

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「銅材とアルミニウム材を直接溶接（ろう付け）する技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成26年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社 アタゴ製作所

目 次

第1章 研究開発の概要

1. 研究開発の背景・研究目的及び目標
2. 研究体制
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)
3. 成果概要
 - 3-1. ろう材とフラックス・バインダーの評価選定
 - 3-2. 新ろう材に適し量産に適合できる電気炉の開発・製作
 - 3-3. ろう付け炉を稼働させ ろう付け条件の確立
4. 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

1. ろう材とフラックス・バインダーの評価選定
 - 1-1. 新ろう材によるろう付け
 - 1-2. フラックスの選定
 - 1-3. バインダーの選定と乾燥条件
2. 新ろう材に適し量産に適合できる電気炉の開発・製作
 - 2-1. ろう付け炉の設計仕様の決定
 - 2-2. ろう付け炉の基本構成（マッフル炉）の決定
 - 2-3. 炉中雰囲気条件の確立
 - 2-4. 量産能力向上の改善・改良
3. ろう付け炉を稼働させ ろう付け条件の確立
 - 3-1. ろう付け条件の検証（初期のろう付け炉）
 - 3-2. ろう付け条件検証（量産能力改善後のろう付け炉）

最終章 全体総括

1. 研究開発で得られた 価値ある技術（技術資産）
2. 事業化と今後の展開
3. 本委託事業に携わって

第1章 研究開発の概要

1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

現在、自動車や環境機器に多く使われている熱交換器、放熱機器等は銅材料で構成され、熱特性においては非常に優れているが、比重が大きいことで省エネルギーのための軽量化を、昨今の銅建値高騰で、機器コスト低減の障害となっている。

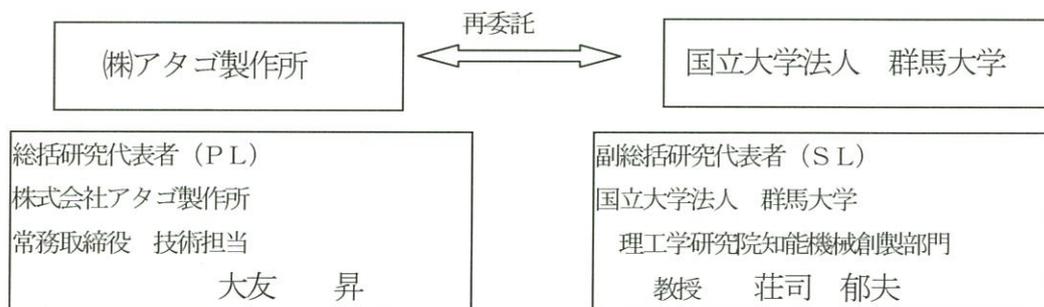
本研究開発の目的は、自動車や環境機器の軽量化及びコスト削減を目指し、非常に有効な手段の「銅材料をアルミニウムに置き換えること」を実現するため、銅材とアルミニウム材を直接接合（ろう付け）する技術を確認することである。現状では、銅材とアルミニウム材の直接接合（ろう付け）は、共晶融解を起こす等の課題があり、殆ど行われていない。この溶接（ろう付け）技術の確認は、自動車、環境機器に限らず列車や航空機等の“使用銅材料を削減するため”の基盤技術として広く展開することが可能である。

目標は、熱交換器を「40%以上の軽量化」「20%以上のコスト低減」を実現する製造技術、量産体制を確認することを目指すことで、具体的には、

- ・ろう材とフラックス、バインダーの適合性の評価と使用条件確立
- ・共晶溶解を避けた狭い温度範囲でろう付けする温度と滞留時間条件の確立
- ・上記条件を満足させて、安定して400台/日相当の熱交換器がろう付け出来る「ろう付け炉」を製作・完成させ、量産体制を作ること。

この成果を踏まえ、現在 オール銅材で量産している熱交換器を 約50%（容積比）をアルミニウム材で構成する熱交換器に進歩させ、大幅な軽量化、コスト低減の実現を目指す。

2. 研究体制



(株)アタゴ 研究員

斎藤正信	技術部 担当部長	山口 啓	技術部 係長
斎藤 茂	課長	谷畑 範雄	主事
奈良 英明	係長	上西 正久	顧問
岩崎 達也	技術部員		

協力者 <アドバイザー>

<アドバイザー>

川下企業 熱交換器開発部 開発・設計者 等

特定非営利活動法人 北関東産官学研究会 根津 紀久雄 萩原 三男

3. 成果概要

3-1. ろう材とフラックス・バインダーの評価選定

- ① 川下企業が開発した「新ろう材」を使用して、数種類のフラックスと組み合わせ、ろう付けを行い、作業性・ろう付け性・ろう付け品の強度等について評価検討を行い、最適なフラックスの選定を平成23年度中に行った。
- ② バインダーについて、課題も多く、水系 ⇒ 油系 ⇒ ゴム系 と多岐に渡る評価検討を行い、作業性、耐環境性、粘性、熱分解・昇華による残渣“0化”について、組成の決定と乾燥・昇華条件を平成23年度にほぼ完了した。
- ③ 平成24年度、25年度は、製作したろう付け炉（NB炉）を使用し、材とアルミニウム材のろう付けを行い、フラックス・インダーのろう付け上の適合性について評価検討を行い、フラックス・インダー共に仕様を決定した。

3-2. 新ろう材に適し量産に適合できる電気炉の開発・製作

① ろう付け炉の仕様の決定

模擬的な炉を使用してのろう付け検証、また、下企業が多量に使用しているアルミニウム専用炉も参考にして、の設計のための目標仕様を決めた。

- ・ ろう付け温度範囲 $530 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 厳しい目標
- ・ 窒素ガス雰囲気のマッフル炉を設計する
- ・ 予定する熱交換器 400台/日 をろう付け出来る能力
- ・ 高温度制御と残留酸素“0”を目指し「マッフル材をカーボン」構成

以上の設計仕様を明らかにして、「開発技術力、見積もり価格、実績」を検証の上、関東冶金工業株式会社に設計・開発を依頼した。

② 炉の製作と導入

初年度末（平成24年1月）に製作された、『ろう付け炉（NB炉）』を搬入して設置し、稼働実験は実質的に平成24年度に行った。

<稼働による評価の結果>

イ、ろう付け環境（酸素の0化）による酸化防止

ロ、高精度の温度制御で共晶融解を避けるろう付け温度範囲の設定の機能・性能は 設計仕様を十分満足するもので、特にろう付け環境すなわち炉内の残留酸素量は、真空炉並みの高性能が実現できた。この機能の働きによりろう付け炉によるろう付け品は、外観、性能、結合断面分析、結合強度等ろう付けに製品に必要な機能・性能を目標通り達成することが出来た。

但し、もう一つの重要な目標である、量産能力については、大きく下回った。この課題の解決のため、成24年度～25年度に渡って、開発・改造を加えた。

③ 炉の量産能力向上のための 開発（改造）の実施

機能・性能共に十分満足できる製品のため、ろう付け炉の根本的な改造でなく量産を想定した製造全工程を含めて、改造できる可能性のある項目を検討し、以下の3項目を改善策とした。

イ. バインダーの乾燥・脱脂で加熱された熱を保持・利用することによるろう付け時の加熱時間を短縮させる（ろう付け温度到達時間の短縮）方法で、具体的には、当初 別工程に設置予定の「乾燥・脱脂炉」を「ろう付け炉」の前に移動し、直結することで、加熱されたワークが ろう付け炉に投入することが出来た。

ロ. イの工程で、加熱されたワークの熱を保持するために、炉の連結部の放熱量を抑えるための防熱（断熱）の徹底を行った。

ハ. ろう付け炉の供給する窒素ガスが大気温度（20～30℃）であるため500℃以上に加熱されている炉内に供給されると、炉内が冷却され、当然ろう付けするワークの加熱が遅れ、ろう付け時間が長くなる。
この解決のために、供給する窒素ガスを予めヒータにより加熱して炉に供給する改造を行った。

以上、イ、ロ、ハ、の改造・改善を行った結果

ワークの移動速度 100mm/min ⇒ 150mm/min

とすることにより、400台、/10時間（2時間残業）を実現できた。

3-3. ろう付け炉を稼働させ、ろう付け条件の確立

仕様の確定したろう材とバインダー・フラックスを使用し、テストサンプル及び対象熱交換器モデルを使って、100回を超えるろう付け検証を実施した。この実証によりろう付け炉の設定条件を確立することが出来た。

