

論文 Article

ラジエタ NB ロウ付け炉における酸素濃度低減に関する研究

原稿受付 2012 年 3 月 31 日

ものづくり大学紀要 第 3 号 (2012) 31~37

香村 誠^{*1}, 吉川 徹^{*2}, 松本光太郎^{*3}^{*1} ものづくり大学 技能工芸学部 製造学科^{*2} カルソニックカンセイ(株)^{*3} (株)荏原エリオット

Decrease of Oxygen Concentration in Nocolok Flux Brazing Furnace for Aluminum Heat Exchanger

Makoto KOMURA^{*1}, Toru YOSHIKAWA^{*2}, and Kotaro MATSUMOTO^{*3}^{*1} Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists^{*2} Calsonic Kansei Corporation^{*3} Elliott Ebara Turbomachinery Corporation

Abstract

In the process of manufacturing aluminum heat exchangers, they usually are brazed in the furnace filled with nitrogen below 20 ppm oxygen concentration. This paper proposes a new method to make the environment above.

Firstly, the chamber (as a model of the furnace) is evacuated to a certain pressure. Secondly, it is filled with nitrogen gas. And then, it is evacuated again to 20 ppm. This method reduces both the amount of nitrogen gas consumption and the time until the oxygen concentration falls enough. Furthermore, this time is found to be the shortest when the initial degree of vacuum p_1 is the same as the secondary p_2 .

Key Words: Nocolok Brazing Furnace, Oxygen Concentration, Vacuum Suction, Energy Saving, Environmental Benign Manufacturing

1. はじめに

自動車アルミニウム製ラジエタの製造工程では、フィンとチューブの接合部にロウ付けを施すことが伝熱性能や耐腐食性の観点より有利である。無数に存在する接合箇所のロウ付けは同時に行う必要があるため、接合部には予めロウ材を配置して熱した炉の中に投入し、短時間の中に熔融させる方法が採用されている¹⁾。この際にはロウ付け部が炉内で再酸化されることを防ぐことがきわめて重要となる。この再酸化防止を、フラックスの塗布および雰囲気窒素ガス置換による酸素濃度低減(20 ppm 以下)によって実現する手法をNBロウ付け法、用いられる炉をNB炉(Nocolok brazing

furnace) と呼ぶ¹⁾。

NBロウ付け法はそれまで主流であったVBロウ付け法(真空中でロウ付けを行う方法)に比べて炉が安価であること、管理・メンテナンスも容易であることから多くの熱交換機メーカーで採用されてきた²⁾。しかし、運転時以外は空気で満たされているNB炉内雰囲気を窒素ガスによって置換するためには、通常膨大な量の窒素ガスが十分な時間をかけて炉内に導入されなければならない。空気を窒素で希釈するこの方法では、消費される窒素ガス量と酸素濃度低下までに要する時間など、まだムダが多いと言わざるを得ない。

本研究ではこの従来式の窒素置換法を改良するために、窒素置換専用の前室を設けて以下に記す

手法で窒素置換を行い、その後NB炉内に投入する方法を提案する。その手法とは、窒素ガス噴入前に前室を一旦真空状態にした後に窒素を噴入するものである。ただし、要求される低酸素濃度を真空排気のみによって実現することは、ある程度の真空度と相応の時間、そしてVB炉に匹敵する頑強な設備を必要とする。そこで本研究ではこの作業を2回に分けて行う新しい方法³⁾(真空2回排気法)を採用することにした。まず前室内を比較的低い真空度の状態まで排気する(短時間で完了)。そしてその後窒素ガス噴入によって前室内を大気圧近くまで復圧し(噴入窒素量は炉容積程度)、再度排気を行う。ここに至っては、前室内はすでに窒素ガスによって希釈されているので、やはり比較的に低い真空度までの排気でも容易に20 ppm以下の酸素濃度に到達可能である。2回目の排気の後さらに窒素ガスを噴入し再び大気圧に戻せばロウ付けのための準備は完了である。

この方法によれば真空排気の際の前室内圧力低下は1,000 Pa程度までであり、なおかつ直後には窒素によって大気圧まで復圧されるため低圧に晒される時間はきわめて短い。さらに前室は炉に比して小型に建造可能なため、VB炉のような高価な設備を用意する必要はない。

