

レーザ照射によるマグネシウム合金市中スクラップ表面の清浄化

水戸岡 豊*, 甲加 晃一*, 日野 実*
橋本 嘉昭**, 金谷 輝人***

*岡山県工業技術センター (〒701-1296 岡山県岡山市北区芳賀 5301)

**株式会社 STU (〒719-1102 岡山県総社市東阿曾 303-1)

***岡山理科大学 (〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町 1-1)

Surface Cleaning of Consumer Scrap Made of Magnesium Alloy by Laser Irradiation

MITOOKA Yutaka, KOUKA Kouichi, HINO Makoto, HASHIMOTO Yoshiaki, KANADANI Teruto

(Received March 21, 2012)

In order to establish the recycle system of consumer scrap made of magnesium alloy, laser irradiation on cylinder head cover has been studied. Now, most of consumer scraps made of magnesium alloy are discarded, since there is no method to remove adhesive materials on the surface. The area where adhesive materials removed under the appropriate laser irradiation conditions appears the clean surface. The casting materials recycled consumer scraps with laser irradiation show equal characteristics, compared with those recycled manufacture scraps. Furthermore, this recycling technology largely reduces quantity of CO₂ emissions and energy consumption in the magnesium alloy manufacturing.

Key words : magnesium alloy, recycle, consumer scrap, laser processing, life cycle inventory (LCI)

1. 緒 言

輸送機器産業では、排出二酸化炭素量削減のために部材の軽量化が強く望まれており、マグネシウム合金の適用が有効である¹⁾。しかしながら、マグネシウム合金の生産は、中国が寡占化しており、そのコストおよび供給は変動し、適用拡大の障害となっている。そのため、コスト低減および供給安定のためには、リサイクルシステムを構築する必要がある²⁾。

マグネシウム合金製品の製造工程を Fig. 1 に示す³⁾。リサイクルシステムが構築できた場合(図中太破線)、採掘、焼成、混合・粉碎、団鉱、還元および輸送の工程が省略され、排出二酸化炭素量およびエネルギー消費量が大幅に削減され、環境面からも重要といえる。

鉄やアルミニウムでは、すでにリサイクルシステムが構築されている。鉄の場合、1億tのうちおよそ3千万tがリサイクルによって生産されている⁴⁾。また、アルミニウムでは、市場に流通した使用済みのスクラップ(市中スクラップ)の70%以上が回収され、リサイクルされている⁵⁾。

他方、マグネシウムでは、製造工程で発生するスクラップ(加工スクラップまたは自家発生スクラップ)はリサイクルされているが、市中スクラップの大部分は廃棄されている⁶⁾。これは、表面に固着した有機物を中心とする付着物の影響である。マグネシウムは燃えやすいため、有機物が固着したまま大気中で溶解すると、マグネシウム

溶湯の爆発を誘引する恐れがある。また、溶解できたとしても、有機物はマグネシウム合金と比重が近く、比重差による分離が困難であるため、鋳造材の歩留、品質および耐食性を低下させる⁷⁾。

これらの問題を解決するためには、再溶解前に市中スクラップ表面を清浄化する必要がある。しかしながら、付着物が化学的に安定であることに加え、マグネシウムが非常に活性なことから、有効な清浄化方法は確立されておらず⁷⁾、マグネシウム合金製品の市中スクラップのリサイクルシステムが構築されていない。

本研究では、マグネシウム製品の市中スクラップのリサイクルシステムの構築を目的として、シリンダヘッドカバーを対象に、レーザ照射による表面の清浄化について検討した。照射条件による表面の清浄化状況、リサイクルして得られた鋳造材の化学成分および耐食性を調査した。また、本プロセスを用い、市中スクラップからマグネシウム合金がリサイクルできた場合の排出二酸化炭素量およびエネルギー消費量を算出し、リサイクルの有用性について検討した。

