アルミニウムの溶解および溶湯処理方法

On the Method of remelting and molten metal treatment of aluminum

犬丸 晋*

Susumu INUMARU*

1. はじめに

アルミニウムは軽く錆び難く美しい性質があるため車輛、建築、電気機器、化学、航空および家庭用品など広い範囲で使用されている。これらのアルミニウム製品の第1工程が溶解および溶湯処理であり、この工程の良否が製品の品質を左右するといっても過言でない。従来、ともすれば、この溶解、溶湯処理工程は高温高熱の悪環境の下での作業であり、また科学的にも未知の点が多かった。しかし、最近では、この分野の研究も進み、技術的な進歩にも著しいものがあり、比較的低コストで良品の溶湯が得られるようになった。そのおかげで、鋳物や鋳塊（熱間圧延用あるいは熱間押出用）の品質が向上した。しかしながら、昭和48年末のオイルショック以降地金、熱源、耐火材および副資材等の費用は高騰した。今後ますますこの傾向は強まるものと推察されるので、溶解部門の実務者には、省エネルギーならびに歩留向上等コストダウンの技術的な改善の努力が、より一層必要となつたといえる。

そこで、アルミニウムの溶解および溶湯処理方法について、比較的新しい現在採用されている設備ならびに技術について、溶解鋳造工場の実務者の立場で概説することとする。

2. アルミニウムの溶解

アルミニウムは非常に活性な金属であり、よく知られているように酸素と容易に反応して酸化アルミニウム（アルミナ・ Al_2O_3 ）となる。たとえば、酸化しやすさの目安として酸化物の生成自由エネルギーを第1表にあげたが、アルミニウムはマグネシウムに次ぎ、むしろ真空溶解でなければ鋳塊の出来ないチタニウムより酸化しやすい金属である。しかしながら、幸いなことに、生成したアルミナは非常に緻密で強固な保護皮膜で内部のアル

ミニウムの酸化を防いでくれるのでマグネシウムのように燃えてしまうことはない。すなわち、アルミニウムは大気溶解出来ることが、今日のアルミニウムの生産の隆盛をみたといつても過言でない。

次に、アルミニウムは比較的溶解し難い金属である。第2表に量産金属の代表である鉄、銅およびアルミニウムの溶解に関する熱的諸性質をあげた。アルミニウムの融点は 660°C と一番低いにもかかわらず、熔融潜熱および比熱が大きいため銅を溶解するより多量の熱量が必要である。なお、アルミニウムは光をよく反射する性質があり、溶解時には火源からの輻射エネルギーを吸収し難い。すなわち、輻射エネルギーを吸収する黒度は

第1表 金属酸化物の生成自由エネルギー

金属の酸化物	14°Cにおける酸化物の生成自由エネルギー (cal)	
	酸化物 1 モル当り	酸素 1 原子グラム当り
BeO	-136,100	-136,100
MgO	-136,080	-136,080
Al_2O_3	-377,300	-125,800
ZrO_2	-247,750	-123,880
TiO_2	-212,300	-106,150
SiO_2	-196,900	-98,450
B_2O_3	-286,400	-95,470
Na_2O	-89,900	-89,900
ZnO	-76,100	-76,100
SnO_2	-124,250	-62,130
Fe_2O_3	-177,400	-59,130
(H_2O)	-56,690	-56,690
NiO	-50,620	-50,620
Bi_2O_3	-118,500	-39,500
Cu_2O	-35,000	-35,000
CuO	-31,000	-31,000
PdO_2	-52,300	-26,150

* 住友軽金属工業株式会社技術研究所（名古屋市）。Technical Research Laboratories Sumitomo Light Metal Industries Ltd. (Nagoya).

第2表 鉄・銅およびアルミニウムの熱的諸性質

金 属 名	密 度 g/cm ³	比 熱 Kcal/kg°C	熱伝達率 Kcal/m ² •hr °C	融 点 °C	熔融潜熱 Kcal/kg	融点まで加熱 に要する熱量 Kcal/kg	融点+100°C まで加熱に要 する熱量 Kcal/kg	黒度 (ε)
鉄	固相	7.36	0.165	1536	65	305	339	0.8
	液相	6.90	0.207					
銅	固相	8.62	0.115	1083	51	162	175	0.8
	液相	8.36	0.130					
アルミニウム	固相	2.55	0.272	660	94	258	283	0.2
	液相	2.38	0.250					

鉄、銅の約四分の一程度である。この点からも、アルミニウムは溶解し難い金属であることがわかる。

以上のような溶解についての基本的な熱的諸性質を踏えて溶解炉の設計ならびに溶解作業を行なう必要がある。

2.1 アルミニウムの溶解炉および保持炉

アルミニウムの溶解および保持に使われている主な炉の種類と特徴を第3表にあげた。このうち、工場でよく使われている代表的な炉の電気誘導炉と直熱式溶解炉について基礎的な事項を概説する。