本稿では上述の真空2回排気法によって酸素濃度20 ppmに到達する時間を大幅に短縮できること、そして従来のNB炉に比して窒素使用量も劇的に削減できることを模型実験の結果に基づいて報告する。さらに、この到達時間を最小にする条件についても考察を加える。

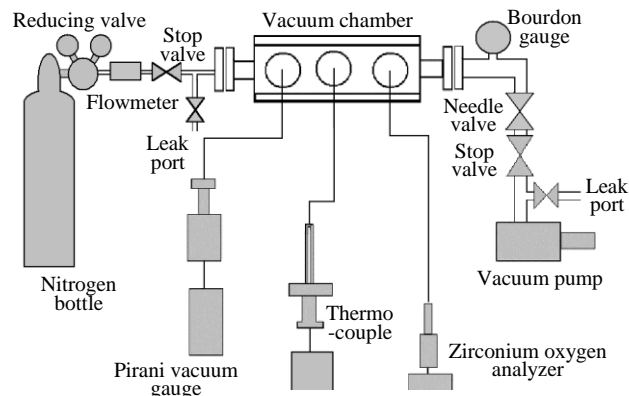


Fig.1 Schematic diagram

下 到達時間 t_a を決定する要因として排気速度をあげることもできる。しかしこの値はチャンバ内圧力によって変化するのでここではバルブ開度を採用することにした。

2. 実験装置

本実験で用いた装置の概要を図1に示す。NB炉前室に見立てた実験用真空チャンバ (Vacuum chamber) には真空ポンプ (Vacuum pump) が圧力計、排気速度調整バルブ (Super needle valve)、開閉バルブおよびリークバルブを介して、そして窒素ボンベ (Nitrogen bottle) がリークバルブ、開閉バルブ、流量計および圧力調整器を介して接続されている。主要な装置の写真を図2に示した。ステンレス製真空チャンバ (外形 $220^\phi \times 146$, 内容積 4.0 l) は念のために絶対真空にまで耐えられる構造とし、側面の各ポートからは、酸素濃度計 (Zirconium oxygen analyzer)、真空計 (Pirani vacuum gauge)、そして温度測定用のK熱電対が挿入されている。

3. 排気速度調整バルブ開度の決定

実験に臨んでは、密閉された真空チャンバを用意した真空ポンプで排気する。これに要する時間、すなわち酸素濃度が20 ppmに到達する時間(以降:到達時間 t_a)は排気速度調整バルブの開度[†]によって如何様にも変化する。本実験は諸々の条



Fig.2 Experimental apparatus

件により到達時間 t_a の変化を調べることが目的の一つであるため、この排気速度調整バルブの開度を適切に選び、かつ各実験の度に一定に保つことがきわめて重要となる。

到達時間 t_a はバルブを開けてより速く排気するほど短くなるが、極端に t_a を短くすれば諸々の現象が一瞬のうちに進行し終わることになるため、実験の再現性は損なわれやすく、測定・観察する立場からも不利益を生じやすい。ところが、以下に記す壁面放散の影響を考慮する一方では、できるだけ短時間に実験を終えてその影響を小さく抑えることが望ましい。中庸を探るべく、実験に先立ってこの排気速度調整バルブの開度を決定するための予備実験を行った。

3.1 窒素ガス連続噴入

カルソニックカンセイ社実績では、たとえば容積 3.9 m^3 のNB炉内酸素濃度を 20 ppm にまで下げるために、流量 $70 \text{ m}^3/\text{h}$ の窒素を 25 分間噴入し続ける[†] (合計で炉容積の 7 倍強の約 29 m^3 の窒素量を費やす) 必要がある。本研究で提案する方法によって到達時間がどの程度短縮されるかを調べるためにも、バルブの開度を決定する際にまずこの数値を参考にしようと考えた。つまり、実際のNB炉容積に対する窒素噴入量と同じ割合で実験用真空チャンバにも窒素を噴入し、 20 ppm 到達時間 t_a を計測する。そして、真空 (1 回) 排気による 20 ppm 到達時間が概ねこの t_a と等しくなるような排気速度調整バルブ開度を用いるという考え方[‡] である。

