



# グラファイトマッフルを備えたアルミロウ付炉の開発

神 田 輝 一\*

## 1. はじめに

現在、一般に用いられている自動車用アルミ熱交換器やエアコン用アルミ熱交換器の多くはタンク、チューブ及びフィン等の部材から構成され、各部材はロウ付法で接合されている。

工業的なロウ付方法としては、真空ロウ付法と非腐食性フラックスを用いた雰囲気ロウ付法とに大別される。真空ロウ付法はAl-Si-Mg系合金からなるロウ材が用いられ、真空中で加熱することによりロウ材中のMgが材料から蒸発し、その際に材料表面の酸化皮膜を破壊しロウ付を可能にするものである。しかしながら、真空ロウ付法は犠牲酸化材のZnの使用が困難であり、蒸発したMgが真空炉及び真空装置を汚染する等の欠点を有する。

一方、非腐食性フラックスを用いた雰囲気ロウ付法は、Al-Si系合金からなるロウ材が用いられ、フラックスを塗布した後に常圧不活性ガス中で加熱し、フラックスのアルミ酸化物溶解作用により材料表面の酸化皮膜を破壊しロウ付を可能にするものであり実用的に広く利用されている。この方法において使用されるロウ付炉は、工業的にはトンネル型メッシュベルト式の連続雰囲気炉であり、予熱ゾーン、ロウ付ゾーン及び冷却ゾーンを有している。また炉中全長にわたり金属マッフルが内蔵し、マッフル内部には保護雰囲気として窒素ガスが充たされている。予熱帯ではフラックス

の熔融温度以下の793 K (520 °C) 程度に被処理物が予熱されるが、この温度域では熱伝達は対流加熱が主体になる。また、ロウ付帯では836 K (560 °C) 前後の温度域でフラックスが熔融し、その後ロウ材が熔融し接合される。しかしながら、従来のアルミロウ付炉には、

- (i) 雰囲気の気密性を高めるために金属マッフルを用いるためファンによる強制対流加熱手段を取ることが難しく、被処理物の急速加熱が困難である。
  - (ii) トンネル炉のため外乱として空気が入りやすく、これを除去する能力がないため炉内を低酸素に維持することが困難である。
  - (iii) 金属マッフルの熱膨張係数が大きく金属マッフルの熱変形を生じやすいために、稼動時の急速な昇温及び終業時の急速な降温が不可能である。
  - (iv) 熔融フラックスが金属マッフルを損傷する。
- など多くの問題が内在している。

そこで、本報告では従来のアルミロウ付炉が抱えている上記の問題を克服するために、

- (i) 金属マッフルを用いずグラファイトマッフルを使用する。
- (ii) 予熱部に攪拌ファンを取り付け強制対流加熱が可能にする。

\* 関東冶金工業株式会社 取締役 (工博) 技術開発室室長 K. Kanda

- (iii) グラファイト材のゲッター作用により炉内の酸素分圧を3Pa以下まで低減させることが可能である。
- (iv) グラファイトマッフルを使用しているため溶融フラックスが炉内構造物を損傷しない。

などの特長を有するアルミロウ付用低酸素雰囲気炉 (OXYNON CAB<sup>®</sup>, 関東冶金工業株式会社製) を開発した<sup>1)</sup>。本報告では、まず炉の特長と構造を述べ、次にこの炉を用いたアルミ熱交換器ロウ付の実施を試み、従来実現が難しいとされていた強制対流加熱によるロウ付時間の短縮を図った。さらに、多段積みによる積載量の増大を目的とした生産量増加の可能性の検討、及び省エネルギー効果の有用性についての検討を行ったので、その結果を報告する。また、最後に次世代のアルミロウ付炉になりうるローラハース式アルミロウ付炉についても報告する。

## 2. OXYNON CAB<sup>®</sup> の特徴と構造

著者らは、これまでに炉内構造物をすべてグラファイト系の材料で構築し、炉内雰囲気窒素ガスやアルゴンガスなどの不活性雰囲気のみで炉内酸素分圧を極限まで下げ、なおかつ炉内圧は常圧である常圧不活性ガス連続雰囲気炉を開発した。この炉を用いると水素炉や真空炉を使用することなく1273K(1000℃)以上の温度で炉内酸素分圧を $10^{-15}$ Pa以下まで下げることが出来る。我々はこの炉をOXYNON<sup>®</sup>炉と命名した。さらに、この炉を用いてステンレスロウ付等の接合技術への応用性を検討した<sup>2)</sup>。また、ロウ付が難しいとされるチタンのロウ付についても報告した<sup>3)</sup>。

