

1310 アルミニウム合金製鉄道車両のリサイクルの現状と課題について

Present Status and Problems to be Solved on the Recycling of Aluminum Rolling Stock

正 [機] ○原 純 (日軽金)

Jyun HARA, Nippon Light Metal 2-2-20, Higashishinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo

About 40 years have passed since the first aluminum rolling stock was built. In the meantime about 12,700 aluminum cars were produced for run, while in recent 5 years, the annual production is about 600 aluminum cars.

There has been none of corrosion-attributable disused aluminum cars owing to its anti-corrosion feature, but due to obsolescence of overall performance, the disuse of aluminum cars has begun, though small in number. In this paper the development of recycling of aluminum rolling stock made in these ten years is reviewed, and consideration is made on problems to be solved for future recycling.

Keyword; aluminum, rolling stock, recycling

1. はじめに

1962 (昭和 37) 年に、アルミニウム合金製鉄道車両 (以下「アルミ車両」という) が開発されて以来、今日までに約 12,700 両が生産され、旅客電車約 4 万数千両の約四分の一を占めるに至った。在来線車両の車両寿命は 40 年前後とされ、アルミ車両も初期のものは廃車の時期にきていると考えられる。新幹線車両のそれは 20 年前後と考えられ、一部に廃車が始まっている。本報告は、日本アルミニウム協会のアルミニウム車両委員会でこの 10 年来実施してきたアルミ車両のリサイクルに関する調査・研究結果¹⁾の概要と、これらから得られた知見による今後の課題について述べる。

2. アルミ車両の開発経緯

アルミ車両の開発経緯の概略を系譜的に分類すると、Table 1. の通りである。その特徴は、構造用アルミニウム合金の開発とその押出技術及び接合技術とが、それぞれの時代とともに強く関連し合っていることである。

Table 1. Development and classification of aluminum car lineage

| 世代 | 車体構造と接合技術 | 主な使用合金 | 形式数 |
|--------------------|-----------------------------------|----------------------------|------|
| 第 1 世代 ('62~'63) | 骨組みと板材によるボック組立。ミグミグスポット、リベットボルト。 | 5083(板・形) 6061(形) | 2 |
| 第 2 世代 ('64~'80) | 抵抗スポット溶接、全溶接構造。 | 5083(板・形) 7N01(形) | 約 20 |
| 第 2.5 世代 ('69~'92) | 抵抗スポット溶接、全溶接構造。(大型・高気密・高剛性。) | 5083(板・形) 7003, 7N01(形) | 約 15 |
| 第 3 世代 ('81~) | FSW 溶接、全溶接構造。(大型・高気密・高剛性。) | 6N01(形) 7N01(形) | 約 50 |
| 次世代 | モノアロイ化、FSW 溶接、全溶接構造。(大型・高気密・高剛性。) | 6N01(形) (6082(形)) | |