実験で使用した真空チャンバの内容積は 4.0 l であるので、上に記した割合で窒素噴入量を定め

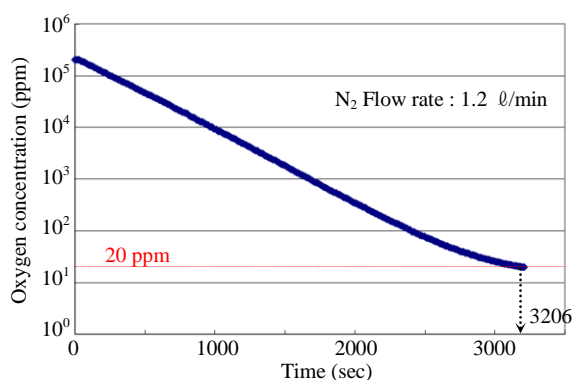


Fig.3 Continuous nitrogen blowing

[†] これは連続運転時の数値である。炉内部が完全に空気で満たされている立ち上げ時にはこの限りではない。

れば 1.2 l/min である。この流量で窒素を噴入した場合の酸素濃度の時間変化を図3に示した。酸素濃度は最終的に 20 ppm を下回ってはいるが、時間 $t_a = 3,206 \text{ sec}$ (約 53 min) を要し、窒素の総使用量もチャンバ容積の 7 倍を大きく超えて 15.5 倍となった。

この類の気体の置換時間は、一般に噴出し口の位置や内部の形状に大きく影響を受けるものと考えられる。本模型実験では実際の炉とは幾何的な相似はもちろん、排気の際のレイノルズ数なども異なるため物理的な相似も成立していない。そのためか、諸々の値は実際とはかなり異なる結果となった。結局、 $t_a = 3,206 \text{ sec}$ は物理的な根拠に乏しく、さらに次に記す壁面放散の影響下に入ってしまうなどの理由からこの到達時間を与えるバルブ開度は採用しないことにした。

3.2 圧力上昇法

真空装置には必ず漏れがあると考えて差し支えない⁴⁾。また、真空に晒された容器内側の壁面からは少なからず壁面放散(物理的・化学的に吸着していた気体分子が放出されること)が起こる⁵⁾。これらの現象はともにチャンバ内の圧力と酸素濃度を上昇させる要因であり、時間の経過とともに影響力を増す。そこで影響が顕著になる前に、可能な限り速やかに測定・観察を終わらせることが望ましい。この目的のために、本実験設備における漏れおよび壁面放散量の振る舞いを予め調べておくことにした。

圧力上昇法⁵⁾はこのことを調べる方法の一つで、本実験ではチャンバ内をある程度まで一旦真空排気し、ポンプ停止後の圧力の回復を時間とともに計測した。漏れや壁面放散がない理想的な場合に

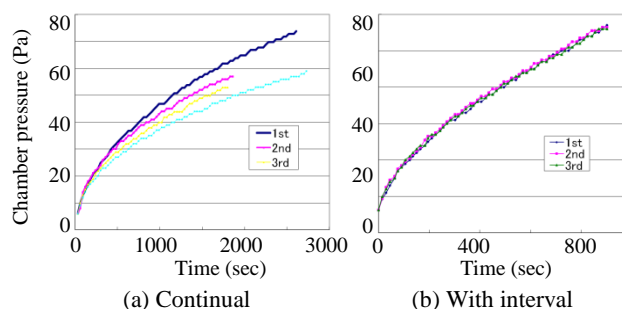


Fig.4 Build up test

は圧力は一切回復（上昇）しないことになる。図 4 にこの様子を示した。

図 4(a)は圧力上昇法を連続して行った場合の様子である。実験の回数を追う毎にグラフが横にズレて傾く様子が分かる。これは断続的に繰り返される真空排気によってチャンバ内壁面の水分や気体分子が徐々に取り除かれ、壁面放散量がだんだん減っていく特有の現象である。

こういう場合、特に高真空域を扱う場合には長時間の排気やベーキング⁵⁾によって壁面放散量ゼロを目指す（グラフを横に倒しきる）という立場がある。しかし、本実験の対象とする真空度は高々 10 Pa 程度と比較的に壁面放散の影響下に入りにくいいため、実験の再現性を損なわない範囲で実験時間を短く設定すればその必要はないと考えた。ただし、図 4(a)のようにグラフが大きくズレることは防がねばならない。そこで、測定の毎に大気を一定時間導入し、チャンバ内壁面に水分や気体分子が再吸着するきっかけと時間を与えることにした。先の考え方とは逆に、倒れかけたグラフをその都度持ち上げてしまうやり方である。

