

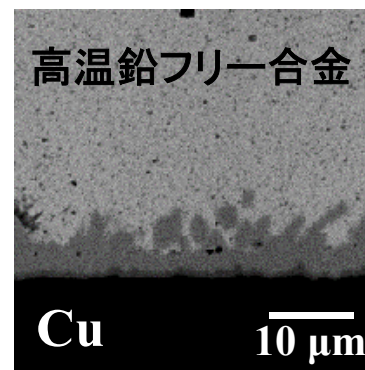
# Society5.0のエネルギーシステム を支える革新的接合材

群馬大学 大学院理工学府 知能機械創製部門  
教授 莊司 郁夫

2019年6月27日

# 紹介技術

- 次世代パワー半導体用高信頼性高温鉛フリー合金



- 高効率小型熱交換器用Niブレージング電解膜の創製  
(A-STEP機能検証フェーズ事業遂行中)

# 研究開発背景

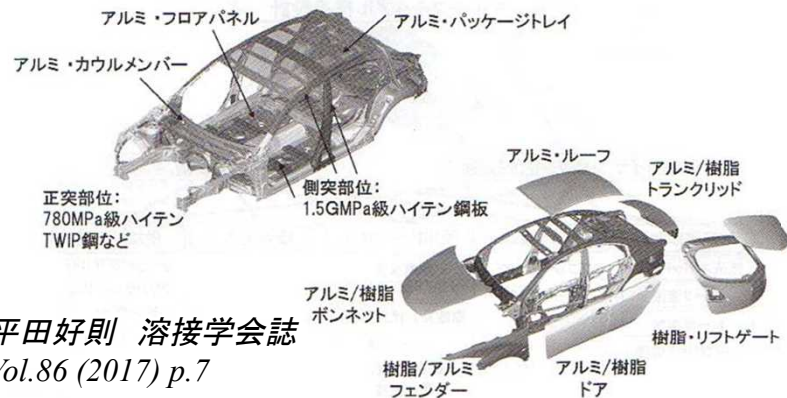
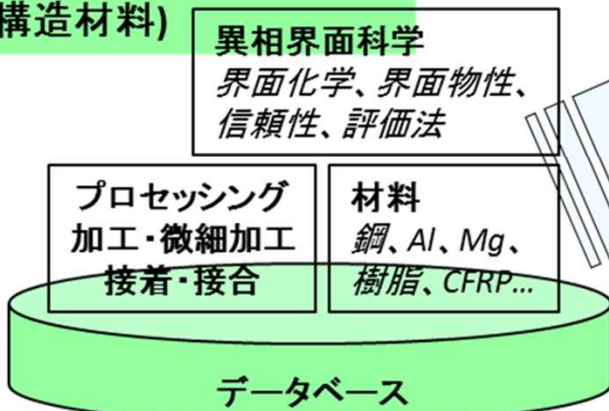


次世代モビリティへ

CO<sub>2</sub>排出量削減のための軽量化

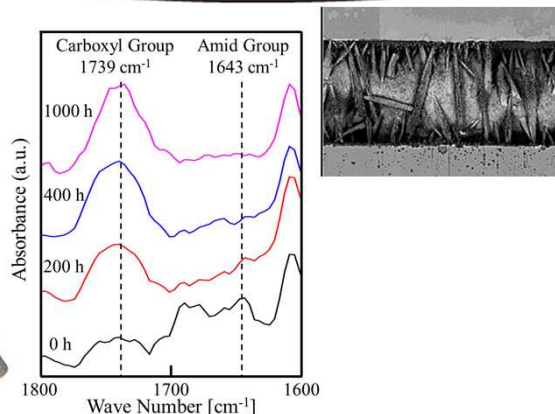
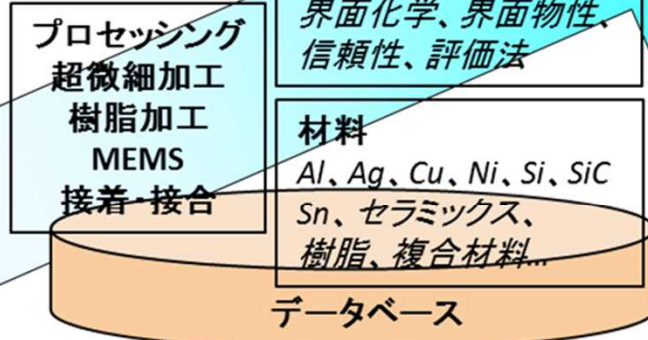


車載版マルチマテリアル (構造材料)



