

アルミニウム材料の循環利用における問題点

Basic Problems in Recycling of Aluminum Materials

増子 昇*・原 善四郎*・石田 洋一*

Noboru MASUKO, Zenshiro HARA and Yoichi ISHIDA

われわれは金属材料の省資源技術の一環として、アルミニウム材料の循環利用技術のための基礎研究を行っている。ここではアルミニウム材料の需給の現状を述べ、将来予測として再生二次地金への依存率の上昇に伴う技術上の問題点を論じた。特にわれわれの研究が狙いとしている再生二次地金を展伸材に利用することを想定した際の鉄不純物増加への技術的対応の意義を解説する。

1. アルミニウム材料における省資源

アルミニウム材料は1960年に銅を抜いて鉄に次ぐ大量消費金属材料となった。材料代替を支配する原理は第1に性能(performance)、第2に価格(cost)である。他の材料との競合に勝って需要をのびてきた背景には、大量生産技術の革新による価格の低下と材料技術の進歩による性能の向上がある。

アルミニウムの資源工学的な特長は原料ボーキサイトに関しては100年の単位で枯渇の心配のないかわりに製錬に大量のエネルギーを必要とすることである。表1に数種の金属について鉱石から新地金を1トン製造する場合のエネルギー所要量と屑の再生による二次地金生産のエネルギー所要量との比較を引用した¹⁾。

金属材料の循環は省資源はもとより省エネルギーの観点からも有利であり、マグネシウム、アルミニウムで特に省エネルギーの効果が大きい。

省エネルギーとアルミニウムというテーマに対しては通常次の三通りの側面が考えられる。第1はアルミニウムの製錬には電力という良質のエネルギーを多量に必要とする。第2はアルミニウムは建築・輸送・食品流通などの諸分野の省エネルギー化に貢献しうる材料である。第3は再溶解に要するエネルギーが少ないので、循環利用の比率を上げることで製錬による高エネルギー消費の欠点を補える。

このようなことを総合してアルミニウムの循環利用のための技術の発展が省資源のための生産技術にとって一つの重要な課題であることが理解される。

2. わが国のアルミニウム需給構造

現在わが国におけるアルミニウム材料の需給が数量的にどのような状況にあるのかを図1および図2に示した。これらの図は日本アルミニウム連盟の資料および津村の著書²⁾の資料をもとに筆者が作成したものである。ここ数年は需給の変動の波が大きかったので、昭和49年から昭和52年の4年間の統計データを年平均に直したのち丸めた数字にしてある。

国内産107トン、輸入40万トンの合計147万トンの新地金に対して屑原料出の二次地金29万トンが使用され全体で176万トンが市場に出ている。

電線用には純度99.45%以上のEC合金(0.02B)が用いられる。押出材としては6063合金*(0.4Si, 0.7Mg)が主に用いられる。アルミニウム展伸材消費量の約60%がこの合金である。圧延加工による板材としては1100合金(Al>99.0), 1050合金(Al>99.5), などの工業用純アルミニウム, 3004合金(1.2Mn, 1.0Mg:アルミ缶の胴材)などのAl-Mn合金, 5052合金(2.5Mg, 0.25Cr), 5082合金(4.5Mg)などのAl-Mg合金が主に使用されている。

表1 二次地金製造のエネルギー比較

	製錬エネルギー* (GJ/ton)	再生エネルギー** (GJ/ton)
マグネシウム	372	10
アルミニウム	253	13
ニッケル	150	16
銅	116	19
亜鉛	68	19
鉄鋼	33	14
鉛	28	10