2.1.1 電気誘導溶解炉

電気誘導炉とは電磁誘導作用によつて、金属のような電気良導体の被加熱物に誘導電流、あるいは渦電流を発生させ被加熱体自身に生じるジュール熱によつて加熱溶解する炉である。形状により、溝型炉とルツボ型炉に大別出来る。

a) 溝型低周波誘導溶解炉

第1図の原理図のように、溶湯を保持して被加熱物を装入し溶解昇温する湯だまりの溶解室と電磁誘導作用によつて発熱させるインダクターの2つの部分から構成されている。インダクターは、一般の変圧器と同様閉回路をなす鉄心と1次コイルを有し2次コイルに相当するものは溝部の溶湯である。溝部で加熱された溶湯はピンチ効果により第1図の矢印のように押し上げられ溶解室の溶湯あるいは装入物と熱交換される。溝部は一般に溶解室より100~200°C温度が高く溶湯の流れも早いので、高アルミナ質、炭化珪素質あるいは窒化珪素質などの良質の耐火材を使用しなければならない。また、溶解中溝部に、アルミナやマグネシヤ(MgO)が堆積し溝を細くするので、定期的に、たとえば、毎出湯後機械的に溝掃除をしなければならない。窒化珪素質耐火材は高価であ

るが熔融アルミニウムに濡れ難いと同時に酸化物を付着し難い性質があるので、あらかじめ溝型に成形した耐火材が使われはじめています。

溝型低周波溶解炉は電気効率がよく、酸化ロスが少なく温度制御が容易で、しかも作業環境がよく、水素ガスや介在物の比較的少ない良質の溶湯が得られる。

欠点として、溝部に常に溶湯を残す必要があるので、合金変更の都度下湯あけを行なうわずらわしさがある。

b) ルツボ型誘導溶解炉

溝型低周波溶解炉の欠点を補うものとして、溝部のないルツボ型の誘導溶解炉がある。商用周波数を用いる低周波炉と高周波(500~5,000 Hz)を用いる高周波炉とがある。低周波は大容量の炉に使われ、高周波は比較的小型炉に用いられる。

ルツボ型誘導炉は溶湯の攪拌力が強く、均一な合金を速やかに溶解することが出来る。溶湯の攪拌力は溶湯の盛り上り高さで表示する。溶湯の盛り上り高さH(cm)は(1)式で表わされる。

$$H = \frac{3.16 \times 10^5}{r} \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot f}} \frac{P_w}{S} \quad (1)$$

ここに、

S: 誘導コイルに対面する溶湯の表面積(cm²)

r: 溶湯の比重(g/cm³)

ρ: 抵抗率(Ω-cm)

f: 周波数(Hz)

P_w: 投入電力(kW)

すなわち、低周波ほど溶湯の盛り上りが大きく高周波ほど小さい。第2図に、アルミニウムの切粉などの溶解に使われる無鉄心型低周波電気炉をあげた。

耐火材としては黒鉛ルツボ(炭素結合炭化珪素質あるいは粘土結合炭素質)あるいは築き固め式不定形耐火材

3

第 3 表 アルミニウム溶解炉・保持炉の種類

種 類			用 途	主として使用されている炉の容量(kg)	特 徴	備考		
電 気 炉	抵抗加熱式	ル ツ ボ 型		実験室用・鋳物保持炉	～200	熱効率悪いが、作業環境よい		
	誘導加熱式	溝型		低 周 波	切粉屑の溶解	500～3,000	熱効率よく、攪拌力あり、酸化ロス少なく作業環境がよい	第 1 図
		ルツボ型	低 周 波		切粉屑の溶解・中間合金の溶製	1,000～3,000	攪拌力大、冷材スタート時、材料の大塊（スターティングブロック）必要	第 2 図
			高 周 波		実験室用・中間合金の溶製	5～200	攪拌力大、熱集中度大きい、冷材スタート時小片でもよい	
燃 焼 炉	間接加熱式	ル ツ ボ 炉		鋳物溶解・保持炉・実験室用	10～400	メタルロス少い。熱効率悪い。設備費安価		
	直接加熱式	側型サイドチャージ式	角型定置炉		展伸材大中ロット溶解・保持ダイキャスト集中溶解炉	5,000～80,000	大型、材料装入時間は長くなるが炉作業容易、残湯多い	第 3 図
			角型傾動炉		展伸材用保持炉	5,000～50,000	出湯量の調節容易、残湯量少	
		円型トップチャージ式	定量式円型炉		展伸材用溶解炉（屑溶解）	20,000～60,000	屑の装入容易・炉作業やや難残湯多い	第 5 図
			傾動式円型炉		展伸材用溶解炉	10,000～50,000	屑の装入容易・出湯量の調節容易残湯量少、炉作業やや難	
		円筒型（ドラムタイプ）	傾 動 炉	展伸材用保持炉（真空炉）切粉屑の溶解炉（再生塊メーカー）	5,000～40,000	炉の気密性良（真空炉として使用）		
		前 炉 付	オープンウェル炉	切粉屑の溶解炉	3,000～25,000	メタルロス少、熱効率悪い	第 6 図	
		ドライハース式	定 置 炉	鉄—アルミの組合せ屑からのアルミニウムの分離	2,000～10,000	融点の異なる異材の分離に適す		
		タワーメルター（急速溶解炉）	定 置 式	ダイキャストメーカーの集中溶解炉	5,000～15,000（1～3Ton/時）	切粉屑には不適、熱効率良い		

が使われる。耐火材として、特に急熱急冷に耐えしかも溶湯の浸食に強いものが望まれる。最近では、全く水分を添加しないドライスタンプ式の不定形耐火材が開発され炉修期間が著しく短縮された。