具体的には

- ・ワークのろう付け温度範囲
- ・ワークのろう付け温度保持時間

について、ワークの品種（形状・重量等）毎に決めることが出来た。

本事業で対象とした熱交換器は、川下企業の量産移行の予定変更があり、平成28年度となったが、一部優先順位変更を行ったろう材の塗布装置を除いて、全ての開発について、当初の事業計画を達成できた。

この開発成果は、対象熱交換器に限らず、空調機、車載部品等軽量化、低コストが急がれる部品への展開を進め、弊社のコア技術として行く。

4. 当該研究開発の連絡窓口

(対外的な問い合わせ担当者)

株式会社アタゴ製作所 技術部
上西 正久 (ウエニシ マサヒサ)
TEL : 0277-76-4411
FAX : 0277-76-8666
uenishi@atago-mfg.co.jp

第2章 本論

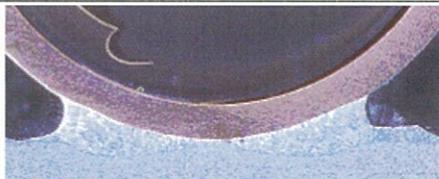
1. ろう材とフラックス・バインダーの評価選定

1-1. 新ろう材によるろう付け

新ろう材として提供を受けた2つのろう材について、ろう付けサンプルの断面観察結果及び評価結果資料を <表 1-1>に示す。

ろう材は、Zn-Al系及び Al-Cu-Si系の2種類で、融点温度が異なるため、ろう付け温度も夫々の温度で実施した。フラックスについては同一品を使用している。

< 表 1-1 >

		Zn-Al系	Al-Cu-Si系
条件	ろう材成分	Zn-5%Al 融点382°C	Al-27%Cu-5%Si (融点521°C)
	フラックス	CsF-AlF ₃ 系 融点417°C	CsF-AlF ₃ 系 融点417°C
	ろう付温度	480°Cx5分	530°Cx5分
ろう付結果	目標(仮)		
	フィレット形成	良好のこと	粗雑
初期強度	9.3MPa以上	11.3, 14.8MPa (n=2)	27.2, 27.5MPa (n=2)

接合部の観察から、Zn-Al系のろう材ではフィレット部に粗雑な組織が観察され Al-Cu-Si系ろう材を用いた接合部断面は、均一な組織が観察された。また、Zn-Al系のろう材の初期強度は、Al-Cu-Si系ろう材に比べて半分以下であることが確認された。

以上の結果 Al-Cu-Si系ろう材はろう付け温度が共晶温度に近い530°Cであるが、良好な接合部を形成し、また強度も優れたろう材であることが確認できた。

1-2. フラックスの選定

新しいフラックスを選定するために、現在アルミニウムろう付け時に使用されるフラックスを参考として検討した。 <表 1-2>にフラックスの成分・融点を示す。

<表 1-2>

成分比 (mol%)	CsF	KF	AlF ₃	Al ₂ (OH) ₃	融点 (°C)
TK-2	50	8	42	-	452
TO-5	54	-	44	2	433
CF-7	53	-	47	-	417
NOCOLOK	-	47	-	-	560

アルミニウム合金のろう付けで、現在、主に採用されている方法は、フラックスを用いたノコロックブレイジング(以下NB法)とフラックスを必要としない真空炉によるろう付け(以下VB法)である。本事業は、NB炉を使う方式で、フラックスを欠かすことが出来ない。NB法では、極めて酸素分圧の低い(露点-40°C以下)純窒素を雰囲気とし

た連続加熱炉が使用される。しかしながら、強固なアルミ母材表面の酸化皮膜 Al_2O_3 を破壊するのに十分な酸素分圧ではなく、また加熱をしても不十分である。従って、 Al_2O_3 の酸化皮膜を破壊するためにフラックスの助けが必要となる。

本事業のアルミニウムと銅のろう付けにおいてもフラックスが必要となるが、使用するろう材の融解温度が低いため、NB法のフラックスは、使用できない。

<表1-3>に主な系列のフラックスを示す。

<表1-3>代表的なフラックス系列と物性

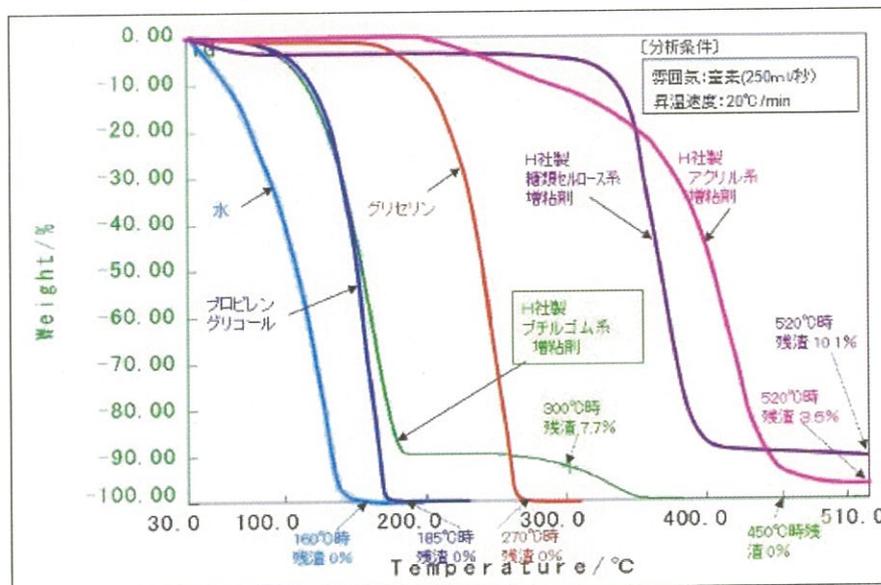
系列	融点°C	還元性	残渣腐食性	安全性	コスト
KF系(NB法)	560~574	◎	○	○	○
CsF系	415~570	◎	○	○	×
塩化物系	282~382	○	×	○	△
アミン系+Cd	177~274	○	○	×	△

使用するろう材(Al-Cu-Si系)のろう付け温度は530°Cであるため、NB法で使用されるKF系のフラックスは、適用できない。塩化物系は、ろう付け後の残渣に腐食性があるため、洗浄工程が必要となり、量産には不向きである。アミン系+Cdは、今回家庭用に使用する給湯器の熱交換器であるため、安全性に問題のあるものや、さらには、Cd(カドミウム)を含有するものは、使用できない。

従って、コスト的には課題が残るものの、フッ化セシウム(CsF)系を使用することとした。フッ化セシウム(CsF)系フラックスで、実用化レベルにあるものは、3種類挙げられる。いずれも使用可能であると考えられるが、T0-5については、水酸化アルミニウム($Al_2(OH)_3$)を含み、水酸基を持つことから、水分を生成する懸念がある。これは、酸素分圧の上昇を招くため、今回は除外した。TK-2とCF-7のいずれも特に懸念事項は挙げられないが、より融点の低い(活性化する温度が低い)CF-7を使用することとした。

1-3. バインダーの選定と乾燥条件

<図1-1>に、現在一般的に使用されているバインダーの温度に対する残渣を示す。



<図1-1> バインダーの温度に対する残渣

粉末状態のろう材をろう付けする金属に適用する場合、ろう材をゲル状にして塗布するのが一般的である。このゲル状のろう材を作成するために混合される適度な粘性を

持った液体がバインダーである。ろう材を塗布する場合、その適用方法により、取捨選択され、最適な物性のバインダーが選ばれる。バインダーの選択は、最終的に生産性やろう付け面の仕上がり、ろう付け強度等に多大な影響を与える重要な要素となる。例えば、継ぎ目のシール程度に適用される場合は、粉末ろうを粘性の低い揮発性のバインダーに混ぜ、電気炉投入直前に塗布される。これは、生産性を最大限考慮した結果である。一方、熱交換器の流体流路の隔離を目的とした場合には、ろう材の十分な拡散接合が要求される。この場合、十分なろう材量とろう付け時間が必要なことから、塗布の容易さも考慮しつつ、高粘度の残渣のないバインダーが使用される。高粘度のバインダーを混合されたろう材は、一般に、ディスペンサーを使用して、圧搾空気の手で必要箇所に塗布される。

