解 説

アルミニウムのリサイクル-二次合金地金

下村 勇一*

Recycle of aluminum, aluminum secondary alloy ingot

Yuichi SHIMOMURA*

1. 歴史と背景

素材産業は、どちらかといえば、縁の下の力持ちと称されるように、時代の先端産業分野に、産業の“米”（鉄が日本の産業の米と称されているように）を提供することを最大の使命としている。

この数年来、リサイクルの優等生として、世間から熱い眼差で見られるようになったアルミニウムの生いたちは、ちょうど今から、100年前の明治20年頃から始まるものの、再生地金が産声をあげたのは、今から60年ほど前の昭和の初めであった。昭和10年代は、一次製錬の勃興期に当たり、昭和20年代になって、再生地金が、鍋・釜を主体に使われだし、当時の再生地金の品位は、97%アップ（水筒や弁当箱等の屑を原料）、93%アップ（合金の板屑を原料）、90%アップ（鋳物材の屑を原料）の3つがあった。また、昭和30年には、アルミニウム再生地金のJIS化が図られると同時に、この30年代には、ダイカスト用合金が、国内で、凄まじいほどの勢いで使われるようになった。これは、主として日本の自動車会社が戦後の本格的生産を開始し、ダイカスト用再生地金が多量に用いられたことによる。そして、遂に昭和39年に国内でアルミニウム再生地金の生産が10万トンを超え、それ以後は年率10%を超える勢いで自動車・建築・運輸を中心に伸び続け、昭和62年には、100万トンを超え、平成3年度の実績は予想で110万トンに迫らんとしている¹⁾（図1参照）。

この間にも、再生地金という呼称が二次地金および二次合金地金と改称され（昭和40年）、品質管理に必要な機器であるカントレットが導入され（昭和41年頃）、昭和45年頃からは公害対策が進められ、昭和49年には社団法人日本アルミニウム合金協会が設立される等して、二

図1 アルミニウム二次合金地金の生産高

次製錬業界の急速な発展の基礎固めが行われた。昭和50年代に入り、オイルショック後の国内は、経済的にも自由圏経済の仕組みの枠内で動かざるを得ない状況になり、国内アルミニウム一次製錬の撤退、新塊地金、アルミニウム屑の輸入拡大へと展開した。製品規格（JIS）の面でも、ダイカスト用地金については、従来の一次・二次の呼称を廃止して、一本化した規格に改訂された（平成2年）。

2. アルミニウム屑原料

アルミニウムリサイクルの循環サークルを図2に示す。この図から、アルミニウム製品の消費→寿命（即ち、屑の発生）から始まり、回収→集荷→合金精錬→鋳造→加工→組立→消費へと循環するアルミニウムのリサイクルの全容を把握することができる。図3には、アルミニウム屑およびインゴットの流通経路図を示す。これによれば、アルミニウム2次製品および3次製品として

* 日本軽金属㈱三重工場（上野市）。Nippon Light Metal Co., Ltd., Mie Works (Ueno-shi, Mie).

受理日：平成4年5月8日

図2 アルミニウムリサイクルの循環サークル

図3 アルミニウム屑およびインゴットの流通経路図

消費されたスクラップが、解体の手間をかけ、回収・集荷され、二次合金メーカーに入ってくるのに実に多くの流通段階を経ており、そこにはいくつもの流通経路が複雑に存在している。たとえば、アルミ飲料缶については、これらの人々の力により、アルミ缶消費量16万トンのう

図4 回収されたアルミ缶。写真のものは、プレスされている

ちの約43%に当たる7万トンが故屑として回収・集荷されてくるのである²⁾(平成2年度実績、図4)。

昨年(平成3年)の暮から、今年(平成4年)の始めにかけて、国内スクラップの相場が値下りしたように、たとえば、キカイコロが、持ち込み価格で、キログラム当たり105円になったとすると、解体処理業者は、自動車エンジンの解体にかかる手間代の方がアルミニウム屑売値よりも高くつくという逆ざや現象のため、解体処理を行わなくなり、手間のかかるスクラップは、回収されなくなってしまう。

アルミニウム屑についての中味は深く、たとえば、日本工業規格では、JIS H2119にアルミニウム屑およびアルミニウム合金屑分類基準が設けられており、米国では、古くから、NARI規格で、鉄屑・非鉄金属屑の分類規格を行っていたが、1988年に、これが、ISRI規格³⁾にとって変わり、現在もISRIで行われている。ISRI規格の特徴は、アルミニウム屑の名前を、いずれも“T”を頭文字として書き記すというもので、割合覚えやすいものである。