2.1.2 直接加熱式溶解炉および保持炉

現在アルミニウムの溶解および保持に最も多く使われている炉で、熱源として重油、灯油、LPGあるいは、都市ガスが使われている。なかでも、重油・灯油系の燃焼式の炉が大半である。

a) 角型炉

反射炉とも呼ばれ古くからアルミニウムの溶解に使わ

れている。第 3 図に代表的な定置式角型溶解炉例をあげた。燃料はバーナで空気と一定比率で混合して燃焼させ火炎となり、被加熱材（装入材という）に熱を与え煙道へと廃ガスは排出される。装入材料は炉の側面に設けられた装入口から炉内に投入される（Side charge 方式という）。

一般に、溶解能力 M (Ton/時) は炉床の面積 R (m²) と式 2 のような関係にある。

$$M = a \cdot R \tag{2}$$

ここに、

a : Melting rate と呼び炉により決る 係数

第1図 ミゾ形低周波電気炉の原理図

第2図 ルツボ型低周波誘導炉（無鉄心型）

(Ton/hour・m²) で炉の性能を示す。

一般の重油燃焼式の溶解炉では Melting rate は 0.2～0.3 Ton/hour・m² 程度である。

定置式の炉では、溶湯は湯だまり (bath) の下端に設けられた出湯口 (tap hole) から出湯する。出湯口として第4図のような方式のものが作業性に秀れ寿命も長いのでよく使われている。

第3図 角型定置式溶解炉

- ① インサートブロック (耐火材)
- ② インサート
- ③ セラミックファイバー質パッキン
- ④ タッピングプラグ
- ⑤ 開閉作動装置
- ⑥ スプリング

第4図 定置式溶解炉の出湯口

保持炉として炉体を傾動させて出湯する傾動炉も使われている。傾動式の利点は、出湯が容易なことで残湯を定置式に比較して非常に少なくすることが出来ることであらう。

b) 天井装入式円型炉

圧延あるいは押出工場で発生する工程屑は一般に屑箱に入れて運搬取扱いをするが、屑は複雑な形状をしているため屑箱への充填率が低い。たとえば、押出工場のサッシ屑で 0.2～0.5 Ton/m³、圧延屑で 0.5～0.8 Ton/m³ 程度である。このため、炉に工程屑を多量に装入するには長時間を要し作業時間 (溶解サイクルという) を延ばすばかりでなく、装入口の開閉による熱損失も大きい。

写真1に示した、炉の天井が開閉する扉となっている円型溶解炉では、一度に多量の工程屑を装入出来る。この方式を top charge 方式あるいは top loading 方法と呼び工程屑を主体とする工場で使われている。材料の装入の速さは Side charge 炉で 0.1～0.4 Ton/分であるの

3

写真1 天井装入式円型炉

第5図 前炉付溶解炉

に対して、top charge 炉では、その3～5倍の速さである。

この炉の欠点としては、top charging 用のバスケットのため建屋を高くしなければならないこと、炉作業用窓を大きくとれないので除滓、攪拌等の作業性が若干悪いことである。

しかし、装入時間を短かく出来る利点のため、大規模工場に採用され、さらに出湯を容易にするため傾動式のものも使われはじめています。

c) 前炉付溶解炉

角型炉、円型炉とも、被溶解材料は燃料の燃焼雰囲気（窒素ガス、炭酸ガス、一酸化炭素ガス、水蒸気および酸素ガス）の直接の影響を受けるので、切粉状の屑のように細かい材料は酸化されやすくメタルロスとなりやすい。再生塊メーカーでは、第5図のような前炉付の炉（open well 炉）が好んで使われる。大きな形状の材料を溶解室で溶解し下湯を作り、その後、細かい材料はopen well に投入され、溶湯と熱交換して溶かす。すなわち、細かい材料は燃焼ガス雰囲気と接しないので酸化ロスが少ない。欠点として、熱効率が悪いことである。

第6図 アルミニウム溶解炉（燃焼式）の熱勘定例

第7図 炉内における熱の動き

最近では溶解室の高温の溶湯を低周波誘導炉のように積極的に open well 部に移送させ熱効率を上げる試みがなされているようである。

d) 直熱式溶解炉の熱管理

重油燃焼式溶解炉の熱勘定の一例を第6図に示したが、熱効率は約25%である。省エネルギーの観点から、廃ガスの持出す顕熱（一般に廃熱という）の有効利用が取り上げられ、廃熱は廃熱ボイラーあるいは、燃焼空気の予熱に利用されはじめています。廃熱を予熱空気に熱交換する熱交換器を recuperater という。しかし、廃熱ボイラーや recuperater の設備費は高価であり、ある程度以上の規模の工場でないとい経済性が成り立たないのが現状である。

そこで、まず、省エネルギーの第1歩として、炉内の熱伝達の機構、燃焼管理の基本についてよく理解し熱効率の向上に一工夫してみることが大切である。すなわち燃料消費量を少なくすれば燃焼排ガス量が少なくなり、廃熱回収設備が小型化され設備費が安価になる等のメリットが生み出される。

(i) 燃焼炉内の熱伝達

第7図は溶解炉内の熱伝達の機構を示す模式図である。火炎から被熱物に伝わる熱量 Q は3式で表わされる。

$$Q = Q_{GC} + Q_{sc} \quad (3)$$

ここに, Q_{GC} : 燃焼ガスから受熱面への熱量 (Kcal/hour)

Q_{SC} : 炉内壁から受熱面への熱量 (Kcal/hour)

