

AZ91D マグネシウム合金インラインリサイクル技術

In-line Recycling Technology for AZ91D Magnesium Alloy

宮 下 英 明*
Hideaki MIYASHITA
望 月 祐 仁***
Yuji MOCHIZUKI

川 辺 剛*
Tsuyoshi KAWABE
夏 原 功 二***
Koji NATSUHARA

下 田 正 志**
Masashi SHIMODA

要 旨

ABSTRACT

AZ91Dマグネシウム合金製ダイカスト部品の製造時に発生するスクラップを、新塊同等の品質に再生処理し、その溶湯を鋳造工程へ連続的に供給可能とするインラインリサイクル技術とその設備を開発した。本技術により、従来の再生インゴット使用時に比べ、材料費および溶解費を約20%低減した。本技術は2009年モデル以降のV6エンジン用マグネシウム合金製ヘッドカバーおよびインテークマニホールドの製造へ適用している。

An in-line recycling technology and equipment for recycling scraps generated in the process of die casting AZ91D magnesium alloy parts have been developed. The new technology enables the scraps to be recycled at the same quality as primary alloy and the molten metal to be continuously supplied to the die casting process.

Material and melting costs have been reduced by approximately 20% compared to the use of conventional recycled ingots. The technology has been applied in the manufacture of magnesium head covers and intake manifolds for V6 engines from 2009 year models onwards.

1. ま え が き

近年、地球環境問題などから燃費改善のための車両軽量化は重要課題となっており、その対応手法として特に欧米を中心にマグネシウム合金を適用する動きが高まっている。Hondaにおいてはこれまで汎用マグネシウム合金を用いたエンジンヘッドカバーやステアリングホイール、V6エンジン用インテークマニホールド(以下インマニ)、耐熱マグネシウム合金を用いたオイルパンやマニュアルトランスミッションケースなどを量産化してきた。

一方、マグネシウム合金は活性度が高く、燃焼、酸化防止や耐食性確保のためにアルミニウム合金製部品に対しコ

スト高となり適用が限定されるケースが多く、適用拡大には低廉化が課題となっている。

アルミニウム合金製部品は鋳造時に発生する方案部、捨て打ち品、鋳造不良品といったスクラップの再利用がダイカストメーカーの社内で実施可能であるのに対し、マグネシウム合金の場合は一部メーカーで実施されているものの、大部分はノウハウを有する専業再生メーカーにスクラップ再生を委託しているのが実態である。その結果、スクラップおよび再生されたインゴットの運送費、再生処理費、インゴット成形費がアルミニウム合金製部品と比較してコストアップ要因の一つとなっている。

* 四輪R&Dセンター

** 本田金属技術株式会社

***株式会社メッツ

Table 1 Chemical components of AZ91D and effect of melting

		Chemical component (wt%)						
		Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Ni
AZ91D specification (ASTM B93)	Alloy	8.5 -9.5	0.45 -0.9	0.17 -0.40	0.05 Max	0.025 Max	0.004 Max	0.001 max
	Product	8.3 -9.7	0.35 -0.10	0.15 Min	0.10 Max	0.03 Max	0.005 Max	0.002 max
Scrap	Before melting	8.8	0.80	0.19	0.03	0.003	0.0049	0.0005
	After melting	8.8	0.80	0.18	0.03	0.003	0.0055	0.0005
Primary alloys	Before melting	9.1	0.82	0.23	0.03	0.003	0.0010	0.0005
	After melting	9.0	0.81	0.22	0.03	0.003	0.0015	0.0007

2. 開発のねらい

軽量マグネシウム合金製部品の適用を拡大するために、Fig. 1 に示すように AZ91D マグネシウム合金のスクラップ再生をダイカストメーカの社内で実施し、かつ、製造工程内へインライン化することにより部品製造コストの低廉化をはかることが今回のねらいであり、そのために以下の目標を設定した。

- (1) 方案を含むスクラップを新塊と同等品質に再生する技術を確立すること
- (2) 再生処理した溶湯を連続的に鑄造工程へ供給可能なインラインリサイクル設備を開発すること

3. 技術課題

Table 1 に示すように AZ91D 合金は耐食性確保のため、合金および製品中の Fe, Ni, Cu 量を厳しく規定している⁽¹⁾。これらの成分が溶解および鑄造過程においてどう変化するかを検証するため、AZ91D ダイカスト製品のスクラップと新塊を溶解し、横 55 mm × 縦 20 mm × 長さ 200 mm の板状テストピース金型に鑄込み、凝固させ、組織を比較することにより、スクラップ再生時の課題を抽出し