本開発ではまず処理温度をアルミロウ付温度である873K(600℃)付近まで下げても炉内酸素分圧を低く抑えることができるか否かを検討するために、まず直径0.06m×長さ0.3mのSUS304材のパイプに $8.4 \times 10^{-4}$ m<sup>3</sup>のグラファイト塊を満たした反応筒を作成した。これに供給ガスとして20Paの酸素分圧に調整された窒素気体を投入し、各温度での排出改質窒素気体中の酸素分圧を測定して低温域でのグラファイトのゲッター効果を確認する基礎データを採取した。その結果を図1に示す。この図からグラファイトが約673K(400℃)以上の温度において酸素を減じる作用があることが確認され、873K(600℃)近傍のアルミロウ付温度においてもオキシノン理論が利用できることがわかる。なお、オキシノン理論については文献<sup>2)</sup>に述べてあるので省略する。

アルミロウ付用低酸素雰囲気炉(以下OXYNON CAB<sup>®</sup>と称する)は、図2に示すように製品投入側から①前室、②予熱室、③加熱室、④冷却室、⑤後室及び⑥衝風冷却室により構成されている。

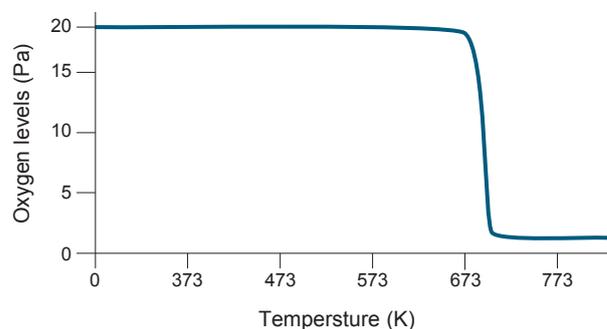


図1 黒鉛温度と酸素分圧の関係

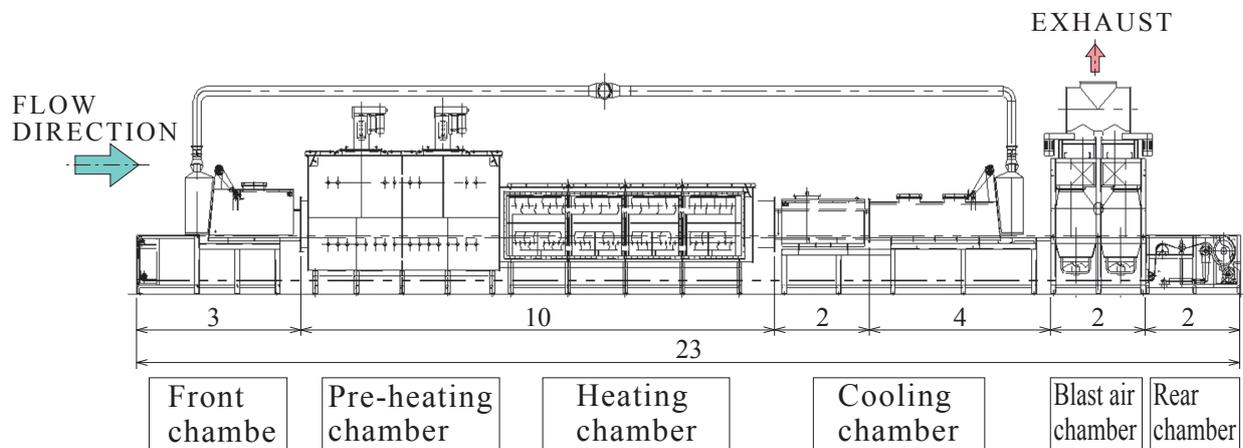


図2 OXYNON CAB<sup>®</sup> 外観図

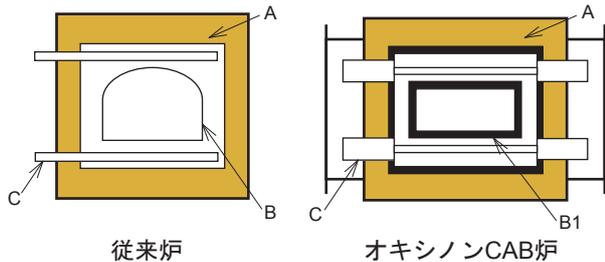


図3 従来炉と OXYNON CAB<sup>®</sup>における模式的断面図の相違点

A:断熱材 B:金属マッフル B1:グラファイトマッフル C:発熱体

図3は金属マッフル構造の炉と OXYNON CAB<sup>®</sup>との比較を模式的断面図で示した。

ここでA部は断熱材であり、Bは金属マッフルで、黒く塗りつぶしたB1はグラファイトで構築されたマッフルであり、この図では二重のグラファイトマッフル構造となっている。またCは発熱体である。ここで OXYNON CAB<sup>®</sup>は、炉内が従来炉の金属製マッフルの代わりにグラファイトマッフルが構成されていることが大きな特徴である。このため、供給される保護ガス中にわずかに残留する酸素や水分、外乱として入り込む酸素や水分などは速やかにマッフルのグラファイトと反応し、炉外に排出させることができる。この構造を利用して得られる低酸素分圧はフラックスの消耗及びアルミの酸化を抑制する効果があると期待できる。

