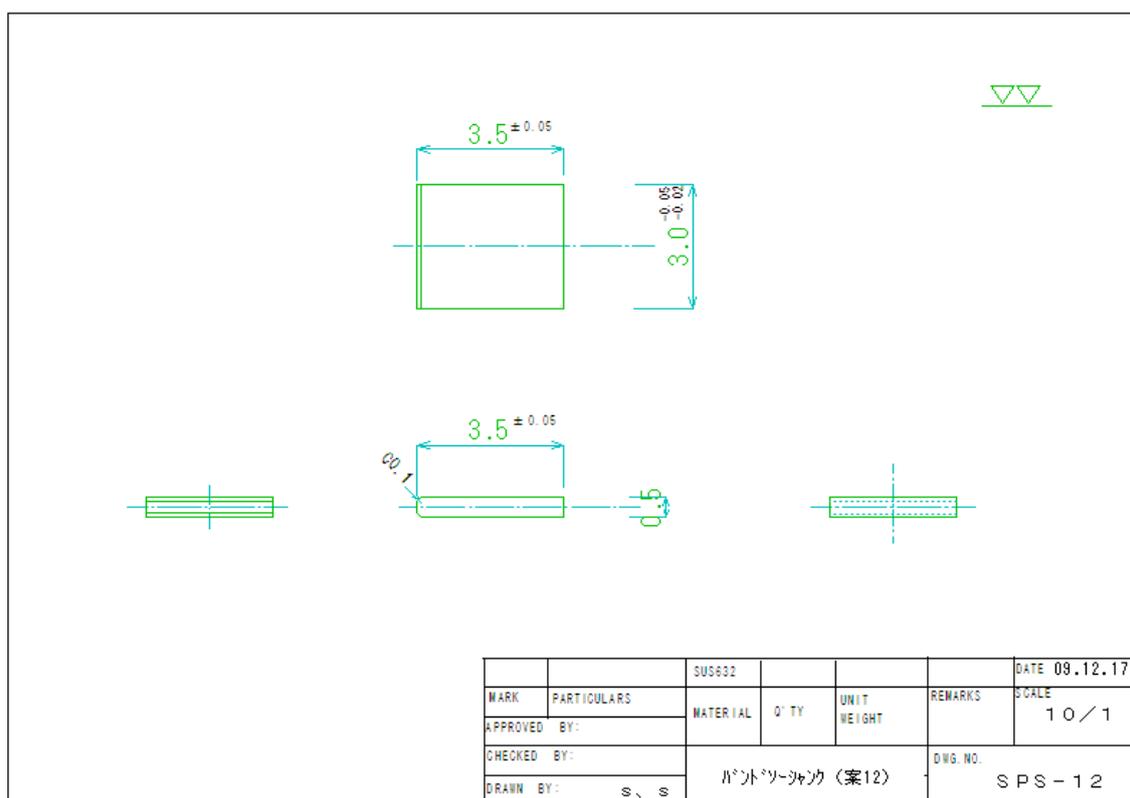
### 1-1-1-2 ストレート型チップ用基台の開発

ストレート型はバンドソーボディにチップがセットされる部分の形状を型抜きすることによりあらかじめセット位置を限定しておき、バンドソーボディとチップをセットした状態で低入熱溶着により接合するようにした形状で、アセンブリ時の熱影響を極小にできる方式である。

0.5mmのバンドソーボディにチップを固定するには、低入熱溶着法を使用し、種々ある溶着法の中でも入熱をコントロールできるのは、連続ポイント溶着が一番可能性として高かったため、連続ポイント溶着法を採用することを前提でこの基台の設計開発を行った。

図2にストレート型基台図を、図3にストレート型チップを使用したバンドソー完成図をそれぞれ示す。

これにより刃厚は0.8mm以下となり、目標値であるカーフロス0.8mm以下の超薄型バンドソーが製作できることになる。



エスシーダイヤモンド株式会社

図2 ストレート型基台図

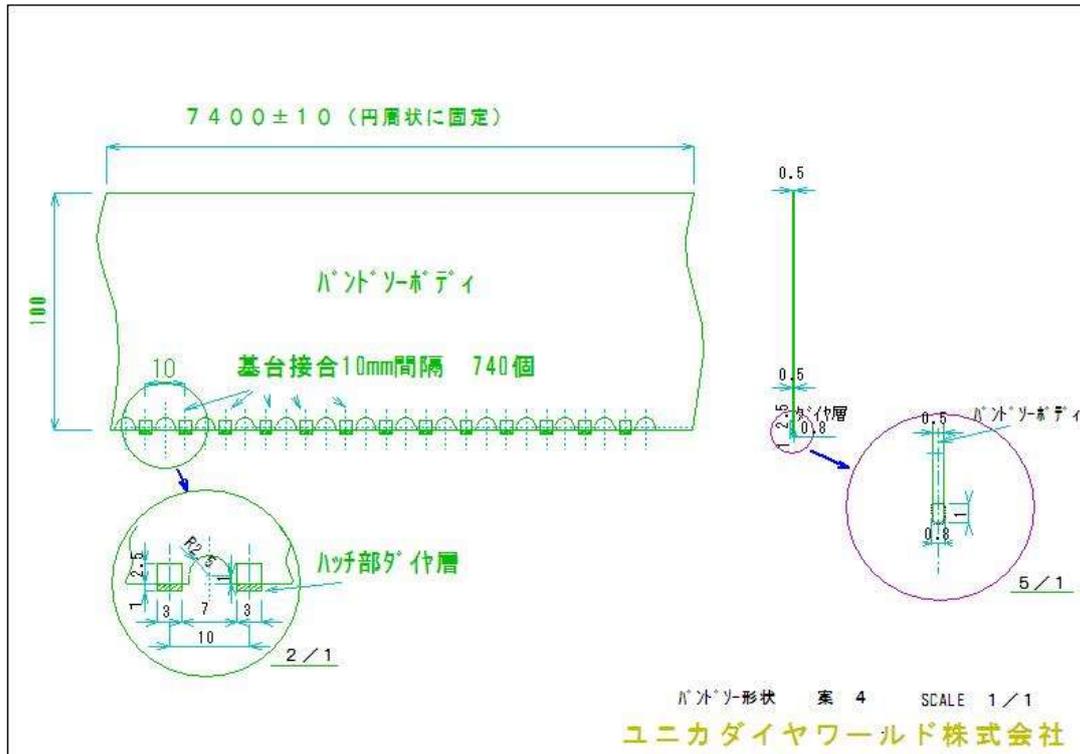


図3 ストレート型チップを使用したバンドソー完成図

1-1-2 : Ni系ロー材を基本としたダイヤモンドとの濡れ性を良くした新ロー材の開発。  
 ダイヤモンド砥粒とそれを固定する基台（合金）両方への濡れ性が良く、しかもダイヤモンド砥粒と反応して合金化する組成を含むことを条件に開発を進めた。  
 数種類の元素に着目し、これを利用しダイヤモンド砥粒との合金化を狙った。