因みに、鉄道車両の車体は Fig. 1 に示すように、六面体から成り立つ。

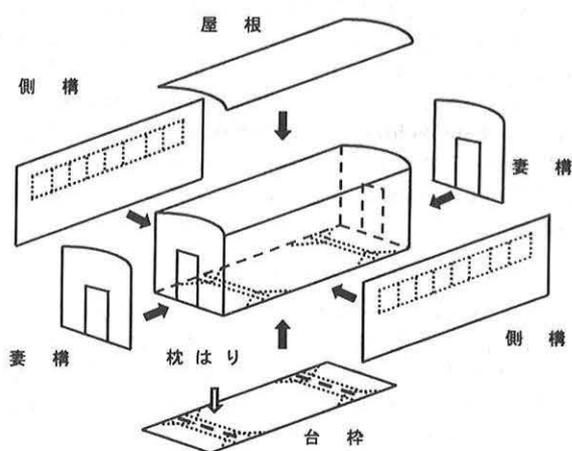


Fig. 1 Assembly model of carbody structure

Table 2. に、鉄道車両に主に使用されるアルミニウム合金例を示す。

Table 2. Main aluminum alloy for aluminum carbody structure

| 合金呼称 | 主たる添加成分 | 特徴 | 合金例 |
|--------|---------|---|------------|
| 5000 系 | Mg | Mg の添加量により、中程度から高い強度と優れた強度特性を持つ溶接性、耐食性も良い | 5083, 5052 |
| 6000 系 | Mg・Si | 強度・耐食性ともに良好、押出性に優れる | 6N01, 6061 |
| 7000 系 | Zn・Mg | Cu を含むものは高い強度を持つが、溶接性は劣る 含まないものは強度と共に溶接性に優れる | 7N01, 7003 |

2.1 第1世代:

1960年代当初の市販の構造材として、A5083の板・形材、A6061の形材を用い、ミグ・ミグスポット溶接によりブロックを組み、車体への最終組立にはリベットやボルトを使用した。

2.2 第2世代:

1960年代中期、溶接構造用A7N01合金が開発され、強度の必要な台枠等に形材として使用され、A5083合金の形材はその他の骨組みに、板材は外板に溶接使用された。同時期に抵抗スポット溶接が導入され、これ以降は全溶接構造が可能となった。

2.3 第2.5世代:

1970年代に入って、押出性を改善した7003合金が開発され、広幅・中実の大型形材が可能となった。これにより、高気密・高剛性・大型車体が要求される新幹線車両への採用も可能となった。

2.4 第3世代:

1980年代始め、更に押出性の良い溶接構造用A6N01合金が開発され、大型広幅の中実・中空薄肉で軽量の形材が生産可能となった。この世代から車体構造が総て押出形材で構成される様になった。強度の必要な台枠の横はりや枕はり等には依然A7N01合金が使用された。

2.5 次世代:

1990年代前半、新幹線及び在来線の次世代車両の試作・試験が実施され、斬新な発想の下に各種の方式が比較された。結果として断面がトラス形の補強リブを有する中空押出形材(ダブルスキン・タイプ)に依る、車体構造が主流となりつつある。接合方式に摩擦攪拌接合(FSW: Friction Stir Welding)が適用される。また、新幹線車両ではリサイクル性の向上の観点から、7000系に替わる高力6000系(A6083)合金によるモノアロイ化開発が推進される。

3. アルミ車両リサイクル調査経過

アルミ車両のリサイクル調査のために、リサイクル分科会が設置された1992年当時は、国内でのアルミ車両の廃車実績は殆どなかった。また、海外におけるアルミ車両のリサイクル例も調査の結果、その記録や情報は皆無に等しいことが判った。そこで先ず机上計算として、新幹線200系、札幌2000系、営団01系車両の内装材を取り除いた材料構成において、車体1両分をまとめて溶解して合金としたと仮定した合金化の試算²⁾を行った。

試算の結果は、7000系合金の使用割合の多い新幹線200系、札幌2000系車両については、特に亜鉛、マグネシウムの割合が高くなるので、この合金元素を有効に利用するには、ダイキャスト用合金のような規格の原料への再生に限定されることが判った。

しかし、営団01系車両については、鉄ねじ・鉄ねじ座等の鉄分の混入を防止すれば、マグネシウム・ケイ素を有効成分とする、押出用ビレット材としてのアルミニウム合金地金の原料として利用できることが判った。

3.1 営団地下鉄5000系車両のリサイクル調査例³⁾

1992(平成5)年に、営団地下鉄で最も古い5000系車両が、運用上の都合で廃車となり、廃車解体と併せてリサイクル調査研究のために、貴重な提供を受けることとなった。

リサイクル作業の体系的フローをFig.2に示す。解体方

法の実験のため、丸鋸・プラズマ切断機・ニブラー等により、解体効率、作業性、環境問題、合金別解体による回収合金の品位保持の方策等を検討した。

また、解体調査に当たっては、経年による耐食性や構体の変形・部材の強度変化等の調査についても同時に実施された。これら経年による影響調査からは、アルミ車両が長期間の使用に十分耐え得ることが確認された。