図 4(b)は実験と実験の間にチャンバ内を 35 min 間大気に開放した場合の図 4(a)に対応する図である。ほぼ全域に亘って曲線は重なっており、特に時刻 $t \sim 500$ sec まで誤差はほとんど認められない。

以上によって、本実験では真空（1 回）排気によって酸素濃度 20 ppm 到達時間が 500 sec 程度になるように排気速度調整バルブの開度を選ぶことにした。この開度を用い 35 min の間隔で真空（1 回）排気の実験を幾度も行うとき、到達時間のバラツキは高々 5 秒程度（1%以下）であった。

4. 真空 1 回および 2 回排気の比較実験

4.1 真空 1 回排気実験

以上によって決定された排気速度調整バルブの開度を用い、まず真空排気のみによって酸素濃度を 20 ppm まで下げる測定を行った。本稿ではこの実験を真空 1 回排気実験と呼び、このときの酸素濃度 20 ppm 到達時間を t_a^1 と記すことにする。

具体的な手順は以下の通りである。

- (A) 各計測器の電源を入れた後十分な時間が経過していることを確認する。
- (B) 全ての開閉バルブおよびリークバルブが閉じていることを確認する。
- (C) 排気速度調整バルブが設定目盛りどおりに開放されていることを確認する。
- (D) 真空ポンプ側開閉バルブを開放する。
- (E) 真空ポンプの電源を投入し、排気および計測を開始する。
- (F) 酸素濃度計が 20 ppm を示すまで計測する。
- (G) 計測終了後、真空ポンプ側開閉バルブを閉じる（ポンプ油煙のチャンバ侵入防止のため）。
- (H) 真空ポンプの電源を切る。
- (I) 十分に時間をかけながら（各計測器保護のため）窒素ボンベ側リークバルブより外気を導入し、チャンバ内を大気圧まで回復。

本実験の結果を図 5 に示す。この類の真空排気では、一般にチャンバ内圧力は時間経過に伴って

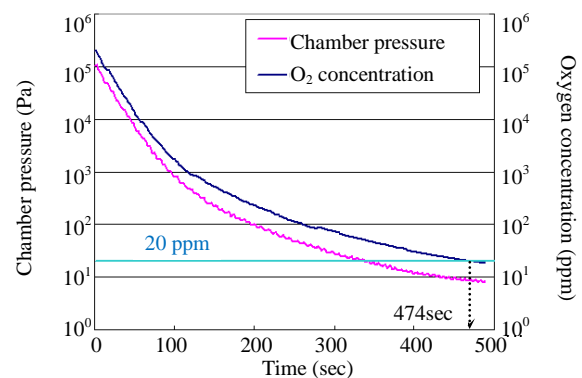


Fig.5 Chamber pressure and O₂ concentration (Vacuum suction only)

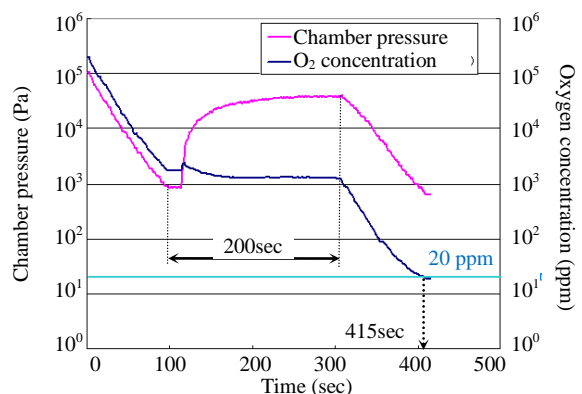


Fig.6 Chamber pressure and O₂ concentration (N₂ charged between twice vacuum suction)

指数関数的に減少する⁵⁾ことが知られており、図5にはこの様子が素直に現れていると言える。また、酸素濃度もほぼ圧力に比例し指数関数的に減少し、圧力10 Pa程度で濃度10 ppmに達している。