(3)式の Q_{GC} , Q_{SC} は (4)式, (5)式で表わすことができる。

$$Q_{GC} = (\alpha_{GC} \varepsilon_c + \alpha_c) (t_G - t_c) \quad (4)$$

$$Q_{SC} = (\alpha_{SC} \phi_{SC} - \alpha_{ab} \varepsilon_b) (t_s - t_c) \quad (5)$$

ここに, α_{GC} : C 面を黒体とみなすときの燃焼ガス (G) と C 面間の輻射伴熱係数 (Kcal/m²・hr・°C)

α_c : 燃焼排ガス (G) から受熱面 (C) への対流伝熱係数 (Kcal/m²・hr・°C)

α_{SC} : 壁面 (S) から C 面への伝熱係数 (Kcal/m²・hr・°C)

α_{ab} : S 面の発する固体熱輻射が燃焼ガスに吸収される量に関する輻射伝熱係数 (Kcal/m²・hr・°C)

ϕ_{SC} : 総括固体輻射で (6)式であらわす。

$$\frac{1}{\phi_{SC}} = \frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{F_c}{F_s} \left(\frac{1}{\varepsilon_s} - 1 \right) \quad (6)$$

ここに, F_c : 受熱面の面積 (m²)

F_s : 天井, 側壁の面積 (m²)

燃焼ガスから受熱面 (装入材料および湯面) に伝わる熱量 Q を大きくする方法として, (4) 式, (5) 式中の $(t_G - t_c)$, $(t_s - t_c)$ を大きくすることであるが, 炉温を上げることになりアルミニウムの酸化ロスを増大させる恐れがある。また, アルミニウムの黒度も小さいので (表 1), ϕ_{SC} を大きくするには壁面 (F_s) を大きくする等限界がある。すなわち, 輻射伝熱による熱効率の向上には限界がある。

そこで, (4) 式, (5) 式の α_c , α_{GC} の対流伝熱係数を大きくすることに着目する。たとえば, α_c は流速と (7) 式, (8) 式のような関係がある。

$$\alpha_c = 5.3 + 3.6 \cdot W \text{ Kcal/m}^2 \text{ hr} \cdot ^\circ\text{C} \quad (7)$$

$$W < 5 \text{ m/sec.}$$

$$\alpha_c = 647 + W^{0.78} \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C} \quad (8)$$

$$W > 5 \text{ m/sec.}$$

ここに, W : 燃焼ガスの流速 (m/sec)

燃焼ガスの流速を上げることは非常に有効と考えられ, 従来の低速バーナーでは 5 ~ 20 m/sec であるが, 最近では 100 m/sec を起すバーナーも開発され, タワーメルターに採用されている。

(ii) 炉内雰囲気と炉圧制御

燃焼ガスの温度は 1200°C 以上あり炉内では天井ほど浮力を受けて圧力が高くなる。たとえば, 大気 の 温度 20°C, 炉温 1200°C のとき, 大気との差圧が 0.97 mmH₂O と

第 8 図 炉圧による放炎と冷風の吸引

第 9 図 溶解炉炉圧制御方式

なり圧力上昇を示す。第 8 図に炉圧による放炎と冷風の吸引の関係を図示した。冷風の浸入を防ぐには $P=0$ の面を炉床面にするよう炉圧を制御する必要がある。冷風は扉の下部から浸入しやすく湯面の冷却, 溶解材料の冷却はむしろのこと空気中の酸素により酸化ロスを増大させる。炉圧制御は, 一般に天井から圧力を検出し, 煙道にもうけられたダンパーにより制御する。第 9 図に, 炉圧制御の一例を図示した。

炉内の酸素は, 冷風の浸入の他に, 燃焼ガスからも来る。すなわち, 燃料を燃焼させるに必要な空気量 A は, 理論的に必要な空気量 A_0 より若干多くなければ完全燃焼しない。この関係を (9) 式で表わし, m を空気比という。

$$m = A/A_0 \quad (9)$$

実際の操業では, m は 1.1 ~ 1.3 程度の値である。空気

3

A. 複式操作方法

B. 単式操作方法

第10図 アルミニウムの溶解炉の複式操炉法と単式操炉法

比が適正な値であるかどうかを知る方法として、経験的には火炎の色などで判別出来るが、煙道中の燃焼廃ガス中の酸素 (O_2) あるいは炭酸ガス (CO_2) を分析して、⑩式および⑪式から簡単に求めることが出来る。

$$m = \frac{0.21}{0.21 - (O_2)} \quad (10)$$

$$m = \frac{(CO_2)_{\max}}{(CO_2)} \quad (11)$$

ここに、 $(CO_2)_{\max}$: 理論空気で完全燃焼したと仮定したときの廃ガス中の (CO_2)

最近では (CO_2)、(O_2) の連続的な分析計も信頼出来るのでより正確な空気比管理に利用されている。

2.2 溶解操作

操作方法として、溶解と保温を別々の専用炉で行なう複式操炉法と同一の炉で溶解保温を行なう単式操炉法がある。第10図に複式操業と単式操業の操作工程の一例を示した。複式法は冷材の溶解を主とする比較的大規模工場に単式法は電解炉からのホットアルミニウムの受入炉に使われることが多い。

2.2.1 装入材料の配合払出

装入材料は、あらかじめ目的の合金成分になるよう配合計算され、これに基づいて配合作業が行なわれ炉前に払い出される。最近ではコンピューターにより速やかに計算出来るので、使用する材料の組合せを選ぶことにより材料費のコストダウンが図れるようになった。