表1には、代表的な国内屑と輸入屑との対比と、それら屑の特徴が書かれており、これらの屑の名前の由来について調べていくと、実に面白い話に行き当たる。鋳物屑が『コロ』という名前(新コロ、キカイコロ)なのは、姿・形がコロコロしているからであるとか、『ノベ』は、展伸故屑で、形が伸びるためであるからとか、数々の由来がある。

日本とアメリカとでは、スクラップの回収・集荷の方法は異なるが、日本では、買い子、寄せ屋と呼ばれる人達が回収し、問屋(ディーラ)に集荷して、そこから、二次合金メーカーへ持ち込むというルートがあり、キカイコロ、ノベ、ガラは、多くこのルートに乗ってリサイク

表 1 代表的なアルミニウム屑の分類

呼 称		特 徴
国 内 屑	輸 入 屑	
線	タロン	φ2 mm 以上—L200 mm 以上の純アルミニウム系屑, 巻線 1 巻で直径 1.2 m 以下
親 切 1 号	テーブル	厚さ0.5 mm 以上の1000系屑・板・条・棒・管・型材の新屑
印 刷 板	リソシート	1000系または, 3000系の印刷板屑
箔	タース, テスティ	0.2 mm 未満の1000系箔屑
3S	3003	展伸材 A3003相当の新屑または故屑
4S	3004	展伸材 A3004相当の新屑または故屑。キャンボディ材 (CLASS-I)
63S	6063	展伸材 A6063相当の新屑または故屑
合 金 新 屑	タフタブー	被覆や塗料のない2種類または, それ以上の低銅アルミ合金屑からなり, 7000系合金・箔・金網・汚物・その他の異物を含まない。
ビス付サッシ	テイントターバー, テール	アルミサッシの解体屑で, ビスの付着は2%以下
ノベ		展伸材1000系の器物等の故屑
ガラ		1000系故屑が60%以上であり, 2000系, 7000系, A5056が10%以下 その他の異種材が40%以下
カン	タラップ (タルク) タルドン	アルミニウム缶故屑からなり, 鉄・汚物・液体又は, その他の異物を含んではならない。NARI 規格のタルクはタラップと改称された。タルドンは, UBC に同じ
新 コ ロ	ニューテンス	鋳物品, ダイカスト品の工場発生不良品や, 湯口, バリ等で, 鉄・真ちゅう等の異物がないこと
キ カ イ コ ロ	テンス	各種類のアルミ鋳物からなり, 自動車・航空機鋳物を含んでよいが, インゴットを含んではならない
キリコ, ダライコ	テリック	込みアルミ切り粉およびダライ粉
パーマ		展伸材およびヒドロ系鋳物の削り屑でパーマ状の屑
ラ ジ エ タ ー	トーク	銅パイプまたは純アルミニウム系フィンの付いたラジエーターで, 銅の割合は, 40%以上であること
ピ ス ト ン	タリー	アルミ合金製ピストンであり, 補強鉄板, ブッシュ, 鉄リングを含んではならない

ルされるものである。また, アルミニウム缶のように, その70%近くが, ボランティアグループ, 自治会, 子供会によって回収され, 問屋を経て集荷されるもの, また, 工場発生屑のように, 工場から問屋を経て集荷されるもの等々がある (図5参照)。

これらのスクラップは, 分類基準に従った品位に応じて分類され, 持ち込まれるので, 二次合金メーカーではスクラップ受入れ基準に基づき検収し, その成績を相場に加味しながら値段決定が行われる。図3の各流通部門間での屑取引きは, はほとんどが現金支払いで行われる。

スクラップの回収量は, アルミ消費量とともに, 年々多くなる一方であるが, これらの回収・集荷を担っている人々の働きがあってこそ廃棄物が有価物化するのであるから, スクラップは今後とも有限な材料として考える必要がある。また, 回収率を向上させるために, 行政とメーカーがスクラップ回収に, 責任ある施策を講ずることが望まれるし, さらに一方では, 大資本がスクラップの集荷・解体選別を行い屑の合理的な処理 (生産) を行うことも今後は必要であろう。最近では, 廃車のカーシュ

図5 問屋を経て, 二次合金メーカーに持ち込まれたアルミ屑。屑の種類毎に区別され, 検収を受ける

レッドがこのルートに乗っているようである。

3. 原材料前処理

スクラップには, 前章で述べたように, 様々な形態の

ものがある。たとえば、鉄付きの故屑（ビス付きサッシ、キカイコロ等）は、そのまま溶解すると溶湯へ鉄が溶け込むので、原材料前処理として、シュレッドにかけて、40～70 mm に細かく破碎し、その工程で分離した鉄を磁選機により除去して、溶解しやすいようにする方法が取られる。アルミニウムの飲料缶は、リサイクルしやすい材料であり、今後、ますます消費量が増えていくであろうが、溶解するときの問題点は塗料が激しく燃え、そのとき発生する煤塵が、作業環境を悪化させることである。その対策としては、デコータ（表面塗料焙焼装置）により前処理をして、あらかじめ塗料を取り除き、溶解するという手順を取る。