た。なお、溶解温度と鑄込みまでの保持時間は溶解および鑄造条件の平均値とした。

Table 1 に各々の溶解前後の成分組成を示す。スクラップ、新塊いずれも Ni, Cu については変化が見られないが、Fe が増加する傾向にある。製品規格上限に近い Fe 49 ppm のスクラップでは溶解後 Fe 55 ppm と製品規格値を越えるレベルとなった。これはマグネシウムに対する Fe の固溶限が 650℃を境に 1 ppm 以下から 30 ppm 以上に増加する⁽²⁾ことから溶解、保持の間になるつば中の Fe が溶湯内に溶出したものと考えられる。

テストピースの中央部を切断、研磨し、組織観察および耐食性評価した結果を Fig. 2 に示す。光学顕微鏡レベルでは差異の見られない析出物が、X線マイクロアナライザ (Electron Probe Micro-Analysis : EPMA) による分析をおこなうと新塊においては Al_6Mn であるのに対し、Fe 量の増加したスクラップでは $Al_8(Mn,Fe)_5$ の析出が見られ、耐食性の低下が確認された。 $Al_8(Mn,Fe)_5$ は Al_6Mn に比べマグネシウム母相との電位差が大きく、Fe 量増加に伴ってこの金属間化合物が析出し、耐食性が低下した⁽³⁾と考えられる。

また、テストピース中の含有ガス量について真空加熱融解一定容測圧法で、介在物量についてテストピース中央部を破断し、そこに観察される介在物の占有面積率で評価し

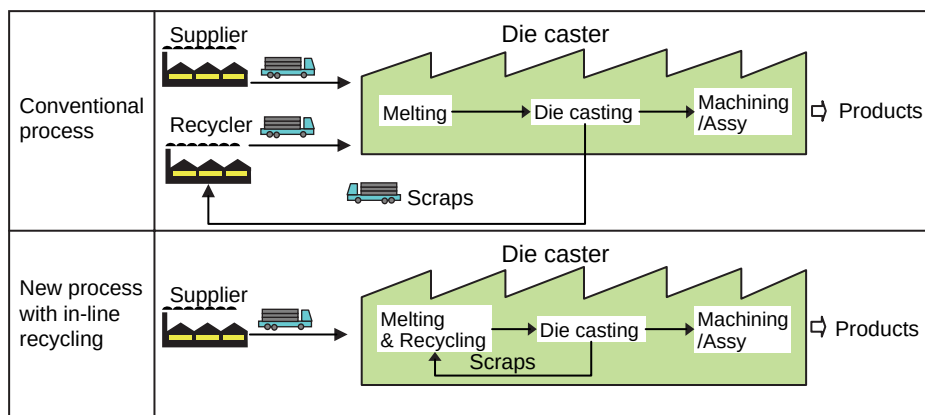


Fig. 1 Comparison of manufacturing process for AZ91D magnesium alloy parts

た結果、含有ガス、介在物のいずれも新塊に対し増加した。これはスクラップが鑄造時に巻き込んだガスや表面酸化膜を含んでいるためであり、これらを除去せずにそのまま鑄造した場合に鑄造品質や部品強度の低下が懸念される。

以上より、AZ91Dマグネシウム合金スクラップ再生における課題を以下のように設定した。

- ・Fe 量の低減
- ・含有ガスおよび介在物の除去

上記課題をクリアするため、サイクルタイム等の鑄造条件を変えること無く、新塊同等の品質に再生処理した溶湯を鑄造工程へ連続的に供給可能なインライン用リサイクル設備を開発することとした。

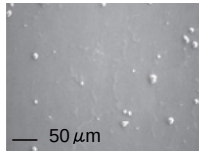
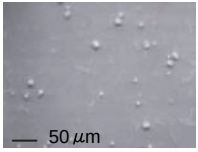
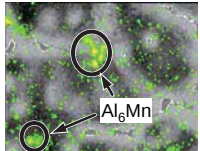
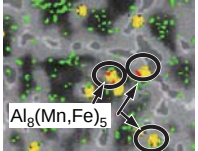
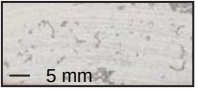
	After remelting of primary alloys	After remelting of scraps
Fe (ppm)	15	55
Organization		
Composition analysis (EPMA)		
Corrosion resistance (after 24 hr salt spray test)		