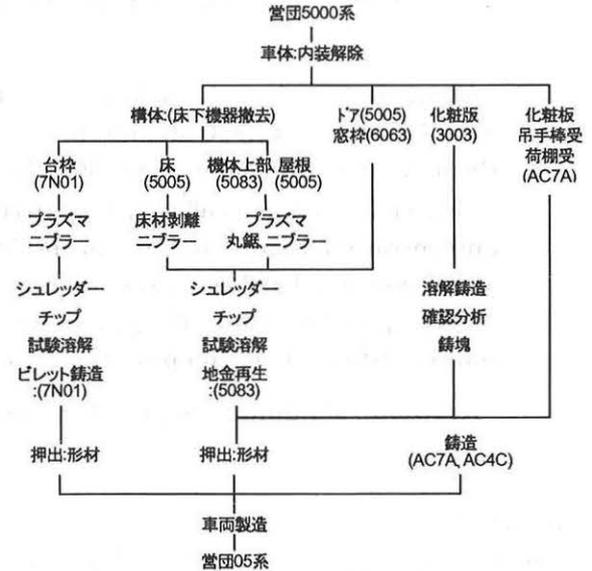


Fig. 2 Recycling flow of TRTA 5000 series

3.1.1 解体方法

○ プラズマ切断: 全てのアルミニウム合金材の切断ができ、効率よい作業ができる。

○ 丸鋸切断: 固定をしっかりとしないと、母材の形状が切断につれて変化し、切断する刃の部分が狭くなり、また、母材の厚さが変わると回転が不安定となり危険な状態となった。裏側に長桁や垂木がある部分では使えない。

○ ガス切断: 鋼材やステンレス材の切断には効率よく作業できたが、アルミニウム合金材の切断には向かないことが判った。

○ ニブラー解体: ニブラーの腕は、切断・つかむ(挟む)・引っ張る・ハンマーリング(振動を与える)・運ぶ(持ち上げる)・マグネットによる磁性金属と非磁性金属の選別等に、極めて柔軟かつ多機能的に利用出来ることを確認した。

○ 他材料との分離: 床材の詰物の分離は、側板と床板の分離後に、ニブラーによって、床材を掴み反転させてから振動を与えながら、床部を上から落下させることにより詰物を分離した。屋根材の屋根塗布材FRPは、シュレッダー等の工程の際に大半は粉体化して剥離した。

○ 断熱材(グラスウール、アンダーシール)の分離: プラズマ切断によっても、切断線の周辺の僅かな面積が剥離するに留まり、物理的な方法に依らなければ剥離しないことが判った。しかし、シュレッダーによる粉碎では、ほぼ完全に剥離することが判った。

○ アルミベースメラミン樹脂化粧板: 地金再生業者に持ち込み鑄物材にリサイクルした。

○ シュレッダー処理: 自動車廃車処理用シュレッダー・1500馬力を使用した。シュレッダー加工処理では、鉄、非鉄金属、ダストに3分類された。

3.1.2 リサイクル

押出用ビレット材へのリサイクルのため、床、構体上部、屋根を構成する 5000 系合金と台枠を構成する 7000 系合金の再生地金化を行なった。アルミニウム合金のリサイクル性における最大の特徴は、リサイクル上の技術的問題は殆ど解決されていることであり、また、成分元素の規格さえ満足すればほぼ 100%のスクラップ配合が可能であることである。

特に、スクラップに含まれる非金属介在物やガスについては、各種の溶湯処理によって健全な製品の製造が可能になる技術ならびに設備が開発され実用化されている。

本調査の解体スクラップからの押出用ビレット製造について、A5083 合金のスクラップを再生塊化の例では、スクラップ比率は 31%、新塊は 65%、添加元素としてのマグネシウムが 4%であった。更に、ビレット製造において受け入れ再生塊にたいし、新塊は 42%であった。従って、最終スクラップ比率は約 20%弱であった。

