

鉛フリー対応のリフロー装置

Reflow Oven for Lead-Free Process

中尾 剛介 *
Kosuke Nakao

平泉 敦嗣 * 2
Atsushi Hiraizumi

岩崎 悦子 *
Etsuko Iwasaki

概要 地球環境保全の観点から電子部品の鉛フリープロセスの採用は避けて通れない道である。当社はリフロー装置メーカーとして現時点で最も実用性のある錫 - 銀系はんだに対応すべくリフロー装置の開発を行った。錫 - 銀系はんだは従来の錫 - 鉛共晶はんだに対して液相温度が30 程度上昇する。はんだ付け温度としては最低でも230 が必要である。最も熱容量の大きい部品の接合部をその温度まで上げてしまうと熱容量が小さい部品の耐熱性が大きな問題となってくる。リフロー装置としてはいかに部品接合部間温度差を小さくできるかという点が命題となる。また、その他にもベアボード温度分布、温度プロファイル再現性、濡れ時間確保といった項目に着目し開発を行い、良好な成果を得た。特に部品接合部間温度差については従来の1/3程度にまで縮小可能となった。

1. はじめに

20世紀、人類はものすごい勢いで地球を汚してきた。工場廃液、生活排水による河川の汚染、90年代にクローズアップされたフロンによるオゾン層破壊、工場、自動車からの排出ガスによる酸性雨、地球温暖化といった環境問題にいち早く手を打たなければ、安心して住める地球を子孫に残してやれないことになる。

エレクトロニクスの分野に目を向けると、電子機器のライフサイクルが極端に短くなってきている。コンピューター、携帯電話に代表されるように次々と高機能な商品が安い値段で提供され、一般消費者は便利さを追求し買換えに走ってしまう。買換えられて古い商品はいとも簡単に廃棄されてしまう。一方、工場、自動車からの排気ガスに含まれる亜硫酸ガス等が雨にとけ込み、酸性雨となって地上に降り注ぐ。樹木の立ち枯れはこれが原因となっていることが多い。更には、酸性の雨は金属をも溶かしてしまう。電子部品の接合に使用されている鉛は酸性雨により溶出し、地下水となり、それを汲み上げ飲んでしまうことによりどんどん人体に蓄積する。図1に鉛イオンの血中濃度と知能指数の関係を示す。エレクトロニクス商品の生産者側の責任として、このような鉛が人体へ及ぼす悪影響を減じるため、鉛を使わない接合プロセスの研究を積極的に開始したのは90年代の後半からである。

鉛フリー接合プロセスでは当初、錫 - 銀系の鉛フリーはんだと錫 - 亜鉛系の鉛フリーはんだが候補となった。ところが錫 - 亜鉛系の鉛フリーはんだは接合部の信頼性に対する実績がない

うえ、亜鉛が非常に卑な金属で、酸化の問題がありごく一部のメーカーで検討が進められている程度である。

今回開発した鉛フリー対応リフロー装置は、特に錫 - 銀系の鉛フリーはんだをターゲットとした。

2. 開発のコンセプト

鉛フリーはんだに対応すべくリフロー装置の重要な要求特性を下記に示す。

(1) ベアボード上温度分布が均一であること

一般的には温度プロファイル測定を行うとき熱容量の大きい部品の接合部と小さい部品の接合部温度（通常基板温度で代表する）を測定し、中間サイズの部品についてはそれらのデータから推測することができる。ところがベアボードの温度分布が大きいと予想もしない場所の温度が高かったり低かったりし、非常に使いにくい炉となってしまう。

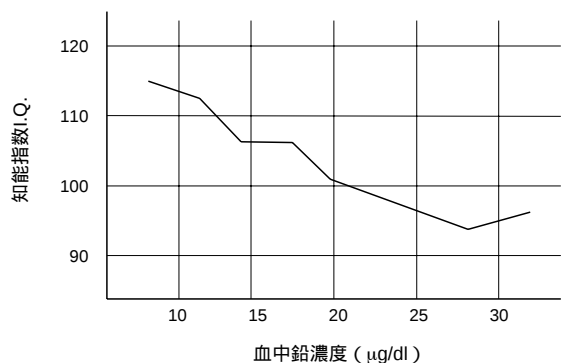


図1 血中鉛濃度と知能指数 (7歳)
Density of Pb and I.Q. in 7years old child's blood¹⁾
(David Research Center in USA)