また、従来炉と OXYNON CAB<sup>®</sup>との雰囲気シール方式の相違は、従来型は金属マッフルで雰囲気の気密が保たれているのに対し OXYNON CAB<sup>®</sup>は板金外殻で雰囲気気密が保たれている点である。

金属マッフルを用いた従来型炉と OXYNON CAB<sup>®</sup>の外観図を図4に示す。これからもわかるように OXYNON CAB<sup>®</sup>は、マッフルの熱膨張を均一に逃がすための冷却ゾーン下部等の車輪が皆無である。これは、昇温・降温時の加熱速度及び冷却速度を制御する必要がないことを示している。

次に、フラックスとグラファイト及びフラックスと金属の反応について調査した。

図5の①は内法0.12m×0.12m、高さ0.02mのグラファイトトレイにノコロックフラックス20gを載せた状態を示している。これを酸素濃度1Paの窒素雰囲気中で883Kにて60min間保持し、その後窒素雰囲気中で室温まで冷却した状態を図5の②に示す。この状態では、フラックスをつまむと簡単に取れて図5の③の状態になる。

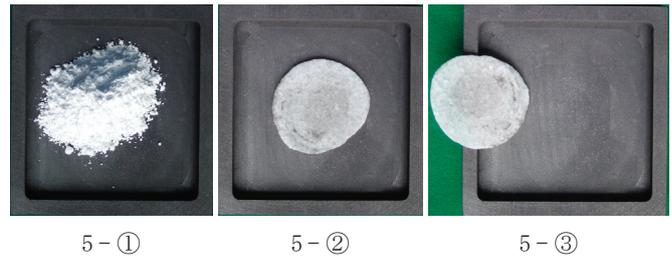
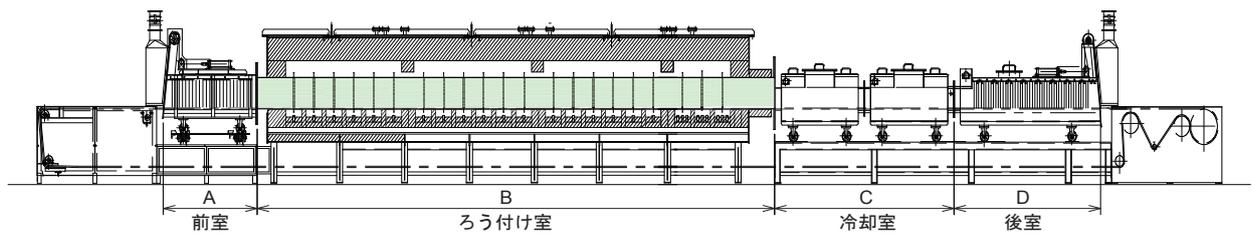


図5 黒鉛とフラックスとの反応

#### 金属マッフルタイプ(従来型) 1979年～



#### グラファイトマッフルタイプ(OXYNON CAB<sup>®</sup>) 2000年～

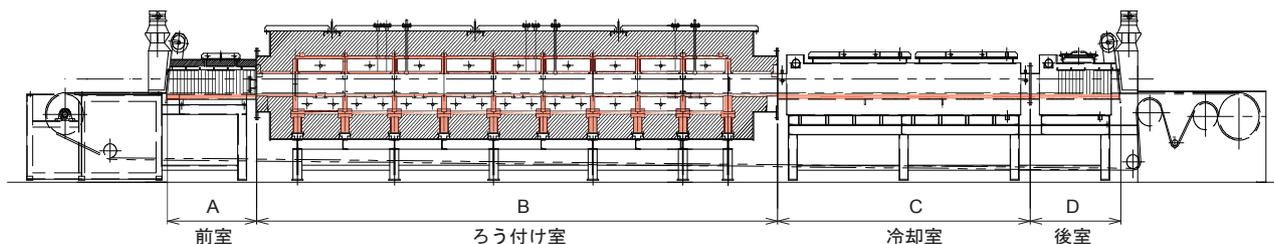


図4 従来炉と OXYNON CAB<sup>®</sup>の外観図

図6の①は、アルミロウ付炉の金属マッフルケースと同じ材質のSUS304を用いて図5と同じ内法で作成した金属トレーを示したものである。図6の②には図5の①と同様に非腐食性フラックスを20g積載した状態を示してある。さらに図5と同じ条件にて加熱処理を行い、同一条件で冷却をした状態のフラックスを図6の③に示す。この場合には、マイナスイオンで削りでもフラックスを剥ぎ取ることが出来ないほど強固に密着していた。