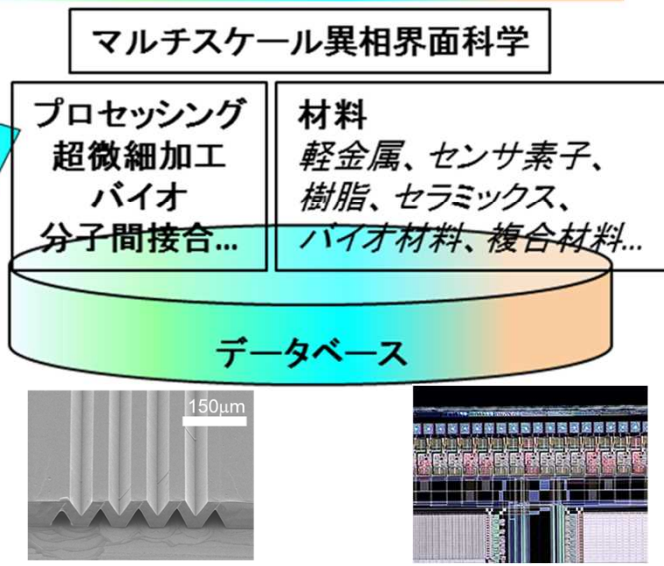
低エネルギーによるエネルギーの高效率利用

電子版マルチマテリアル (電子デバイス材料)



Society 5.0

フィジカル空間版マルチマテリアル



・電気自動車の自動運転時代へ (自動車メーカーの構造改革)  
→ 半導体+AI/IT企業がキー

・エネルギーの高效率利用  
→ 次世代パワー半導体、自然エネルギー

・フィジカル空間機器

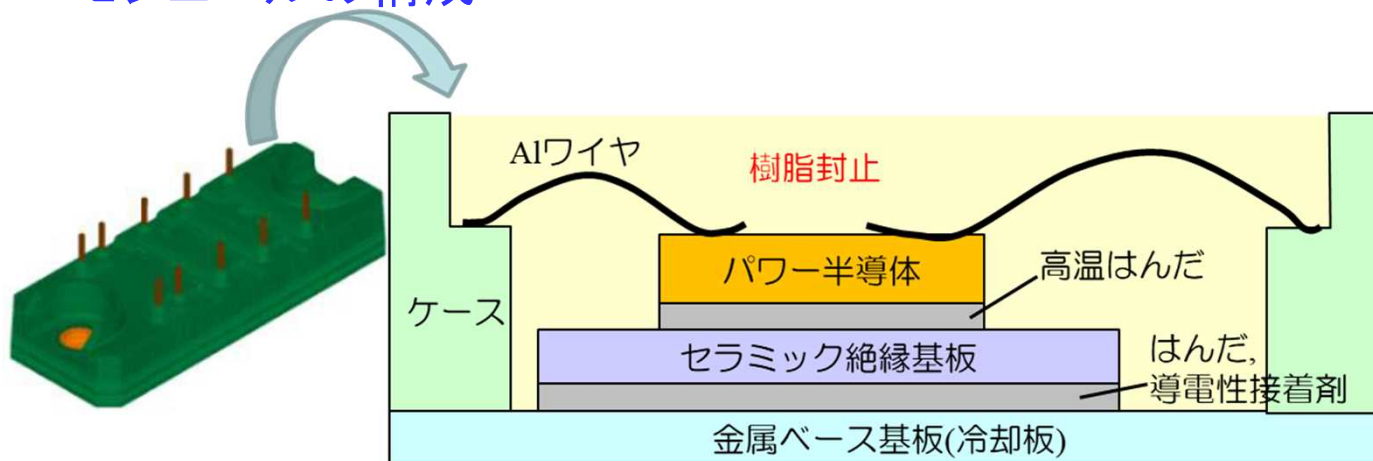
・機器/人体間・機器間通信、診断・制御

⇒ 半導体・パワー半導体・センサなどの電子部品、軽量・生体材料、熱電マネージメントがキーに

# 従来技術 (次世代パワー半導体用高信頼性高温鉛フリー合金)

既存Si製パワー半導体の接合材には高鉛含有はんだが使用されてきたが、はんだの鉛フリー化対応およびSiCなどの次世代パワー半導体対応(より高温で使用)のために接合材の高温化対応が求められている。

## パワーモジュールの構成



### 物性比較

	Si	SiC(4H)	GaN	ダイヤモンド
バンドギャップ [eV]	1.12	3.26	3.39	5.47
電子移動度, $\mu$ [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]	1400	1000/850	900	2200
絶縁破壊電界強度, $E_c$ [kV/cm]	300	2500	3300	10000
熱伝導率, $\lambda$ [ $\text{W}/\text{cmK}$ ]	1.5	4.9	2	20
比誘電率, $\epsilon$	11.8	9.7	9	5.5