#### 1-1-2-1 粉末組成

Ni系ロー材は処理温度の大きく異なるBNi-2とBNi-7の2種を選択した。  
 また、ダイヤモンド砥粒との濡れ性を改良するために有効であった元素を選択し使用した。

基台との濡れ性を改良するためと、処理温度を下げる目的で更に有効性のある粉末も使用した。

Ni系ベースロー材BNi-2とBNi-7に対して、上記の元素の添加量を変え試験し、最適添加量を探った。

#### 1-1-2-2 粉末混合

ロー材粉末の混合はターブラー（写真1）とライカイ機（写真2）の2機種を選択し、最適条件を見いだした。



写真1 ターブラー混合機



写真2 ライカイ機混合機

顕微鏡観察の結果、ロー材粉末のみの乾式混合では、ライカイ機を使用した結果が良く、最適の時間が判明した。

他の条件では各粉末クラスターが偏析として存在または、粒成長が確認されたため、混合条件から除外した。

#### 1-1-2-3 評価サンプル作成

ダイヤモンド砥粒とそれを固定する基台（合金）両方への濡れ性を評価・確認するため、図4のような状態のサンプルを作成した。

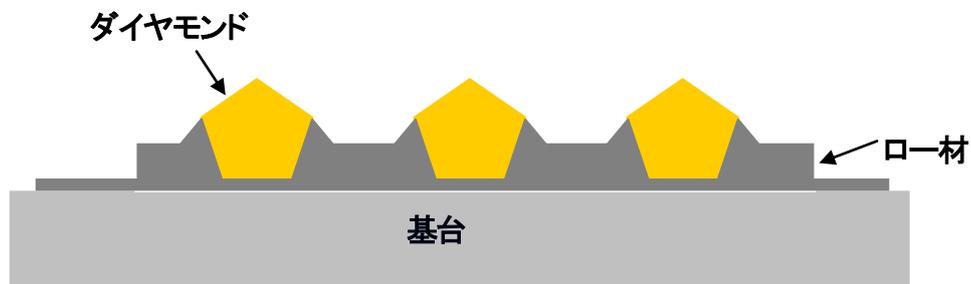
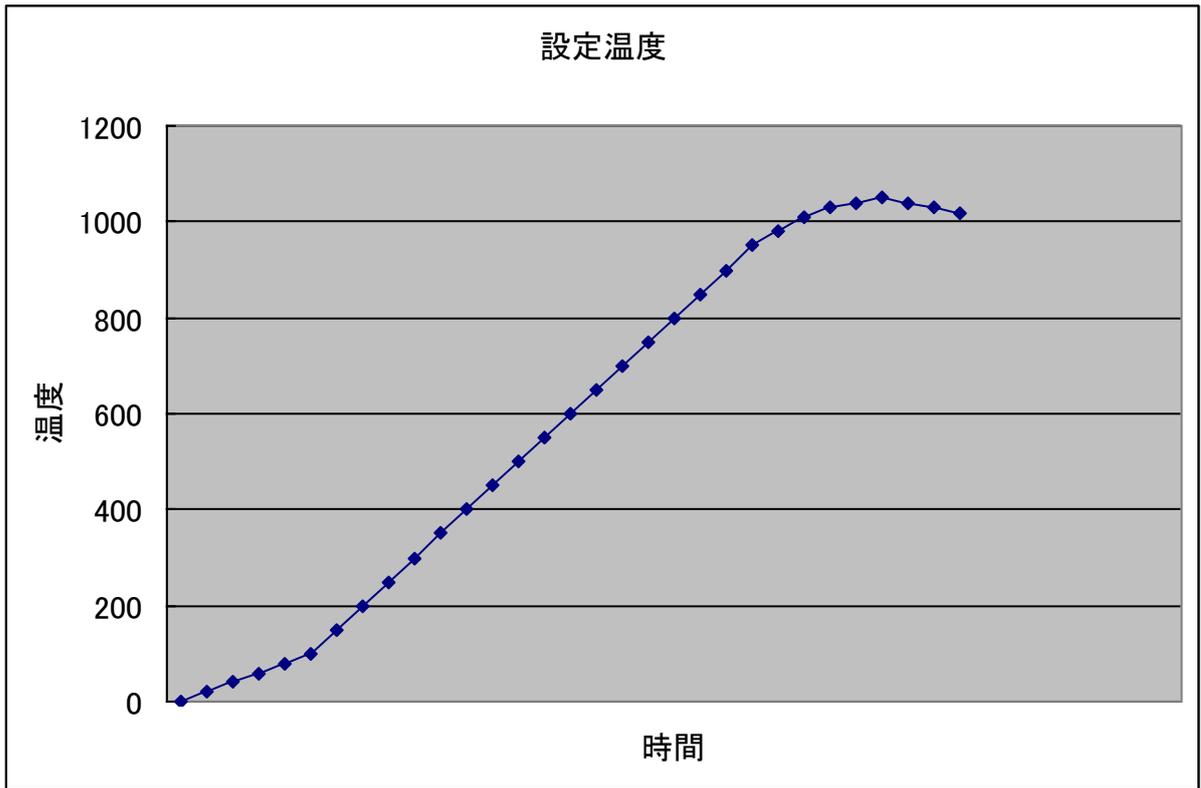