* エレクトロニクスコンポーネント事業部 産業機器部 技術開発課

*2 設備部 生産システム開発センター プロセス開発部

(2) ΔT (基板上の部品接合部間温度差) が小さいこと

錫 - 鉛共晶はんだのリフローではプリント基板上の最も小さい部品の上限温度を240 程度とし、最も大きい部品の接合温度を210 としても十分はんだ付けが可能であった ($\Delta T = 30$)。錫 - 銀系の鉛フリーはんだに対応するためには、最も小さい部品の最高温度を錫 - 鉛共晶はんだ並の240 に抑え、熱容量の大きい部品接合部の温度を230 程度まで引き上げることが必要となる ($\Delta T = 10$)。したがって炉自体の加熱能力をあげる必要はなく、いかに大きい部品の接合部温度を引き上げるかが命題となる。

(3) 温度プロファイルの再現性が良いこと

錫 - 鉛共晶はんだではその融点に対して30 程度の余裕度を持てたが、錫 - 銀系のはんだではせいぜい10 ~ 15 しか無い。ここで重要となるのは温度プロファイルの再現性である。プリント基板は条件出しを行うときのように1枚単体で常時生産されるわけではない。連続的でしかも投入間隔もまちまちである。このような生産条件において、条件出しで得られた温度プロファイルと同等の温度プロファイルが得られなければ炉としては全く使いものにならない。

外気温度変動に対しても同様である。外気温度につられて温度プロファイルが変動するようであれば、段取りを行うごとに温度プロファイル確認を行わなければならない。

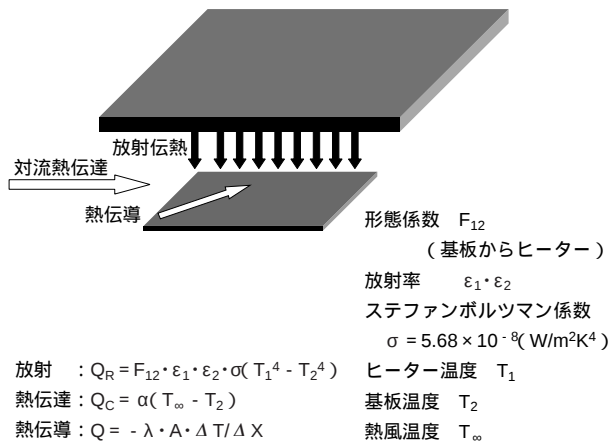


図2 炉内熱移動²⁾
Thermal transfer in reflow oven

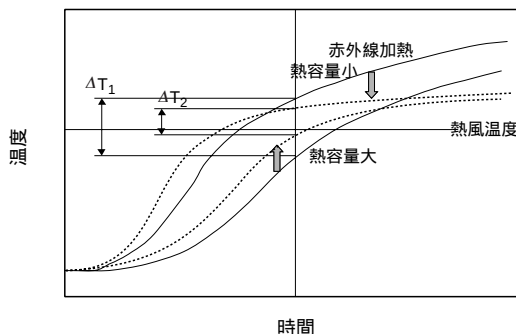


図3 赤外線+熱風加熱による均熱効果
Thermal transfer in reflow oven

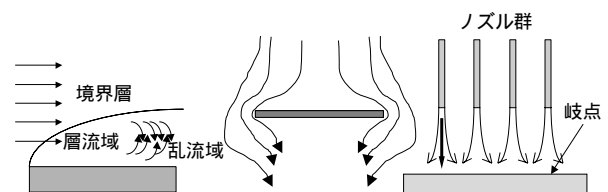
(4) 濡れ時間の確保

熱の移動には被加熱物の熱容量と熱抵抗を考えなければならない。特にBGAのようなパッケージではいったんパッケージ、プリント基板が加熱された後に熱伝導により接合部が加熱されることとなる。この温度上昇特性に時間のパラメータが大きく利いてくる。例えばパッケージ表面に230 の強烈な熱風を吹き付けたとしても内部接合部は瞬間に温度が上がることなく時間とともに上昇していく。したがって、リフローゾーンにはピーク温度を維持しながら内部接合部温度上昇を待つ機能を設けることが有効である。