装入材としては、油脂分、湿分の付着した屑は、事前に焼却処理や乾燥をしなければならない。すなわち、水素ガスの溶湯への吸収があるばかりでなく水蒸気による爆発を起す危険がある。

2.2.2 装入順序

装入順序として、比較的小さい屑を炉床に入れ、この上に大きな形状の材料を入れる。合金元素は、マグネシウム、亜鉛以外の鉄、銅、珪素、マンガン、ニッケル、チタニウム、ジルコニウムおよびクロームは中間合金と

第11図 液相および固相中の水素の溶解度 (純アルミニウム)

して装入する。マグネシウムおよび亜鉛は溶解完了後溶解炉あるいは保温炉で添加する。マグネシウムは燃えやすいので、アルミニウム溶湯の中へ工具を使用して押し込む。亜鉛は炉床に沈降するので、よく攪拌をするなどの注意が必要である。

2.2.3 攪拌・除滓作業

溶解が完了すると、溶湯の攪拌を行ない湯温および合金を均一にし、滓とアルミニウムの分離を促進する。このとき若干のフラックスを滓上に散布し滓離れをよくする。滓は作業窓から、滓取ポットにかき出す。滓の中には多量の金属分が含まれているので、さらに熱いうちにポット中の滓を攪拌し、ポットの下端のタップホールから溶湯を取り出し、溶解炉に返す。残滓は水冷振動コンベヤー、水冷回転ドラムなどで急冷され、さらに再生処理にまわす。

3. 溶湯処理

溶解されたアルミニウム、あるいは電解炉からのホットアルミニウムは水素ガス、酸化物などの介在物およびナトリウムなどのアルカリ金属が含まれており、そのまま鑄造するとブローホールなどの欠陥となる。これらの有害物を取り除き清浄な溶湯を得る操作を溶湯処理といい、品質上最も重要な工程の1つである。

3.1 溶湯処理の必要性

3.1.1 水素ガスについて

水素ガスの混入は主として溶解工程で起り、装入材に付着した湿分、油脂分、燃焼ガス中の水蒸気、炉材の湿分、攪拌除滓等の工具の保護塗料の湿分などの水分と⑫式のように反応して溶湯中に入る。

水素ガスのアルミニウムへの溶解度は Ransley の実験によると、⑬式、⑭式で表わすことが出来る。この関係を第11図に図示した。

$$\log S = \frac{1}{2} \log P_{H_2} - \frac{760}{T} + 1.356 \quad (\text{液相}) \quad (13)$$

$$\log S = \frac{1}{2} \log P_{H_2} - \frac{2080}{T} - 0.652 \quad (\text{固相}) \quad (14)$$

3.1.2 介在物について

アルミニウム溶湯に混入する介在物には次のようなものがある。

a) 酸化物

溶解中あるいは送湯中に、空気中の酸素と反応して出来る、アルミナ (Al_2O_3)、マグネシヤ (MgO)、シリカ (SiO_2) あるいはスピネル ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{MgO}$) などである。

b) 結晶粒微細化剤 Al-Ti-B 中間合金からの粗大 Ti-B 粒子

c) 溶湯処理中に生成する塩化物 (主として塩化マグネシウム)、窒化物あるいは炭化物

d) 耐火物の破片、樋や工具の保護塗料の脱落したもの

これらの介在物のうち、最も代表的なものが酸化物である。写真 2 (a) は鋳塊に発見されたフィルム状の酸化物であり巣の原因となる。写真 2 (b) は板製品に観察された粒状酸化物で、ブライトシートのレザーストリーク (あるいはストリンガーとも呼ぶ) として発見されたものである。

3.2 溶湯の処理方法

現在、工場で採用されているか、あるいは採用されつつある代表的な溶湯処理方法を第 4 表にあげた。このうち、塩素処理とフラックス処理は、古くから使われ、これらの欠点を補うものとして真空脱ガス法、インライン処理システムが開発され実用の段階に入っている。

3.2.1 塩素処理

塩素ガスを溶湯中に吹き込む塩素処理は、従来から最も広く使われていて、展伸材のブリスター防止に大きな効果をもたらした。

塩素処理による脱ガス機構は次のとおりと考えられている。

主反応は 15 式であり、生成した塩化アルミニウム (昇華点 183°C) は気泡となつて溶湯中を浮上する。この際、気泡に水素ガスが拡散していき、同時に介在物をともなつて浮上する。また、16 式は発熱反応であり溶湯面に浮上している滓と溶湯との分離を促進する。15 式の反応の他にマグネシウムを含む合金では塩化マグネシウム (MgCl_2 融点 714°C) が生成し、フラックスとして溶湯中の介在物を包囲し浮上分離する働きがある。

塩素処理は、溶湯中のナトリウム、カルシウムの除去に最も有効な手段である。しかし、欠点としては毒性が強いので取扱いには充分な注意が必要であり、排ガスは

(a)

写真 2 製品に観察された酸化物

(a) AA 5657 鋳塊中のフィルム状酸化物

(b) AA 5657 板製品中の粒状酸化物

カセイソーダのようなアルカリ水溶液で洗浄しなければならない。この対策として、塩素ガスを窒素ガスで稀釈した混合ガス ($\text{Cl}_2 = 5 \sim 30\%$) が最近では使われている。