理想気体に関する状態方程式の成立を仮定すれば、一定容積のチャンバ内で圧力が酸素濃度に比例するのは温度が一定の場合に限られる。したがって、上の結果はチャンバ内の温度変化がほとんどないことを示唆するものである。実際、チャンバ内の温度低下は2~3°C程度と、ほとんど変化しなかった。より高真空域においても温度の変化は見られないとの報告もある⁶⁾。

なお、実験で用いた排気速度調整バルブ開度による20 ppm到達時間は、図5にも記したように実際には $t_a^1 = 474 \text{ sec}$ である。

4.2 真空2回排気実験

次に、ある程度の排気の後一旦窒素ガス充填によってチャンバ内を復圧し、再度排気を行って20 ppmを実現する場合につき、同じく時間と圧力および酸素濃度の関係を測定した。これまでも記してきたが、この実験を真空2回排気実験と呼び、このときの酸素濃度20 ppm到達時間を t_a^2 、1回目の排気で到達する圧力を初期真空度 p_1 、そして2回目の排気で到達する圧力を最終真空度 p_2 と記すことにする。

実験の手順は4.1で示した手順(E)および(F)の間に以下の(a)~(f)を加える。この間に真空ポンプは運転を停止しない。

- (a) 目標初期真空度 p_1 になったら真空ポンプ側開閉バルブを閉める。
- (b) 酸素濃度計の表示が落ち着くまで待つ。
- (c) 窒素ボンベ側開閉バルブをゆっくり開放し、窒素ガスの噴入を開始する。
- (d) ブルドン管式圧力計の読みが0.1 MPaまで回復したら窒素ボンベ側開閉バルブを閉めて復圧を終了する。
- (e) 酸素濃度計の表示が落ち着くまで待つ。
- (f) 真空ポンプ側開閉バルブを再び開放して2回目の真空排気を開始する。

真空2回排気実験の結果を図6に示した。排気速度調整バルブの開度は真空1回排気の実験と同様である。1回目の排気(ここでは $p_1 = 900 \text{ Pa}$)の後に窒素を噴入するのでチャンバ内の圧力は上昇するが、酸素濃度はほとんど横ばい状態となる。窒素による復圧後に再度排気するとき、圧力、酸素濃度ともに速い速度で減少する予想通りの現象が確認された。

窒素による復圧は図6を見ると1気圧に満たない値となっているが、これは1気圧付近では精度の悪いピラニ真空計[†]の出力値がそのまま現れているためである。実際には上の手順にも記したようにブルドン管(Bourdon gauge)によって1気圧になったことを確認している。

さて、図6によれば2回目の真空排気の際に酸素濃度が20 ppmを下回る時間は415 sec($p_2 = 682 \text{ Pa}$)と読み取ることができる。しかし、ここではピラニ真空計などを保護する理由によって、意図的に窒素噴入に十分な時間(200 sec)を費やした。もし単純にこの数字を差し引けば、真空2回排気における正味の酸素濃度20 ppm到達時間は $t_a^2 = 215 \text{ sec}$ となって t_a^1 の半分以下となったことが分かる。

窒素使用量も従来に比べれば大幅に削減されている。窒素は2回の復圧(本実験では2回目の復圧を省いている)のためだけに噴入されるため、その必要体積はチャンバ容積の2倍程度である。カルソニックカンセイ社の現状では、チャンバ7容積分の窒素が使用されているため、70%強の削減率である。

5. 最短排気時間

これまでの実験および考察によって、窒素ガスの連続噴入のみによって酸素濃度を下げる手法に比べ、真空2回排気法は到達時間および窒素使用量の双方の観点より有利であることが分かった。

ところで、真空2回排気実験における到達時間 t_a^2 は初期真空度 p_1 の関数であることは容易に想像される。そこで、次に到達時間 t_a^2 をさらに最小にする p_1 について単純な理論によって定性的に調べ、実験によって検証することにした。

[†]ピラニ真空計とは元来このような性質を持つ。本実験で使用したものの精度は、 $0.1 \sim 10^4 \text{ Pa}$ において $\pm 10\%$ 、それ以上(大気圧域を含む)では $\pm 20\%$ である。

5.1 単純理論による予測

まず、真空 2 回排気によって酸素濃度を 20 ppm に下げる場合につき、初期真空度 p_1 そして最終真空度 p_2 の間にある関係を調べる。以下の議論も含めて本稿で言及する酸素濃度 ppm とは、チャンバ内に存在する分子数の比ではなく、大気圧に対する酸素分圧の比であることを改めて指摘しておく。