図4 評価サンプル

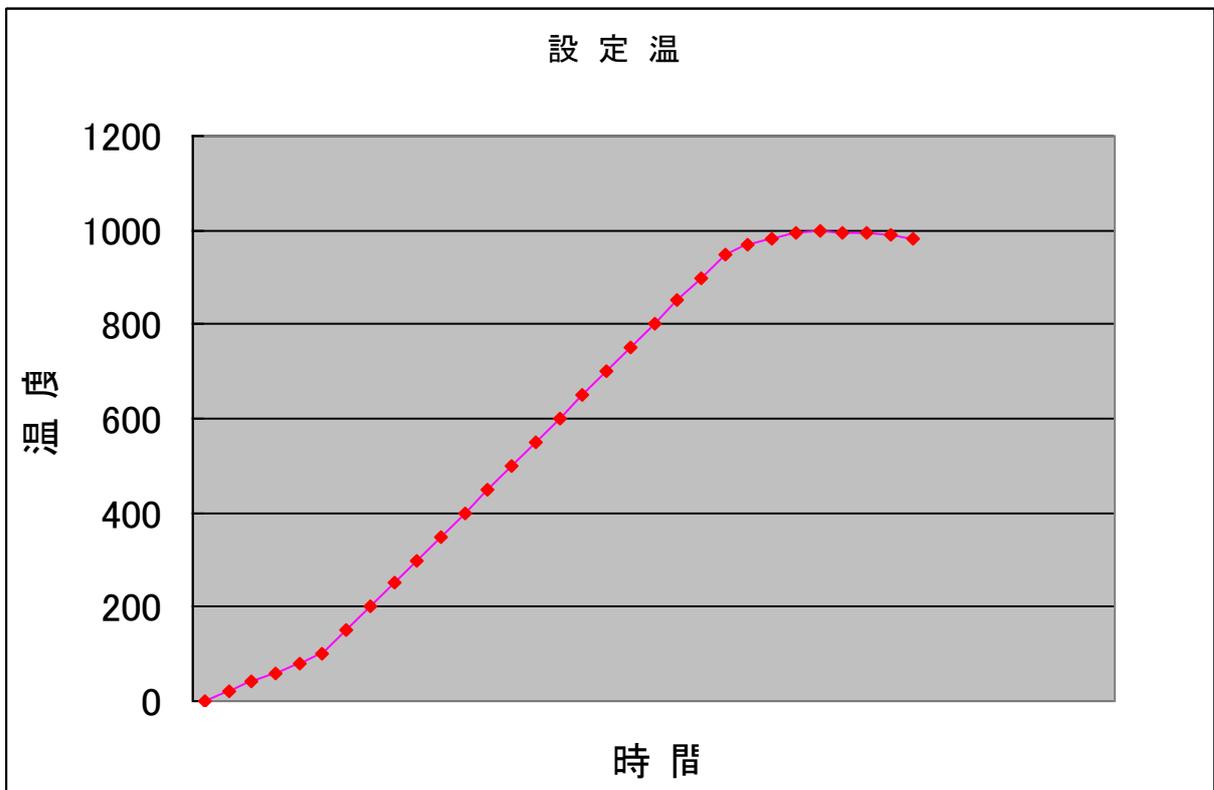
ロー材粉末を基台に接着し、その後ダイヤモンド砥粒をロー材にセットする。それを基台に取り付け真空炉で熱処理して評価サンプルを作成する。

#### 1-1-2-4 真空炉でのロー付け

真空炉の操炉条件はグラフ1、グラフ2のようにロー材融点異なるため、BNi-2系とBNi-7系とで分けて各組成系では同一条件とした。



グラフ1 BNi-2系組成ロー剤の真空炉処理条件



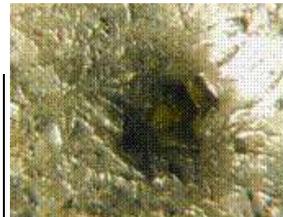
グラフ2 BNi-7系組成ロー剤の真空炉処理条件

### 1-1-2-5 サンプルのダイヤモンド砥粒と基台へのロー材濡れ性評価

作成したサンプルの実体顕微鏡で各組成毎のダイヤモンド砥粒と基台へのロー材濡れ性を観察し、合否を判定した。

表1にロー材の組成と評価内容を示す。

表1 ロー材濡れ性評価表 (BNi-2系)

組成1	組成2	組成3
ダイヤモンド砥粒に対する濡れ性が不足。砥粒を掴みきれない	ダイヤモンド砥粒に対する濡れ性が良好	ダイヤモンド砥粒に対する濡れ性が良すぎて砥粒が埋没。
		
組成4	組成5	組成6
ダイヤモンド砥粒に対する濡れ性が不足。砥粒を掴みきれない	同左	ダイヤモンド砥粒に対する濡れ性が良好。
		

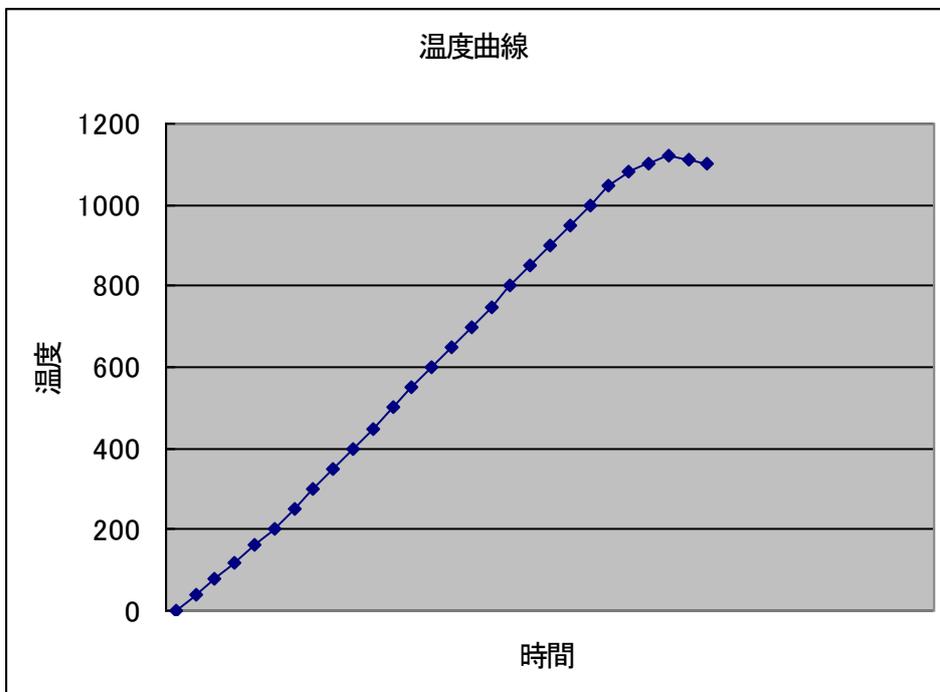
この結果、BNi-2系は組成2、またBNi-7系は組成6を採用する。

### 1-1-3：新規開発Ni系ロー材の適正な処理温度条件の開発。

開発した2種のロー材 BNi-2系は組成2、またBNi-7系は組成6に対して最適な温度条件を探るため、組成判定した条件を基に基台の変形量も小さくできる熱処理条件を詰めていった。