2. 実験方法

供試体は、使用済みのマグネシウム合金(AZ91D)製シリンダヘッドカバー(以下、シリンダヘッドカバー)とした。シリンダヘッドカバーは、表面全体に油が焼き付いた状態で回収される。

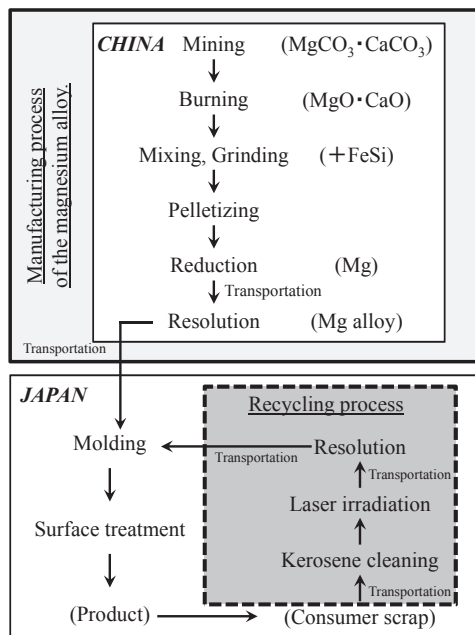


Fig. 1 Manufacturing process of the magnesium alloy product

Table 1 Laser irradiation conditions

Wavelength	1,064 nm
Focusing distance	411 mm
Spot diameter	300 μ m
Current	20 A
Frequency	5, 10, 15, 20 kHz
Scanning speed	500, 1,000, 1,500, 2,000 mm/s
Pitch interval	100 μ m
Shielding gas	None

シリンダヘッドカバーを灯油中で高周波バイブレータにて洗浄した後(灯油洗浄), Table 1 に示す条件でレーザ照射を行った。熱源としては, 最大出力 50 W の微細レーザ加工機(ミヤチテクノス(株)製 ML-7064A)を用いた。なお, レーザ光はガルバノミラーにより一定方向に走査し, その方向に対して直交に 0.1 mm 移動しながら走査を繰り返すことで, 所定の領域を加工した。

灯油洗浄後およびレーザ照射後のシリンダヘッドカバー表面の清浄化状態について, 表面および断面から電界放射型電子プローブマイクロアナライザ(日本電子(株)製 JXA-8500FS, 以下 FE-EPMA))を用いて, 観察および分析を行った。断面観察用の試料は, 機械研磨あるいはクロスセクションポリッシャ(日本電子(株)製 SM-09010)により作製した。

リサイクル性を評価するため, レーザ照射したシリンダヘッドカバー(50 kg)と新地金(50 kg)を 1:1 の割合で混合し, 溶解・精錬および鋳造を行った。なお, 溶解・精錬はフラックスを使用し, Ar ガスによるバブリングおよび 943 $\pm$ 2 K で 1.8 ks 沈静化を行った。

リサイクルして得られた再鋳造材について, 発光分光分析装置((株)島津製作所製 PDA-7000)による成分分析およ

び炭素硫黄同時分析装置((株)堀場製作所製 EMIA-920V)による残留炭素量測定を行った。さらに塩水噴霧試験(JIS Z 2371)による耐食性の評価を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 シリンダヘッドカバーの清浄化状況

回収されたままの, 灯油洗浄後およびレーザ照射後のシリンダヘッドカバーの外観写真を Fig. 2 に示す。灯油洗浄後では, 100 g 当たり約 1.5 g の重量が減少し, 表面は黒色から茶色へと変化するが, 表面の大部分に焼付油の残渣が目視で確認される。他方, レーザ照射後においては, 100 g 当たり約 1.2 g の重量が減少し, 表面全体が銀白色に変化した。

Table 2 には, レーザ照射条件における照射部表面の FE-EPMA による元素分析結果を示す。分析はプローブ径を 200 μ m とし, 各試料について, 5 点分析を行い, 平均値を分析結果とした。比較のため, 灯油洗浄および機械加工を行った表面の分析値も併記した。