* 鉱石から新地金を製造するのに要するエネルギー

** 屑材から二次地金を製造するのに要するエネルギー

*合金番号はAluminum Association (USA) のAA規格で示してある。0.4SiはSiの0.4%添加を意味する。

* 東京大学生産技術研究所 第4部

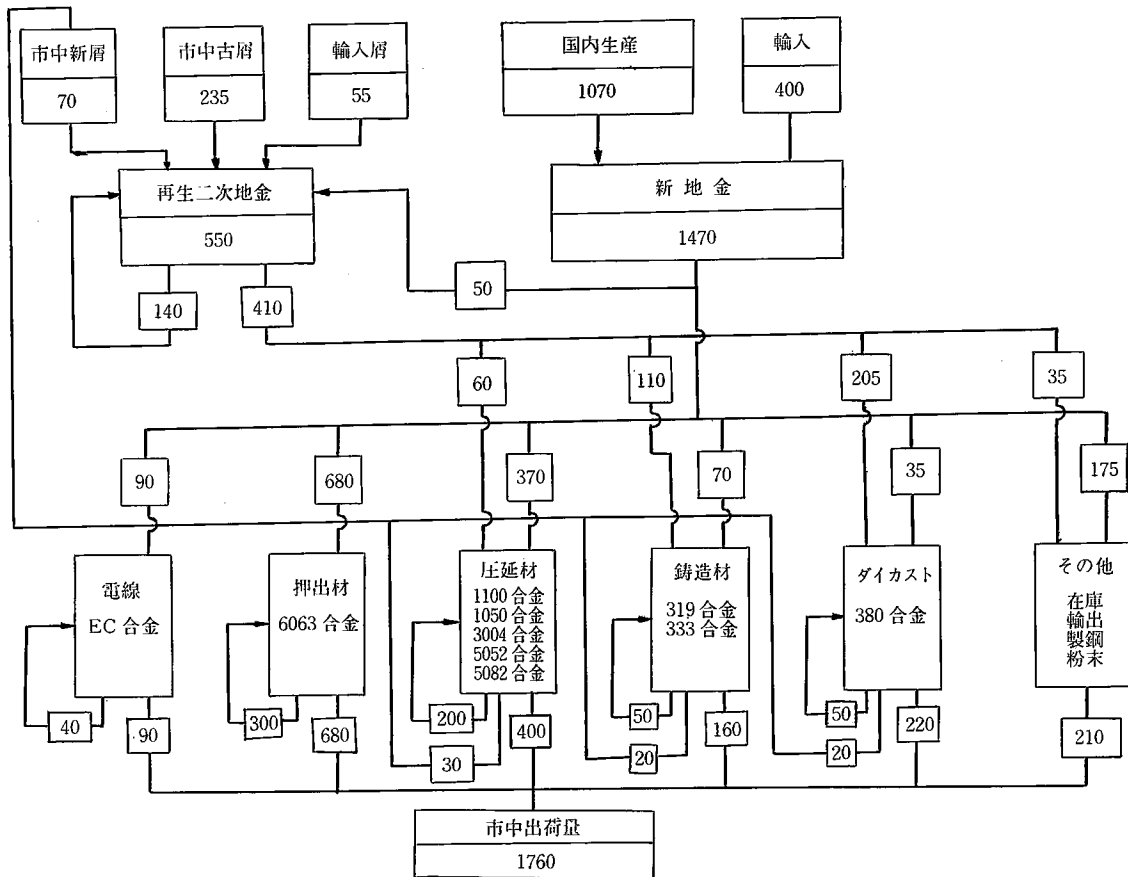


図1 わが国のアルミニウム材料の生産構造 (単位 10^3 ton/年)
昭和49年～昭和52年平均

鋳物用合金としては 319 合金 (3.5Cu, 6Si), 333 合金 (3.5Cu, 9Si), ダイカスト用としては 380 合金 (3Cu, 8.5Si) などの Al-Si-Cu 合金がもっとも広く用いられている。現在二次地金の主な用途は鋳造材料である。

3. 循環利用技術の問題点

材料の再生循環利用に当たってアルミニウムが他の金属と大きく異なる点は、屑を新地金の製錬工程の中間段階に戻すことが不可能であるということである。銅合金や鋼材などでは屑の純度の程度に応じて素材製造の種々の工程に戻すことができ、新地金と同時に不純物除去の工程を通すことができるのに対し、アルミニウムは全く別の再生工程をもたなければならない。

このことに関連して再生二次地金の品質が次に大きな問題となる。アルミニウムはきわめて活性な金属であるので屑中の不純物を酸化製錬によって除去することは困難である。アルミニウムを酸化させずに不純物のみを酸化除去できる元素は Mg, Ca, Na などに限られる。

現在地金再生のためにとりうる技術は新地金による不純物の希釈を基本としたブレンド技術ということになる。迅速化学分析と組み合わせたコンピュータ制御という方向が考えられる。図1, 図2に示されるように再生地金製造のために必要な純地金消費が約5万トンに達している。

市中に出荷された材料はそれぞれの使用分野に特定の寿命を経たのち、一定の遅れ時間をもって循環材のための潜在資源となる。図2はアルミニウムの資源循環をダイナミック分析のための Chapman⁴⁾ のモデルに合うように作図したもので、Gameren⁵⁾ が最近オランダにおけるアルミニウム需給の将来予測をこのモデルに基づいて行っている。

図1および図2からみて現状からの延長上にあるもっとも主要な問題は二次地金からのマグネシウム除去技術である。現在市中に出荷される展伸材の平均 Mg 含有量は約 0.7% であるが、二次地金として Al-Si-Cu 系の鋳造材になる場合は Mg を 0.3% 以下に下げなければならない。これは Si を主成分とする鋳造品では Mg は