3. 加熱方式の検討

3.1 伝熱のメカニズム

プリント基板をリフロー装置ではんだ付けする場合の熱移動を図2に示す。熱の移動には放射、対流、伝導の3種類がある。その内装置側で加熱エネルギーの制御可能なものは放射伝熱量と対流熱伝達量である。図4に遠赤外線加熱による伝熱量を示したが、これを見ても分かるように遠赤外線の加熱エネルギーは熱風に比べはるかに大きい。サラマンダー[®]では高密度、大熱容量の基板のリフローを想定しているため主加熱源として遠赤外線を用い補助加熱源として熱風を用いている。しかしながら、遠赤外線のみで加熱すると熱容量の小さい部品接合部と大きい部品接合部の温度差が大きくなってしまふ(図3の ΔT_1)。ここで両者の中間温度の熱風を吹き付ける。そうすると温度が上がっている熱容量が小さい部品に対して熱風は冷却作用として働き、逆に温度が上がりにくい熱容量の大きい部品に対してその熱風は加熱作用として働く。その結果、両者の温度差は小さくなり ΔT_2 となる。この概念がサラマンダーの加熱理論の根底にある。この効果を達成するには加熱源の温度をおのの独立で制御する必要があることは言うまでもない。さらにこの熱風の均熱効果を高めるには図2の対流熱伝達の式における α (熱伝達率) を高めればよい。 α は被加熱物への風の当たり方、風速により変化する。単純には風速を増せば良いと考えるが、増しすぎるとプリント基板上の部品の位置ずれが発生することとなる。通常、表面実装部品の位置ずれを防ぐには4 ~ 5 m/s以下の風速に抑える必要がある。したがって本開発では風速の増加を前提に考えず、風の吹き付け方を検討していくこととした。図4に風の吹き付け方と熱伝達量の関係を示す。従来装置は基板中央部で衝突噴流、基板端部では平行流となっていた。本図よりノズルを多数配置した衝突噴流方式を採用すれば熱伝達量の増加が期待できることが分かる。



	平行流	垂直流	衝突噴流 (岐点)
熱伝達量 (W/m ²) $T_2 = 200, T_\infty = 250$	1560	2175	6500

図4 熱風の吹き付け方と熱伝達量 (風速5 m/s)
Thermal transfer rate and air flow direction for P.C.B.

3.2 加熱構造の検証

写真1に今回開発した衝突噴流ノズル付きパネルヒーターの外観を示す。このユニットを用い加熱構造の検証を行った。図5に α （熱伝達率）の改善結果を示す。同一風速で比較すると衝突噴流（新方式）方式では約1.4倍の熱伝達率となっている。



写真1 衝突噴流ノズル外観
Appearance of new nozzles

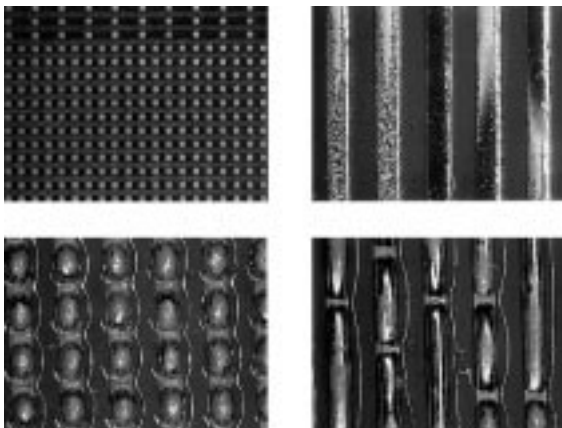


写真2 Sn - Ag - Cuはんだの濡れ性
Wettability of lead-free solder

一見、増加率が小さいようにも思えるが衝突噴流ではノズル直下（岐点）の熱伝達が非常に大きく、その周辺では大きく低下するため平均すれば妥当な値と考えられる。また、このユニットを用い実際基板上に搭載されるQFP 144Pの加熱特性を評価した。図6に結果を示す。本実験は一定時間中（70秒）で接合部が約100℃となるように加熱条件設定を行っている。図6の左から遠赤外線加熱，熱風加熱，両者の併用加熱方式での結果を示す。また，上段は従来の加熱システムによるデータであり，下段が今回開発したユニットによるデータである。明らかに新方式では熱風の加熱能力が向上し基板（熱容量が最も小さい部品温度を代表する）と部品の接合部温度差が著しく縮小している。遠赤外線加熱と併用した場合は更に両者の温度差は小さくなっている。