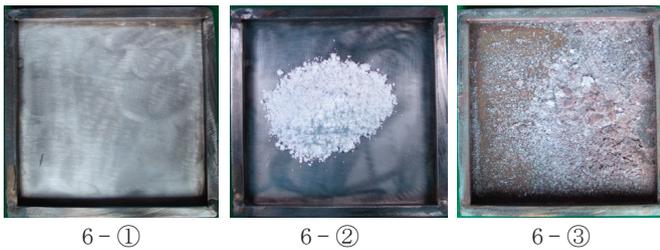


図6 ステンレス鋼とフラックスとの反応

以上の結果より、金属製マッフルケースにフラックスが落下して熔融すると、金属マッフルとフラックスが反応して急速に侵食され、寿命が短縮されるが、フラックスに濡れない耐食性が良好なグラファイトを使用した低酸素雰囲気炉のマッフルは、フラックスに侵食されることがないために極めて長い寿命が期待できる。

金属マッフルの場合は部分的な損傷でもマッフル全体を交換することになるが、低酸素雰囲気炉のグラファイトマッフルケースは多数のセグメントを組み合わせる方式で製作されるため、仮に部分的な損傷・損耗が発生しても部分交換が可能であり、補修費用と作業時間を大幅に削減できる。図7にセグメント方式のグラファイトマッフルケースの模式図を示す。

また、グラファイトは黒体であるため金属に比べ放射率が高く、良好な放熱板として作用し、炉内温度精度の一層の向上が期待できる。

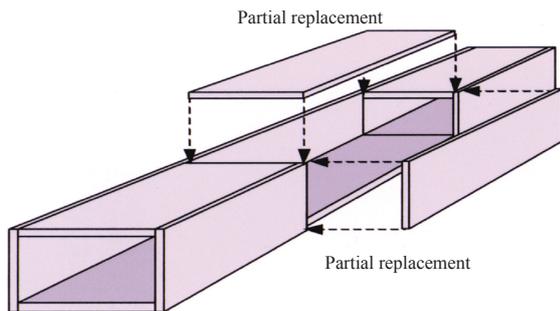


図7 グラファイトマッフルの部分補修

### 3. OXYNON CAB<sup>®</sup>を用いたアルミロウ付実験

#### 3.1 バッチ炉での基礎実験方法

連続炉での実験に先立ち炉内に攪拌ファンを設け、炉内壁をグラファイトで構築したバッチ炉(図8)を作製し、流速と酸素濃度の関係を調査した。窒素ガス流量は炉内容積の5倍の4.5m<sup>3</sup>/hrとした。このとき炉導入口での窒素気体の酸素分圧は0.2Paであった。なお、すべての実験で用いた酸素計はガルバニ電池式の燃料電池型酸素計である。

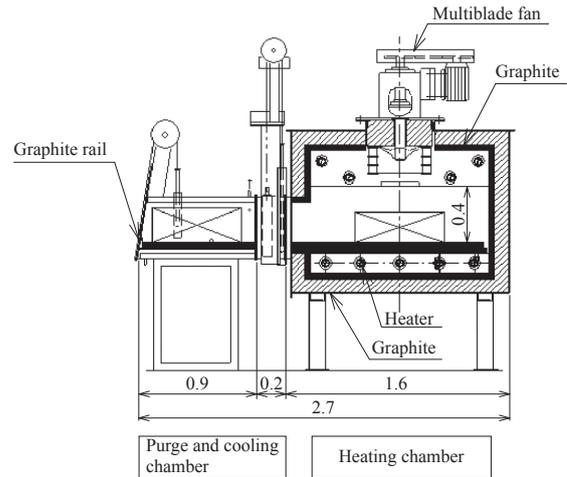


図8 OXYNON CAB<sup>®</sup> バッチ炉外観図

このバッチ炉を用い873K(600℃)に昇温された炉内に0.355m×0.495m×0.025mの熱交換器コアを投入し、対流速度を0m/sec、3m/sec及び4.5m/secと変化させたときのコア中心部における昇温速度と流速の関係を比較・検討した。

#### 3.2 連続炉での実験方法

図2で示した連続炉を用いて、図9に示す炉入り口側AからFの6箇所の位置で、炉内が空の場合と製品が投入された場合での炉内酸素分圧を測定した。このときの窒素気体の流量は稼動時と同量な60m<sup>3</sup>/hrとした。

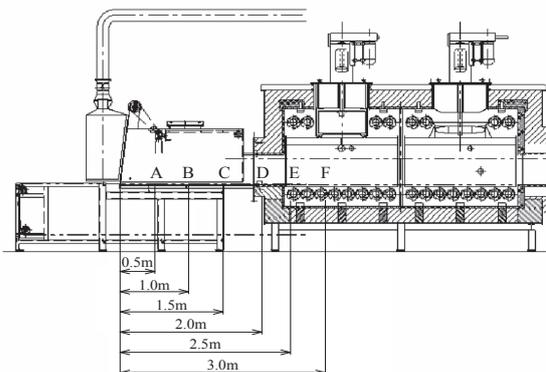


図9 連続炉での炉内雰囲気測定位置

次に図 10 に示す方法にて低酸素雰囲気炉の特徴を活かす三段積ロウ付実験を実施した。熱電対を図中に示す  $0.7\text{ m} \times 0.375\text{ m} \times 0.15\text{ m}$  の寸法を有するラジエーターの各部に取り付け、昇温・冷却の温度プロファイルを測定することにより生産量向上の可能性を調査した。