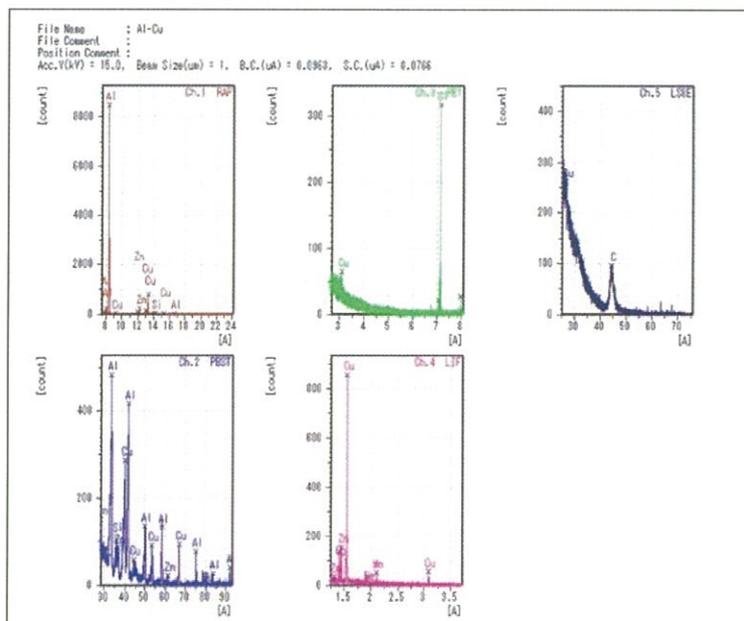
バインダーには、「水性系」と「油性系」の2種類がある。今回検討したバインダーを、図1-1に示す。図1-1は、昇温に対するバインダー重量の減衰曲線を表す。ここでは、アルコール系のバインダーは、水性系に分類した。水性系のバインダーの残渣や分解曲線の結果は、良好なものであった。一方、油性系のバインダーは、3種類のうちブチルゴム系を除いて、残渣が残る結果となった。本ろう材のろう付け温度は、530℃であるため、余裕度を加味しても500℃以下で熱分解し、残渣がなくなることが望まれる。油性成分のろう付け面上の残渣は、最終的に昇温されるとカーボン化してろう付け表面に膜を形成するため、ろう付け(母材やろう材の拡散接合)の阻害要因となる。また、バインダーとしての「水」は、ろう材が微粉末であり、その分散性が悪いこと(沈殿分離)から、塗布方法や適用量の管理の点で課題が多い。これらのことから、水性系でグリセリン、プロピレングリコール、油性系でブチルゴム系増粘剤が候補として選択された。

最終的に使用するバインダーを決定するために、電気炉内で発生するであろう蒸発成分について確認を行った。これら3種類のバインダーのうち水性系バインダーは、電気炉内で水分が蒸発した後、分解して酸素成分を生成する。これは、炉内の酸素分圧を上昇させるため、安定的にろう付けを行う上で支障をきたすと考えられる。一方、油性系のブチルゴムバインダーは、酸素成分は発生しない。しかしながら、分解した成分でカーボンは、一部炉内に固着することが確認されている。以上の検討結果から、今回量産のろう付けに使用するバインダーは、ブチルゴム系の増粘剤とした。今後、粘度や配合割合を調整し、生産効率のよい塗布方法および粘度の検討を行う。

1-4. ろう付け品の評価

1. Al-Cu ろう付け部の定性分析

<図1-2>に、ろう付けサンプルの接合部断面の定性分析結果を示す。
本分析は、再委託先である国立大学法人 群馬大学にて、電子線マイクロアナライザー (Electron Probe Micro Analyzer、以下 EPMA) を用いておこなった。



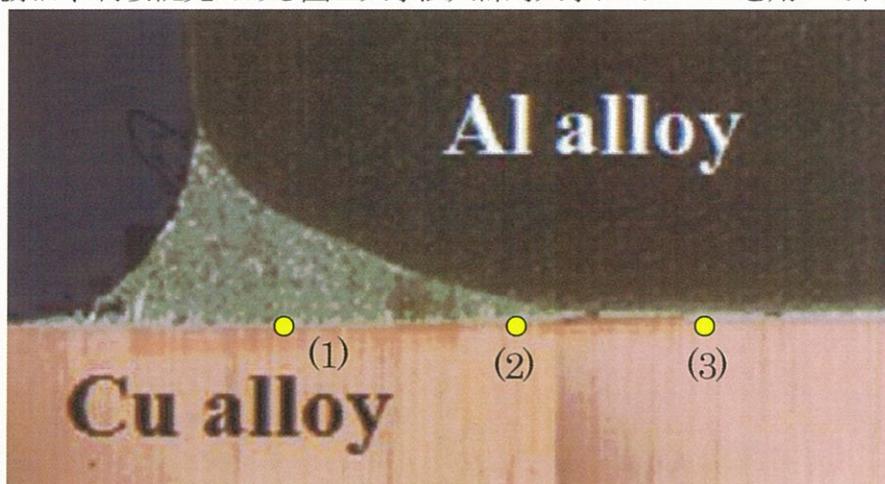
<図1-2>

図1-2より、ろう付け部からはAl, Cu, Fe, Mn, Si, Zn, Cが検出された。
本定性分析の結果から、ろう付けサンプルの接合に使用されたろう材はAl-Cu-Si系のろう材であることが明確であり、また、微小元素として、Fe, Mn, Znが検出された

2. Al-Cu ろう付け部のマイクロ組織観察

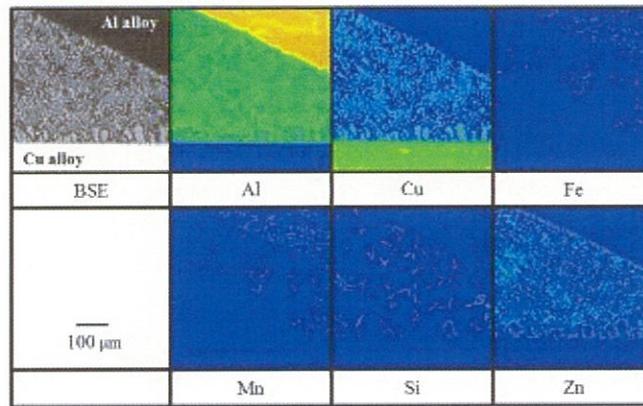
図1-3に接合部断面のCCD観察結果と以後の分析部位を、図1-5、1-6、1-7、1-8にAl-Cu ろう付け部断面における各観察部位での反射電子像 (Back Scattered Electron image、以下 BSE 像) 及び各元素に関するマッピング分析結果を示す。

本観察は、再委託先である国立大学法人群馬大学にて EPMA を用いておこなった。

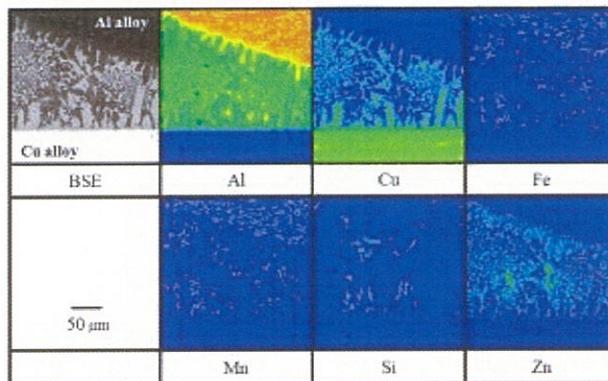


<図1-3>

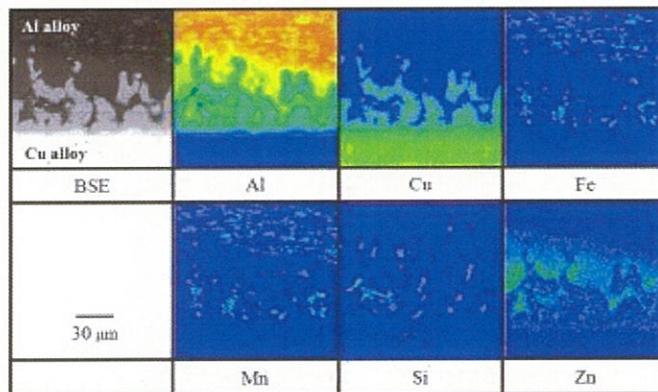
図1-3に示す黄色丸部に関して観察・分析をおこなった。
図に示す黄色丸部の左から、マイクロ観察・分析結果 (1) ~ (3) となっている。



<図1-4> ミクロ観察・分析結果 (1)



<図1-5> ミクロ観察・分析結果 (2)



<図1-6> ミクロ観察・分析結果 (3)

<図1-4>は、接合部断面のフィレット部（全体）に関するミクロ観察・分析結果を示す。

本図は、左上から観察部位のBS像、Al, Cu, Fe のマッピング分析結果を、右下から Zn, Si, Mn に関するマッピング分析結果を示している。（以下、図1-5, 1-6同様。）

<図1-4>より前項にておこなった定性分析により確認された、Fe, Mn, Zn に関して、Fe 及び Mn は Al 母材内に存在し、Zn はろう材内に存在していることが確認された。