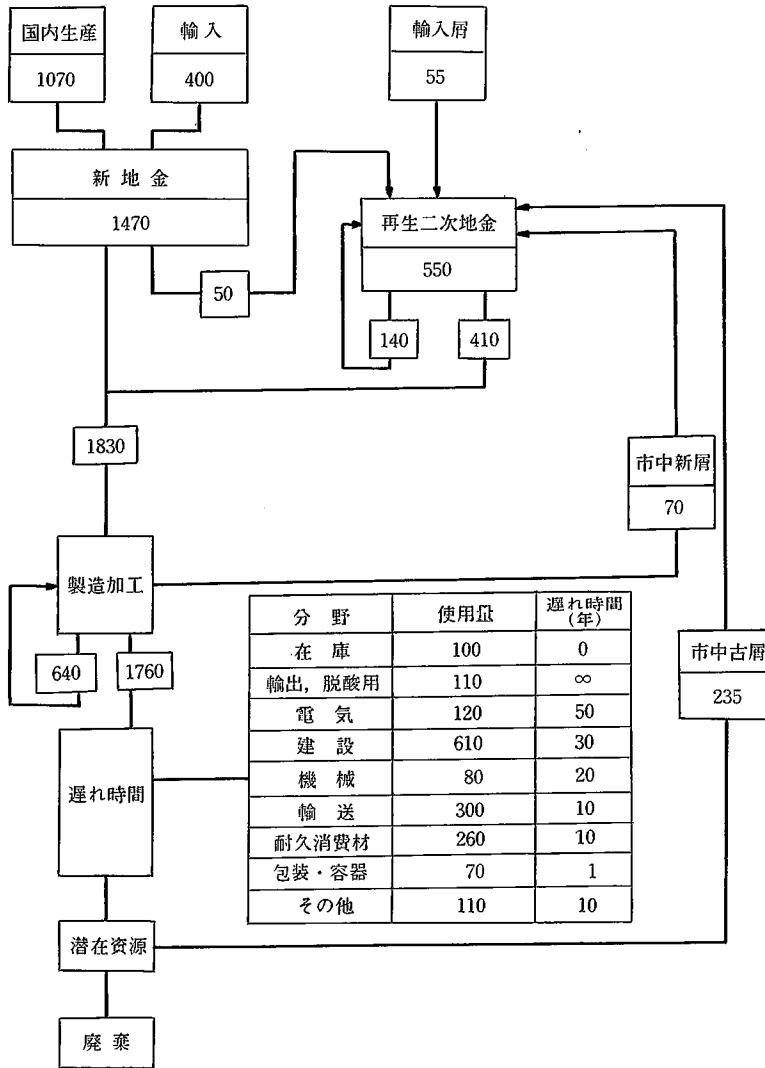


図2 アルミニウム材料の消費構造(単位 10³ ton/年)

Mg₂Si 化合物を形成して靱性の低下, 寸法変化の原因となるからである。

通産省の産業構造審議会が昭和49年に出した報告では昭和60年のアルミニウム需要は350万トンに伸びるとなっている。現状から推測してこのような倍増の達成する時期は昭和60年より先になると思われるが, このような場合の需給バランスを考えると潜在資源からの再生循環利用率の上昇とともに二次地金の展伸材としての利用を考えなくてはいけなくなる。

このような状況で技術上の問題点となるのは二次地金の中の不純物挙動である。表2に主要な混入経路と特に問題となる不純物の種類を引用した³⁾屑原料に起因するものとしては前述のようにMgが最も主要な元素であるが, 合金成分以外で回収, 溶解の工程で混入するものと

表2 二次地金中の不純物混入経路

混入経路	不純物の種類
1. 屑原料中の合金成分	Mg, Cu, Si, Zn, Mn, Ni, Ti
2. 合金配合原料	Fe, Ca, Ti, S
3. 屑材に付着, 混合した異物	Cu, Zn, Sn (銅合金, 亜鉛合金, 錫箔など) Fe (鉄ボルトなど)
4. 溶解工程	Fe, Si, (取鍋, 耐火物) H ₂ , O ₂ , N ₂ (大気) Ca, Na, K (フラックス)

してはFe, Sn, などが問題となる。

4. 循環材料中の不純物としてのFeの挙動

比較的汚染の少ない潜在資源を再生して鑄造用の二次地金とする場合には不純物としてのFeの挙動はあまり問題とならず、二次地金規格でも上限を0.9%まで上げている。耐食性の面で特に問題がある場合にはFeを下げた材料が必要となるが、使用状況に適した耐食試験法は必ずしも整備されていない。