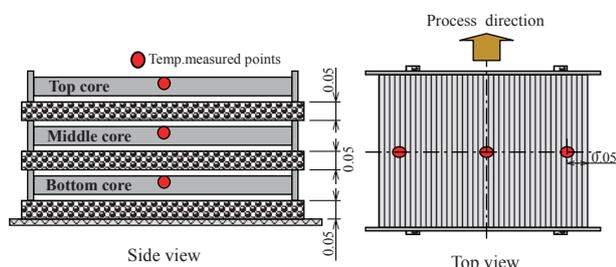


図 10 三段積みロウ付実験方法

#### 4. OXYNON CAB<sup>®</sup>を用いたアルミロウ付実験結果及び考察

##### 4.1 バッチ炉での基礎実験結果及び考察

図 11 は炉内温度を室温  $298\text{ K}$  ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) と  $673\text{ K}$  ( $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) に設定し、強制対流速度を  $0\text{ m/sec}$ 、 $3\text{ m/sec}$  及び  $4.5\text{ m/sec}$  と変化させた場合の炉内酸素濃度の推移を示している。

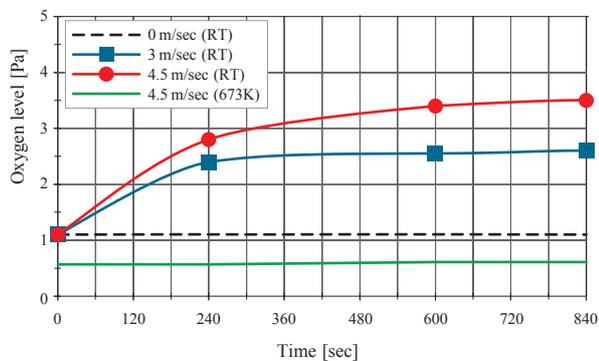


図 11 雰囲気流速と炉内酸素分圧の関係

室温  $298\text{ K}$  において炉内攪拌ファンを停止した場合には約  $1.2\text{ Pa}$  と安定しているが、攪拌ファンを稼働させると空気が混入して炉内酸素分圧が上昇する。この傾向は強制対流流速が増大するほど著しい。しかしながら、炉内温度を  $673\text{ K}$  に昇温すると、強制対流されているにもかかわらず炉内酸素分圧は上昇せず、約  $0.6\text{ Pa}$  で一定となる。この現象は、前述のグラファイト反応筒実験の場合と同様な理由によって炉内のグラファイトが混入した酸素を削減した結果生じたと考えられる。

図 12 は対流速度を変化させの昇温速度におよぼす影響を測定した結果である。従来型の強制対流を実施しない加熱方式では、ロウ付温度である  $873\text{ K}$  ( $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) の到達する時間が約  $10\text{ min}$  である。これに対して  $4.5\text{ m/sec}$  にて強制対流加熱したラジエーターコアロウ付温度到達時間は約  $5\text{ min}$  であり、加熱炉内滞在時間が約  $50\%$  になった。この結果から、本炉を用いることにより強制対流を行わない従来炉と比較して処理能力の大幅な向上が期待できることがわかる。

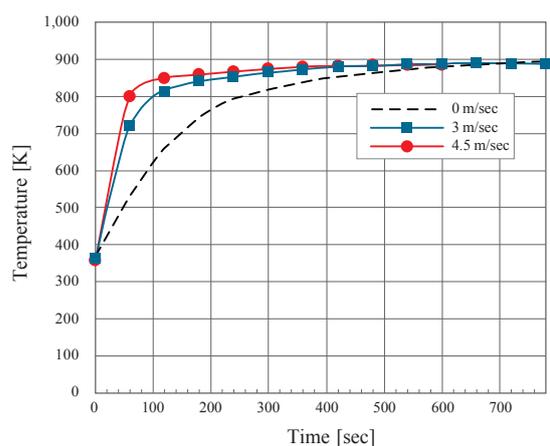


図 12 雰囲気流速と製品の昇温時間との関係

##### 4.2 連続炉での実験結果及び考察

図 9 の方法で炉内酸素分圧を測定した結果を表 1 に示す。空炉時においては入り口扉より  $250\text{ mm}$  の地点においても酸素分圧は  $1\text{ Pa}$  を下回っているが、製品投入時においては入り口扉から  $1500\text{ mm}$  付近で  $1\text{ Pa}$  を下回る結果となった。これは製品の持ち込みにもなう外乱が増したためと推測される。前項で述べたように、従来の金属マッフル炉