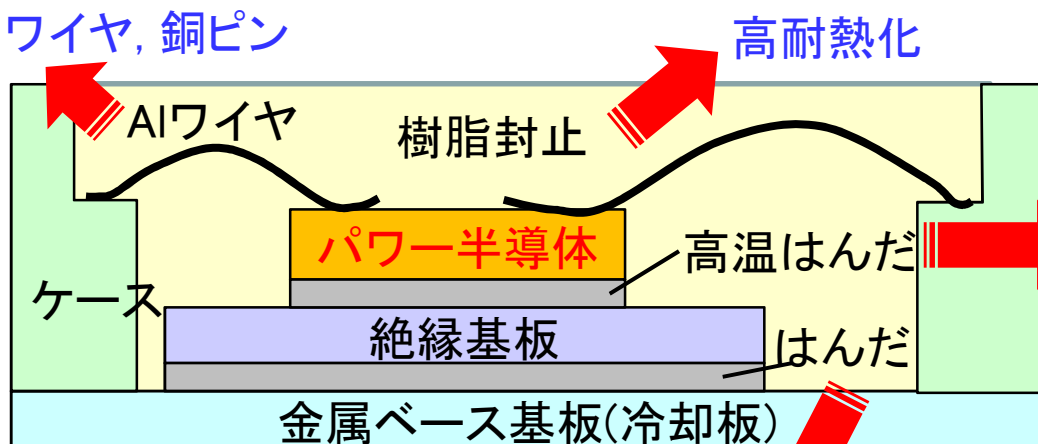
← 高温動作可能  
(漏れ電流の増加少)  
Si: 150~200°C  
→ 200~250°C?

# 従来技術とその問題点

(次世代パワー半導体用高信頼性高温鉛フリー合金)

はんだの鉛フリー対応としては、Sn-Ag-Cu系やSn-Sb系はんだが適用されてきたが、次世代パワー半導体での課題である高温対応はいまだ検討中である。チップサイズが小さければ銀焼結ペーストの対応も可能となってきたが、信頼性評価が十分とはいえない。

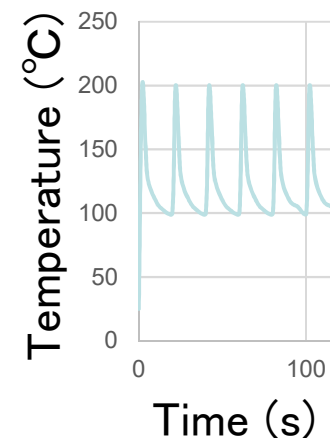
リボン, 銅ワイヤ, 銅ピン



高温鉛フリーはんだ  
TLP接合  
銀ペースト(焼結)  
直接接合(表面活性化常温接合)