品質的には、脱ガス効果は著しいが、介在物の除去には難点があり、品質水準の高いものには溶湯汜過をさらに行なう必要がある。

3.2.2 フラックス処理

脱ガス用フラックスとしては六塩化エタンが最もよく使用されるが、脱ガス機構は塩素ガス処理と同一である。すなわち、六塩化エタンは固形状のタブレットとして市販され取扱いが塩素と異なり著しく簡単である。六塩化エタン (C_2Cl_6) はアルミニウム溶湯中で分解して塩素ガスを生成する。この塩素ガスにより脱ガスが行なわれる。

介在物除去用のフラックスは、主としてアルカリ金属の塩化物 (たとえば KCl , NaCl)、ふっ化物 (たとえば NaF , KF) や氷晶石 (Na_3AlF_6) の混合物がよく使われる。フラックスは介在物と溶湯との界面張力を減少

3

第4表 各種溶湯処理方法の比較

プロセスの形式		プロセス名		プロセスの内容	溶湯処理の効果				備考
					対環境	脱ガス	脱Na	介在物の除去	
炉内処理	常 圧		溶湯保持	長時間の保温 flux との用併	○	○	△	△	時間がかかる
			塩素処理	保持炉内へ Cl ₂ ガスを吹き込む	×	◎	◎	△	処理後から鑄込みまでの時間が長くガスの再吸収がある
			C ₂ Cl ₂ 処理 (タブレット製フラックス)	保持炉内へホスホライザーで固形フラックスを挿入する	×	○	○	△	
			Cl ₂ +N ₂ 処理	保温炉内へ Cl ₂ +N ₂ ガスを吹き込む	△	◎	△	△	
	真 空	ホルスト社	Static Vacuum Treatment	炉に送湯後真空脱ガス処理	◎	○	×	△	時間がかかる
		ホルスト社 ASV社	Dynamic Vacuum Treatment	真空にした炉へ溶湯を噴出させる	◎	◎	△	△	不活性ガスを吹き込むこともある。
炉外連続処理	脱ガス	Air Liquide 社	N ₂ 処理	ポーラスプラグよりガスの吹込み	△	○	×	△	
	汙 過	Alcan 社	グラスクロスフィルター (U. G. C. F)	グラスクロスを複数枚重ねて使用	◎	×	×	○	フィルターの再生処理はできない
		Kaiser 社	セラミックチューブフィルター	粒状セラミックからなるパロブ状フィルター	◎	×	×	◎	
		Conalco 社	セラミックフォームフィルター	セラミックからなるスポンジ状フィルター	◎	×	×	○	
	汙過・脱ガス	Alcoa 社	Alcoa 469	アルミナボールと Ar + Cl ₂ ガス	○	○	○	◎	アルミナボールの再生出来る
		BACO	FILD プロセス	フラックスコートアルミナボール N ₂ ガス	○	○	△	○	
		Union Carbide 社	SNIF	回転ノズルによる Ar (+Cl ₂) ガスバブリング	○	○	○	○	消耗品回転ノズルのみ

させ、フラックスとともに介在物を浮上分離させる。同時に若干の脱ガス効果もある。

3.2.3 真空脱ガス法

真空脱ガスは、 H_2 の分圧 (P_{H₂}) を低くすることにより溶解度 S を少なくすることである。たとえば、湯温 750℃ の溶湯の水素量を製品上問題のないとされる 0.1 ml/100 g (Al) 以下にするには H_2 から P_{H₂} を 4.8 mmHg 以下にすればよい。雰囲気中に 50% の水素量が含まれていると仮定しても、真空度は 10 mmHg でよいことになる。

真空脱ガスの脱ガス速度は溶湯中での水素濃度勾配に基づく拡散速度が律速となる。脱ガス速度を上げるには、溶湯と真空雰囲気との接触面積を大きくすることであり、プロセスとしては、真空雰囲気中へ液滴として噴出

させる Horst-ASV 社の Dynamic Vacuum 法が代表的な方法である。

真空脱ガス法の利点として次の点がある。

- 塩素を使用しないので排ガス処理の必要がなく、しかも作業環境がよい。
- 溶湯処理時の滓の発生が少ない。すなわち、メタルロスが少ない。

欠点として、ナトリウム、カルシウムの除去効果が悪い。介在物の除去も今一步である。対策として、フラックスあるいは溶湯汙過と組合せて使用されている。

3.2.4 溶湯汙過法

従来の脱ガスを主とした溶湯処理法では、介在物の除去水準が低いので最近では溶湯の汙過が行なわれている。

第12図 Alcoa 469 プロセス

第13図 FILD プロセス (BACO)

a) グラスクロスフィルター

グラスウールフィルターは古くからアルミニウムの鑄造分野では使われている。たとえば、炉の出湯口、鑄型内のメタルプールにセットされフィルム状の酸化物や大きな介在物の除去用として、その効果が認められている。

微小な介在物を除去するため、グラスクロスを数枚組合せ、比較的遅い流速で溶湯を上向きに流す Alcan社の U.G.C.F (Under-pour Glass Cloth Filter) が使われている。

b) アルミナボールフィルター

アルミナボール間のすき間や溝などの溶湯の流れの停滞した領域で介在物が捕足される。代表的な方法にAlcoa社の469プロセス(第12図)、ブリテッシュアルミニウム社(BACO社)のFILD(Fumeless In Line Degassing)の略、第13図)もある。469プロセスは2つのユニットから構成され、各ユニットは仕切板で区切られ直径10~20mmのアルミナボールとフレーク状のアルミナ粒子の