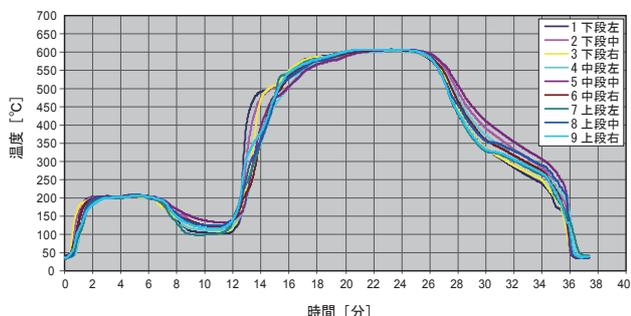
表 1 連続炉雰囲気中の酸素濃度分圧

Measured point	Oxygen level [Pa]		Remark	Temp. [K]
	Max	Min		
A	0.52	0.472	Unloaded	311
B	0.482	0.434	Unloaded	309
C	0.431	0.399	Unloaded	338
D	0.441	0.398	Unloaded	372
E	0.408	0.362	Unloaded	663
F	0.408	0.348	Unloaded	749
A	> 1000	380.00	Loaded	-
B	> 1000	290.00	Loaded	-
C	0.923	6.01	Loaded	-
D	0.618	5.20	Loaded	-
F	1.382	0.609	Loaded	-

では、外乱侵入による炉内残留酸素がフラックスを酸化させる可能性が高いため対流加熱方式は好ましくない。これに対して、炉壁にグラファイトを用いる低酸素雰囲気炉では、外乱侵入があっても炉内の酸素濃度を極めて低く保つことができるため、強制対流による熱交換器の急速加熱が可能になる。

図 13 は生産量向上の可能性を確認するために行った三段積ロウ付実験の温度分布結果を示したものである。3 段積みにして加熱した場合のコア各部の温度上昇は極めて速く、また各部位間の差がほとんど認められない。予熱室入り口から約 5 min で 823 K に達し、加熱開始後約 10 min で各測定部位はいずれもロウ付温度に達していることがわかる。

なお、図 13 の下表に各部位の最高到達温度を示す。最も低い到達温度は中段製品左側で 874.9 K (601.9 °C) であり、最も高い到達温度は上段製品中心で 880.0 K (607.0 °C) である。ロウ付温度での温度偏差は 5.1 K であり、従来から妥当といわれているアルミロウ付時の温度偏差が 6.0 K 以内の基準を満足している。このときの合計ロウ付処理時間は約 33 min であり、従来炉を用いた一段のロウ付時間とほぼ同じ処理時間であった。なお、二段積みを行った実験結果では温度偏差が 3 K であり、各部の温度ばらつきは三段積みと比較してより低減された。ロウ付状態については、すべての製品で接合部のフィレットの状態は従来ロウ付品と同等であり、外観は、従来ロウ付品と比較し光沢があり綺麗な製品が得られた。この結果は炉内酸素分圧が従来炉と比べ低いことに起因するものと考察する。



	1 下段左	2 下段中	3 下段右	4 中段左	5 中段中	6 中段右	7 上段左	8 上段中	9 上段右
最高温度	606.0	606.8	604.6	601.9	605.4	605.4	606.2	607.0	606.3
600 °C 以上	4.9	5.3	4.8	3.1	4.2	4.6	5.4	5.3	5.4
	最高昇温点			最低昇温点					
場所	8 上段中			4 中段左					
温度	607.00			601.90					
温度差	5.10								

図 13 3 段積みロウ付時の温度分布

## 5. ローラハース式アルミロウ付炉の開発

今まで述べてきたようにアルミ製品のためのロウ付炉は、金属マッフルケースを用い、窒素等の不活性ガスをその中に満たした低酸素分圧雰囲気中で、予熱ゾーン、ロウ付ゾーン、徐冷ゾーン及び冷却ゾーンを有する各ゾーン中をメッシュベルトにより炉中搬送するメッシュベルト式連続炉が一般に用いられている。

この連続炉の欠点は、炉内搬送用の金属製メッシュベルトを加熱・冷却するための熱エネルギー損失が大きいことである。また、搬送速度は一定であるため、加熱速度及び冷却速度を調整することは困難である点も挙げられる。

近年、急速加熱及び急速冷却により、加熱冷却に要する時間を短縮化し、アルミ材料の改質を図るとともに省エネルギーを図る要請が強くよせられる。

例えば、最近のアルミ製品の熱交換器のフィン材料等では薄く、しかも強度を持たせるために合金元素を添加することが多用されるが、このようなアルミ製品のロウ付では、873 K (600 °C) で加熱してから 573 K (300 °C) まで急冷すると強度向上が図れるといわれている。このため従来は、5 ~ 6 min 必要であった冷却時間を 3 min 程度にすることが要望されている。