また、Cu, Al, Zn に関するマッピング分析の結果、ろう材内部には Cu, Al, Zn が均一に分布していることが確認された。

以上、接合部断面に関する観察及びマッピング分析結果をまとめると、以下のことが言える。

- 1：フィレット部の組織は、ろう材に含まれる元素が均一に分布している。
- 2：母材であるAl及びCuがろう材内部に拡散し、接合されている。
- 3：クリアランスが小さくなるに従い、Znの分布に違いが確認された。
- 4：クリアランスが小さくなるに従い、ろう材層内部のAl-Zn化合物層とCu-Al化合物層の境界は鮮明になる。

2. 新ろう材に適し量産に適合できるろう付け炉の開発・製作

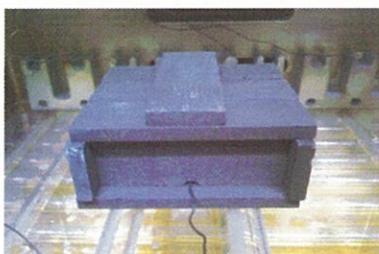
2-1. ろう付け炉の設計仕様の決定

1. 試験炉を用いた検証

自動炉（連続ろう付け炉）を用いたろう付けによる接合をおこなう際、「ろう付け温度（製品温度）」、「ろう付け温度保持時間」及び「加熱・冷却速度」の設定及び管理が非常に重要となる。

また、本開発に使用するろう材及びフラックスは、バインダーとの混合をおこない、ろう材ペーストとして使用されるので、ろう付け温度到達時に、ろう材ペースト内にバインダーが残留していると、バインダー成分が不純物となりろう付け状態に支障をきたす。そのため、ろう付け温度に到達するまでにバインダーを完全に熱分解・蒸発させるための、「バインダー蒸発温度保持時間」を設定する必要がある。

新ろう材を用いたろう付け時の「ろう付け温度範囲」「ろう付け温度保持時間」「加熱・冷却速度」及び「バインダー蒸発温度保持時間」等の条件を決定するため、簡易試験炉を製作し、試験をおこなった。



<図 2-1>

簡易カーボンマッフルの構成

図 2-1 に簡易カーボンマッフルの外観を示す。製作する電気炉の仕様予定であるカーボン製マッフ炉と同様に、カーボンを用いて箱状の簡易カーボンマッフルを構成した。

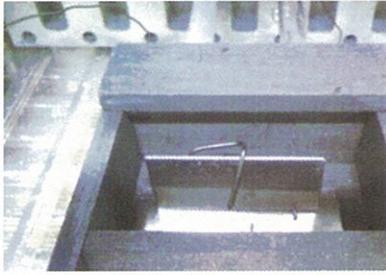


<図 2-2>

テストピース

図 2-2 にろう付け条件の検討に用いたテストピース（以下 TP）の外観を示す。

本開発によって開発対象となる熱交換器の構成である銅管及びアルミニウム厚板を使用し、より実仕様に近い形態とした。



<図2-3>

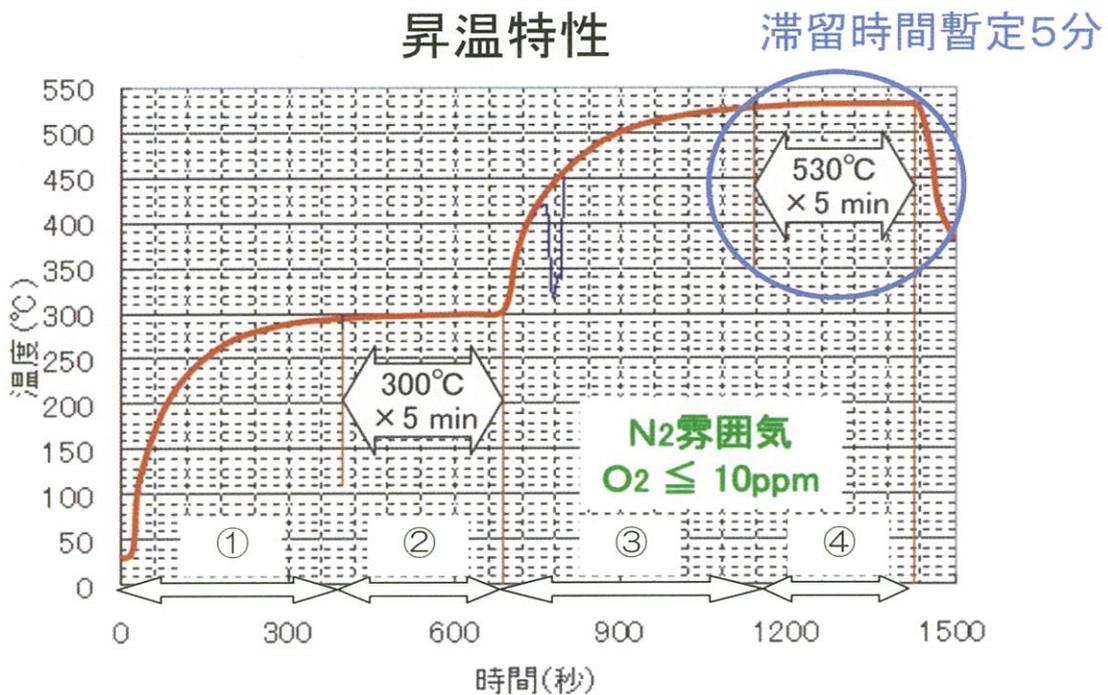
試験方法

図2-3に上記簡易カーボンマッフルとTPを用いた試験時の様子を示す。

前項で述べた簡易カーボンマッフル内にTPをセット、簡易カーボンマッフル全体を真空炉に投入し、試験をおこなった。

2. ろう付け温度、保持時間の選定

図2-4に(2-1)項にて製作した簡易試験炉を使用しておこなった。新ろう材の暫定処理プロファイル(横軸:経過時間、縦軸:炉設定温度)を示す。



<図2-4>

図2-4に示した処理プロファイルの決定には、下記項目の検討をおこない設定した。

① 初期昇温特性

<常温 ⇒ 300°C (300~350秒) >

急激な昇温によるワークの変形を防ぐため、初期昇温時間として常温から300°Cへの昇温時間を300秒~350秒とした。(昇温勾配: 1°C/sec程度)

② バインダー蒸発温度保持時間

<300°C保持 (5分間) >

前項にて確認した、ろう材ペースト熱特性分析結果及び、バインダーの乾燥条件を踏まえ、バインダーを完全に熱分解・蒸発させるための温度及び保持時間として300°C、5分間を設定した。

③ 2 段目昇温特性

<300°C ⇒ 530°C (600 秒程度) >

① 項と同様に、急激な昇温はワークに変形を生じさせるため、緩やかな温度上昇をおこなう必要があるため、300°Cからろう付け温度 530°Cへの昇温時間を 600 秒程度 (0.38°C/sec 程度) に設定した。

④ ろう付け温度及びろう付け温度保持時間

<530°C (5 分間) >

<表 2-1>に本開発において使用する母材材料、ろう材、フラックスに関する諸現象とその開始温度を示す。

<表 2-1>

No.	項目	開始温度	参照
1	Al-Cu における共晶融解	548°C	Al-Cu 2 元系状態図
2	Al-Cu-Si 系ろう材融解	524°C	DTA 融点分析結果
3	フッ化セシウム系フラックス活性化	510°C	Al-Cu-Si 3 元系状態図

<表 2-1>より、

『Al-Cu の共晶融解温度 > Al-Cu-Si 系ろう材融解温度
> フッ化セシウム系フラックス活性化温度』

であることがわかる。

ろう付け温度を<表 2-1> No. 3 項のフッ化セシウム系フラックス活性化温度以下に設定した場合、フラックスが活性化されず、Al 母材表面を覆う不動態膜を除去することが出来ないためろう付けは不可能であり、また No. 2 項の Al-Cu-Si 系ろう材融解温度よりも低くなるためろう材も溶融しない。

また、ろう付け温度を、No. 1 項の Al-Cu における共晶融解温度以上に設定した場合、<図 2-5>に示すように Al と Cu が共晶融解を起こしてしまい、製品を構成することはできない。



<図 2-5>

以上のことから、本開発において実施するろう付けでは、

『Al-Cu における共晶融解温度 > ろう付け温度 > Al-Cu-Si 系ろう材融解温度』
でなければならない。

前項で確認したろう材ペーストの熱特性分析結果を踏まえ、

『ろう付け温度を 530°C』と設定した。

また、保持時間として暫定的ながら

『 5 分間 』を設定した。

3. 物性による制限条件

素材、ろう材、フラックスの夫々について、使用可能な温度範囲の検証を行う。

① 母材のアルミニウムと銅

銅材とアルミニウム材の接合で、もっとも重大な課題が共晶融解である。この共晶融解温度が「548℃」である。従って、ろう付けを行う温度は548℃以下の温度で行わなければならない。