Fig. 2 Comparison of organization and corrosion resistance after remelting of AZ91D scraps and primary alloys

4. 再生技術の開発

4. 1. Fe 量の低減

Holta⁽⁴⁾らにより報告された、Mg-9%Al 合金溶湯中の Al-Mn-Fe 金属間化合物の挙動を Fig. 3 に示す。図中の L は液相、 $L + Al_6(Mn,Fe)_5$ は液相中に $Al_6(Mn,Fe)_5$ 金属間化合物が析出することを意味する。溶湯中の Fe 量が増加するほど $Al_6(Mn,Fe)_5$ の析出範囲が拡大する。これは 3 章で述べたように、Fe 量が増加したテストピースにおいて $Al_6(Mn,Fe)_5$ の析出が多く見られたことを裏付けるものである。一方、Fe 量が一定であっても Mn 量が増加、もしくは溶湯温度が下がることで、 $Al_6(Mn,Fe)_5$ もしくは $Al_6(Mn,Fe)$ が析出する。このことは Mn 量と溶湯温度を制御することで Al-Mn-Fe 金属間化合物を人為的に析出、沈降させ、Fe 量の低減が可能であることを意味する。溶湯温度 660 °C の場合 0.18% 以上、670 °C の場合 0.22% 以上の Mn 量を確保することで合

金規格上限である Fe 40 ppm を越えた場合に $Al_6(Mn,Fe)_5$ 金属間化合物を析出、沈降させ、Fe を低減することが可能である。

Mn 量を確保する手法として、通常は新塊製造時に用いられる Al-Mn 合金の添加があるが、インライン化には短時間での Mn 増量が必要であるため、Mn を適正量含む新塊を一定割合で混合することで対応した。

るつばからの Fe 溶出抑制および必要 Mn 量確保の観点から溶湯温度は低くしたいが、一方で新塊およびスクラップ中における Mn は $Al_6Mn/Al_6(Mn,Fe)$ 金属間化合物になっており、これらをロス無く溶解するには 660 °C 以上の温度が必要となる。

以上より、Mn 量と溶湯温度を制御することで、 $Al_6(Mn,Fe)_5Mn$ 金属間化合物を析出、沈降させ、Fe 量を低減することとした。

4. 2. 含有ガスおよび介在物の除去、低減

AZ91D 合金スクラップ中の含有ガスおよび介在物を除去する方法としてフラックス添加があるが、添加後に十分な沈静時間が必要であり、インライン化には不適である。そこで、Fig. 4⁽⁵⁾に示すように、フラックスを使用せず、アルゴンガスのバブリングにより溶湯中の含有ガスや介在物、酸

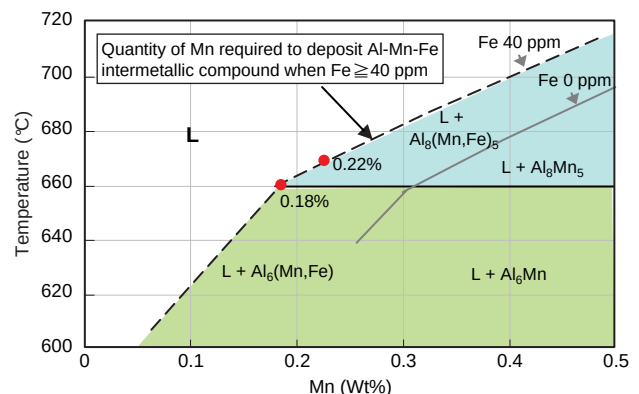


Fig. 3 Composition of Mg-9%Al-Fe-Mn alloy

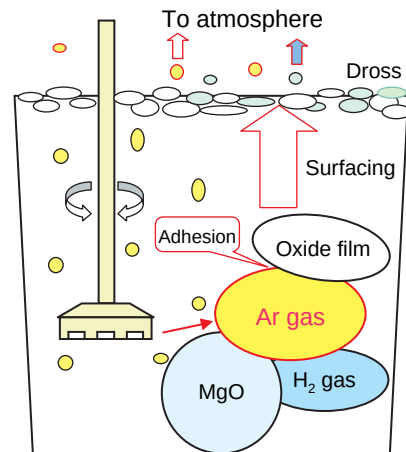


Fig. 4 Concept of reduction of gas/oxide in smelting process

化皮膜を浮上分離できる正逆反転式溶湯処理装置⁽⁶⁾を選定した。本装置はアルゴンガスを細かな気泡にして分散するシャフトおよびディスクが数秒ごとに正逆反転することで、溶湯表面のドロス巻き込みおよびつぼ底部の沈降スラッジの巻上げを抑制しながらアルゴンガスを溶湯中に均一に拡散させることが可能である。そのため、処理後の沈静時間が短縮でき、インライン化に適している。