写真3 セラミックチューブフィルター
(7本セット) 写真4 セラミックフォームフィルター
(コナルコ社)

層からなり、ベッド層の下からアルゴンまたは窒素ガスと塩素の混合ガスが吹き込まれる。介在物によるベッド層のつまりが軽減されるばかりでなく、脱ガス、脱ナトリウムも同時に出来る。

FILD法は直径約20mmのアルミナボールとその表面にフラックスをコーティングしたベッド層、窒素ガス吹き込みノズルからなり、第1室に熔融フラックスを浮上させたプロセスで、効果はほぼ469プロセスと同等であるといわれている。

アルミナボール法の欠点として、振動等によりベッド層に堆積した介在物が流出する恐れがあることと、ボールの取換に手間がかかることである。

c) セラミックチューブフィルター

セラミックの多孔性のチューブを写真3のように数本組合せてカートリッジとし、専用室にセットして溶湯を汙過する方法である。セラミックチューブは骨材の粒度(通常0.2~2.8mmφ)および充填密度を調節して焼結して作る。溶湯はチューブの外表面から内面に通過させ汙過する。チューブの寿命は溶湯の通過トン数にして200~500Tonで、1回の操業で使いすてである。チューブは高価格であるが、最も効果のある溶湯の汙過法の1つであり高品質の要求に応じられる。

3

第 5 表 セラミックフォームフィルターの特性

項 目	性 能
汙 過 面 積	約3900 cm ² (24インチ角)
厚 さ	38 mm~76 mm
孔 の 大 き さ	25~45 pores/in.
多 孔 度	0.85~0.90
見 掛 け 比 重	0.35~0.45 g/cm ³
通 気 率	1000~2000×10 ⁻⁷ cm ²

第14図 SNIF プロセスの回転ノズル (黒鉛製)

15図に図示したような気泡と介在物の衝突により介在物
d) セラミックフォームフィルター

アルミナ、酸化クロームからなるスポンジ状の多孔性物質 (Ceramic Foam Filter 略称 C.F.F. 写真 4) に溶湯を通過させて汙過するプロセスである。第 5 表に C.F.F. の特性値をあげた。長さは約50 mm のプレートで 1 枚ないしは 2 枚重ねて使用する。1 回溶湯を通過させると C.F.F. は取換える。設備費が安価で取扱いも簡単なことから、最近、我が国でも使われるようになった。

3.2.5 SNIF プロセス

SNIF (Spinning Nozzle Inert gas Flotation の略) は、第14図に示したような回転ノズルから不活性ガスあるいは、微量の塩素を含む不活性ガスを小さな気泡として溶湯中に分散放出する。この気泡により脱ガスならびに第 15図に図示したような気泡と介在物の衝突により介在物が除去出来ると考えられる。

第15図 バブルによる粒子の捕足機構
(a) 慣性衝突
(b) バブル周囲による捕足

第16図 FMA 水素分析装置の概要図

このプロセスの利点は消耗品は回転ノズルのみで、汙材を使用しないので操業コストが安価であり、今後最も注目すべき溶湯処理法の 1 つである。

4. 溶湯処理効果の判定法

4.1 水素ガス含有量の測定

アルミニウム中の水素ガス量の測定方法を第 6 表にあげた。表中の No. 1, 2, 3 および 7 は溶湯処理効果を炉前検査する方法である。No. 1 のイニシャルバブル法は測定時間も約 3 分間で操作も非常に簡単なことから、炉前検査法として最もよく使われている。この方法の 1 例として、アルスイス社の FMA 式の原理図を第16図に、水素ガス含有量を算出するチャートの 1 例 (A1050 合金) を第17図に示した。たとえば、気泡がサンプル表面に最初に発生した圧力が 30 mmHg、湯温730℃のとき、水素ガス量は第17図の A 点と B 点を結んだ交点 C (0.20 ml/100 g(Al) で与えられる。この方法は純アルミニウム系では比較的精度がよいが、Al-Mg系などの合金系では溶湯の表面張力等の影響を受け精度が落ちる。BACO 社の Ransley が発明し Alcoa 社 が改良した Telegas 法は溶湯中に測定端子を挿入して直接水素ガスを分布するこ

