特集号

|||||||
解説
|||||||

アルミニウムドロスの処理とリサイクル

大西 忠一*,**

Treating and recycling of aluminum dross

Tadakazu OHNISHI*,**

1. はじめに

地球環境を保全し、持続型社会を築き上げる必要性は近年特に重視されるようになってきた。単なる理念や理想ではなく、このまま放置すれば地球全体の生態環境が破滅的危機に陥る可能性が科学的に証明されつつあり、何物にも先んじた課題との認識が定着してきている。あらゆる問題がこの観点からもう一度見直され、対応策の講じられる必要がある。

アルミニウムという金属材料は、いったん製造されればその後の再溶解エネルギーが新塊の約3%で済むという特徴を有しており、大量生産消費される金属材料の中で最も省エネルギー、省資源性の高い材料である。したがって、リサイクルを推進し、循環型材料として利用できれば未来社会に対しても大きな貢献を成し得るであろう。もちろん、口先で言うほど容易ではなく、多くの課題が横たわっており、その解決に多くの努力が払われ続けていることは周知の通りである。そうした課題の一つにドロスの処理問題がある。アルミニウムを溶解すれば不可避免的に残滓であるドロスがでる。従来は一部再利用されているものの、多くは廃棄処分されてきた。ところが、中に含まれる窒化アルミニウムが水分と反応してアンモニアを発生するという問題などがあり、管理型廃棄物に指定されている。昨今の社会状況はこうした廃棄物を安易に放置することを許す環境ではなく、より積極的で抜本的な対策を求めている。放置すれば、最悪の場合にはアルミニウムの生産そのものにも影響しかねない状況となった。ドロスは生産活動に伴って発生するいわば「余計なもの」であり、研究者や技術者の注目を集めることはあまりなく、有用物の回収に一部の興味は引いても、結局は「処分」されるものとして扱われてきた。したがって、その実体は渦中にある当事者を除いてあまりよく知られていない。しかし、有害な廃棄物を生み出

し、廃棄せざるを得ないような生産ならば、「生産そのものを見直そう」といった機運の生まれかねない社会状況になってきている。ドロスの処理は単なる廃棄物処理の問題ではなく、アルミニウムの生産活動そのものにも影響する全体的な問題として、いつの間にか前線に飛び出してきているのである。

こうした背景の下、アルミニウムドロスをできるだけださない、でてしまったものはより安全に処理する、できれば有用資源としてもう一度再利用する、といった課題を対象に、将来のアルミニウム産業界としてはいかにあるべきかを調査研究する委員会が、通商産業省の委託により(株)軽金属協会に設けられた。「アルミニウムドロスの処理とリサイクルに関する調査研究委員会」である。この委員会は平成7年度より活動を始め、初年度の報告書¹⁾もすでに発刊されているので、詳細はそれをご覧いただきたい。ここでは、ドロスに対する認識を新たにし、その重要性に対する共通の問題意識を持ってもらうため、委員会活動の成果を下敷きに問題の概略を解説することとした。

2. ドロスとは

金属の溶解時に発生する残滓の呼び方には種々あり、必ずしも一致していない。同じものに対して違った呼称が、同じ呼称が違ったものに対して用いられていることも少なくない。まず、この解説で使う定義を示しておく。

アルミニウムの溶解時に発生する溶湯残滓全体を「ドロス」という。このドロスには通常相当量のメタル分が含まれているが、この回収工程を「搾り」という。搾り工程を経たものを「灰」という。灰のうち、さらなる搾りが不可能か、可能であっても搾らずに排出されるものを特に「残灰」という。搾られた灰はその回数により「一番搾り灰」、「二番搾り灰」などという。その他の呼称に

* 大阪府立大学工学部（堺市）。Faculty of Engineering, Osaka Prefecture University (Sakai-shi, Osaka).

** (株)軽金属協会・アルミニウムドロスの処理とリサイクルに関する調査研究委員会委員長

受理日：平成8年7月25日

況、炉の形式や雰囲気、溶解速度、溶湯処理法や攪拌法などがドロスの発生量とその組成、性状に影響する。したがって、同じ工場の同じ炉からでたドロスであっても、投入原料や操業条件によって安定しないことが多い。ドロスの一般的な発生源としては、原料表面の汚れ、酸化物、塗装、アルマイト、混入異物、溶解作業中の酸化生成物、溶湯処理中のフラックスや塩素、窒素ガス等との反応生成物などで、これらが溶湯表面に浮上集合したものがドロスである。