(高温)鉛フリーはんだ, 接着剤,  
粒子含有はんだ(厚み保持用),  
絶縁基板/冷却基板一体型緩衝材構造

課題: 構成材料の高耐熱化, 異相界面の高信頼性化,  
大面積接合におけるクラック進展則,  
パワーサイクル信頼性の評価技術



# JIS Z 3282(2017.3.21改正)による鉛フリーはんだの種類(30種)

合金系	標準化学組成 (mass%)	溶融温度範囲 (°C)		
		固相線	液相線	
高温系 固相線 $\geq 217^\circ\text{C}$ , 液相線 $\geq 225^\circ\text{C}$	Sn-Sb	Sn-5Sb	238	241
	Sn-Cu	Sn-3Cu	227	309
		Sn-0.7Cu	227	227
	Sn-Cu-Ni	Sn-0.7Cu-0.05Ni	227	227
	Sn-Ag	Sn-5Ag	221	240
	Sn-Cu-Ag	Sn-6Cu-2Ag	217	373
	Sn-4Cu-1Ag	217	335	
	Sn-0.7Cu-0.3Ag	217	226	
	Sn-Ag-Cu-In	Sn-1.2Ag-0.5Cu-0.5In	217	225
中高温系 固相線 $\geq 217^\circ\text{C}$ , 液相線 $< 225^\circ\text{C}$	Sn-Ag	Sn-3Ag	221	222
		Sn-3.5Ag	221	221
		Sn-3.7Ag	221	221
	Sn-Cu-Ag-P-Ga	Sn-0.5Cu-0.3Ag-0.05P-0.05Ga	217	224
	Sn-Ag-Cu	Sn-1Ag-0.7Cu	217	224
		Sn-3Ag-0.5Cu	217	219
		Sn-4Ag-0.5Cu	217	219
	Sn-Ag-Cu-Ni-Ge	Sn-3.5Ag-0.5Cu-0.07Ni-0.01Ge	217	219
Sn-Bi-Cu-In	Sn-1.7Bi-0.8Cu-0.6In	217	218	
Sn-Ag-Cu	Sn-3.5Ag-0.7Cu	217	217	
	Sn-3.8Ag-0.7Cu	217	217	
Sn-Cu-Ni-P-Ga	Sn-0.7Cu-0.25Ni-0.05P-0.05Ga	214	220	
中温系 $150^\circ\text{C} \leq$ 固相線 $< 217^\circ\text{C}$ , 液相線 $\geq 200^\circ\text{C}$	Sn-Ag-Bi-Cu	Sn-2.5Ag-1Bi-0.5Cu	213	218
	Sn-Bi-Ag-Cu-In	Sn-1.6Bi-1Ag-0.7Cu-0.2In	210	222
	Sn-Bi-Ag-Cu	Sn-2Bi-1Ag-0.7Cu	208	221
	Sn-In-Ag-Bi	Sn-4In-3.5Ag-0.5Bi	207	212
	Sn-8In-3.5Ag-0.5Bi	196	206	
中低温系 固相線 $\geq 150^\circ\text{C}$ , 液相線 $< 200^\circ\text{C}$	Sn-Zn	Sn-9Zn	198	198
	Sn-Zn-Bi	Sn-8Zn-3Bi	190	196
低温系 固相線 $< 150^\circ\text{C}$	Bi-Sn	Bi-42Sn	139	139
	Sn-In	In-48Sn	119	119

2006年改正時 21種 → 2017年改正時 30種へ (青字組成9種追加)

# 新技術の特徴・従来技術との比較 1

(次世代パワー半導体用高信頼性高温鉛フリー合金)

- 第三元素としてNiを微量添加することにより、Sn-Sb系高温はんだの溶融温度域を低下させることなく高温疲労に優れるはんだ合金の開発に成功した。

DSC(示差走査熱量測定)による溶融温度調査結果

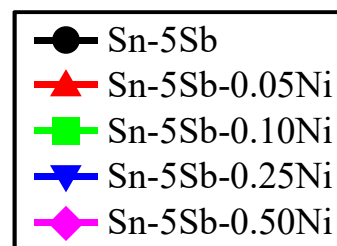
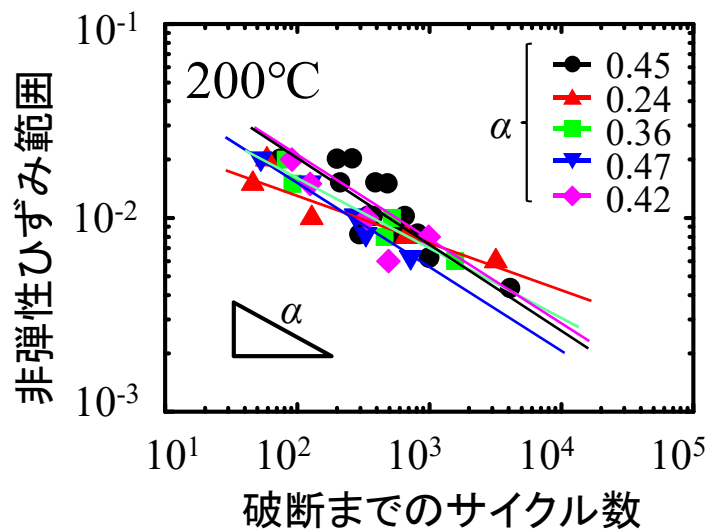
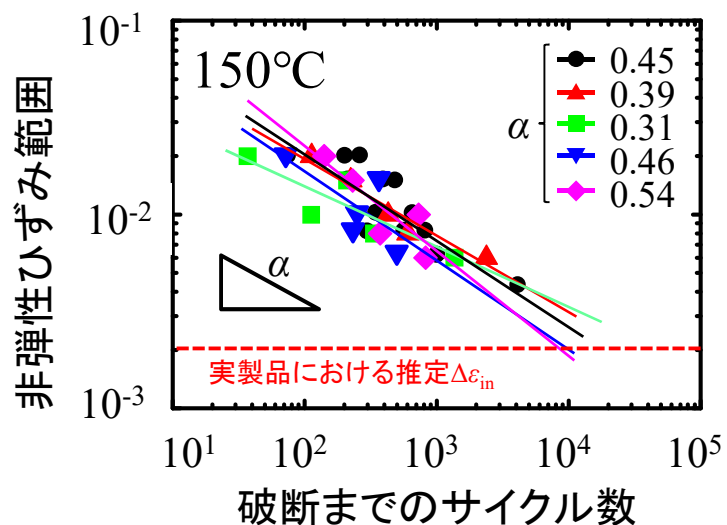
はんだ合金組成 [mass%]	固相線温度, $T_s$ [°C]	液相線温度, $T_l$ [°C]	$T_s$ と $T_l$ の差 [°C]
Sn-5Sb	239.0	241.9	2.9
Sn-5Sb-0.05Ni	238.5	242.1	3.6
Sn-5Sb-0.50Ni	238.6	241.5	2.9
Sn-10Sb	242.5	247.3	4.8
Sn-10Sb-0.05Ni	244.4	246.8	2.4
Sn-10Sb-0.50Ni	242.9	246.2	3.3