第6表 水素ガス量の測定方法

No.	方法名	測定方法の概要	特 徴
1	イニシャルバブル法 (Gudechenko Test)	試料を小さな鉄製のルツボにとり電気加熱保温容器に入れ真空ポンプで減圧する。減圧中サンプルの表面に最初に気泡が発生したときの圧力とサンプルの温度とから水素ガス量を算出する。	1. 約3分間で測定出来る。 2. 合金の種類, 介在物の多少で測定値がばらつく。 3. 炉前検査用
2	減圧凝固法 (Straube Pfeiffer test)	鉄製のルツボに約200グラムの試料をとり, 容器に入れ, 展伸材では5 mmHg に, 真空ポンプで減圧し凝固させる。凝固中の気泡の状況の観察, 標準試料の比重との比較, および試料の断面の気泡の製況から, 水素ガス量を測定する。	1. 測定時間10分ないし20分間 2. 精度はイニシャルバブルテスト程度(0.3 ml/100 g が限度)
3	振動減圧凝固法	No. 2 の減圧凝固法の精度を向上させるため, 次の点を改良した装置 (1) 減圧用のポンプを大型化し, 所定の圧力に減圧する時間を短縮 (2) ルツボの予熱による凝固時間の延長 (3) 気泡の発生を助長するための振動装置 結果の判定は2項と同じ。	1. 精度 0.1 ml/100 g 2. 測定時間 15分ないし25分間 3. 炉前検査用
4	真空溶融抽出法	固体試料の表面を機械加工仕上げを行ない, 溶剤で洗浄し秤量後真空中で溶融し, 水素ガスを分離, 分析する。	1. 分析精度は非常によい。 2. マグネシウム, 亜鉛の影響を受ける。 3. 研究室用である。
5	真空固体加熱抽出法	No. 4 のマグネシウム, 亜鉛の影響をなくするために, 試料を固体状態で, 水素ガスを抽出, 分析する。	1. 分析時間が非常に長い。 2. 精度は4と同等かそれ以上。
6	不活性ガスキャリア抽出法	試料 No. 4 と同じであるが窒素ガスを通して水素ガスを分析する。	1. 分析時間が短い(15分間) 2. 蒸発成分マグネシウム, 亜鉛の影響を受けない。 3. 精度 0.02 ml/100 g
7	Telegas 法	少量の窒素ガスを溶湯に注入し, 循環させて, 水素ガスを窒素ガス中に拡散させる。平衡状態になったところで, ガスクロマトグラフ法で水素ガスを分析する。	1. 測定時間が短い(5分間) 2. 分析精度がよい。 3. 炉前検査用

第7表 溶解工場の環境対策

	問題点	発生原因	対 策	備 考
対 工 場 内	粉 塵	除滓, 攪拌脱ガス処理時に発生	炉まわり集塵装置の設置	
	有 害 ガ ス	塩素処理, C_2Cl_6 処理時	・排ガス吸引洗浄処理の実施 ・ $\text{N}_2 + \text{Cl}_2$ への切り換	
	高 熱 (暑気)	除滓, 攪拌脱ガス処理時扉を開ける	・手作業の機械化 ・スポットクーラーの設置	
対 工 場 外	SO_2	燃焼排ガス	・低硫黄燃焼化 ・排煙脱硫装置の設置	規制値は地域により異なる。
	NO_x	燃焼中に生成	・低粘度油 ・低温燃焼 (低 NO_x パーナ)	
	有 害 ガ ス	Cl_2 処理時の排ガス	・カセイソーダによる中和処理	
	粉 塵	攪拌, 除滓, 脱ガス処理	・集塵機の設置	

3

第17図 FMA 装置の水素ガス算出チャート
(AA 1050 用)

との出来るもので、精度も真空溶融抽出法に匹敵する程度である。その測定原理図を第18図に図示した。

4.2 介在物の検査方法

介在物の検査方法は水素ガス量の測定方法に比較して、まだ開発、研究の段階であり、確立された評価方法がない。一般には、板製品や押出製品のアルマイト処理後、あるいはカセイソーダ処理後にあらわれるレーズストリーク等の欠陥の数を数える方法が用いられている。

ある程度までの溶湯の品質水準を知るには、第6表のNo. 1, 2および3の方法でサンプルの表面に発生した気泡の着色の状況などで定性的に判定することも出来る。

5. 溶解および溶湯処理工程での環境対策について

溶解、溶湯処理工程は多量の熱源を取扱うので、作業環境、公害防止対策に万全を期する必要がある。第7表に主な環境問題と対策についての概要をあげた。最近、改善されたとはいえ、今後より一層改善に努力が必要と思われる。

6. おわりに

アルミニウム製品の第1工程である溶解および溶湯処

- ① ホイーストブリッジ
- ② DC 12V 電源
- ③ 標準ガス
- ④ 検出ガス
- ⑤ フィルター
- ⑥ N_2 ガスパルプ
- ⑦ ダイアフラムポンプ
- ⑧ 四方向バルブ
- ⑨ N_2 ポンペ

第18図 Telegas 分析装置の概要図

理工程について基礎的な技術について解説した。どのようなプロセスを採用するかは、溶解工場の規模、要求される品質水準、工場の立地条件あるいは設備投資額等各使用者の立場でよく検討し最適の方法を選ぶ必要がある。

溶解炉としては、省エネルギー化として Recuperator の設置、熱伝達の改善をより一層進める必要があり、溶湯処理としてはインライン処理化をより効率のよいプロセスに改良する必要がある。

なお、結晶粒の微細化処理も溶湯処理工程の1つであるが参考文献も多いので、本稿では割愛させていただいた。

本稿が溶解鋳造部門の実務に携わっている方々の少しでも参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) A. S. M: *Aluminum*, **8** (1967).
- 2) L. Herdain and R. Swell M: Boichenko's *Continuous Casting of Steel* (1961).
- 3) 日本工業炉協会編: *工業炉ガイドブック* (1969)
- 4) J. Koch, Wiehl: *Aluminum*, **55** (1979), 611.
- 5) 太田恵三, 山本武義: *Al-ある* **6** (1977) 33
- 6) 日本金属学会編: *新制金属講座*, 新版製錬編, 冶金熱工学
- 7) 犬丸, 吉田, 城谷: *住友軽金属技報* **19** (1978) 112
- 8) A. I. Kemppinen, G. D. Schnittgrund: *Light Metals* 1979 2, *TMS-AIME* (1979), 721.