また、故屑中には鉄以外にも、ステンレス、ごみ、木片、プラスチック、ゴム等の異材質が混入されているものがあるので、これらのものを前処理で除去するために、故屑をシュレッドした後、渦電流選別機^{*}を通して、これらの異材質をアルミニウムと分離選別するという方法が取られる。さらに、故屑中に、亜鉛、マグネシウム、真ちゅうが混入している場合、それらの異質金属の除去のため、故屑をシュレッドした後、砂鉄を含んだ重液と称するメディアの中を通過させ、それら金属とメディアとの比重の差でもって、アルミニウムの中から、亜鉛、マグネシウム、真ちゅう等を分離するというプロセスも採用されていて、主としてカーシュレッドの最終選別工程に、本法（重液選別法）が用いられている。

4. 溶解工程

二次合金メーカーで使われている溶解炉には、前炉付き反射炉、密閉式反射炉、ドライハース、回転炉、ポット炉、誘導炉があり、熱源としては、重油、灯油、LPG、都市ガス、低周波誘導起電力が挙げられる。スクラップ溶解の最大のポイントは、安全に溶解することと歩留を高く留めることにある。この条件に適合し、しかも生産性が高い溶解炉としては、前炉付き反射炉（オープンウェル炉）が挙げられるが、オープンウェル炉は、昭和35年に日本に導入されるや否や⁴⁾、急速に広まっていった。屑の浸漬溶解の方法としては、図6のように、フォークリフトに押込工具を取り付け、作業者がリフトを運転しながら溶解していくというのが一般的である。スクラップの溶解は、暑熱環境の中で安全と歩留を確保しながら行われる過酷な作業であり、かつ高度なスキルが要

図6 オープンウェル炉でのアルミニウム屑の溶解

求される方法に頼っている。

しかし、最近では、熟練者の高齢化対策、3K職場の改善対策として、機械装置により屑の自動溶解を試みるものが起こってきている。ただし、形状や特徴が異なる種々の屑をいくつかパターン化したとしても、全部の屑を完全に自動溶解することは無理が伴うので（精巧な機械装置ほど、炉の熱で、作動部が故障して使えなくなる）、材料の特徴をよく掴んだ上で自動化の条件に適合する屑のみに限定して自動溶解を行うというものである。たとえば、シュレッドしたシュレッド屑を溶湯中に浸漬した回転子に定量供給して、連続的に自動溶解する方法が普及しつつある。

そもそも屑というのは、表面に塗料、ビニール、油が付いていたり、表面処理が施されていたり、酸化腐食していたりするものの集合体であるので、溶解時に煤塵やドロスが発生するのが普通である。そこで、煤塵に対しては、汙布式集塵機や電気集塵機により捕集を行い、公害対策・作業環境対策を施し、かつまた安全保護具の装着により粉塵・煤塵の人体への吸入防止を図るなど、作業者の健康に対する配慮がなされている。またドロスについては、炉から掬き上げた状態では、ドロス中に随伴金属が30～60%近くあるので、MRM（灰絞リ機）により、機械的に、ドロスと金属とを分離し、絞った金属は炉に戻し、残灰ドロスはただちにスキムクーラで冷却し、最終的に灰加工メーカーに売却される（委託加工している場合には、灰加工メーカーで、ドロスより回収された粗金属を、二次合金メーカーが買い戻すことになる）。ところが、灰加工メーカーで、加工を終わった最終残灰は、一部鉄鋼向けの保温材として利用されるものの、その量は年間10万トン程度でしかなく、年間20万トンもの量が廃棄物として埋立て処分されているのが現状である⁵⁾。

屑を全部溶解した後に溶湯の成分分析を、発光分析機

^{*} ベルトを介して、高速回転する磁極回転子上を流れるアルミニウムは、高周波交播磁界を受ける結果、アルミニウム内部に渦電流が発生し、磁極回転子との間で回転遠心方向への斥力を生ずることにより、アルミニウムが飛び出し、異材質と選別を可能にする。