# 新技術の特徴・従来技術との比較 2

(次世代パワー半導体用高信頼性高温鉛フリー合金)

- 室温から200°Cまでの疲労特性に優れることが確認でき、次世代パワー半導体への適用可能性を示した。

微小試験片を用いた疲労試験  
(ひずみ速度:  $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )



**Manson-Coffin則**

$$\theta = \Delta \varepsilon_{in} \cdot N_f^\alpha$$

$\theta$ : 疲労延性係数

$\Delta \varepsilon_{in}$ : 非弾性ひずみ範囲

$N_f$ : 疲労寿命 (疲労サイクル数)

$\alpha$ : 疲労延性指数

Ni添加量0.05~0.10 mass%のSn-5Sb-Niは、Sn-5Sbより $\alpha$ 値が小さく疲労特性に優れる

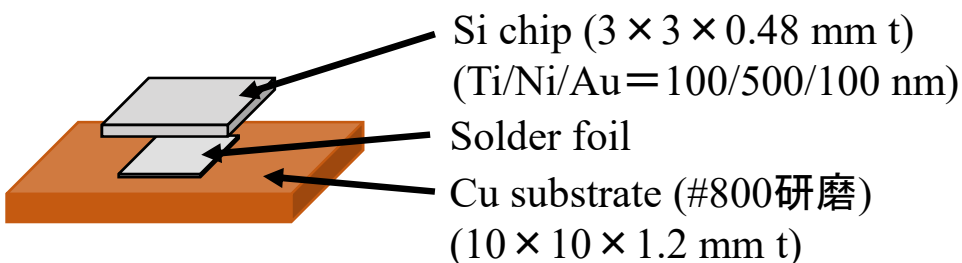


# 新技術の特徴・従来技術との比較 3

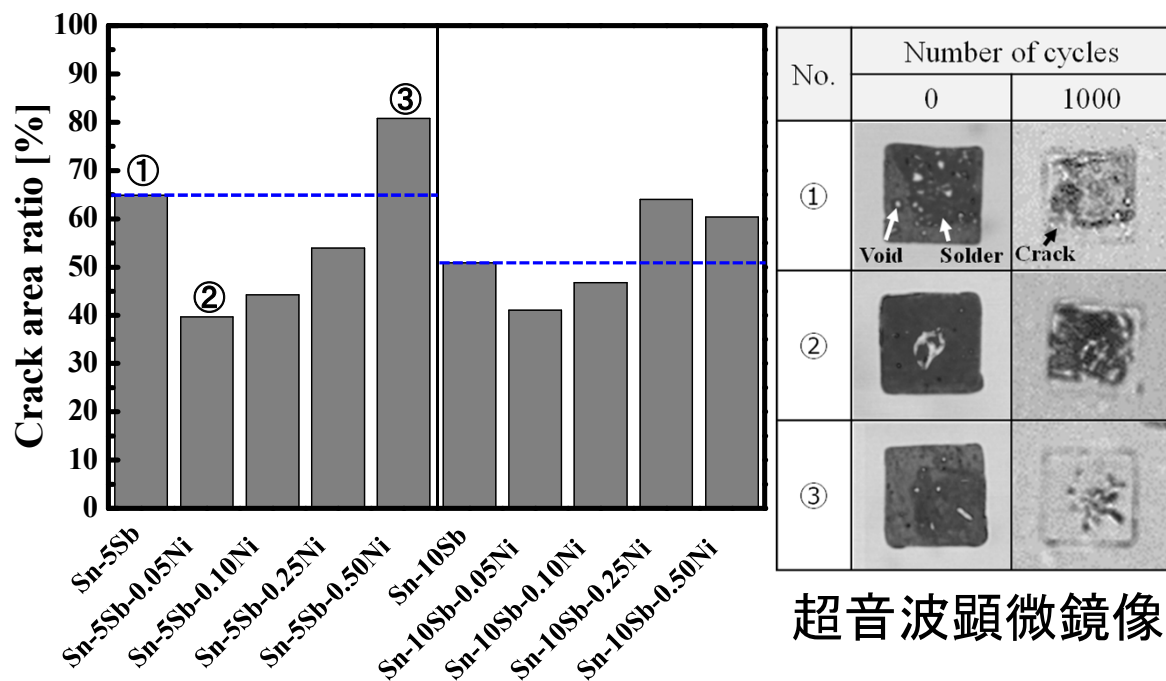
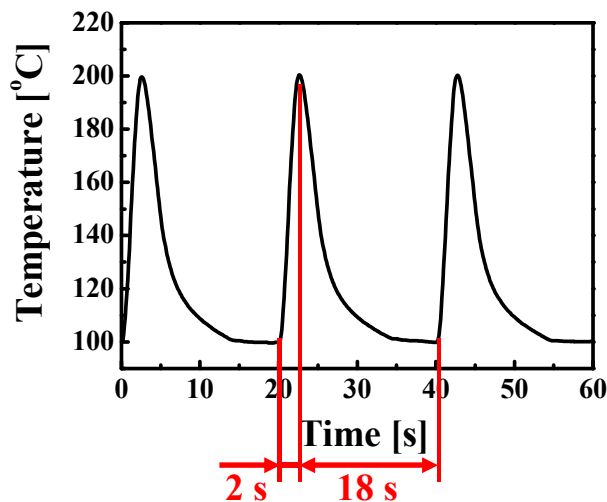
(次世代パワー半導体用高信頼性高温鉛フリー合金)