3.3 不活性雰囲気中でのリフローの有効性

写真2に錫-鉛共晶はんだと錫-銀-銅の鉛フリーはんだのリフロー状態を示す。鉛フリーはんだは錫-鉛共晶はんだに比べ極端に濡れ性が悪くなる。これは溶融時のはんだの表面張力が鉛フリーはんだのほうが大きいためである。窒素雰囲気中でリフローすると若干の濡れ性の改善が認められる。多くのアセンブリーメーカーは外観検査機を導入して検査の自動化を図っ

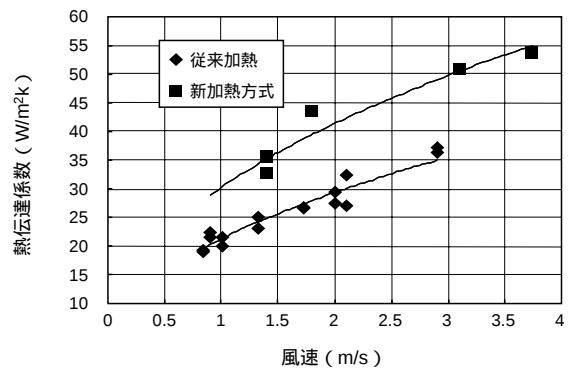


図5 従来方式和新方式の熱伝達係数
Thermal coefficients of conventional heating system and new system

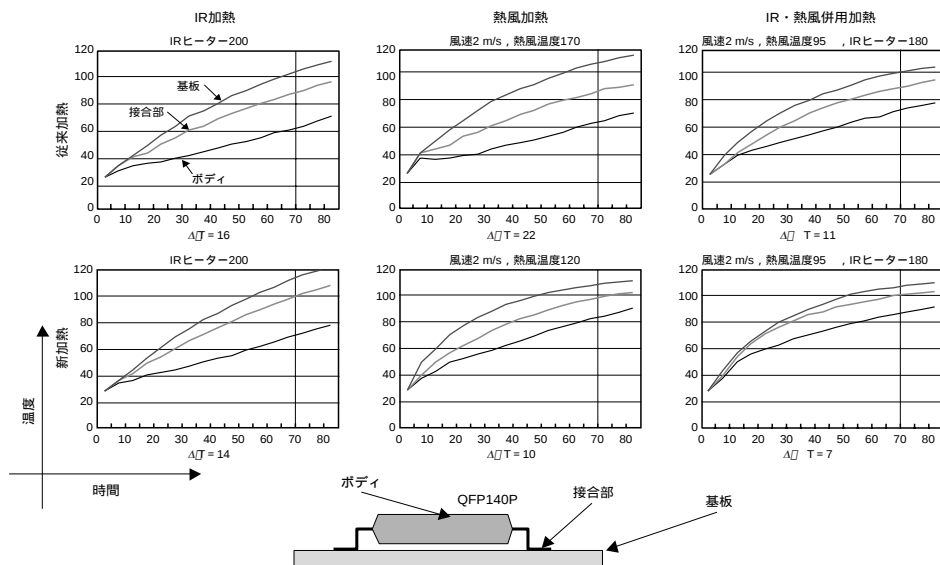


図6 従来方式和新方式による ΔT （接合部，基板間温度差）の相違
Temperature differences between of conventional heating system and new system

ている。検査機では電子部品のリード（接合部）先端のフィレット形状を検査しているため、濡れ性が悪くフィレットがきちんと形成されていなければ不良と判定されることが多くなっていくことが予想される。窒素ガス雰囲気中でリフローすることにより検査機による誤判別の頻度が下げられる可能性をこのデータは示唆している。また、両面リフロー基板の第2面をリフローする場合、1回目のリフロー時の酸化が抑えられはんだ付け品質の向上に大きな効果が期待できる。