循環材としての利用率を上昇させるとともに展伸材への利用を考えてゆく場合には、前述のようにFe, Snの挙動が特に注目される。成分調整時の希釈材としての新地金の使用の面からも、また再生地金の加工性、耐食性の面からもアルミニウム材料中の鉄の挙動に関してより多くの情報が必要である。

Mondolfoの集録を中心に現在知られている鉄の挙動の概略をのべる。工業用純アルミニウムの主要不純物はFe (0.04~0.2%) およびSi (0.02~0.1%) であり、通常FeはSiの2~3倍の量含まれる。

Fe-Al二元系状態図では655°Cに共晶点 (Fe~1.8%) をもち、Feの溶解限度は約0.04%となっている。共晶組成は α 相とFeAl₃相とから成る。通常材料では必ずSiを含んでいるので微量のFeの場合の析出相はAlFeSiの三元化合物となる。400°Cでの鉄の固溶限は0.00%まで下がる。急冷すると8%程度までFeを強制固溶できる。高Fe組成でもスプラット冷却材などでは高温加工性は良い。

通常材料の性質はAlFeSi, FeAl₃の析出相の寸法と分散度によって大きく左右される。強制固溶材に対して適切な加工や熱処理を行うと分散性の良い析出相を得ることができる。Feの多い材料は再結晶時の粒成長が抑えられ再結晶温度も増加する。材料の機械的強度や加工性の向上にとってFeは良い結果をもたらすことが多く、材料製造技術上はFeは有効合金元素として取り扱える。

もっとも難点となるのは耐食性の阻害と表面処理への障害である。高Fe材は高温水中の腐食、水蒸気腐食などではあまり問題は生じないとされている。耐熱目的の鋼材被覆としても使用できる。常温水溶液環境ではFeAl₃の析出を原因とする粒界腐食や析出物の周辺を起点とする孔食の原因となる。水道水に対する孔食発生確率はFe量と共に上昇する。

鑄造時の偏析などを原因とする大きな析出相の存在は陽極酸化などの表面処理加工時に加工ムラなどの障害の原因となる。

酸化物分散焼結アルミニウム合金 (通称SAP) の原料

粉末としてはFeはあまり悪影響を示さない。特に水蒸気腐食、高温腐食に対しては害がない。Cu, Znはこの場合耐食性を悪くする。

現在の新地金を中心とするアルミニウム材料技術の中では、たとえばFeのような不純物の挙動についての系統的でかつ基礎的なデータは必ずしも十分でない。これからの循環材の利用範囲の拡大にあってはぜひこのあたりの情報を整備する必要がある。そのための狙いとしては次のようないくつかの状況を考え、それぞれ目的を絞った基礎研究を積み重ねる必要がある。

まず第1にFeの高濃度を合金元素として必要とするような特殊合金用途を開拓する。現在ではFeを3%まで含む軸受合金などがある。

第2に急速冷却などの手法と加工法の工夫によってFeを有効合金元素とする処理法を考える必要がある。

第3に粉末焼結法などを改良して高Fe材の積極的な利用を考える。

第4に耐食性評価の手法を確立して、用途別、環境別に応じてFeの許容限度を使い分ける技術を生み出す。いたずらに腐食を恐れて過剰品質に走ることを避ける。高温用途などへの利用も含まれる。

第5に合金元素添加もしくは適切な環境処理技術と組み合わせることで高Feの害を防止することを考える。

これらはいずれもきめ細かに材質と用途の選別を行うことで、むしろFeのもつ利点を活用してゆく方向を考えるとということである。基本にはアルミニウム材の特質としてブレンド技術による材料管理を想定し、その目的のために今から有用な基礎データを蓄積してゆくことを狙いとしている。

本省資源研究の中でわれわれのグループが手がけている研究もこれらの五つの狙いをそれぞれ分担している。

(1980年1月16日受理)

- 1) J. J. Moore: Recycling of Nonferrous Metals, Int. Met. Reviews, (1978) No.5, 241~264
- 2) 増子昇: 資源循環利用におけるアルミニウムの位置づけ, アルミニウム (1979), No.5, 1~6
- 3) 津村善重: アルミニウム合金 (1976) 金属通信社
- 4) P. F. Chapman: Energy Conservation and Recycling of Copper and Aluminum, Metals and Materials, 8 (1974), June 311~319
- 5) A. van Gameren: Aluminium Recycling Math Model, Metals and Materials, 12 (1978), May 42~46
- 6) L. F. Mondolfo: Aluminum Alloys, (1976), Butterworths