溶湯表面からドロスを除いた時点では、溶湯の取込みがあるのでかなり多量のメタル分を含むのが常である。一番搾り灰では金属 Al 50～70%のほか、 Al_2O_3 、 AlN 、 Al_4C_3 、 SiO_2 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 TiO_2 や、Cu、Si、Fe、Mg、Zn、Mn、Cr、Ti、Ni、Pb、Sn、Bi、Sb、Sr、Ba、V、Zr、Bなどの元素とその酸化物、Na、K、Ca、Cl、F、S、Cなどの元素とその酸化物、塩化物、ふっ化物、炭化物、炭窒化物などの含まれていることが多い。要するに、溶解金属に含まれる元素、溶湯処理やフラックス処理に使われる元素、大気中や炉材に含まれる元素、さらにはスクラップなどに付着して入ってくる元素など、ありとあらゆるものの混入している可能性がある。最終の残灰ではメタル分が通常は数%以下にまで搾られ、主成分は Al_2O_3 になっているが、依然として種々元素を含み、搾りや残灰処理の方法によって組成もまた違ってくる。委員会で分析した灰組成の例を表2に示す。単なる一例に過ぎないが、その多様複雑さと差異の大きさはわかるであろう。

こうしたドロスや残灰組成の複雑さ、多様さと不安定性は、その処理と再利用を図る上で常に大きな問題となっている。併せて、メタル分を搾っていくほど灰は微粉末状になることが多く、その扱いも問題になる。

3.3 ドロスと灰の処理

大規模な溶解設備を持つ工場では、多くの場合メタル分の回収が行われている。通常は含有メタル分の1/2程度の回収が行われている。搾り後の灰と一部の冷却ドロス、小規模工場などからの冷却ドロスは処理業界に運ばれ、そこで再びメタル分が回収される。残った残灰は一部再利用されているものの、現状では多くが埋立処分される。この工程間における主要な問題点はいくつかある。一つは粉塵の発生で、労働環境と粉塵公害に対する対応がいる。もう一つはメタル分と酸素との反応によるメタル分の酸化消耗やテルミット反応で、回収効率を悪くするとともに、高熱の発生による火災の危険性もある。ドロスや灰の扱いと保管には十分な注意がいる。さらに大きな問題点は、ドロスや灰に含まれる成分と水との反応である。

表2 灰の組成分析例 (mass%)

試料 No.	A	B	C	D	E	F
乾燥減量	0.11	0.08	0.20	0.23	0.15	1.5
金属 Al	44.6	26.6	51.0	10.6	20.2	7.2
Al_2O_3	38.7	39.2	19.2	42.8	39.9	50.8
AlN	4.5	22.8	5.5	20.5	23.4	13.3
Al_4C_3	0.17	0.50	1.5	1.8	0.61	1.1
Cu	0.04	0.11	1.4	1.1	0.12	0.73
Si	0.17	0.16	4.6	2.4	0.37	4.8
Fe	0.14	0.38	1.3	0.78	0.30	1.4
Mg	4.7	3.7	3.0	3.3	6.5	3.8
Zn	0.03	0.03	0.56	0.03	0.06	0.22
Mn	0.02	0.35	0.27	0.04	0.30	0.16
Cr	0.01	0.01	0.09	0.02	0.02	0.08
Ti	0.21	0.06	0.11	0.13	0.08	0.33
Ni	<0.01	<0.01	0.05	0.01	<0.01	0.03
Pb	<0.01	<0.01	0.08	<0.01	<0.01	0.03
Sn	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	0.02
Na	0.37	0.12	0.20	2.8	0.13	1.9
Ca	0.06	0.04	2.9	0.79	0.12	1.1
K	0.32	0.85	0.05	1.5	1.5	0.44
Sb	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Bi	<0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
Sr	<0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01	0.01
Ba	<0.01	<0.01	0.04	0.02	<0.01	0.05
V	0.02	0.01	0.01	<0.01	0.01	<0.01
Zr	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01
Cl	0.54	0.67	0.84	4.4	1.2	1.8
F	0.13	0.41	0.17	0.86	1.2	0.55
As	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Cd	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Hg	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Co	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
B	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02
In	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

注) 試料 A : 溶解原料6063の一番搾り灰

試料 B : 溶解原料3004の一番搾り灰

試料 C : 溶解原料 ADC12の一番搾り灰

試料 D : 溶解原料 AC2B の一番搾り灰

試料 E : 溶解原料3004の処理業での搾り灰

試料 F : 鋳物の処理業での搾り灰

といった反応が考えられており、いずれも発熱反応で、ガス発生を伴う。ほかにも、塩素ガスその他の有毒ガス発生や有害な水溶性反応生成物形成の可能性も無視できない。現在、特に問題視されているのは(1)式の反応による窒化物からのアンモニアガスの発生である。悪臭による公害問題の発生、水質や土壌の汚染、発熱による火