- パワー半導体特有のパワーサイクル(100°C-200°C、20 秒/サイクル)に対しても優れた信頼性を示すことを確認した。

## パワーサイクル試験片



## パワーサイクル試験条件



各チップ接合体のき裂面積率(1000 cycles後)

Ni添加量0.05~0.10 mass%のSn-Sb-Niは、  
Ni無添加材に比べき裂進展が抑制される

# 想定される用途

(次世代パワー半導体用高信頼性高温鉛フリー合金)

- 開発合金は、次世代パワー半導体のダイボンディング材料に適用することで優れた耐熱性・耐熱サイクル性が得られると考えられる。
- 達成された耐熱性および耐熱サイクル性より、現在高鉛含有はんだが使用されている車載部品や封止用用途に展開することも可能と思われる。

# 実用化に向けた課題

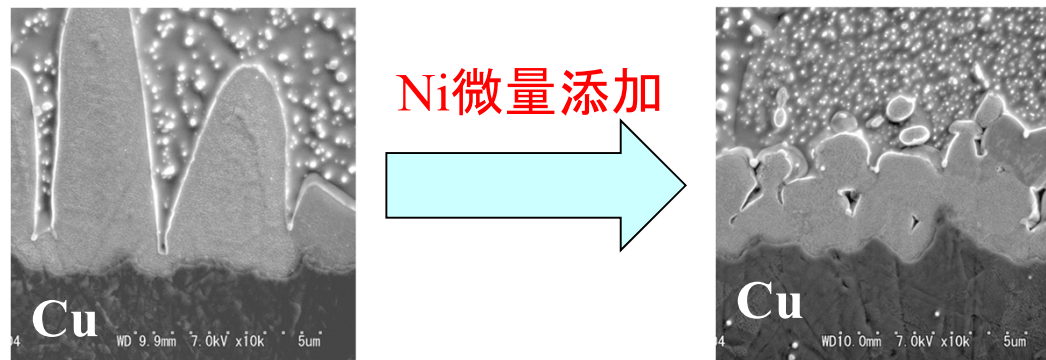
(次世代パワー半導体用高信頼性高温鉛フリー合金)

- 200°Cでの疲労特性については調査済みであるが、製品レベルでの熱サイクルやパワーサイクル特性の調査は未実施。
- Sn-Sb系だけではなく、母合金の成分も更なる高信頼性の獲得を目指して検討予定。合金の融点も、次世代パワー半導体の進展に合わせて更なる向上が望ましい。

# 企業への期待

(次世代パワー半導体用高信頼性高温鉛フリー合金)