札幌 200 系車両についても 1997 年度に調査⁴⁾を行ったが、ほぼ同様な結果が得られた。

これらの調査結果から、合金毎のスクラップ分別回収により最終的に押出用ビレットへの再生が可能であることが判った。しかし、合金毎に分別回収する作業は、非常に工数を要して現実的でないことなどが明らかとなった。

3.2 JR 東日本 200 系新幹線車両のリサイクル調査例¹⁾

1997 (平成 9) 年から、200 系新幹線車両の廃車解体が行われている。廃車解体のフローを Fig. 3 に示す。

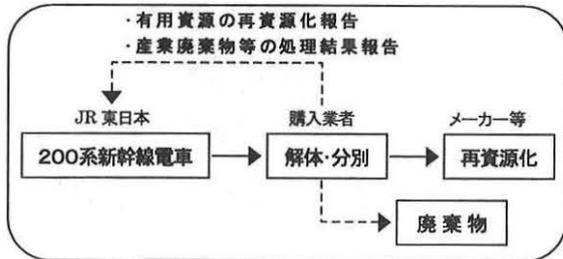


Fig. 3 Disuse process flow of JR EAST 200 series

売却された 200 系新幹線車両は、その購入業者が主体となり車両の解体、分別等を行い、有用資源の再資源化報告と産業廃棄物等の処理結果報告をする。解体作業後の部材等は、業者において分別後メーカー等で再資源化処理されており、現在その比率は、約 99.7%である。この中でアルミニウム合金スクラップが廃車解体で生じる部材等に占める割合は約 19%である。主な部材の処理内容を Table 3. に示す。

Table 3. Items of main materials on recycling

| 種別 | 処理内容 | 重量比 (%) | 備考 | |
|--------|----------------|---------|-----------------------|-------|
| 普通鋼屑 | 電炉メーカーへ売却 | 57.4 | 再資源化 処理内容 99.7% | |
| アルミ屑 | アルミメーカーへ売却 | 19.2 | | |
| 銅電線屑 | ナゲット処理後、銅山元へ売却 | 1.8 | | |
| 銅屑 | 銅山元へ売却 | 2.2 | | |
| 混合金属屑 | 選別作業し、各メーカーへ売却 | 6.8 | | |
| ステンレス屑 | ステンレスメーカーへ売却 | 3.8 | | |
| 油脂類 | 売却先で再生後、雑燃料化 | 0.4 | | |
| 蓄電池 | 売却先で再原料化 | 0.3 | | |
| フロン | 分解処理 | *- | | |
| その他 | RDF化 | 固形燃料 | | 発電用熱源 |
| | | スラグ | 路盤材 | 2.6 |
| | | 焼却灰 | 埋立 | 0.3 |
| | | | 産業廃棄物 処理 0.3% | |

3.3 制振材付加中空型材のシュレッター処理試験・調査

乗り心地向上のために、客室内における振動・騒音を軽減するために、車体を構成する押出型材には制振材が付加されている。リサイクルに際して、特に中空押出型材の中空部に付加された制振材が、シュレッター処理により十分に剥離・除去できるか否かの調査を、2003 (平成 15) 年に行った。実用部材と同形状・同仕様の供試材により、現在一般に廃車自動車のリサイクルを行っているシュレッター処理会社において実施した。

供試材は、Fig. 4 に示す断面を有する。当初シュレッター処理試験に当たり、制振材が型材中に巻き込まれて分離・剥離しないのではとの懸念があったが、試験の結果、制振材は十分に型材から分離・剥離されており、破碎されたアルミ型材のシュレッド・スクラップは、そのまま再生地金化が可能の状態であることが判った。