4. サラマンダー® XN IIIシリーズ

前述した新しい加熱方式を組み込んでサラマンダー XN III（鉛フリー対応窒素ガスリフロー炉）を商品化した。写真3に XN III - 525PZの外観を示す。また、図7に XN III - 525及び XN III - 725の加熱ゾーンの構成を示す。プリント基板を急速に加熱するゾーンには遠赤外線と熱風を併用し、温度を維持するゾーンは熱風加熱方式とした。525の加熱ゾーンは5ゾーン目が450 mmでその他は600 mmの長さとなっている。725はすべてのゾーンが450 mmとなっている。725は温度プロファイルの多様性を考慮して開発した。ゾーン数が多い分様々な温度プロファイル形状を形成することができる。

4.1 特徴

サラマンダー XN IIIの特徴を下記に紹介する。

- (1) 衝突噴流による熱風加熱方式により部品間温度差を小さくできる。

図8に当社従来機と XN IIIの基板と部品（45 mm角 BGA）間

温度差の比較を示す。このように従来装置の1/3の温度差に縮小することに成功した。

- (2) 遠赤外線及び熱風の加熱エネルギーを独立して制御

XN IIIにおいてもサラマンダー XN と同等の温度プロファイルの再現性を確保できた。これは遠赤外線、熱風の熱源の制御を正確に行っているためだと考えられる。プリント基板を単独で流した場合と、連続で流した場合の温度差変化を図9に示す。また、外気温度が変動した場合の温度プロファイル変化を図10に示す。このように基板の投入条件、外部条件が変動した場合の炉の安定性が非常に優れている。また、加熱エネルギー配分を任意に変更することにより基板及び搭載された部品の熱特性に合わせた最適条件の設定が可能となる。

- (3) 同一機種間では同一設定値に対する温度プロファイル差が小さい。

これは多数生産ラインを保有しているユーザーにとって大変便利な特徴である。1台の装置を使用して条件を決定すれば、その他の装置では同一条件で使用できるため条件設定にかかる手間を大幅に削減できる。この特性も遠赤外線と熱風の制御を正確に行っているからこそ得られる特性と考えられる。

- (4) ベアード温度分布に優れる。

基板上の温度分布を図11に示す。ノズルから噴出される風速分布を均一化したため温度分布はレンジで5℃以下に収まっている。

- (5) 台形状の温度プロファイルの形成が可能

BGAのような部品内部に接合部を有したパッケージは放射、

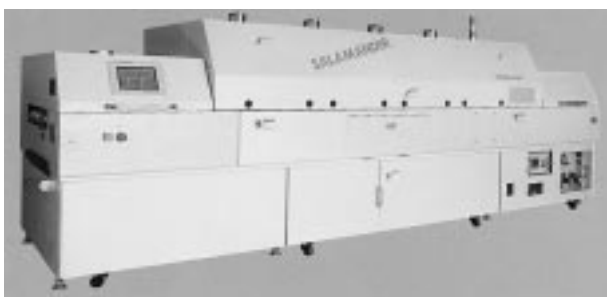


写真3 XN III - 525PZ外観
Appearance of XN III-525PZ

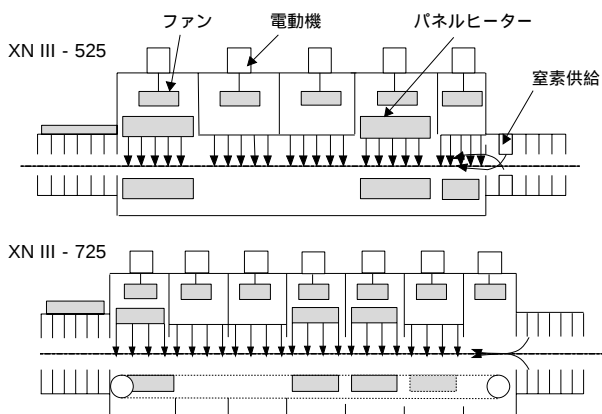


図7 XN III - 525とXN III - 725の加熱ゾーン構成
Heating zone structure of XN III-525 and XN III-725