② ろう材

ろう材は、母材 Al と Cu の共晶融解温度（548℃）以下の温度領域で使用できる Al-Cu-Si ろう材を選定し、機械的強度の維持、電位腐食防止策（自然電位調整）を考慮して、『 Al-Cu-Si + Zn 』系を選定した。

③ フラックス

フラックスは、ろう付け温度において、十分に活性化される温度でなければならない。現在進めているフラックスは、フッ化セシウム系であり温度は比較的高い「510℃」であり、これ以上の温度で使う必要がある。

夫々の結果をまとめると 次表のとおりである。

< 表2-2 >

条件	温度	参照
フッ化セシウム系フラックスの活性温度以上	510℃	DTA フラックス融点分析結果より
Al-Cu-Si ろう材の共晶点温度以上	524℃	Al-Cu-Si 3元系状態図より
母材 Al と Cu の共晶融解温度以下	548℃	Al-Cu 2元系状態図より

結論として 炉中ろう付け温度は『 530±5℃ 』の非常に狭い範囲で制御する必要がある。この条件を「電気炉の設計仕様」とした。

2-2. ろう付け炉の基本構成

現存する各種の連続式ろう付け炉を比較検証し、本開発の銅材とアルミニウム材のろう付けに最適な炉の方式について検討した。

① Al-Al のろう付けで使用されている 「ノコロック炉」

使用ろう材：アルミろう

処理温度：600±15℃

雰囲気：窒素・・・・・・・・酸素濃度 10ppm が限界

フラックス：ノコロックフラックス

② Cu-Cu のろう付けで仕様される 「DX ガス炉」

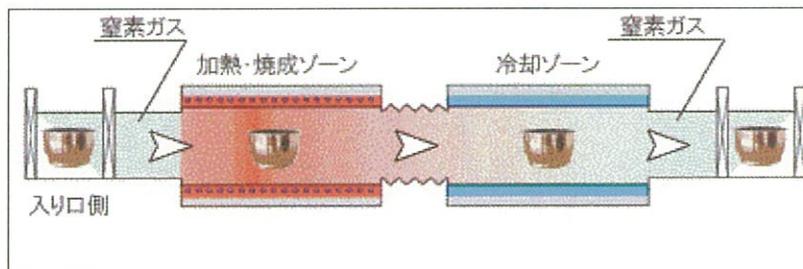
使用ろう材：リン銅ろう・・・Pは酸化膜除去効果あり

処理温度：750～800℃

雰囲気：不完全燃焼ガス (CO・H を含み還元作用)

フラックス：未使用

③ Al ろう付け炉の構造



<図 2-6>

図 2-6 に一般に使用されている Al ろう付け炉の構造イメージを示す。

Al ろう付け炉は、①で述べたように低い酸素濃度を必要とする。

そのため、炉内を金属によるマッフルにて構成することにより、外部からの酸素の侵入を防ぐと共に、炉を構成する部材のアウトガスを低減している。

④ Cu ろう付け炉の構造

Al ろう付け炉と比較して、加熱ゾーン、冷却ゾーンの構成に差はない。

ただし、Al ろう付け炉と比べて酸素濃度が低くする必要がないため、マッフルを使用した酸素侵入の防止策は取られないことが多い。

金属によるマッフルを使用しない代わりに、耐熱レンガ及び難燃性断熱材によって構成される。

以上をまとめると 次表の通りである。

< 表 2-3 >

条件	規格値	方式
Al - Al のろう付で使用されるノコロック炉の露点	< - 50℃	純窒素 (露点-60℃)を使用
Cu - Cu のろう付で使用される DX ガス炉の露点	< 10℃	DX ガスの 5%CO による還元作用
Al のろう付炉の構造		マッフルタイプ (炉体の酸素解離 小)
Cu のろう付炉の構造		耐熱レンガ、断熱材(炉体の酸素解離 大)

結論として、開発・製作するろう付け炉の方式は『 マッフルタイプの窒素炉 』
とすることを決定した。

2-3. 炉中雰囲気条件の確立

設計仕様は、「カーボンマッフル使用の窒素炉」であり、炉中雰囲気は窒素の供給とカーボンマッフル採用によって、残留酸素のレベルを 10ppm 以下にすることである。製作し設置した。「カーボンマッフルろう付け炉」を使用して、雰囲気条件の検証を行った。

1. 電気炉への窒素供給装置

当初は、ボンベ窒素を使用したけど、安定した電気炉の稼働を行うため、連続的に窒素供給ができる窒素発生装置を導入し一連の稼働試験を行った。

(窒素発生装置は本事業の対象外)

供給能力 : 120m³/h

ろう付け炉への供給

: 20~40m³/h 充当可



< 図2-7 > 窒素発生装置

<図2-8. 窒素の供給口>

ろう付け炉への窒素供給は予熱ゾーン、加熱ゾーンの入口左右、中間左右、出口及び冷却ゾーンに配置し、夫々に流す窒素量を調整し炉内の残留酸素を大幅に低減することができた。

窒素の供給は

- ① 予熱ゾーン
- ② 加熱炉中央ゾーン
- ③ 加熱炉出口ゾーン
- ④ 冷却 中央ゾーン



<図2-8. 窒素の供給口>

に、夫々供給することで、各ゾーンへの供給量の決定を行った。

当然、経済性を考慮し、熱交換器のろう付けを行い

- ・ろう材の流れ、
- ・フィレット形成
- ・材料の酸化

を評価項目にし、供給窒素量の最少化の条件を決定した。

<表2-3>は、最少化して決定した、各ゾーン毎の窒素供給量である。

<表2-3> 各ゾーンへの窒素供給量 (m³/h)

トライ経過	窒素封入量				
	窒素封入ゾーン				合計
	①	②	③	④	
初期設定	10	10	7	7	34
	12	8	5	5	30
	12	8	5	0	25
	12	6	6	0	24
	10	6	6	0	22
	10	4	0	0	14
	10	4	6	0	20
決定配分	16	4	0	0	20

以上の窒素ガスの配分供給とカーボンマッフルの効果もあり
『低酸素分圧では 10^{-20} 気圧以下』となり
真空炉以上の炉内雰囲気を実現した。

2-4. 量産能力向上の改善・改良

1. 初期ろう付け炉の性能

設計仕様に基づき製作されたろう付け炉であったが、対象とする熱交換器を使ったろう付けの実証を行った結果、安定したろう付け品質を得るためには、計画したろう付け時間より多く必要となることが判明した。

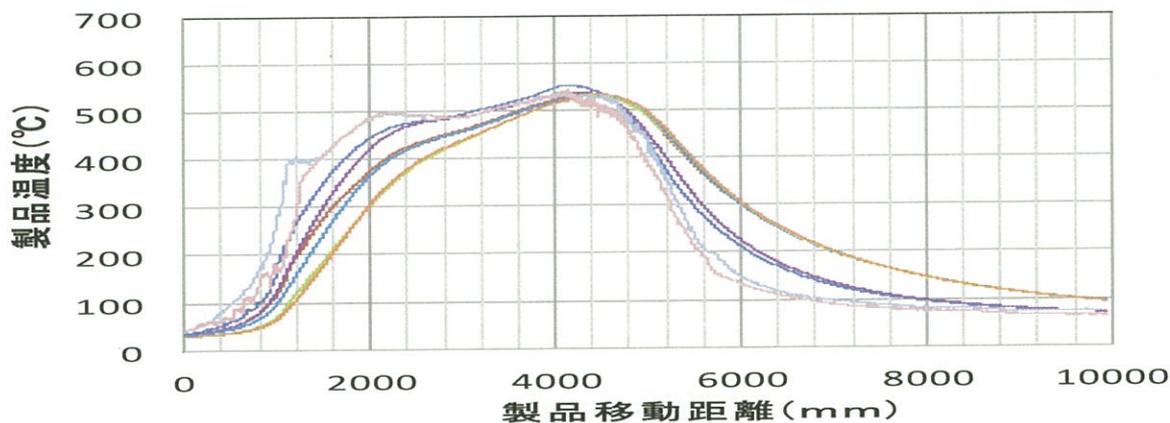
具体的には 炉中のワーク移動速度（搬送のベルト速度）が

目標：200mm/min に対し安定した条件では100mm/min となった。

<表2-4>は、稼働トライの1例の 条件と 最高到達温度及び 515℃以上の保持時間を示したものである。

<表2-4>

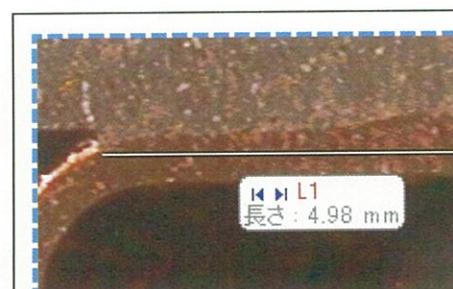
トライ条件					トライ結果		
45回目	ベルトSP	100mm/min	酸素濃度	4.7ppm	プローブ	最高到達温度	515℃以上保持時間
	ヒーター1	ヒーター2	ヒーター3	ヒーター4			
上	550	490	550	600	#1	553.1	723.0
下	550	490	550	600	#2	533.4	564.0
					#3	530.3	468.0
					#4	538.0	606.0
					#5	532.4	546.0
					#6	532.7	507.0
					#7	532.2	621.0