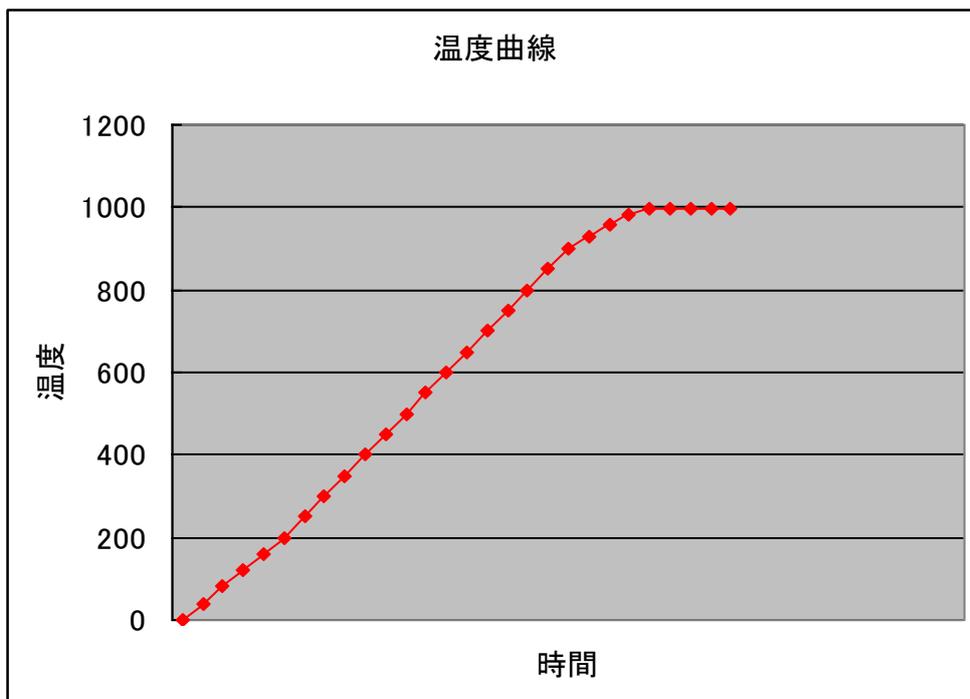
### 1-1-3-1 BNi-2系ロー材組成2の熱処理条件

SUS系材質には良好な濡れ性を発揮するが、C（カーボン）量の比較的多いS45CやFCD400には濡れ性が不十分であったため、SS系（SS400等）やSUS系材料にはこのロー材を採用する。



グラフ3 BNi-2系組成2の最適条件

### 1-1-3-2 BNi-7系ロー材組成6の熱処理条件



#### グラフ4 BNi-7系は組成6に対しての最適条件

また、S45C や FCD400 には良好な濡れ性を発揮するが、C（カーボン）量の少ない SUS 系材質には濡れ性が不十分であったため、高カーボン系材料にはこのロー材を採用する。

今回は、シリコンインゴット切断中に錆を発生させない工具にまで発展させることになったため、このロー材は採用しないこととした。

#### ②1-2 強靱なダイヤモンド砥粒及び配列の開発

1-2-1：高温破砕値の良好なダイヤモンド砥粒の開発。

従来までの購入できるダイヤモンド砥粒で80メッシュ以下の粒度ではT.T.I値（Thermal Toughness Index：1,100°C加熱後の破砕強度）が50程度であったのに対して、特別に通常+、硬質、硬質+の3種類を製造してもらい本試験に使用した。

T.T.I値だけではなく、結晶面同士の角度が90°に近づけること、ツイン砥粒が無いことをさらに付け加えた上で、特注生産となった。

従来品と本特別製作品の強度比較を表2に示す。

このダイヤモンド砥粒は、結晶形状の影響から現製造工程では完全な篩い分けが不可能であることから、当社にて20oct.ずつその都度篩いの網を新品に交換しながら手作業にて篩い分けし、目的粒度に揃えてから使用した。

表2 ダイヤモンド砥粒メーカーでのT.I、T.T.I測定結果

ダイヤモンド砥粒種類	T.I	T.T.I	T.I/T.T.I
従来品 80~400	119	80	67
硬質 80/100	165	135	≥80
硬質 100/120	175	145	≥80
硬質+80/100	175	140	≥80
硬質+100/120	185	155	≥80
従来品 MBS960 40/50	180	136	76
通常+40/50	196	174	≥80
硬質 40/50	215	185	≥80
硬質+40/50	230	190	≥80

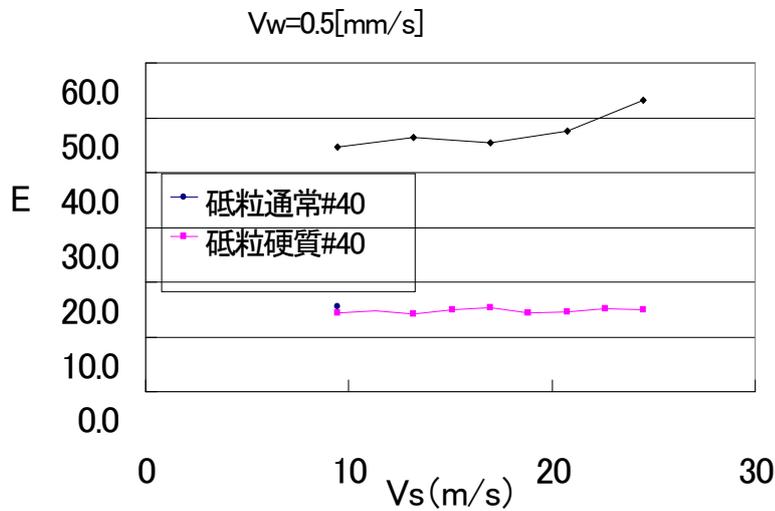
1-2-2：高温破砕値の良好なダイヤモンド粒の評価方法。

従来と同様のT.I値（Toughness Index）、T.T.I値（Thermal Toughness Index）測定機、測定方法にて購入先で測定してもらい、数値は確認した。