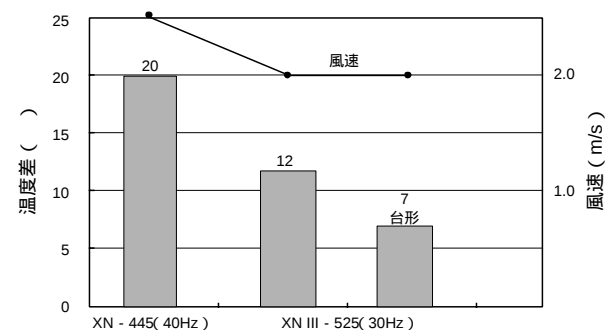


図8 45□ BGA中心を235℃とした場合の基板間温度差
Temperature difference between BGA (45 mm □) and PCB

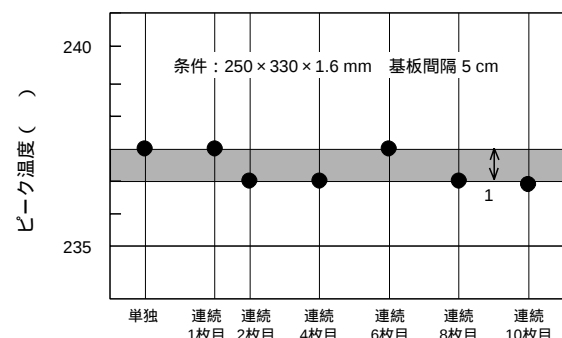


図9 連続基板投入時のプロファイル安定性（基板温度）
Stability of temperature profile during continuous production

対流の熱エネルギーを直接接合部に供給することができない。このようなパッケージをリフローはんだ付けするにはパッケージ若しくは基板を加熱し、それからの熱伝導によって加熱することとなる。ところがパッケージは熱容量、熱抵抗を有するため与えた熱量が瞬時に接合部に伝わることはなく時間とともに上昇していく。図12に通常の山形形状の温度プロファイルと台形形状の温度プロファイルを示す。台形状の温度プロファイルの平坦部分ではBGA内部の温度が次第に基板温度に近づいていく様子が分かる。当然、この平坦部分の長さが長いほど両者の温度差は小さくなる。したがって、台形温度プロファイルでは熱容量の小さな部品の温度上昇を抑えながら熱容量の大きな部品の最高温度を持ち上げること（ ΔT の縮小）、鉛フリーはんだで要求される液相温度220 以上の保持時間の確保の両方が可能である。

（6）フラックス回収装置

図13にフラックス回収機構と省エネシステムの構成を示す。循環雰囲気中に含まれるフラックスのヒュームは炉内の温度の低い（凝固点以下）場所に付着する。これが機構部等に付着することにより動作不良を引き起こす原因となるため定期的な清掃を強いられる。本システムは雰囲気中のヒュームをいったんバイパスダクトに引き込み、冷却されたダクトの壁面に凝縮させる。凝縮量が多くなるとダクト壁面を伝って回収容器内にたまる。このシステムによりフラックスの清掃頻度を著しく低減できる。

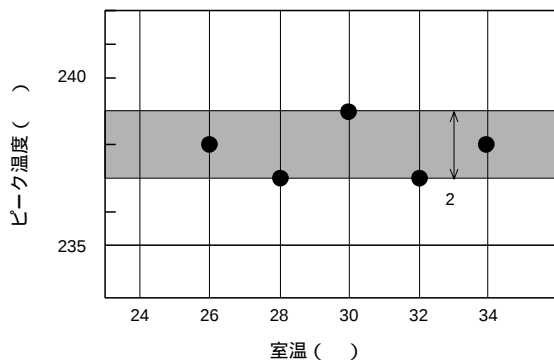


図10 外気温度変動時のプロファイル安定性（基板温度）
Relationship between temperature profile and room temperature