< 図2-9> 炉内を移動するワーク（熱交換器）の温度推移

<図2-9>は、ろう付けトライの1例であるが、最高到達温度、515℃以上の保持時間共に満足しろう付けされた製品の 非常に良好である。

<図2-10>は、ろう付け部の断面であり、ろう材の浸透性、フィレットの形成など良好なろう付けがなされている。



しかしながら問題は、ろう付けの最適条件が 100mm/min の搬送スピードで実現できたことである。このスピードでは、川下企業が要求する、日産納入数400台/日を満足することが出来ない。この課題は、ろう付けが安定して高品質で出来るとは言え、緊急かつ最優先の解決すべき事項なので、工程全体も考えて 取り組んだ。

2. 量産能力向上の改善・改良

量産能力不足は、ろう付け炉の加熱能力不足等によるのではなく、

- ・ 急激な加熱（加熱量アップ）を行うと、共晶融解温度 548℃を越える。
- ・ ワーク全体を均等に加熱するためには、緩やかな加熱が必要。

と、緩やかな加熱を行わなければ、狭い範囲のろう付け温度に到達・維持することが出来ないことで、「緩やかな加熱は当然時間を要し」量産能力を低減させる。

従って、「緩やかな加熱を維持して加熱時間を短縮させる方法」を以下の3段階で行った。

① 乾燥・脱脂炉で加熱された熱を使う。「乾燥・脱脂炉の直結」

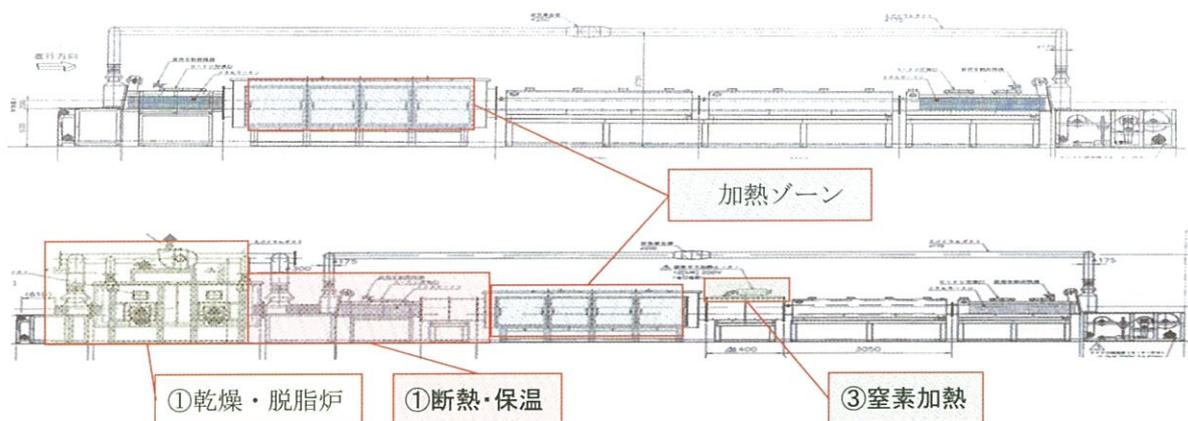
ろう付けを行う前工程で、ろう材をペースト状にするために添加されているバインダーを昇華させる加熱を行う。当初の計画では、物流と作業の流れを考慮して、乾燥・脱脂炉は他工程の設置であった。

この乾燥・脱脂炉を、ろう付け炉の前に直結して、ワークを加熱された状態のままろう付け炉に投入すれば、予熱された状況なので 最高到達温度に至る時間は大幅に短縮できる。

<図2-9>より 概略時間は (100mm/min 条件で)