4.3. インライン用リサイクル設備の開発

インライン化を実現するためにはサイクルタイム等の製造条件を変えることなく、Fe低減、含有ガスおよび介在物の除去を短時間で連続的にこなす必要がある。そのため、つばを三槽に分割し、溶解、精錬および沈静をおこなうインライン用リサイクル炉を開発した。バーナの熱量および配置を最適化し、溶湯温度を制御した第1槽に、新塊を混合してMn量を調整したスクラップを投入、溶解することで $Al_3(Mn,Fe)_5$ を析出、沈降させ、Feを低減する。第2槽

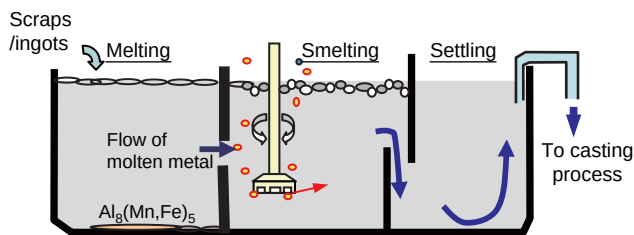


Fig. 5 Process of manufacture of AZ91D magnesium alloy parts with in-line recycling furnace divided into three rooms

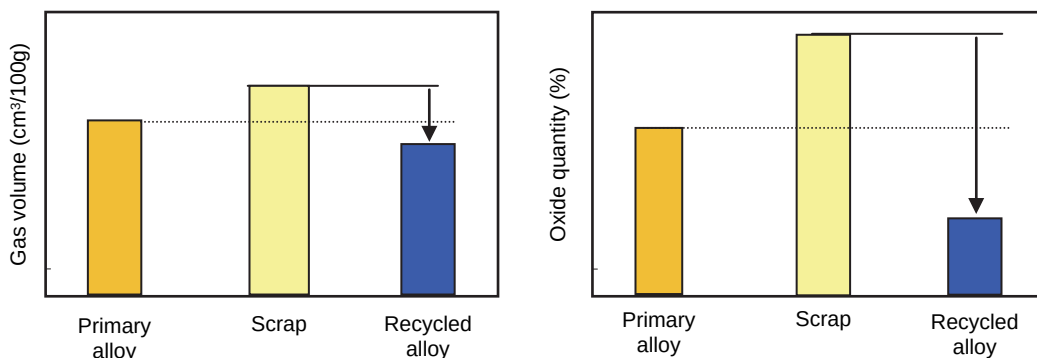


Fig. 6 Comparison of gas volume/oxide quantity after AZ91D in-line recycling

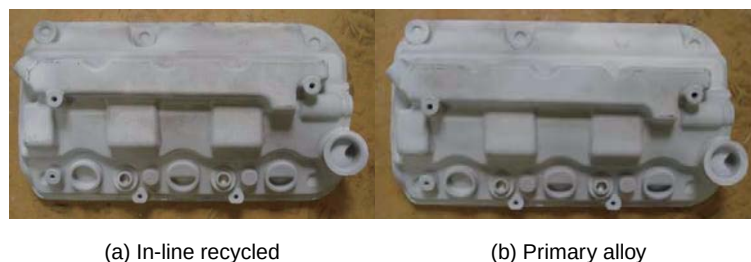


Fig. 7 Comparison of appearance of AZ91D magnesium front head cover for V6 engine

Table 2 Mn and Fe content in AZ91D after in-line recycling

Material		Mn (%)	Fe (ppm)
Before recycling	Primary alloy	0.234	10
	Scrap	0.204	36
After recycling	50% scrap/primary alloy	0.217	20