災の発生などが懸念されている。処理中はもとより、保管中、廃棄後においても安全性を確保するため、何らかの対策を講じる必要がある。通常は、廃棄前にあらかじめ水と反応させて窒化物を分解させてしまう水処理の行われることが多い。これにより大半の現実的な問題はクリアーされているようであるが、完全であるかどうかは明らかでない。いずれにせよ、こうした対策には相應の設備と投資が必要である。

単なる廃棄物とはいえ、その廃棄物の安全性を確保する処理費用、管理型廃棄物であることによる処分場の確保、その遠隔化などが最終処理費用を高騰させていることは避け得ぬ現状であり、それが全体の製品価格に反映されることも当然である。業種別の現在の残灰の最終廃棄処分費用分布は図2のようになっている。どの業種から出る残灰も平均2万円程度の費用をかけて埋立等の最終処分を行っており、少なからぬ負担であり、今後ともその増加が予想されるので、関連業界はもとより社会全体で熟慮した対策を立てる必要がある。

4. 技術の現状

発生したものの処分を考えるより、発生しないようにする方がよりよいことはいうまでもない。しかし、それでも零にはできないから、いかに効率よく分離し、メタル分を回収し、安全に廃棄できるようにするかも劣らず重要である。そのための努力はすでに多く重ねられている。発生から最終処分に至る過程でなされている技術的工夫の系統図を描くと図3のようになる。詳細は報告書を参照していただきたいが、個々の概略は以下のである。

4.1 溶解時の発生抑制

(1) 溶解炉の特性

反射炉はバーナの火炎が原料に直接触れることや、酸化しやすい雰囲気曝されることのためにメタルの酸化消耗が多い。誘導炉では電磁場内における自己発熱と攪拌により酸化が少ない。このように、炉形式によってドロスの発生は異なるが、現実には設備費用や容量などの壁が大きく、経済効率が優先されるので思うに任せない。挿入原料の形状、形態や挿入法も影響する。できるだけ酸化損耗を少なくする工夫が基本となる。

(2) 溶解雰囲気

大気雰囲気では800～1000℃で酸化が起こりやすいが、真空、Cl₂、SO₂雰囲気では抑制される。不活性雰囲気を作るフラックスの使用も有効である。

(3) 溶解速度

溶解速度を上げると酸化ロスが少なくなる。

(4) 攪拌

攪拌して表層の過熱状態を防ぐことが有効である。静

図2 業種別にみた残灰の最終廃棄処分費用分布。
(件数はアンケートにおける回答数)

かで有効な攪拌のため、電磁式、溶湯ポンプ式、真空ポンプ式などが工夫されている。

(5) フラックス

精練時の使用フラックスによってドロス発生の多いものと少ないものがある。塩化物+ふっ化物系は多く、ふっ化物を含まないものは一般に少ない。

4.2 除滓技術

ドロスのみを効率的に除くことは歩留まりを向上させ、生産性を高める。通常は熊手、バケット状治具、真空吸取り、スクリュコンベヤーなどが用いられている。ドロスは溶湯との分離が難しいので、フラックスを用いてウェットな滓をドライな滓にし、付随する溶湯を少なくすることも重要な技術になっている。しかし、完全な分離は困難で、除滓したドロスには60～80%のメタル分を含むのが普通である。

4.3 ドロスの冷却技術

高温のまま長時間放置するとメタル分の酸化消耗やテルミット反応が起き、危険性があるとともに後のメタル回収効率が悪くなる。冷却手段、手法、雰囲気、フラックスなどを工夫し、コントロールして冷却することが必要である。ロータリードラム式の冷却機などが多く用いられている。

4.4 メタル分の分離技術

いかに酸化を防ぎつつ、メタル分だけを分離抽出するかがポイントである。欧米では溶融塩処理が主流であったが、残渣であるソルトケーキの処理が問題になっている。ソルトレスフラックスの工夫や、雰囲気調整をして溶融分離する方法、プラズマやアークを用いる方法などがいくつも研究開発されている。

我が国のドロスや灰の処理工場では適度に粉碎分級したものを回転炉で加熱し、メタル分を抽出していることが多い。また、溶解現場から出るドロスの一番搾りにはMRM (Metal Reclaim Machine) と呼ばれる機械的分離技術の用いられていることが多い。回転翼を持つ容器を用い、そこに高温のドロスを投入して攪拌すると溶融メタル分が分離して容器底にたまり、回収することができ