以上のように炉内酸素分圧の低減、省エネ、送り速度の制御容易性等の観点から、金属製マッフルケースを設けたアルミ製品ロウ付連続炉において、搬送手段としてローラハースを設けることが考えられるが、炉内に金属製マッフルケースを設けたアルミ製品のロウ付け用連続炉において、搬送手段としてローラハースを設けたものは従来存在しなかった。

その理由は、次のとおりと考えられる。アルミ製品のロウ付け用連続炉において金属製マッフルを設けると、窒素ガス等の不活性ガス雰囲気内で酸素濃度を低下させた状態で加熱処理が可能となり、品質維持のためにきわめて有益な構造である。しかし、加熱炉内での加熱により金属製マッフルには膨張が生じる。

例えば、金属製マッフルを、熱膨張率が  $17 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  の金属材料で形成すると、加熱炉内の温度が 873 K (600 °C) の場合、1 m につき、10.2 mm 膨張することとなる。従って、長さが 10 m 程度の加熱炉では、全体として 102 mm 膨張する。

ところで、ローラハースにマッフルを設ける場合は、搬送ローラ両端の支持軸（回転軸）は、その両端が金属マッフルの側壁に形成される支持孔を貫通して回転可能に支持され、金属製マッフルの外側に配置される駆動機構で駆動される構成が想定される。

しかし、上記のとおり金属製マッフルは熱膨張が大きく、特に、加熱炉の長手方向（搬送方向）の熱膨張により、搬送ローラ両端の支持軸に対して支持孔の位置が大きく変化するためローラ両端の支持軸を円滑に支持できないという問題がある。

よって、金属製マッフルを設けたアルミ製品のロウ付け用連続炉では、炉内搬送手段としてローラハースを採用するような発想はなかった。

そこで我々は、新 OXYNON CAB<sup>®</sup>の開発に挑戦した。それは炉内酸素分圧の低下、省エネルギー及び送り速度等の技術的要請を充たす目的のために、マッフルケースを設けたアルミ製品のロウ付け用雰囲気連続炉で、加熱炉内の搬送手段としてローラを用いたローラハース式アルミロウ付雰囲気連続炉を実現することを試みた。

本開発は上記課題を解決するために、予熱、加熱、及び冷却の各ゾーンを有するアルミロウ付け用連続炉において予熱ゾーン及び加熱ゾーンにおいては、炉壁内にグラファイトマッフルを有するローラハース構造とし複数の搬送ローラが搬送方向に並列されている搬送ローラを複数群備え、なおかつ、搬送ローラ群毎にモータで独立的に駆動されるように形成されたローラハース式アルミロウ付炉を開発した。その外観図を図 14 に示す。

また、図 15 の断面図によりその構造を説明する。⑤ の搬送ローラの両端がカーボンマッフル③の側壁に形成された孔を貫通して外側に伸び、ローラ支持軸⑥に同心状に固定されている。ローラ支持軸は窒素等の不活性ガスで満たされたボックス①内に軸受を介して回転可能に軸支されて

いる。

本開発のローラハース式アルミロウ付用連続雰囲気炉は、次のような効果が生じる。

- (1) 炉内に設けたマッフルを、温度が変化しても熱膨張係数の変化が小さく安定したカーボン材料で形成したので、搬送ローラの支持軸を回転可能に支持するマッフルの支持孔の位置が膨張によって変化したり支持孔の変形が少なく、そのために、搬送ローラ及びその支持軸やマッフルを破損したりすることなく、スムーズに滑らかに回転可能に支持することができる。
- (2) よりきめ細かく速度制御の可能なローラハースを搬送手段として利用する構成であるから、急速加熱及び急速冷却に対応してアルミ製品の炉内搬送速度を適切に調整することが可能となり、急速加熱及び急速冷却を可能とし、省エネルギー効果を高めることができる。
- (3) 炉内に熱容量の大きいベルトコンベアが走行しないので、ベルトコンベアの加熱に要する熱量がなくなり、省エネルギー効果が向上させ、しかも、大きな重量や密に載置したアルミ製品も炉内を搬送可能となった。