に正逆反転式溶湯処理装置を設置、ディスクの回転数および反転時間、アルゴンガスの流量を最適化し、アルゴンガスを溶湯中に均一に拡散することで含有ガスおよび介在物を浮上分離する。第3槽において溶湯処理時に巻き上げたスラッジを沈降させた後、再生溶湯を鋳造工程へ供給する。

この三槽分割型リサイクル炉をサイフォン管にてダイカストマシンの手元溶解炉と連結し、再生処理のインライン化を実現した(Fig. 5)。

4.4. 再生溶湯および製品品質

リサイクルに用いるスクラップは異物、異材の付着と混入を防止するため、製品方案部、捨て打ち品、鋳造区内不良品のみとし、スクラップの発生量と、Fe低減に必要とする新塊のMn量から混合比を規定した。

ヘッドカバーの鋳造にて発生したスクラップを50%混合し、再生処理した溶湯の品質を確認した例をTable 2およびFig. 6に示す。再生処理によりFe量は減少、また、含有ガスおよび介在物量のいずれも新塊同等以下に低減している。この再生溶湯をダイカストマシン手元溶解炉に給湯して鋳造した製品の外観をFig. 7に示す。再生材を鋳造し

た製品は新塊を用いて鋳造したものと外観品質は同等である。さらに、製品から切り出したテストピースによる強度確認結果を Fig. 8 に示す。平均強度は同等だが、ばらつきである $\pm 3\sigma$ の範囲が約 26% 減少しており、新塊同等以上に安定した品質であることを確認した。

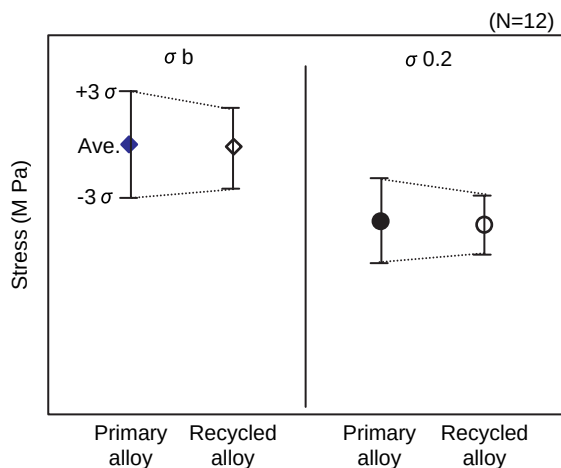


Fig. 8 Comparison of intensity of stress in test pieces taken from AZ91D magnesium front head covers

5. まとめ

AZ91D マグネシウム合金スクラップのリサイクル技術および本技術を反映したインライン用リサイクル炉を開発し、新塊同等品質を確保しつつ、従来の再生インゴット使用時より材料および溶解費を約 20% 低減した。同時に再生溶湯のインゴット化、再溶解、輸送工程を無くすことにより製造時 CO_2 を約 36% 低減した。本技術は 2009 年モデル以降の V6 エンジン用ヘッドカバーおよびインマニに適用した。

その技術内容は以下の通りである。

- (1) Mn 量および溶湯温度の制御による Fe 量の低減、正逆反転式溶湯処理装置による含有ガスおよび介在物の除去を施すことで AZ91D 合金スクラップを新塊同等品質に再生する技術を確認した。
- (2) るつぽを三槽に分割し、バーナ熱量および配置、溶湯処理条件の最適化により、鋳造条件を変更すること無く、短時間で再生処理した溶湯を連続的に鋳造工程に供給可能なインライン用リサイクル炉を開発した。

参考文献

- (1) マグネシウム技術便覧 日本マグネシウム協会編：カロス出版, p.313(2000)
- (2) マグネシウム技術便覧 日本マグネシウム協会編：カロス出版, p.81(2000)
- (3) 福崎昌宏, 田村洋介, 河野紀雄: AZ91 マグネシウム合金における腐食挙動とマイクロ組織の関係, 軽金属, 第 55 巻, 第 9 号, p.389-394(2005)
- (4) Holta, O., Westengen, H., Roen, J.: High Purity Magnesium Die Casting Alloys: Impact of Metallurgical Principles on Industrial Practice, Proceedings of the Third International Magnesium Conference, p.75-87(1996)
- (5) <http://www.j-imonon.com/column/daredemo/16.html>, 2008/12/22
- (6) <http://www.alumi-fukuoka.co.jp/shizunami/>, 2009/3/19

■著 者■



宮下 英明



川辺 剛



下田 正志



望月 祐仁



夏原 功二