図3 ドロス発生抑制から処理までの技術系統図

る。このほかにも、加圧法、静電気法、浮遊法、フラックス分離法などがある。

ドロスに含まれるメタル分は通常60～80%とかなり多いので、その回収とリサイクルは重要で、各種の工夫がなされている。

4.5 残灰処理技術

メタル分を搾り取った残灰は微粉末状になっている場合が多く、窒化物、塩化物、ふっ化物、炭化物などが含まれており、そのまま廃棄するには問題がある。再利用する場合にも障害となることが多い。そこで何らかの処理を施すことが必要になる。

(1) 水処理

有害ガスの発生や発熱による火災の危険性を避けるため、特に窒化物の反応によるアンモニアガスの発生を避けるため、あらかじめ水と反応させてしまう水処理が一般には行われている。ほかにも種々の方法が検討されているが、その後の有効利用あるいは廃棄処理を含めて、経済的かつ効果的な方法はなかなか見出せないのが現状である。

(2) 造粒

有効利用しやすくするために微粉末状の残灰を改めて造粒することも行われる。バインダを混ぜて加熱固化成形するようなことが行われるが、その分だけ工程が増すので、再利用されないものは粉末状のまま産業廃棄物として処分されているのが普通である。

(3) その他

静電分離によって微粉末ドロスや灰からメタル分を回収する方法なども工夫されているが、効率と経済性の壁は大きいようである。

5. ドロス・残灰処理現場の作業環境

処理現場における最大の課題は粉塵である。ほかにも有害なガスの発生、水処理等における廃水処理、粉塵や反応熱による発火の危険などにも備えねばならない。調査結果によれば、処理の末端に行くほど設備能力の不足している傾向にある。現状の社会体制として最終処理の社会的地位が低く見られる傾向にあったことと無縁ではないであろうし、商品経済社会の弊害という側面もある

う。社会全体として改善への努力がなされねばならない。

6. 灰および残灰の有効利用

1994年度の推計残灰発生量19.2万tのうち再利用されているのは約7万t、残り12万t余は管理型の産業廃棄物として埋立処分などに付されている。もう一度有効利用できれば望ましいことはいうまでもない。そのための試みは今までも多く行われてきたし、現在も続けられている。有効利用の現状をまとめると次のようである。

(1) 鉄鋼用

我が国における現在の残灰の最大有効利用先は鉄鋼用であり、再利用用途のほとんどを占めている。製鋼作業にアルミナと金属Alを含む残灰を添加すると、熔融温度が低下し、流動性が改善され、脱硫脱酸が促進され、製鋼時間の短縮に効果がある。金属Alはスラグ中の酸化鉄を還元し、その反応熱によってエネルギー原単位を減少させる。もっとも、再利用のためにはメタル分が20～50%残留している必要があるほか、造粒するなどのユーザの品質要求を満たす工夫がいる。また、我が国の鉄鋼生産に大きな飛躍が見込めないことのほか、他の有効材料に比べて必ずしも残灰が有利ではないという意見もあり、今後の動向に注目する必要もある。

(2) セメント

残灰成分からみて、アルミナセメントへの利用が考えられる。セメント用としては塩素の除去、AINの除去、成分の安定などが課題となる。海外では積極的に利用されている例もあるが、我が国では極微量である。

(3) 耐火物

耐火物への利用も可能であるが、アルカリ酸化物、けい素酸化物、マグネシウム酸化物などが制限され、金属Alも望ましくない。したがって、安定で高性能な耐火物を作ることはかなり難しい。プラズマ等で高温処理して特殊用途のアルミナとして利用することも考えられるが、これでなければいけないという理由は見当たらない。品質と経済性の点でまだ十分でない。

(4) その他

考えられる方法はいくつもある。例えば、アルミニウムの電解製錬用原料に戻す、硫酸処理してアルミニウムみょうばんや硫酸アルミニウムにして水の浄化用や製紙用に使う、プラスチックやガラスと混和して安定固形物として再利用する、金属基複合材料の分散粒子とする等々である。

有効利用の方途として可能性のあるもの、研究段階であるもの、アイデアの段階に過ぎないもの、過去に例はあるがより有効な代替品があったり問題点が指摘されて使われなくなったもの等々様々であるが、いずれも実用