さらに、今までにデータの揃っている粒度のダイヤモンド砥粒を使用して代表的な2種

を選定して横浜国大の高木研究室にてφ180切断刃を使用して鉄鋼切断試験を行い、切断抵抗及び砥粒破碎の状態を比較・評価した。

グラフ5にその結果を示す。



グラフ5 ダイヤモンド砥粒種別差による切断エネルギーの変化比較

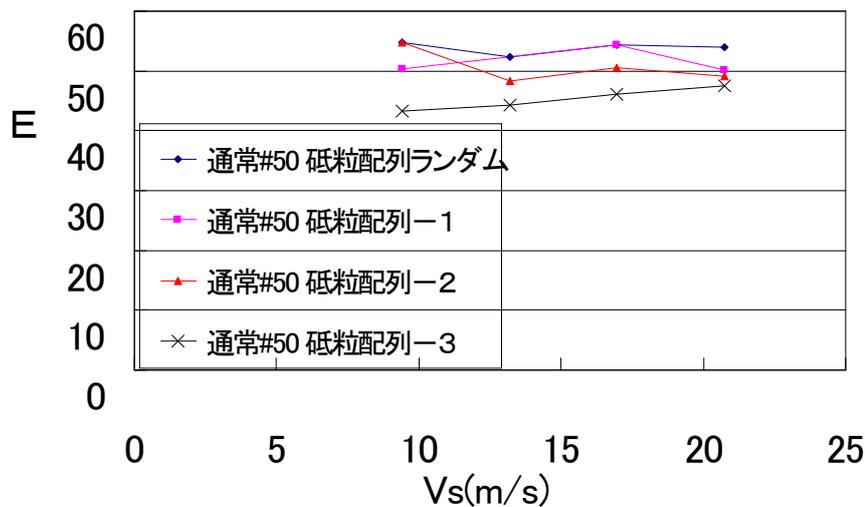
1-2-3：切断効率の高いダイヤモンドの配置、角度等技術の開発。

横浜国大の高木研究室にて砥粒の配置方法で切断エネルギーが低く抑えられる条件を探った。

データが顕著に表れるように被切断材料にはSS400を使用した。

切断刃の回転数、送り速度等を変化させながら砥粒配置の差がはっきりわかる条件にて比較・評価した。

グラフ6に変化させた砥粒配置角度の比較とその結果を示す。



グラフ6 ダイヤモンド砥粒配置差による切断エネルギーの変化比較

この結果を踏まえて、砥粒配置は図より一3を採用した。

#### 1-2-4 チップの製作

従来品と当社溶着方式を単純に比較するためにコノ字をはじめに製作し、その次に目標値である0.8mmの厚みのストレート型を製作した。

##### 1-2-4-1 コノ字型チップの製作

従来品と同様の刃厚さ1.5mmを達成するためにコノ字型チップにてバンドソーを製作する。

前記の用に錆を出さないようにすることと、加工精度を上げるためにシャンク材質はSUS303を採用した。

このチップに使用するダイヤモンド砥粒は硬質+80/100を使用した。

ダイヤモンド砥粒配置は横浜国大の高木研究室での試験結果で最良の結果の出た角度、配置を採用した。

バンドボディー端面から1.5mm突出するデザインとなるため、チップ両端1.5mmはダイヤ層とした。

熱処理条件は開発した操炉条件を使用した。

##### 1-2-4-2 チップの製作

チップの製作は、1-1-3の結果を踏まえ、その手順により製作した。