により行い（中間分析）、分析結果に基づいて補正を行う。目標とする成分規格より組成が高い元素については、適切な材料で薄め、また、組成が低いものについては、添加材や母合金等を追加投入して、規格に合致するように造り込む。配合で、溶湯組成が規格組成になるようにコントロールしているが、屑溶解の場合は、補正は欠かせない作業である。ラウタル合金や、ADC10、ADC12では、けい素成分は金属けい素、銅成分については、銅製のラジエーター屑を添加することとしている。また、マグネシウムの規格オーバに対しては、塩素ガスまたはフラックスにより脱Mgを行うのが一般的である。最終的に、確認分析を採り溶製工程に入る。

5. 溶製工程（精錬工程）

溶製工程（精錬工程）では、溶湯を一端高温にして添加材の溶解を完全に行うのと同時に、脱滓フラックスを投入して攪拌しながら、酸化物の分離を完全に行う。このとき、溶製工程でさばきが不十分な場合、ドロスが燃焼して（急激に酸化する）、電気玉が生成しやすいので、攪拌後、速やかに滓を炉外に出して、冷灰を加えながらMRMで灰絞りを行う。フラックスの投入量は、ドロスの状態によっても異なるが、一般に溶湯重量の0.05～0.1%くらいで行われる。

次に、溶湯中に溶解しているガスを除く処理（脱ガス処理）を行う。アルミニウム溶湯中には、溶解雰囲気によっても異なるが、一般に、水素、メタン、炭酸ガス、一酸化炭素等のガスが溶解している。それらの中でも、水素が最も多く、80～95%の割合を占める。脱ガス処理の方法としては、炉中溶湯へ、ランスを介して、塩素ガス、窒素ガス、またはアルゴンガスを吹込む方法や、フラックスフィーダによってフラックス吹込む方法、さらには、ガス吹込みの回転ノズルを付帯したインライン脱ガス装置による脱ガス方法等がある。これらのなかで、最も脱ガス効果があるのは、インライン脱ガス法であり、それは、 casting中に気液接触時間が2～4分となるように設計された容量の溶湯処理槽に、アルゴンと塩素の混合ガスを回転子のノズル先端より吹込み、脱ガス処理するという方法である。このとき、出側のガス量は0.1～0.2 ml/100 g Al程度に脱ガスされる。一方、窒素ガスで炉内脱ガス処理したときは、条件により多少異なるが、30分間の脱ガス処理で、0.3 ml/100 g Alがおおよそその飽和点であろう。脱ガス後は、溶湯温度を casting温度に管理しながら（脱ガス処理後は、極力加熱燃焼を避けるべきである）鎮静保持をして、その後に castingに入る。

6. casting工程

casting工程は、先の溶製工程で炉内精錬された溶湯を出湯口を経て連続したインゴットケースに流し込み、凝固させ、1本が5 kgの重さのインゴットを造ることにある。ここでの管理項目は、 casting時の溶湯温度と casting速度（インゴットケースの送り速度）である。 casting温度が基準温度より高い場合は、炉内および桶中で水素ガスの再吸収を受け、凝固過程でインゴットにガス気泡を発生させる原因になるので好ましくない。逆に、低い場合は溶湯が分配機（インゴットケースへの溶湯分配ドラム）内で固まりだして、 casting不能となる。いずれにしても、 casting温度は地金の品質を造り込む上で最重要項目である。

casting速度は、凝固時間が品種によって異なる点と、凝固収縮率が品種によって異なるため、ケースからの脱型タイミングが違うという2点で、規定される。一般的には、一つの casting機で時間当り7～10トンのインゴットが固められる（図7参照）。

最近では casting機を2機同時に稼働させ、炉内の溶湯を2機の casting機に分けて出湯させることが多く行われている。これは、生産性向上の意義も大きいですが、1ロットが40～60トンのメタル容量の castingでは時間がかかるので、できる限り短時間に casting込んで組成の変動（MgやCaが減耗し易い）、ガスの再吸収によるガス含有量の増大を避けることにより、ロット内の品質ばらつきを抑え込む上でも重要な意味あいがある。

1本が5 kgのインゴットを井桁に積み上げ、台脚用の足インゴットを組合わせて梱包し、品種名等客先指定の表示を行った後、最終工程で外観検査および出荷分析検査を行い、手配に従って出荷または倉庫入れされる（図8参照）。

図7 インゴットケースから脱型され、積上機まで冷却されながら運ばれるアルミニウムインゴット

図 8 最終検査を経て出荷される製品インゴット
(写真は、100本で1 梱包となり、重量は500 kg のもの)