シュレッド・スクラップの状態を、Fig. 5 に示す。

発泡樹脂充填タイプ



制振樹脂充填タイプ

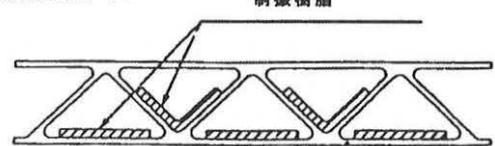


Fig. 4 Hollow section with anti-vibration material

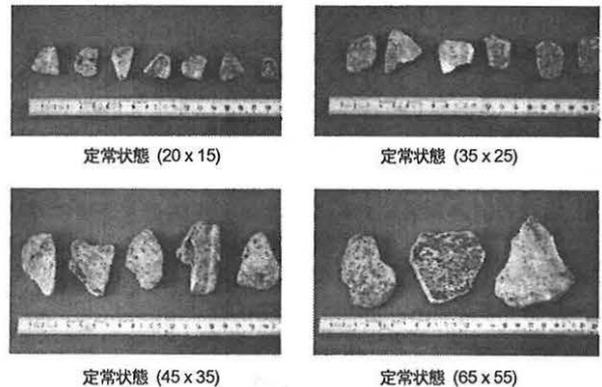


Fig. 5 Chips of shredded scraps

Table 4. にシュレッド・スクラップの分布状態を示す。長辺で約 25~45mm 程度のものが最も多かった。因みに、10~49mm のもので全体の約 85%を占める。

Table 4. Distribution of chips of shredded scraps

| 長辺 短辺 | 10 ~19 | 20 ~29 | 30 ~39 | 40 ~49 | 50 ~59 | 60 ~69 | 70 ~79 | 80 ~89 | 90 ~99 | 計 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 10~19 | 178 | 255 | 95 | 36 | 9 | 3 | | 1 | | 577 |
| 20~29 | | 117 | 174 | 100 | 25 | 8 | 1 | 2 | 1 | 428 |
| 30~39 | | | 42 | 91 | 36 | 6 | 7 | 1 | 2 | 185 |
| 40~49 | | | | 12 | 19 | 13 | 4 | 3 | 2 | 53 |
| 50~59 | | | | | 1 | 5 | 8 | 5 | 2 | 21 |
| 60~69 | | | | | | 3 | 4 | | 1 | 8 |
| 計 | 178 | 372 | 311 | 239 | 90 | 38 | 24 | 12 | 8 | 1,274 |

4. 調査・試験結果の知見と課題

アルミ車両のリサイクルについての議論は、過去に製作された、7000系合金を含む従来車両と、モノアロイ化が実施された対策車両とに分けて考える必要がある。

4.1 得られた知見

① アルミ車両の車体構造を構成するアルミ合金を、種別毎に分別回収を行えば、同一合金種別のピレット材への再生が可能である。しかし、合金種別毎の分別回収を実施するには非常に多くの工数を必要として現実的でない。

② 5000系合金或いは6000系合金スクラップ材中に、7000系合金が混在すると、再生地金の用途をダイキャスト合金等に限定させることとなる。

6000系合金スクラップ材中に若干量の5000系合金が存在しても添加元素上の問題は特段に生じない。Fig. 6に車体を構成する各種合金の質量割合の概略を示す。

③ 車体構造を一種類の合金、即ちモノアロイで構成できれば、再生時の回収作業は単純化され工数は低減できる。同時に、本来の合金ピレットに再生できる。

④ 鉄ねじ、鉄ねじ座の除去はかなり困難であり、鉄分の混入は再生地金の品位を低下させることとなるので、除去方法とともにねじ及びねじ座のアルミ化の開発・改善が必要である。なお、アルミニウム合金ねじ座の板厚がねじ径の1.5倍以上あれば、鉄ねじ座と同等の強度・耐久性を持つ。

⑤ 車体を構成するアルミ合金材に付加された塗料・制振材・断熱材等は、スクラップ溶解前に剥離・除去する必要がある。そのためには、シュレッダーによる破碎工程を通すことにより、現状技術において十分除去できることが判った。

⑥ 当初の解体調査においてリサイクル調査と同時にを行った、経年による耐食性や構体の変形や部材の強度変化の影響調査結果から、アルミ車両は十分長期間の使用に耐えることが判った。