写真3 真空炉への投入

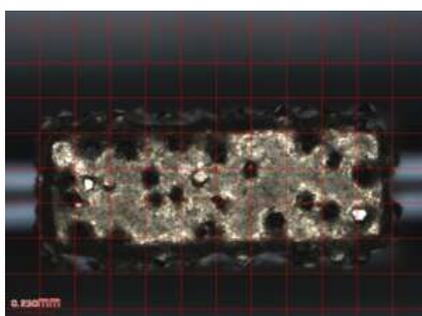


写真4 実体顕微鏡写真

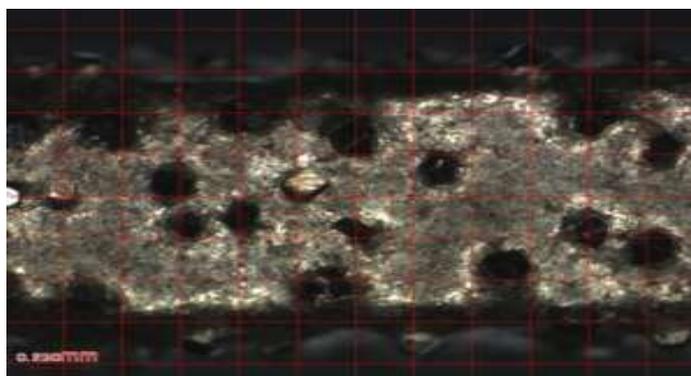


写真5 実体顕微鏡写真拡大



前記、製作手順に従い製作したチップの顕微鏡写真を示す。



写真6 刃厚0.8mmバンドリチップ



写真7 実体顕微鏡写真拡大

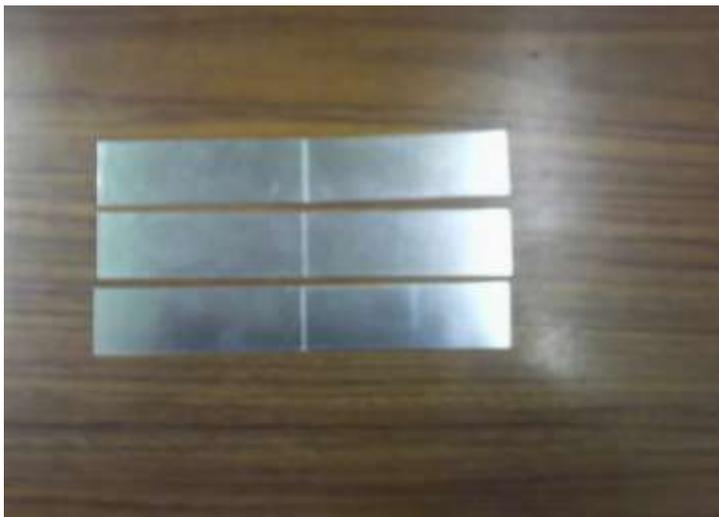
### ③1-3 アッセンブリ技術の開発

1-3-1：ダイヤモンドを固着させた基台を高精度にバンドソーボディに取付ける方法の開発。

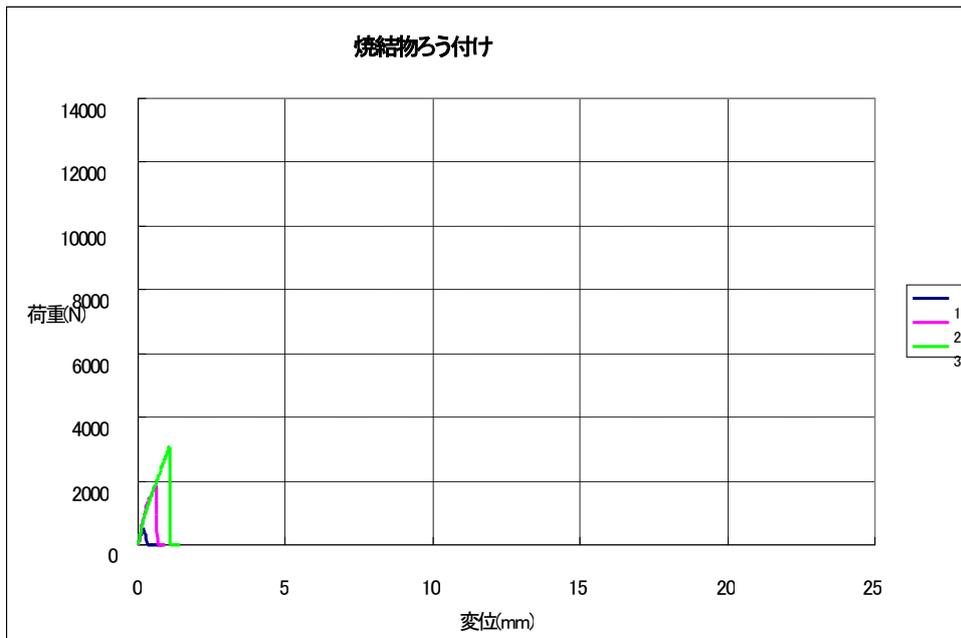
1-3-1-1 コノ字型チップのアッセンブリ方法の開発

コノ字型チップはバンドボディにセットした段階で精度が出るように設計したデザインで、これを接合するのに低入熱接合法を採用した。

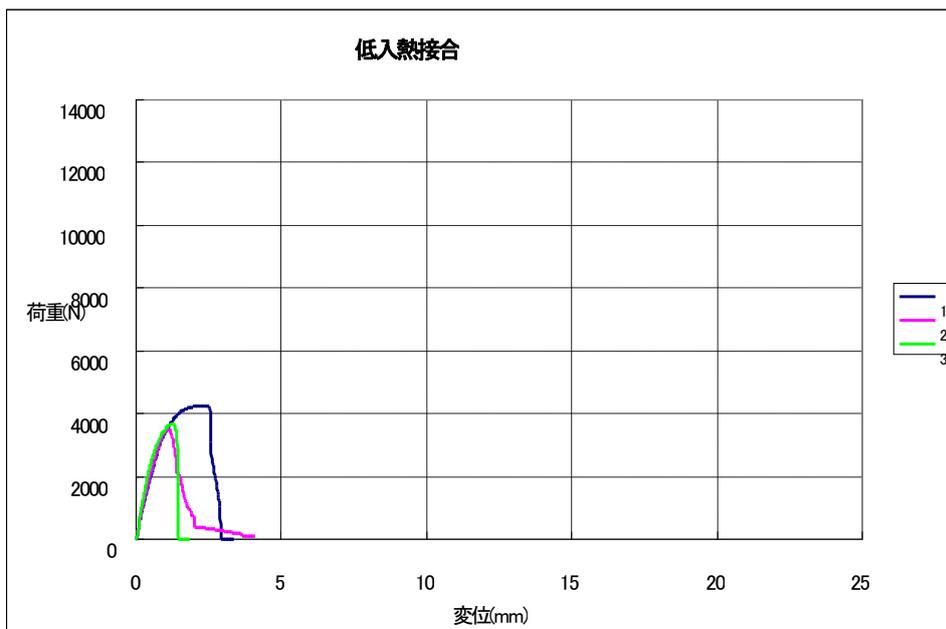
バンドボディとチップ双方に熱歪みを残さないために、従来型の銀ローを使用する方法は採用しないことを前提に検討した結果、コノ字を接合面として使用できることから低入熱接合の可能性が大きく、接合試験での確認を行った。



写真新8引張試験片



グラフ8 メタルボンドロー付け品の引っ張り試験結果



グラフ9 低入熱接合品の引っ張り試験結果

低入熱接合での結果は、メタルボンドの銀ロー付けと比較して平均して約2倍の強度があり、十分に工具として製作できると判断した。



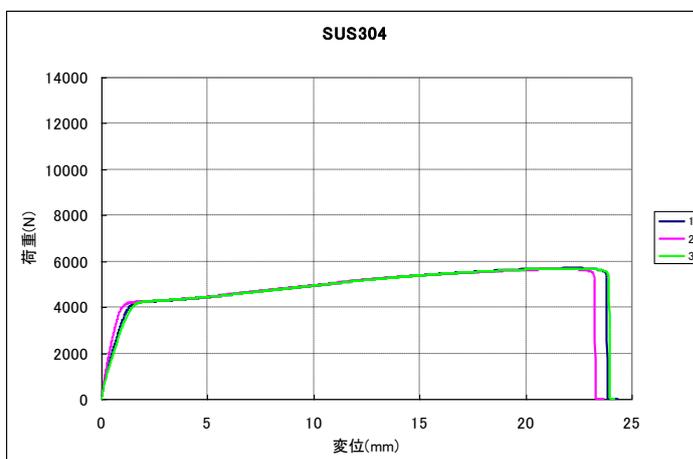
写真9 完成した刃厚1.5mmバンドソー全体  
1-3-1-2 ストレート型チップのアッセンブリ方法の開発