初期状態 : 25℃ ⇒ 500℃・・・36分

乾燥・脱脂炉の加熱後 : 120℃ ⇒ 500℃・・・24分<12分減>

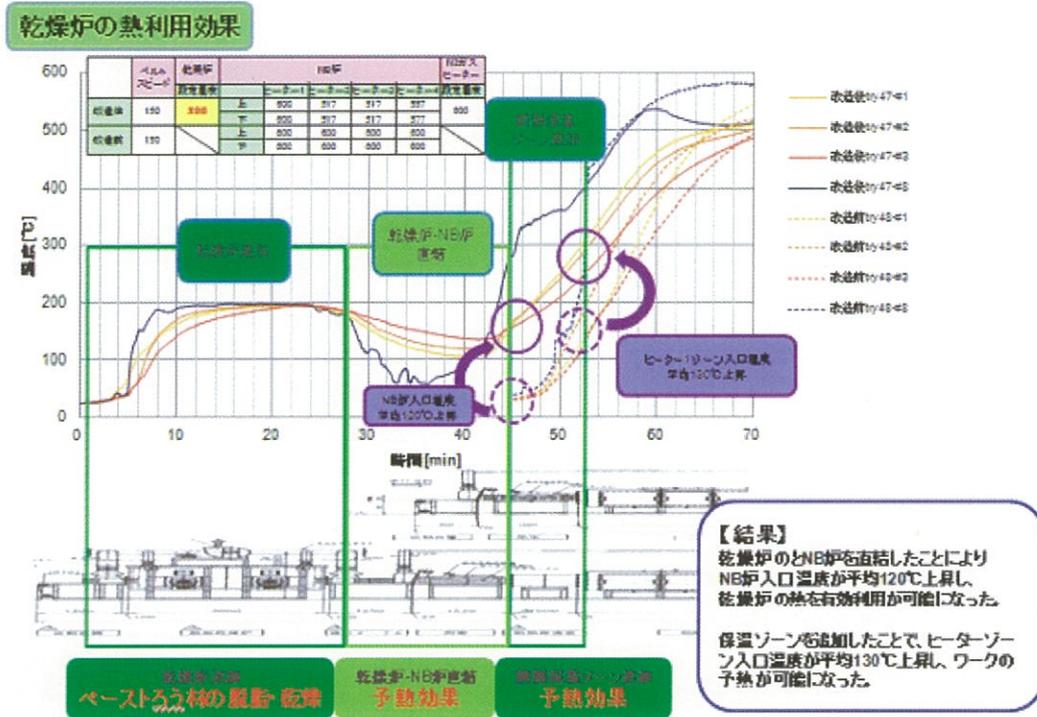


< 図2-11 > 改造前 後の構成

② 熱ロスを最小限化。 「断熱・保温で熱ロス削減」

①で得られた熱を 確実にろう付け炉に投入するため 乾燥・脱脂炉と加熱ゾーンとの間の断熱・保温を強化し 熱ロスを最小限化する。

<図 2-12>に ① ②による改善効果を示す。

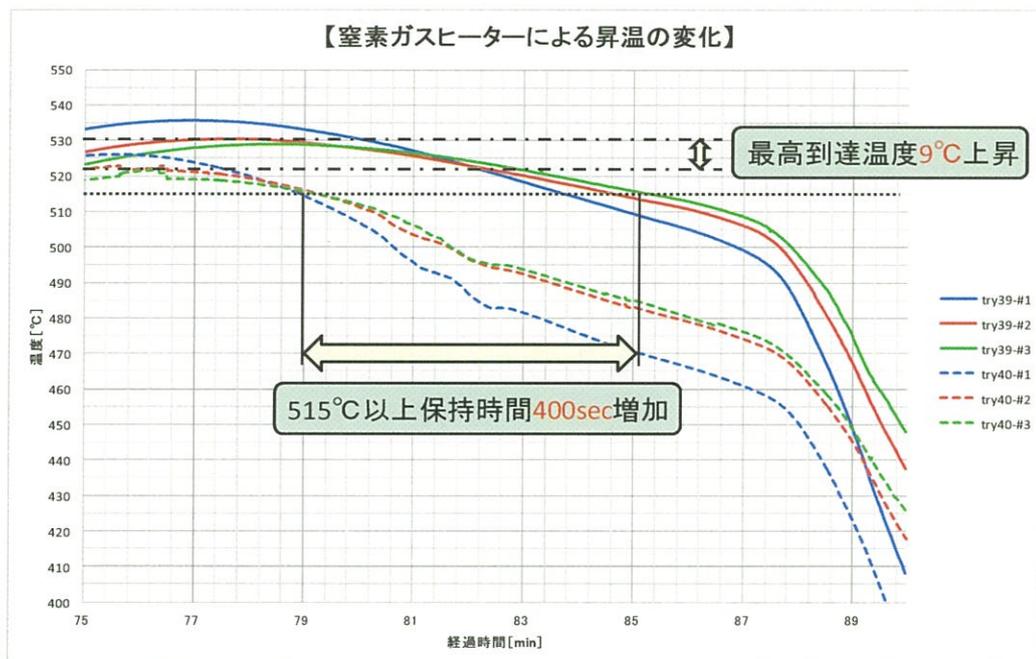


< 図 2-12 >

乾燥・脱脂炉の加熱利用は、ろう付け炉投入時『約120℃』相当分の加熱効果を出すことが出来た。

③ 窒素ガスを加熱して供給する。

残留酸素低減のため ろう付け炉の各部に窒素を供給する必要があるので、当然加熱ゾーンの前後にも供給している。液体窒素から発生させる窒素は大気温度以下なので、当然 炉内を冷却することになる。<図 2-13>はろう付け炉の稼働時に、窒素ガス加熱の有無で、測定したワークの各部温度推移である。



<図 2-13>

加熱によって、最高到達温度が9℃上昇し、保持時間が400sec改善され、以上 ① ② ③の改良・改善を実施した結果

「搬送スピード 150mm/min」でろう付けが可能となった。当初の目標 200mm/min には到達していないが、川下企業の必要な日産納入数 400台/日は、2時間程度の残業の10時間稼働により対応出来る。今後、改善は継続するが、本事業での目標は達成と考えている。

3. ろう付け炉を稼働させ ろう付け条件の確立

3-1. ろう付け条件の検証 (初期のろう付け炉)

製作・導入したろう付け炉の最適なろう付け条件を検証するために、対象とする熱交換器の模擬品、または試作品の各部の温度測定用センサーを取り付け、温度推移測定(データパックによる測定)を、幾つかの条件をパラメータとして測定を繰返しおこなった。代表的なトライデータについて紹介する。

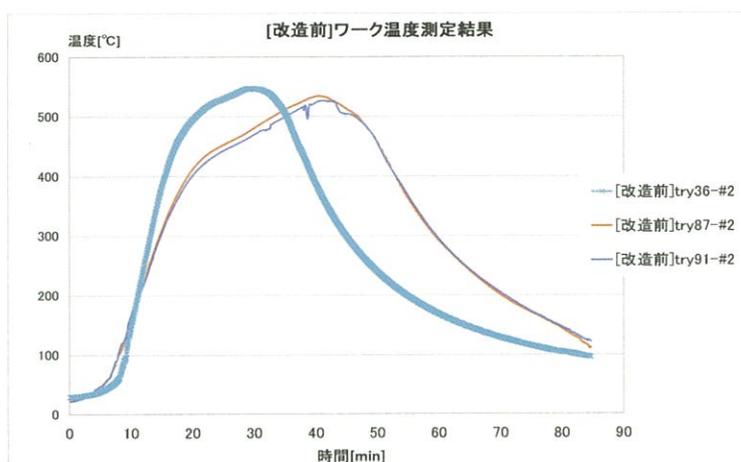
<表2-5>は、初期の炉で行った代表的なトライで try 36、87、91 の設定条件表である。

ベルトSP : 150mm/min 100mm/min ・ベルトの1分間速度
ヒーター温度 : 8ゾーンのヒーター夫々の設定温度

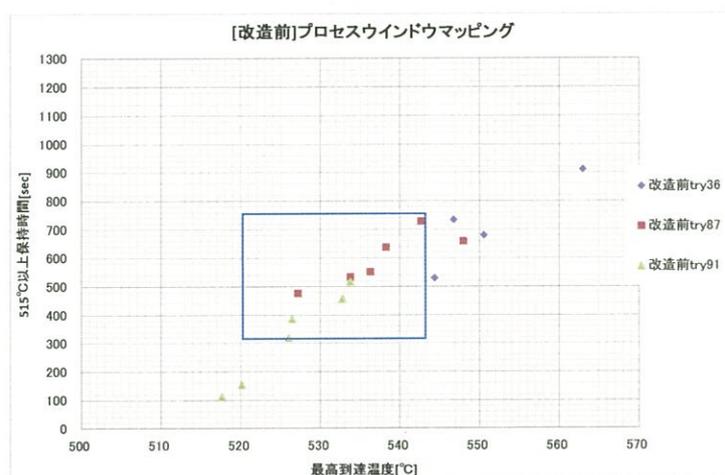
<表2-5>

トライ条件				
TRY36	ベルトSP	150mm/min	酸素濃度	9.1ppm
	ヒーター1	ヒーター2	ヒーター3	ヒーター4
上[°C]	640	600	590	590
下[°C]	640	600	590	590
TRY87	ベルトSP	100mm/min	酸素濃度	7.4ppm
	ヒーター1	ヒーター2	ヒーター3	ヒーター4
上[°C]	580	510	570	600
下[°C]	580	510	570	620
TRY91	ベルトSP	150mm/min	酸素濃度	7.1ppm
	ヒーター1	ヒーター2	ヒーター3	ヒーター4
上[°C]	574	504	564	594
下[°C]	574	504	564	614

この条件のトライ結果の炉中のろう付け品(熱交換器)の温度推移を <図2-14>に、また、最高到達温度と515℃以上の保持時間のマップを <図2-15>に示す。



<図 2-14>



<図 2-15>

ろう付けに必要な温度及び保持時間は、<図 2-15>で示す枠内でなければならない。try 36 は、150mm/min のベルトスピードを維持して得られた、ベストのデータであるが、ろう付け条件枠を外れ、特に最高到達温度が共晶融解温度を大幅に超える温度となっている。この結果から、150mm/min のベルトスピードでは、ろう付け条件を決めることが不可である判断した。

ベルトスピードを落とした条件でのろう付け条件を見つけるために、100mm/min でトライを行った、代表的な try 87 try 91 について <図 2-15>に示している。まず、try 87 については、最高到達温度が 1 点オーバーしているが、515°C 以上の保持時間は十分枠内に収まっている。try 91 は、最高到達温度は、530°C を切ることで保持時間が 300 sec を大きく下回る。

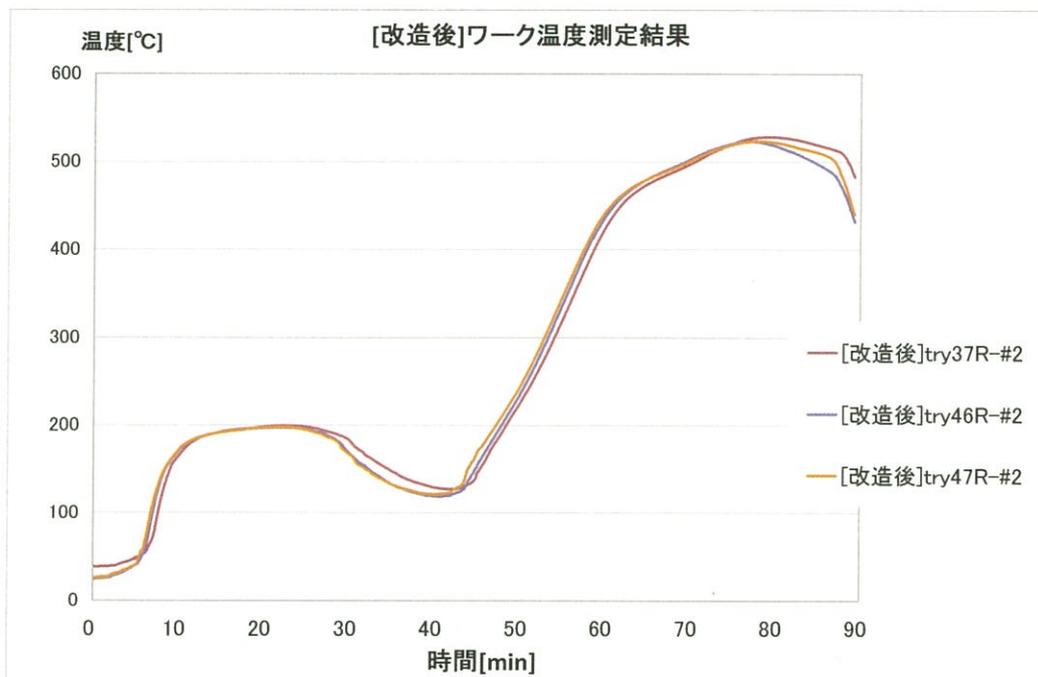
この 2 例については、枠内に収めるために、各ゾーンの温度設定を詳細に調整することで、最適ろう付け条件を決めることが出来ることが掴めたが、100mm/min のベルトスピードでは、目標との量産能力が不足のため、ろう付け炉の改善・改良を実施した。