真空チャンバ内の圧力は初期において大気圧 p_0 に保持されているので、排気によって温度が変化しないと仮定すれば、初期の真空排気によって酸素濃度は p_1/p_0 倍に低下する。この後に窒素ガス噴入によってチャンバ内を大気圧 p_0 に戻し再び p_2 まで排気すれば、酸素濃度はさらに p_2/p_0 倍となる。したがって大気中の酸素濃度を 20% (20×10^4 ppm) とすれば、その分圧は 2.0×10^4 Pa であるので、最終排気後に酸素分圧は

$$(2.0 \times 10^4) \times \frac{p_1 p_2}{p_0^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

まで下がることになる。酸素濃度 20 ppm とは分圧で表現すれば 2.0 Pa であるから、このとき

$$p_1 p_2 = 1.0 \times 10^6 \quad \dots\dots\dots (2)$$

が成立することになる。つまり初期真空度 p_1 と最終真空度 p_2 の積は常に式(2)の関係を満足する定数でなければならない。ただし、ここに大気圧 p_0 を 1.0×10^5 Pa とした。

次に、 t_a^2 をこれら p_1, p_2 によって表現することを考える。先にも触れたようにこの種の真空排気ではチャンバ内圧力 p は時間経過に伴って指数関数的に減少するので、これを

$$p(t) = \phi e^{-\tau t} + \chi \quad \dots\dots\dots (3)$$

$(\phi, \tau, \chi > 0)$

と記しておく。図 5 の曲線もこの表式にしたがうと言って良い。定数 ϕ, τ および χ は本来チャンバ容積、ポンプの排気速度、リークそして壁面放散などで記述される量である⁷⁾が、ここでは式(3)のように書けることが分かっているれば良い。

真空 2 回排気の際、1 回目の排気に要する時間を t_1 、復圧後 2 回目の排気に要する時間を t_2 とすれば、式(3)によって次式が成立する。

$$p_1 = \phi e^{-\tau t_1} + \chi \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$p_2 = \phi e^{-\tau t_2} + \chi$$

初期排気も最終排気も同じチャンバを同一の真空ポンプおよびバルブ開度で排気するので、式(4)の 2 式における ϕ, τ, χ は共通である。

式(4)を t_1, t_2 について解けば、

$$t_1 = -\frac{1}{\tau} \log \frac{p_1 - \chi}{\phi} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$t_2 = -\frac{1}{\tau} \log \frac{p_2 - \chi}{\phi}$$

を得る。真空 2 回排気における正味の酸素濃度 20 ppm 到達時間 t_a^2 とは $t_1 + t_2$ のことだから、この式(5)を用いれば、

$$t_a^2 = t_1 + t_2$$

$$= -\frac{1}{\tau} \left(\log \frac{p_1 - \chi}{\phi} + \log \frac{p_2 - \chi}{\phi} \right)$$

$$= -\frac{1}{\tau} \log \frac{(p_1 - \chi)(p_2 - \chi)}{\phi^2}$$

$$= -\frac{1}{\tau} \log \frac{\chi^2 - (p_1 + p_2)\chi + p_1 p_2}{\phi^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

と p_1, p_2 を用いて表現できる。

さて、式(6)に現れる積 $p_1 p_2$ は既に式(2)によって定数 ($=1.0 \times 10^6$) であることが示されている。そこで到達時間 t_a^2 は、和 $p_1 + p_2$ の値が最小のときに最短になることが結論される。