ストレート型チップは幅0.8mmの厚みを達成するために設計したデザインで、これを接合するのに低入熱溶着を採用した。

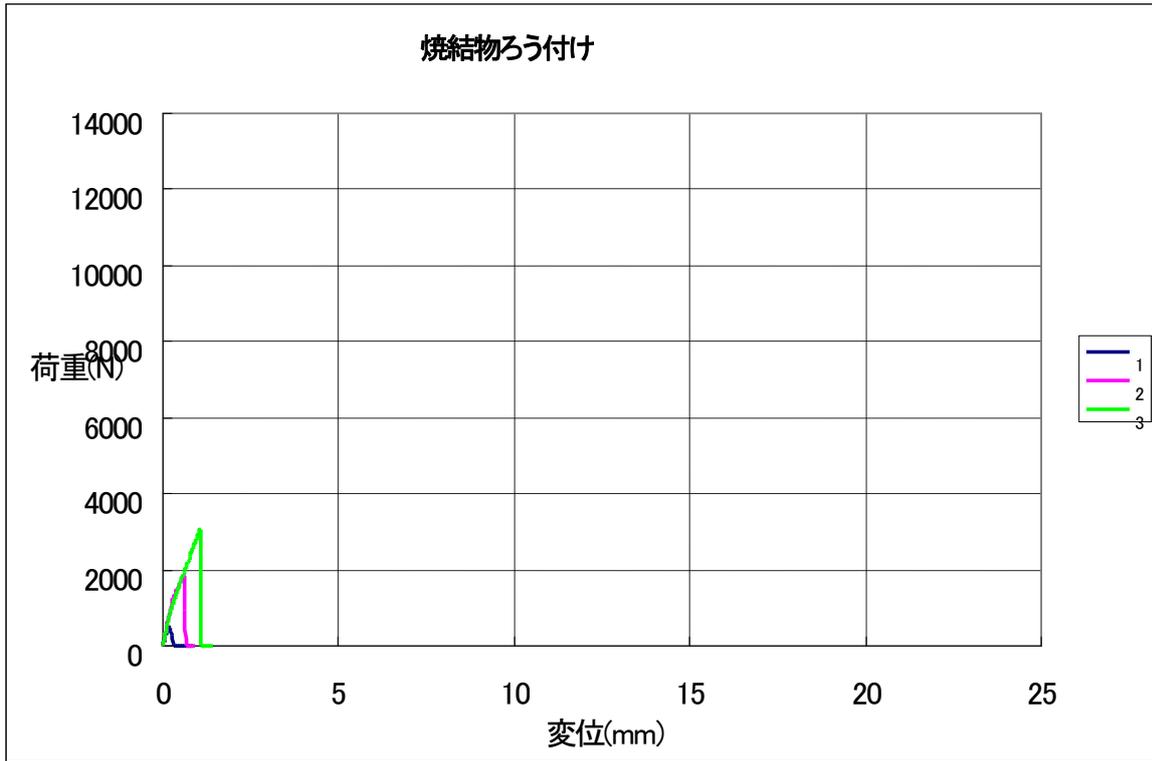
バンドボディとチップ双方に熱歪みを残さないために、従来型の銀ローを使用する方法は採用しないことを前提に検討した結果、溶着ビードの盛り上がり小さく、熱影響部を小さくできる可能性が高いため、接合試験での確認を行った。

引っ張り試験結果をグラフ12に示す。

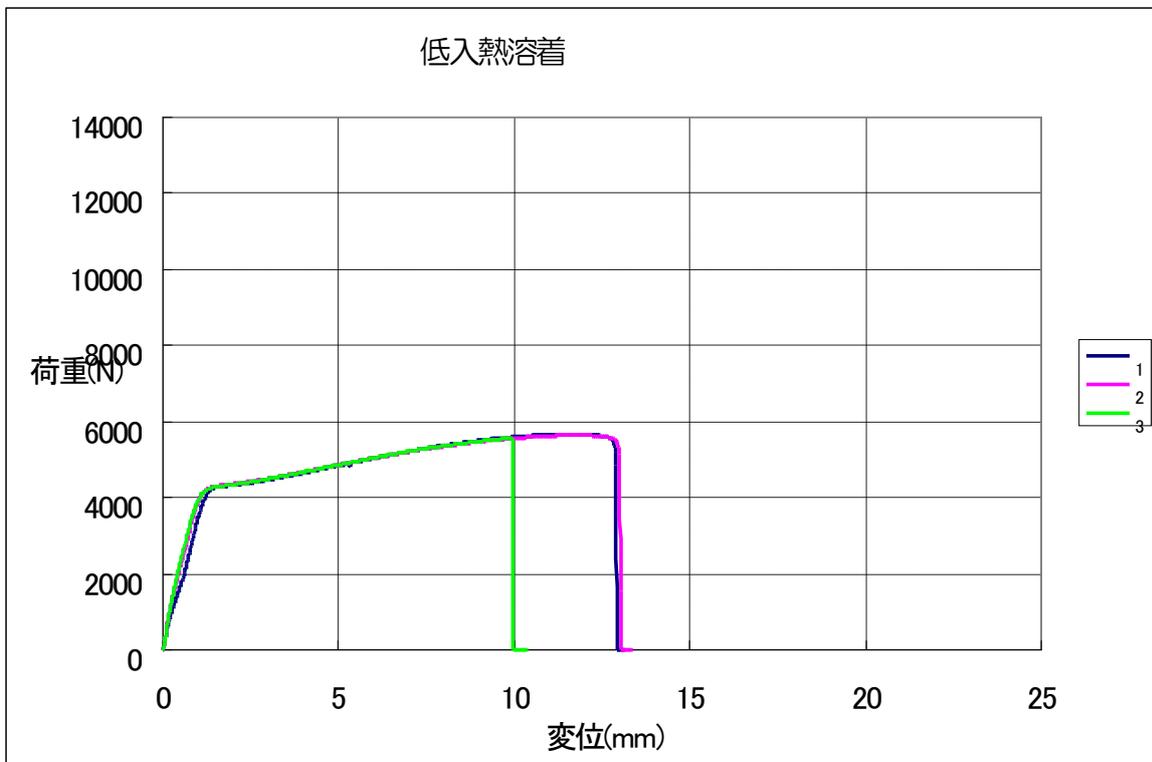
この低入熱溶着ではメタルボンドの銀ロー付けと比較して平均して約2.8倍の強度があり、基台として使用した母材SUS304の強度に非常に近く、十分に工具として製作できると判断した。