3-2. ろう付け条件の検証 (量産能力改良後のろう付け炉)

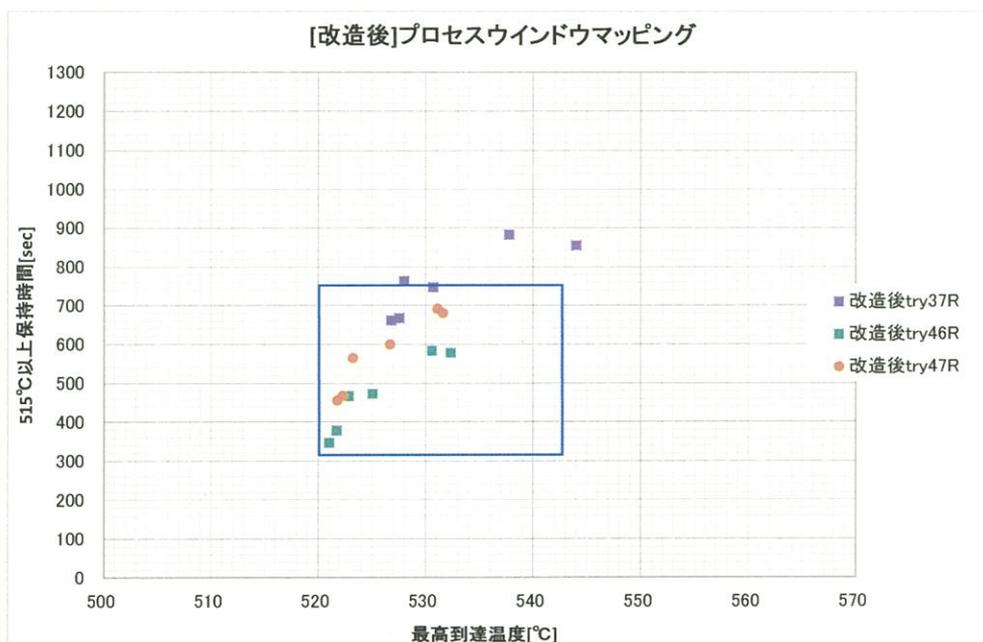
量産能力を向上させるために 乾燥・脱脂炉の連結、熱ロス防止の保温断熱、窒素ガスの予熱の改善・改良を行い、ベルトスピード 200mm/min を目指したが、トライ結果から150mm/min が実現可能な限界と判断した。

<炉の改造後> <表 2-6>

トライ条件				
37R	ベルト SP	150mm/min	酸素濃度	9.1ppm
回目	ヒーター1	ヒーター2	ヒーター3	ヒーター4
上 °C	600	517	515	567
下 °C	600	517	515	587
46R	ベルト SP	150mm/min	酸素濃度	7.4ppm
回目	ヒーター1	ヒーター2	ヒーター3	ヒーター4
上 °C	600	517	517	562
下 °C	600	517	517	582
47R	ベルト SP	150mm/min	酸素濃度	7.1ppm
回目	ヒーター1	ヒーター2	ヒーター3	ヒーター4
上 °C	600	517	517	557
下 °C	600	517	517	557



<図 2-16>



<図 2-17>

<表 2-6>及び <図 2-16><図 2-17>は、150mm/min の場合の到達温度、515°C以上の維持時間を求めた結果である。多くのデータより代表的なものとして、try37、46、47 を選択したもので、全て 150mm/min として、各ゾーンの設定温度を変えた条件でのトライである。

<図 2-17>に表された try46及び47のデータは、全てが枠内に収まりほぼ理想的な条件であると言える。

これらの結果から、本事業で開発製作したろう付け炉の量産能力は当初目標には達せなかったが、川下企業の要望する 日納数量は確保出来る結果なので、

「ろう付け炉のろう付けは、150mm/minでの条件」

最高到達温度範囲 520～543°C

515°C以上保持時間 310～750S

と決定した。

最終章 全体の総括

1. 研究開発で得られた 価値ある技術（技術資産）

溶接（ろう付け）の基盤技術の高度化を目指す委託事業として、技術の確立を、具体的に川下企業が必要とし要請されている熱交換器を対象として進めることが出来たことで、プロジェクトメンバー、川下企業担当者が、品質（Q）、経済性（C）、日程期限（D）を忠実に徹底することにつながり、期間内に目標達成した。

また、開発は「熱交換器を作る量産工程（ろう付け）の確立」と今後の熱交換器の量産移行するものであるが、開発の過程で取り組んだ個々の開発成果は、夫々に生かすことが出来る貴重な技術資産となった。

① ろう材とバインダー、フラックスの選定と使用条件の確立

多くの種類のバインダー、フラックスについて詳細に調査・分析し具体的にろう付けに使用して評価した経過の内容は、選定・確立結果以上に価値のあるノウハウであり、今後の弊社の技術資産として活用できる。

② 炉中雰囲気条件の確立

設計・開発したろう付け炉では、

『低酸素分圧では 10^{-20} 気圧以下』

を満たす、真空炉以上のノコロック炉を作ることが出来た。この技術は、ろう付けを事業とする弊社は、今後導入するろう付け炉の開発・導入に生きる。

③ 高精度の温度を得るための構成と制御

強度保証のための最少温度（515℃）と共晶融解（548℃）を避ける最大温度の狭い範囲で「昇温⇒保持⇒冷却」を行うための、炉の構成、制御方法は今後活用できる技術である。

④ 微小荷重の疲労解析

制約された低い温度で行うろう付けは、必然的に接合部の機械的強度は小さい値になる。熱交換器の機械的強度は、熱交換器の構成・構造で保証している。しかし、製品として市場に供給する

以上、結合強度は永久的に保証されるものでなければならない。この微小の結合を評価した微小荷重試験は、貴重な経験で今後も生かすことが出来る。

2. 事業化と今後の展開

① 対象とした熱交換器の事業化

当初計画では、平成26年5月に量産を予定していたが、川下企業の意向として、世界初とも言える「銅材とアルミニウム材の直接ろう付け」は、市場実績が未知数のため、年間10万台近くを市場に供給するにはリスクが大きいとの判断で2年間数十台の市場モニターを実施することで、平成28年5月量産に延期した。

弊社は、モニター品の製作と2年後の量産に向けての残された課題、ペーストろう材の塗布装置や量産のための冶工具等の開発に当たる。

平成28年度の量産見込みは

生産台数 80,000 台/年 売上金額 850 百万円 である。

② 確立技術の他への展開

現状は、具体的対象は未定であるが、前1項で述べたように、弊社の貴重な基

盤技術として「軽く、安い」アルミニウム材の積極的な採用に活かして行く。

3. 本委託事業に携わって

3年前、「銅材とアルミニウム材の直接ろう付け技術」テーマを掲げて 事業委託を受けスタートした時点で、技術的に確立することに危惧はなかったが、400台/日の量産を「安定した品質」で「経済的」に行うこと、すなわち、工程品質“0”（共晶融解等によるロスゼロ）で、量産効率、標準的な作業、標準的な設備稼働（ろう付け炉の操作と日常管理）等 不確定な課題が多くあり3年間での達成は 相当の困難と覚悟し取組んだ。

幸い、川下企業の技術者による技術的指導・支援、また多くの課題を担当しての評価検討を加えて頂いたことで、結果は100%とは言えないにしてもほぼ満足出来る結果を得ることが出来た。

一方、開発課題が、大学に一任すべき内容や、課題の分担設定が難しく、企業が選定した材料の評価、企業がろう付けしたサンプルの評価・分析等の範囲で終わったことを反省している。

今後、群馬大学に限らず広く大学が持つシーズを求めて、新しいろう材や新しい結合方法の開発で、溶接（ろう付け）を基盤技術とする企業として、ものづくりの高度化に努めて行く。

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。