以上様々な利点があり、2008 年から販売を開始したが、客先から良好な評価をいただいている。

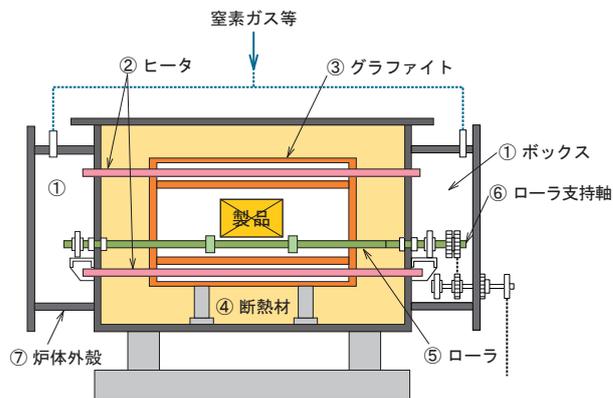


図 15 ローラハースアルミロウ付炉解説断面図



図 14 ローラハースアルミロウ付炉外観図

図 16 に弊社のアルミロウ付炉の開発推移を示す。

## 7. まとめ

本報告では、新たに開発したアルミロウ付用低酸素雰囲気炉 (OXYNON CAB<sup>®</sup>) による自動車用熱交換器のアルミロウ付を試みた。

主な結論をまとめると以下のとおりである。

- (1) 従来のアルミロウ付炉に比べ本低酸素雰囲気炉を用いることにより、大幅なロウ付処理時間の短縮が可能となった。
- (2) 本低酸素雰囲気炉を活用することにより、炉内の酸素分圧を低く制御することが可能となった。
- (3) 本炉では、グラファイト炉壁を使用しているために熔融フラックスが炉壁と反応せず、従来炉に比較してメンテナンスが容易である。
- (4) 本炉を用いることにより、多段積みロウ付が可能になり、一段処理時と同程度の雰囲気ガス使用量で積載量の増大が期待できることを示した。

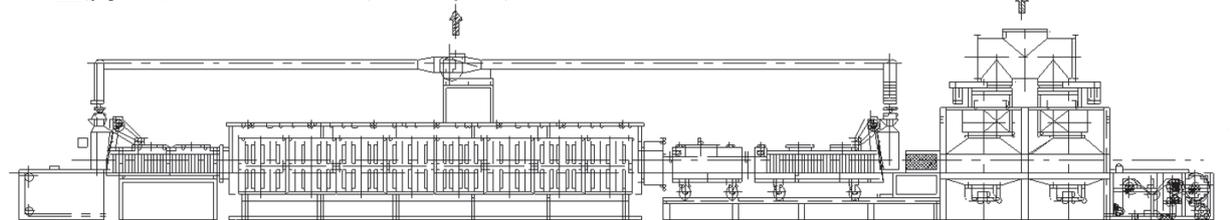
(5) 本炉を用いて多段ロウ付された製品のロウ付状態は、接合部のフィレットについては従来炉での一段ロウ付品と同等であり、外観は、従来ロウ付品と比較し光沢があり綺麗なロウ付製品が得られた。

(6) 最後にローラハース式次世代アルミロウ付炉についてその効果につて述べた。

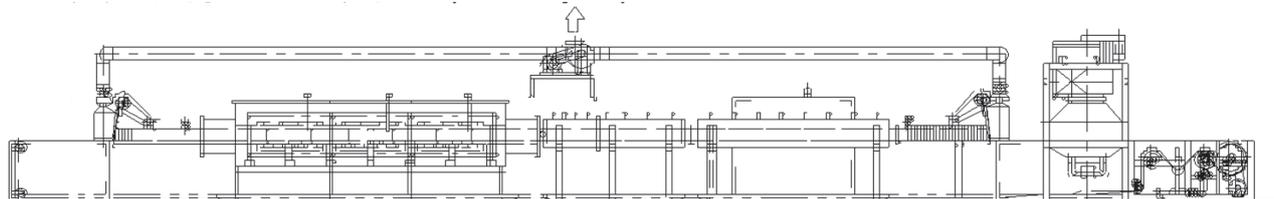
## 参考文献

- 1) 神田輝一, 小西英一郎: 新型ロウ付炉によるアルミの高速ロウ付技術の開発, 軽金属溶接構造協会, 42, 9, (2004), 440-445 (軽金属溶接)
- 2) 神田輝一, 橋本 巨: 高温連続無酸化雰囲気炉の開発と接合新技术への応用, 日本機械学会論文集, 72, 719, C 編 (2006), 318-325
- 3) 神田輝一: 連続無酸化雰囲気炉によるチタンのろう付け, チタン協会, 152, 2 (2011), 34-41 (チタン)

### 金属マッフルタイプ (1979年~)



### グラファイトマッフルタイプ (2000年~)



### ローラハースタイプ (2008年~)

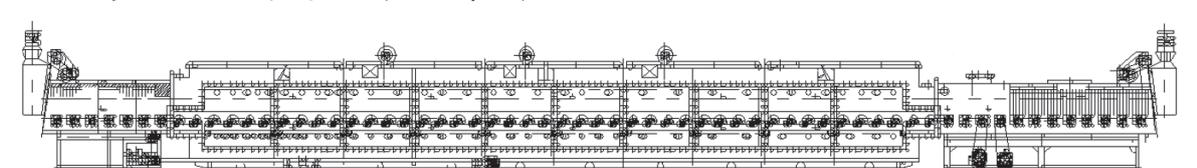


図 16 弊社における 3 種類のアルミロウ付炉外観図