よって簡単な計算の結果、

$$p_1 = p_2 = 1.0 \times 10^3 \text{ Pa} \quad \dots\dots\dots (7)$$

と選べば良いことが理論的に予測される。

5.2 初期真空度 p_1 と到達時間 t_a^2 の関係

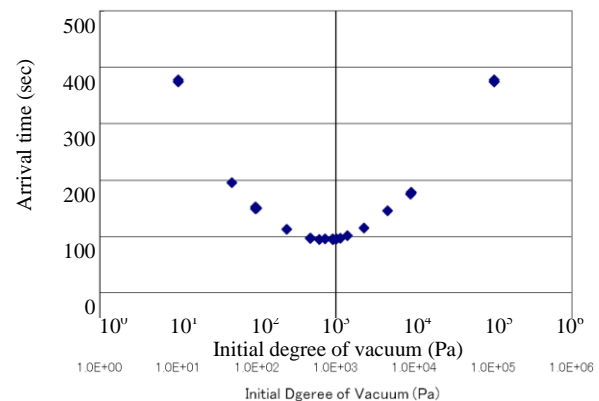


Fig.7 Effect of p_1 on arrival time; t_a^2

† あくまでも $\chi^2 - (p_1 + p_2)\chi + p_1 p_2 > 0$ の下での議論であるが、通常は $(p_1 - \chi)$ も $(p_2 - \chi)$ も常に正であるため問題ない。

以上の予測を確認するために、初期真空度 p_1 を幾通りにも変化させて到達時間 t_a^2 を調べた。ここでは t_a^2 に窒素による復圧時間は含めておらず、排気速度調整バルブの開度はもちろんこれまで同様である。

実験結果を図 7 に示す。横軸が初期真空度 p_1 であり、縦軸は到達時間 t_a^2 である。この図によれば p_1 の変化に伴って t_a^2 は大きく変化し、前節で予想したようにたしかに式(7)の近辺で最小値をとっている様子が分かる。

ただし、今回の実験における到達時間 t_a^2 の最小値は 195 sec であり、この現象は

$$p_1 = 606 \text{ Pa}$$

のときに起こった。この値 ($t_a^2 = 195 \text{ sec}$) は 1 回排気 ($t_a^1 = 474 \text{ sec}$) の約 41% に相当する。

到達時間 t_a^2 の最小値は単純理論によって予測された値と詳細な一致を見せることはなかった。この理由としては、排気の際にチャンバ内の温度がやはり多少は変化していること、真空ポンプの排気速度がチャンバ内圧力によって変化し、その結果式(3)に現れる ϕ , τ , χ が厳密な意味では定数となっていないこと、などが上げられる。

6. むすび

ラジエタ NB ロウ付け炉の酸素濃度低減に関し、窒素噴入の前後に 2 回の真空排気をとる新しい手法を提案した。模型実験を行った結果得られた知見を記す。

- (1) 今回用いたステンレス製の真空チャンバでは、排気の前後にチャンバ内の温度変化は高々 2~3°C 程度であった。
- (2) 真空 2 回排気によれば 1 回排気の場合に比

べ低真空度で酸素濃度 20 ppm を実現可能である。また、これに要する時間も最短で 40 % 程度まで短縮できる。

- (3) 従来の窒素ガス連続噴入方式に比べ、窒素消費量も 30 % 程度まで削減できる。
- (4) 真空 2 回排気時の酸素濃度 20 ppm 到達時間 t_a^2 は初期真空度 p_1 によって変化し、最小値が存在する。このことを単純理論によって予測し実験によって確認した。

本手法が実現できれば窒素ガスは炉内容積 2 倍程度を噴入すれば良いことから、投入熱量についても大幅に低減が可能となる。また、酸素濃度低減に要する時間を削減できることから生産タクト短縮にも寄与できる。そして、本手法は NB 炉に限らず、様々な不活性ガス置換による雰囲気確保に広く応用できるはずである。

最後に実験の計画当初から随時適切なアドバイスをいただいたキャノンアネルバ株式会社岡田修理学博士にこの場を借りてお礼を申し上げます。

文 献

- 1) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構, アルミ熱交換器の低温接合技術の研究開発, 2006 年 5 月, p.3, 8.
- 2) 川瀬寛, アルミニウムろう付技術の変遷, 軽金属, 48/9 (1998), pp.426-431.
- 3) 吉川・香村, 他, NBロウ付け炉の性能改善に関する研究, 機講論 4(2009 年次大会), pp.341-342.
- 4) 中山勝矢, 真空技術実務読本, オーム社(2007), p.90.
- 5) 熊谷寛夫, 他, 真空の物理と応用, 裳華房 (1970), p.117, 192, 401, 384.
- 6) J. H. Kim, et.al., Protection schemes for critical surface in vacuum environments, *J. Vac. Sci. Tech. A*, 23/5(2005), pp. 1319-1324.
- 7) 堀越源一, 真空技術(第 3 版), 東京大学出版会(1994), p.122.