- 製品レベルの信頼性については、共同研究より克服できると考えている。
- 電子部品実装の技術を持つ企業との共同研究を希望。
- また、高温鉛フリー合金を開発中の企業、電子実装分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。
- 本技術で使用した第三元素添加による合金の特性向上は様々な材料への展開が期待できる。



CuとSn-Ag-Cuはんだの接合界面

# 本技術に関する知的財産権

(次世代パワー半導体用高信頼性高温鉛フリー合金)

- 発明の名称 : はんだ合金、はんだペースト、  
プリフォームはんだ
- 出願番号 : 特願2018-219012
- 出願人 : 群馬大学
- 発明者 : 荘司郁夫、小林竜也

# 従来技術とその問題点

## (高効率小型熱交換器用Niブレージング電解膜の創製)

環境負荷低減の観点から、機器等から排出される廃熱の回収・利用技術が注目され、廃熱回収に使用されるステンレス製熱交換器の需要が増加している。熱効率の向上には多層型熱交換器が使用されるが、軽量小型化のためにフィン材の薄肉化が進行している。

フィン材の薄肉化に伴い、接合材であるろう材の薄厚化も要求されるが、既存のステンレス用Niろうは、耐食性は優れるが高強度材であるため、

- ・薄膜材の製造が困難で棒材やペースト材での供給
- ・微細部への適量提供が困難で材料代が高価

等の問題がある。



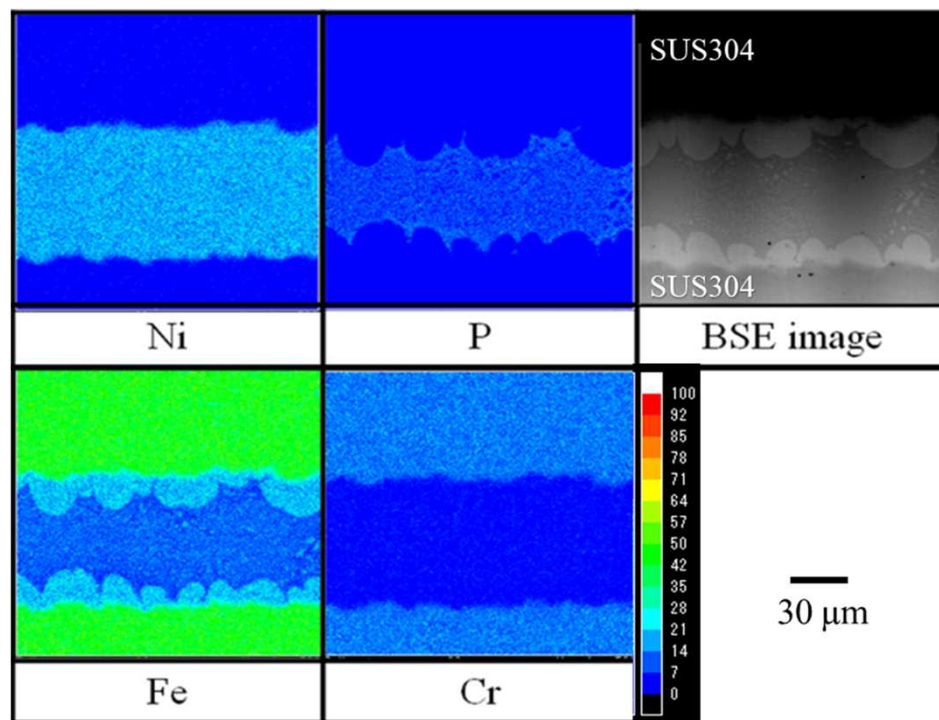
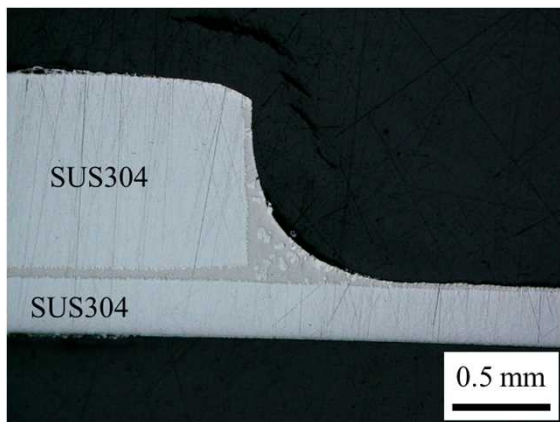
和氣製作所様資料より

# 新技術の特徴・従来技術との比較

(高効率小型熱交換器用Niブレージング電解膜の創製)

- 棒材やペースト材による既存技術の問題点であった、ろう材の微量提供を可能とするNi-P電解膜を創製することに成功した。
- 数十 $\mu\text{m}$ 厚レベルの電解膜をろう材として使用することを可能とし、ボイドなどの欠陥のない接合部の生成に成功した。