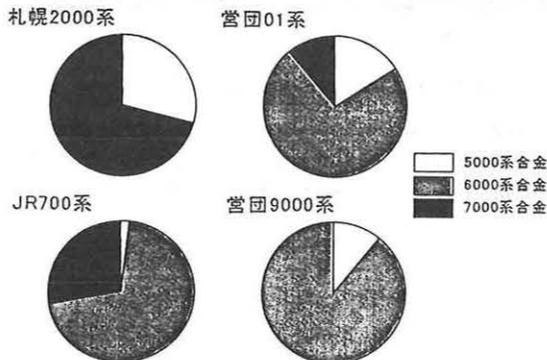


Fig. 6 Mass ratio of alloys consist of carbody structure

4.2 今後の課題

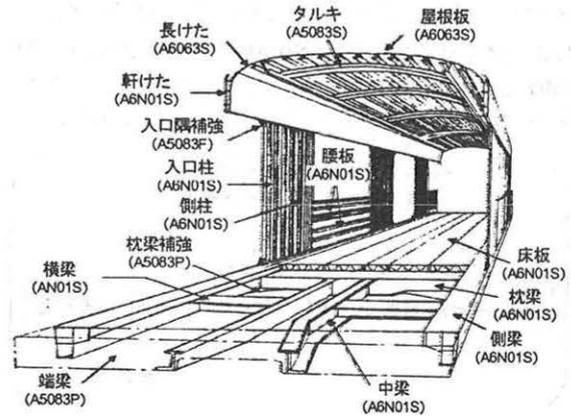
リサイクルにおける理想は、リサイクルにより元の製品に再生することである。しかし多くの従来車両は、5000系合金、6000系合金、7000系合金が混在しており、これらを分別回収することは非常に困難であることから、このままでは再生地金の用途を限定せざるを得ない。鉄ねじ、鉄ねじ座の混入も同様の結果を招く。

① モノアロイ化：アルミ車両に係る一連のリサイクル調査結果の成果として、最近の地下鉄車両では、同一合金種別による車体構造が実現している。Fig. 7に営団9000系車両の構体構造を示す。新幹線車両については、なお、枕はり等の特に強度を必要とする部分については現在でも7000系合金が使われており、モノアロイ化実現にはこれに替えるべき高力6000系(A6082)合金の実用化開発の推進が必要である。

② 鉄ねじ、鉄ねじ座のアルミ化：走行安全に直接関係しない部分については、鉄ねじ、鉄ねじ座のアルミ化の適用を前提に実用化開発の推進を図るべきである。

③ 内装部品のアルミ化：内装部品は軽量化のみでなく、リサイクル時の環境負荷低減の意味からもアルミ化の意義は大きい。

Fig. 7 Carbody structure of TRTA 9000 series



5. おわりに

本報告は、アルミ車両のリサイクルに際しての基本的な事項について、僅かな例ではあるが調査の結果得られた知見と、今後対処すべき課題を述べた。発生スクラップの予測²⁾では、年間数百トから多い年で2~3,000トとしているが、廃車の発生、解体処理、スクラップ(シュレッダー)処理、地金再生(溶解)等が行なわれる個所は、同一ではなく異なるのが一般と考えられる。これらの各作業において、最も効率的なハンドリングに配慮すべきである。

ここ当分は従来車両がリサイクルの対象である。廃車リサイクルに当たっては、事前に車体構造を十分に調査・確認して、資源の有効利用に少しでも寄与すべきである。

参考文献

- 1) 軽金属車両委員会：アルミニウム合金製車両リサイクルの現状と将来、2001年3月
- 2) 産業研究所：アルミニウム車両のリサイクルに関する調査研究、1993年4月
- 3) 軽金属協会：アルミニウム合金製車両 営団5453号車解体調査報告書、1994年6月
- 4) 軽金属協会：札幌市交通局地下鉄車両2000系解体調査報告書、1997年1月