グラフ10  
SUS304の引っ張り試験結果



グラフ11 メタボンダーロー付け品の引っ張り試験結果



グラフ12 低入熱溶着品の引っ張り試験結果

低熱溶着のチップ部写真を写真10、に示す。  
また、完成したストレートタイプ0.8mm 刃厚のバンドソーの外観写真を写真11、  
に示す。

写真10 ストレートタイプ、低入熱溶着チップ部



写真11 ストレートタイプ0.8mm 厚バンドソーの全体写真

#### ④1-4 切断効率の評価方法の確立

##### 1-4-1：切断効率の実証方法の定量化。

従来方式のメタルボンドチップ方式と当社溶着方式とを単純に比較するために、シリコンインゴットを切断し切断抵抗を電流値変化で比較した。

太陽電池パネル用シリコンインゴットには単結晶と多結晶の2種類があり、電着工具では多結晶には全く対応できない。

多結晶シリコンインゴットは表層部と内部とでは結晶組織の大きさが異なり、表層部

不純物と冷却速度が速いため非常に緻密で硬い組織になっている。

よって切断は難しく、電着バンドソーではダイヤモンド砥粒を保持しておく力が弱いために現状では各社対応出来ていない。

内部は大きな結晶構造となっており、材料の硬さは単結晶と同様レベルであり電着バンドソーでも対応できる。

したがって、今回の電着バンドソーでの単結晶切断結果は参考値として取り扱うこととする。

今回の試験では、送り速度、切り込み深さ、検出電流値、バンドソー周速、計算送り量、バンドソーテンションの条件を変化・測定しながら、顕著に比較できる検出電流値と計算送り量、機械オペレーターの感想を主に切断試験を行った。

今回の試験では各方式により最適条件が異なったため、最適条件で比較すると表3のように表せる。

No.	条件			結果 実行電流 値 (A)	回転数 (rpm)	周速 (m/min)	送り	テンシ ョ ン (t)
	切断モード	速度 (mm/min)	切込深さ (mm)					
メタルバンドソーでの最適条件								
9	1st	12	270	7.0	283	6855	0.042	2.1
	2nd	-	-	-	-	-	-	-
当社開発溶着バンドソーでの最適条件								
8	1st	15	300	5.3	242	5876	0.062	1.5
	2nd	-	-	-	-	-	-	-

表3 メタルバンドソーと当社溶着バンドソーの最適条件での切断性能比較

この結果から、当社溶着バンドソーの切断抵抗はメタルバンドソーより実質電流値比較で25%低かった。

また実質計算送り量は48%ほどメタルバンドソーより大きくなった。

実行電流値を同一にした場合には、当社溶着バンドソー実質送り量はメタルバンドソーより約90%増加することとなり、同一切断幅、同一チップピッチで行ったとしても、2倍弱の高速切断が可能となる。



写真12 シリコンインゴット切断風景

## 最終章 全体総括

### 1. 研究開発成果

今回の研究開発の結果

#### 1-1 基台製造、ロー材及び操炉条件の開発について

基台材質は、試験先の要望から錆の問題があり、従来試験してきたSS材、SC材からSUS材に変更。SUS303、SUS304の2種類を選択。いずれの材質も材力選定基準を満たし且つ開発したロー材とダイヤモンドとの良好な固着性が得られた。

#### 1-2 強靱なダイヤモンド砥粒及び配列の開発について

今回の目標達成に大きく寄与するダイヤモンド砥粒は、高温破砕値と形状で判断される。目標とされるTTI値は測定した結果満足するものであり、形状も良好であった。

また、ダイヤモンドの配列については横浜国立大学での研究結果から最も良い切削性が得られた角度、配列を採用した。

#### 1-3 アッセンブリ技術の開発について

1-1で決定した材質2種類について、1種類は、客先で使用中の1.1mmとし、低入熱接合もう1種類はバンドソーボディ材と同厚さ0.5mmとし、ストレート型による低入熱溶着とした。何れもバンドボディの熱影響が殆ど無くなり、接合後のバンドへの矯正処理工程を省略する事が出来た。

#### 1-4 切断効率の評価方法の確立について

実際のシリコンインゴットにて切断試験を実施し、切断効率で判断。

今回の切断試験は、電着、セグメントと試作した、コノ字型低入熱接合と突合せ型低入熱溶着タイプとした。

多結晶シリコンの表層部は非常に硬く、電着では切断不能とわかったため、電着の試験結果は単結晶のみとした。

今回は、多結晶シリコンについてセグメント方式との比較とした。

その結果、コノ字型で切断速度は約2倍、ストレート型で3倍となり当初の目的を達成出来た。但し、寿命は約2/3、及び精度が目標の0.1mmを多少オーバーした。

## 2. 研究開発後の課題・事業化展開

今回の研究開発後の課題としては、次の事が挙げられる。

### ① 寿命を伸ばすための方法。

今回の試験結果から、刃先のダイヤモンドの状況を観察した結果C面(0.1)の部分のダイヤモンドだけが抜けて切断不能となった。この部分のダイヤモンド固着強度いかに上げるかが課題。

### ② アッセンブリ方法の改善

今回、アッセンブリ方法は2種類行い、何れもほぼ合格点であった。

しかしながら、コノ字型ではバンドボディに対し幅が大きすぎる事が問題。

また、ストレートタイプは治具や条件設定が十分でなく、取り付け精度が若干不足。

ただし、今回の結果から低熱溶着は使用可能な大きな武器であることが分かった。

## 今後の事業展開

今回の結果から、今後低入熱溶着で精度を上げる試験及びチップC面又はR面のダイヤモンドを如何に強固に固着させるかを検討・実験を重ね、安定した製品にする。

その上で、SUMCO等に展開を行いつつシリコンインゴットのみならず、LED関連の難削材(サファイヤ等)に展開を図っていく。