に耐える品質のものを安定して安価に継続供給するには解決すべき課題が多く残っている。現状では、量産用途としては鉄鋼用以外にない。

7. おわりに

アルミニウム製品の製造には否応なくドロスの発生が付いてくる。有用分を回収し、残灰の再利用法を開拓したとしても、全量を有効活用するための道はかなり遠いと思われる。一方で、有害物を発生するようなものの処理や廃棄はますます厳しく規制されてくるであろう。地球環境を保全し、人類生き残りを策す社会環境の変化の中で、アルミニウムという有用な金属材料が有用であり続けるには、ドロスや残灰の処置を最早避けては通れない。極力その発生を抑制し、発生したものは安全確実に処理し、極力再利用して廃棄を減らすことが必要である。経済性や品質の面からだけみて排除することはできない。処理業界だけの問題でもなく、生産に携わるものが等しく分担しなければならない問題で、大きくいえば社会全体の問題でもある。高性能で安価なものを作ればよい、便利で安いものが手に入ればよいという発想は転換しなければならない。研究、開発、生産、消費、リサイクル、廃棄、すべての段階において同じである。どこかが行き詰まれば全体に波及し、結局は自分自身に被ってくるのだから。

将来に備えて取組まねばならない課題をもう一度簡単に整理すると、次の四つになるであろう。

(1) ドロスの発生抑制

できるだけ発生そのものを抑制するのがまず第一である。これは生産効率に直接影響するので、すでに多くの工夫がなされている。それだけに簡単ではないであろうが、さらに研究が必要である。

(2) ドロスや灰の無害化

再利用するにも廃棄するにも無害とすることが必須である。さもなくば、処理、移送、保管、廃棄のすべてで大きな抵抗に遭うであろう。管理型といってもその廃棄は敬遠されがちになるであろう。なお一層の安全確実な無害化が必要である。

(3) 有効利用

廃棄するより利用できればよいことはいうまでもない。用途の開発と品質向上への努力を積み重ねる必要がある。

(4) システム構築

上記3点は技術的課題である。困難ではあっても不可能ではなく、早急に実現しなければならない。しかし、それが経済性を有するかどうか、品質的に対抗できるかどうかは別である。過去にも数々の試みがこれらの壁に跳ね返されてきた。それでもなお実現しなければならない

いとなれば、満足できる方法が見つかるまでは社会の中のシステムとして機能させ、社会全体の協力を求めることが必要になろう。地球環境を保全し、持続型社会を築いて行くのは社会全体の要求であり責任であるのだから。

一般の研究者や技術者の関心を集めることの少なかったドロスや残灰の問題に今一度注目し、解決への道を探ることが今必要である。

[付記]

本稿は通商産業省、(株)軽金属協会の了解を得て、「アルミニウムドロスの処理とリサイクルに関する調査研究委員会」の平成7年度報告書の内容を、一般的にまとめ直して解説としたものである。したがって、まず認識していただきたい問題を中心にしており、報告書の内容と量率およびレベルを正確には反映しておらず、私見も混じっている。その限りにおいて本稿の責任のすべては筆者にある。

当該委員会は通商産業省の委託を受けて(株)軽金属協会に設置され、(株)軽金属協会と(株)日本アルミニウム合金協会を共同事務局とし、日本アルミ鋳造リサイクル協議会の協力を得て活動している。構成委員各位の熱意と問題意識によって支えられており、報告書はその努力の成果

である。ここに平成7年度委員会名簿を添えて、関係各位に深甚の謝意を表します。また、読者諸兄にはぜひこの報告書をご一読いただき、ドロスに対する認識を新たにさせていただくことを希望します。

大西忠一(委員長：大阪府大)、上原 赫(大阪府大)、菅野幹宏(東大)、小林一輔(千葉工大)、椿野晴繁(姫路工大)、茂木徹一(千葉工大)、磯部俊夫(合金協)、田辺義典(日軽金)、横田正勝(神鋼)、千葉文紀(昭和アルミ)、友永三千人(スカイアルミ)、大谷 真(住軽金)、高橋 晋(古河電工)、三田村康二(三菱アルミ)、宮本 悟(エム・シー・アルミ)、山本龍太郎(大紀アルミ)、杉山貞男(アルテックアミノ)、中村春彦(サミットアルミ)、大辻孝雄(日軽金)、近藤與士人(アーレストィ)、松島紘史(松島金属)、村本辰弘(共栄アルミ)、中島 巖(協和金属)、田口晴彦(オブザーバー：通産省)、井波隆夫(事務局：軽協)、佐々木侑槌(事務局：軽協)、藤本正治(事務局：合金協)、松永正二(事務局：合金協)。

参 考 文 献

- 1) アルミニウムドロスの処理とリサイクルに関する調査研究報告書、軽金属協会、(1996)。