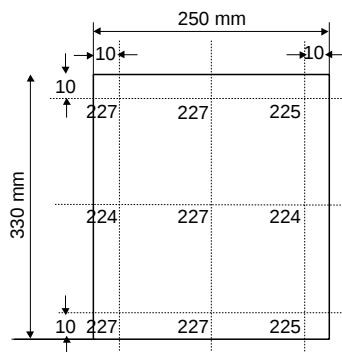


図11 基板上温度分布（単位 °C）
Temperature distribution on bare PCB

（7）省エネ

装置の消費電力を抑えるシステムである。（図13）サラマnderは前述したように遠赤外線と熱風を独立で制御しているため、相互の熱干渉を避けることができない。従来装置では積極的に炉壁から放熱させ、熱風の温度制御が不能となる問題を回避してきた。ところが温度設定条件によっては放熱させなくても熱干渉が問題とならない領域があることが分かった。本システムは炉壁の外側を断熱板で囲い、熱干渉が問題とならない領域においては放熱を抑え、熱風温度の制御が不能となった場合、炉壁、断熱板間に送風し放熱を促進させ極力無駄なエネルギーの放出を抑えている。

（8）低窒素消費量

サラマnderでは炉内の酸素濃度制御を窒素ガス流量によって制御する。したがって高酸素濃度で使用する場合は供給窒素の削減が可能となりランニングコストが低くなる。ところが供

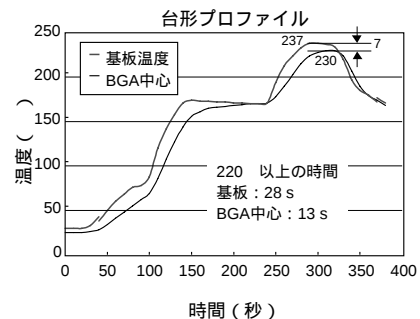
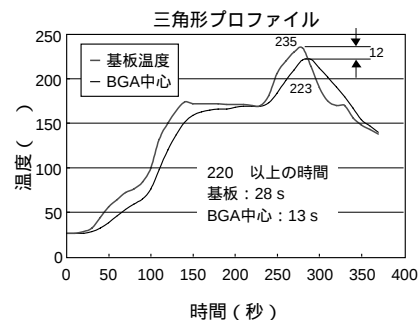
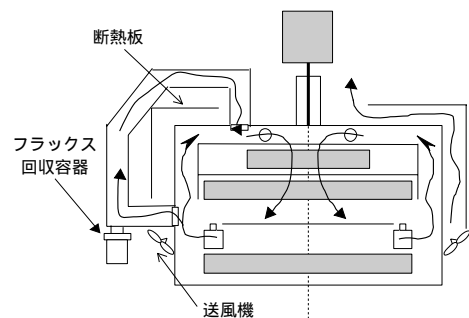


図12 三角形プロファイルと台形プロファイル
Triangular profile and trapezoidal profile



・通常は断熱板により炉体を保温することにより省エネを図る
・熱風温度制御が困難になった場合送風機により放熱させる

図13 フラックス回収システムと省エネ機構
Flux collection and low emission structure

表1 代表機種仕様
Specifications of typical model

	XN III - 525PZ	XN III - 725PC
寸法 (mm) (長×幅×高)	4750×1200×1500	5150×1200×1500
質量 (kg)	1200	1400
基板寸法	250×330 mm	
許容部品高さ	上13 mm / 下13 mm (指定可能)	
ゾーン数	5ゾーン	7ゾーン
制御方法	PLC + タッチパネル	PLC + パソコン
生産条件記憶	50パターン	HDD容量の範囲内
通信回線	RS - 232C	イーサネット
窒素供給量と 酸素濃度	300 ppm/200 (l/min)	
電気容量	40 kVA	47 kVA

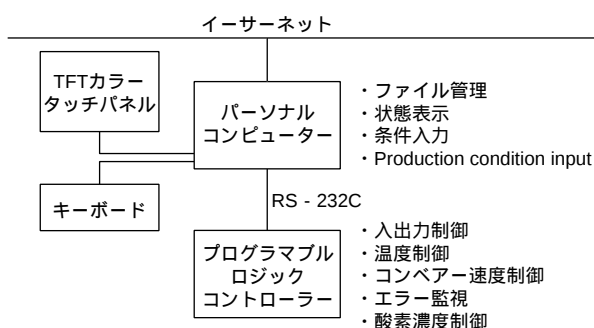


図14 C型リフロー炉システム構成図
System configuration of C model

給量を絞りすぎると炉内の静圧が低くなり外乱に対して酸素濃度が変動しやすくなってしまいます。今回、炉内酸素濃度の安定限界の窒素供給量を自動調節する機能を内蔵した。これにより、各生産条件における最適窒素流量制御が可能となった。