Ni-9P(mass%)電解膜を用いたSUS304鋼のろう付け部



20  $\mu\text{m}$ 厚Ni-11P(mass%)電解膜を用いたSUS304鋼のろう付け部  
(EPMAによる反射電子像と元素分析結果)

# 想定される用途

(高効率小型熱交換器用Niブレージング電解膜の創製)

- 本技術は、多層型熱交換器の製造に適用することで、ろう材の適量提供による信頼性向上およびコスト減のメリットが大きいと考えられる。
- 電解膜の改良により耐食性の向上を図れることも期待される。
- また、電解法を利用する手法であるため、ブレージングシートやろう材付き部品等に展開することも可能。

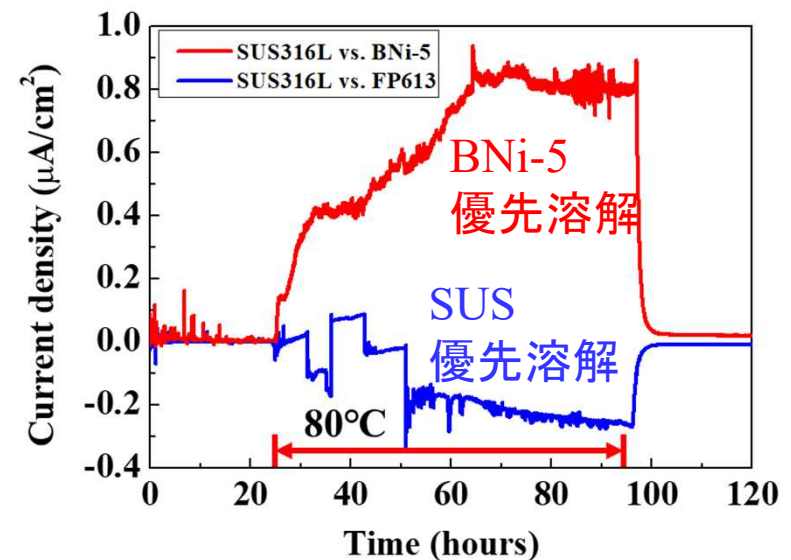


# 実用化に向けた課題

(高効率小型熱交換器用Niブレージング電解膜の創製)

- 接合部のミクロ組織および強度について調査済み。耐食性については電気化学分析を実施中。
- 今後、既存BNi-6(Ni-10~12 mass%P)ろう付け部について実験データを取得し、比較を行う。
- 実用化に向けて、製品要求に応じて耐食性を向上できるように、新規合金膜の創製技術を確立する必要があると考える。

既存NiろうとSUS材との  
ガルバニック電流測定結果  
(0.06 mol/L NaCl電解液中  
にて正極をSUSとして測定)



# 企業への期待

(高効率小型熱交換器用Niブレージング電解膜の創製)

- 多層型熱交換器、プレート型熱交換器などの技術を持つ、企業との共同研究を希望。
- また、ろう材を開発中の企業、車載用ろう付け部品加工企業、めっき関連分野の企業には、本技術の導入や活用が有効と思われる。

# 本技術に関する知的財産権

(高効率小型熱交換器用Niブレージング電解膜の創製)

- 発明の名称 : ブレージングシートの製造方法
- 出願番号 : 特願2018-183166
- 出願人 : 群馬大学、和氣製作所
- 発明者 : 荘司郁夫、飯岡諒、和氣庸人、  
広橋順一郎

# 産学連携の経歴(主なもの)

- 2000年6月群馬大学着任後より多数の共同研究実施
- 2002年度 即効型地域新生コンソーシアム研究開発事業に採択
- 2007年度-2009年度 経済産業省基準認証研究開発委託事業に採択
- 2009年度-2010年度 戦略的基盤技術高度化支援事業に採択
- 2010年度-2012年度 戦略的国際標準化推進事業に採択
- 2008-2010、2011-2013、2013-2015、2015-2017年度(計4件)  
戦略的基盤技術高度化支援事業サポイン事業に採択
- 2018年-2019年 JST A-STEP機能検証フェーズ事業に採択

これまでの連携企業数:52社(共同研究・受託研究・奨学寄附金)

# お問い合わせ先

群馬大学 産学連携・知的財産活用センター

〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1

TEL 0277-30-1171~1175

FAX 0277-30-1178

e-mail [tlo@ml.gunma-u.ac.jp](mailto:tlo@ml.gunma-u.ac.jp)