7. 品質管理と技術開発

二次合金地金の製造では微量成分を含め、主要成分を組成規格に合致させるための成分管理と溶湯の温度管理が最も重要な品質管理項目といえる。しかし、最近の鋳物用アルミニウム合金においては、地金の内部品質についても介在物量およびガス含有量の低い地金が要求されており、それらの品質の造り込みのために、以下に述べる処理と品質管理が行われる。

まず、介在物除去については、铸造中に桶にセットしたセラミックフィルタまたはガラスフィルタによって、溶湯中の異物・介在物の除去を行う。地金中の介在物量に関する品質評価法は、一般にフィルタ通過後の溶湯をサンプリングして K モールドに铸造し、そのサンプル中の介在物欠点数により、溶湯の清浄性を評価する方法を適用している⁶⁾。

また、地金のガス含有量を低く抑えた造り込みは、先に述べたような脱ガス処理によるものであるが、ガス含有量の品質評価法としては、減圧凝固法またはテレガスによるガス量測定法がある。ただし、減圧凝固法は限度見本との照合による等級評価法であるので、精度に関しては若干ラフである。ランズレー式ガス分析法は、古典的なガス量評価法の一つであるが、結果が出るまでの時間が長すぎるので、ごくまれな場合を除き、合否判定には用いられていない。

二次合金地金の多くの用途は自動車部品であるが、たとえば、シリンダヘッド、インテークマニホールドの铸造では徐冷部の引け巣発生が問題となるため、引け特性のよい(耐圧性の優れた特性を有する)地金が必要とな

る。そのために、二次合金メーカーでは、溶湯のきめ細かい管理を行っている⁷⁾。さらに、溶湯の評価手段として、示差熱分析をマイコン装置で行う方法も開発されている。

新合金の開発については、要求特性に影響を及ぼす成分について水準数をいくつか設定しておき、試作試験を行い、熱処理をも含めて機械的特性を評価していく。最終的に需要家との間で設定される規格は、経済性も加味した上で決められる。なお、新合金の開発の際、耐食性についても重要な特性値の一つとして評価することを忘れてはならない。

最近では自動車産業を中心に、アルミニウム合金の採用、VA による一次合金から二次合金への転換の動きが活発であることから、二次合金地金の需要は年率 4～5 % の勢いで伸びており、今後さらにアルミニウムリサイクル推進のブームに乗って、各産業分野でますます増えていくものと考えられる。

アルミニウムリサイクリングで最も障害となるのは、アルミニウム屑に混入する鉄である。前処理工程で、どんなに鉄除去に努めても 100% 取り除くことはできず、何らかの量の鉄が溶解工程で溶湯中に溶け込み、Fe 組成が高くなる。鋳物用合金地金では、Fe が低いほど品質は高いのであるが、Fe が不可避的に高くなった溶湯では、凝固組織中に、Al-Fe-Si 針状晶出物が現われるため、強度・伸びの低下、さらに機密を要求される部品では、圧洩れを起こす。この問題に対しては、現在、種々の研究が行われている。

8. おわりに

二次合金業が細々とした粗メタル製造業からスタートして、昭和39年の10万トンを超えた頃から、昭和62年の100万トンに到達した間の生産量の増加率は年10%という急激な伸びを示している。かくも二次合金生産量の飛躍的な伸びが見られたのは、需要家の要望する地金の品質とコストを追求することをモットーに、品質管理の導入による JIS マーク表示に関する認可審査に代表されるように、積極的な生産管理の姿勢があったからである。

国内で、アルミニウム一次製錬が、わずか日本軽金属蒲原製造所を残すだけとなった今日、合金地金は二次製錬が、すでに主導権を握っており、各企業とも、西暦2000年を展望した二次合金製造プラントを建設する気運が高まりつつある。恐らく、5～10年後には、徐々に溶解現場から作業者がいなくなり、クーラの効いた部屋から、溶解作業をオペレートするような工場が出現してくることであろう。そのときには、この職場は、昔は 3K の代表のようにいわれていたものだったと、懐かしい思い出話となることを夢みて著者も頑張りたい。最後に、

本記事が現場的内容に片寄ってしまったことを御容赦願いたい。

参 考 文 献

- 1) 非鉄金属の需給：資源統計年報，通産省（1991），6.
- 2) アルミ缶リサイクル協会発行資料による（平成2年度）
- 3) 米国アルミニウムくず（ISRI）規格表（昭和63年9月1日改正），日本アルミニウム合金協会
- 4) 大信洋行50年史による（昭和35年発刊）
- 5) 梅原茂雄：AI-ある，8（1991），10.
- 6) 「K モールド試験法」（実用新案 昭52-17449）
- 7) 「耐圧性に優れた鋳物用アルミニウム合金」（公開特許公報，No. 平1-156446）