4.2 仕様

表1にXN III - 525PZとXN III - 725PCの装置仕様を示す。725PCは制御系にパーソナルコンピュータを搭載、OSにWindowsNTを使用しておりネットワーク環境にも容易に対応できる。

4.3 Cタイプ制御システム構成

図14にCタイプコントローラーのシステム構成を示す。パーソナルコンピュータ（PC）は生産条件管理、データ入力、現在値表示等を行う。表示はTFTカラー液晶表示（タッチパネル付き）を使用しており、装置の状態がビジュアルに把握できる。装置を運転するためのデータはプログラマブルロジックコントローラー（PLC）に転送され、PLCが常時装置を制御するようになっている。PCは一般的なDOS/V機を用いており、万が一故障したとしてもノートパソコンで簡単に代用できる特徴がある。また、ネットワークに簡単に接続できるため、ソフトウェアのバージョンアップもインターネット回線を用い迅速に行うことができる。近い将来、装置の故障診断等もこのネットワーク機能を用いオンラインで実行することも検討中である。

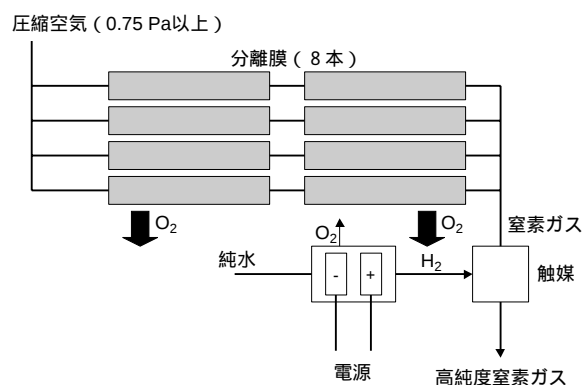


図15 窒素ガス発生装置システム構成
System configuration of nitrogen generator

4.4 窒素発生装置

窒素雰囲気形成するには窒素の発生源が必要である。一般的には液体窒素のタンク（CE）を用意すればいいが、液体窒素供給の安定したインフラが整っていない地域や、タンクの据付けができないユーザーに対して窒素ガス発生装置内蔵型のリフロー装置を提案している。図15にシステム構成図を示す。窒素分離膜に圧縮エアーを供給すると、空気中の酸素、窒素ガス等の膜を透過する速度差を利用して窒素ガスを分離する。分離膜出口において約1000 ppmの酸素濃度の窒素ガスを得ることができる。このガスをリフロー装置内に供給すれば窒素ガス雰囲気炉として使用が可能となるが、更に低酸素濃度の雰囲気が必要な場合、分離膜で得られた若干の酸素を含む窒素ガスに電気分解で得られた水素を触媒燃焼させ高純度窒素ガスを供給することができる。本システムはリフロー装置に内蔵され装置移設の簡便さから、ユーザーから大変好評を頂いている。

5. おわりに

鉛フリーはんだによる部品実装は今年から大きく拡大すると考えられるが、クリームはんだ材料、電子部品の耐熱性等未確定な要素が多い。例えば、台形温度プロファイルは部品の最高温度を抑えるには非常に有効な手段ではあるが、一定温度以上の時間が長くなってしまい電解コンデンサーの容量変化が懸念されている。プロセスの最適化は単に装置メーカーだけでは到底達成できるものではなく、電子部品メーカー、材料メーカー、アSEMBリーメーカーがタイアップして推進していくことが重要である。当社は装置メーカーとしてNEDOの鉛フリーはんだプロジェクトに参加し鉛フリーはんだの実用化に向け情報の提供と入手を行ってきた。今後も単なる装置メーカーとしてではなくプロセス全般に関してユーザーへの協力を行っていきたい。最後に本開発に関して多大なる協力を頂いた平塚事業所計画課の皆様に謝辞を述べたい。

参考文献

- 1) 浅野省三：鉛レスはんだの背景と開発の現状，COX超高密度実装技術フォーラム'94，サイエンスフォーラム
- 2) 伝熱工学資料