灯油洗浄後の表面は, AZ91D 合金の主成分(マグネシウムおよびアルミニウム)に加え, 固着した有機物に起因する炭素, 多量の酸素, カルシウム, 硫黄, シリコンおよび塩素等が検出された。AZ91D 合金成分以外については, 表面処理, 油溶込物および腐食生成物等に由来する。

次に, 機械加工面では, マグネシウム, アルミニウム, 炭素および酸素が検出されるが, その他の元素は検出されなかった。4.80 mass% の炭素が検出されるが, FE-EPMA による分析では油回転ポンプに起因するコンタミとして炭素が検出される。

一方, レーザ照射後の表面では, 照射条件によって値は異なるものの, いずれの試料も固着した有機物に起因する炭素は大幅に減少し, 酸素も減少した。また, 走査速度が速く, 繰返し周波数が高い条件を除き, カルシウム, 硫黄, シリコンおよび塩素等は検出されず, 炭素量は機械加工面と同程度であることから, 固着した有機物を含む付着物は

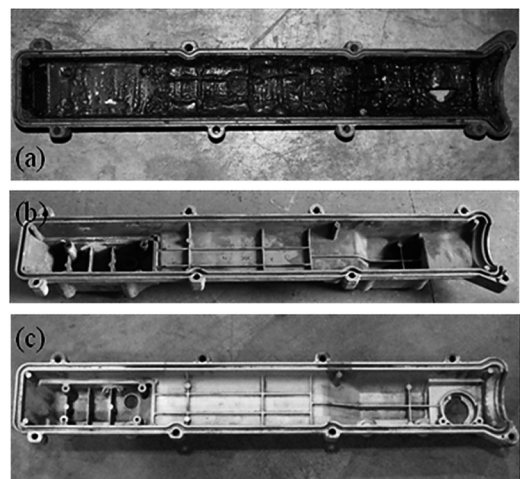


Fig. 2 Appearance of various cylinder head cover scraps made of AZ91D magnesium alloy: (a) Consumer scrap, (b) After kerosene cleaning, (c) After laser irradiation

Table 2 Chemical compositions of the laser irradiated specimens with various laser processing conditions (mass%)

Scanning speed (mm/s)	Oscillating frequency (kHz)	C	O	Mg	Al	Ca	S	Si	Cl	Others
500	5	4.71	19.39	67.59	8.32	—	—	—	—	—
	10	4.52	16.19	70.30	9.00	—	—	—	—	—
	15	3.95	15.80	71.01	9.24	—	—	—	—	—
	20	4.03	17.44	69.32	9.21	—	—	—	—	—
1,000	5	4.27	17.19	69.51	9.03	—	—	—	—	—
	10	4.27	16.90	70.23	8.61	—	—	—	—	—
	15	4.80	17.00	69.47	8.73	—	—	—	—	—
	20	5.61	18.84	68.20	7.35	—	—	—	—	—
1,500	5	5.64	18.00	68.17	8.20	—	—	—	—	—
	10	6.99	15.54	66.46	11.01	—	—	—	—	—
	15	13.24	18.73	55.53	12.29	0.21	—	—	—	—
	20	18.13	20.77	48.04	12.21	0.58	0.30	—	—	—
2,000	5	5.59	17.51	68.83	8.07	—	—	—	—	—
	10	9.88	15.10	62.15	12.86	—	—	—	—	—
	15	10.23	16.75	54.04	18.98	—	—	—	—	—
	20	13.29	15.43	50.11	20.61	0.32	—	0.25	—	—
Kerosene cleaning		39.91	40.45	10.92	3.04	3.05	1.11	0.51	0.54	0.45
Machining		4.80	5.51	78.61	10.99	—	—	—	—	—

除去されていると推定される。機械加工面と比較すると、酸素が増加するが、マグネシウム合金素地へレーザ照射した場合も同様の傾向にあることから、溶融—凝固に伴い、表面が酸化したものと推測している。

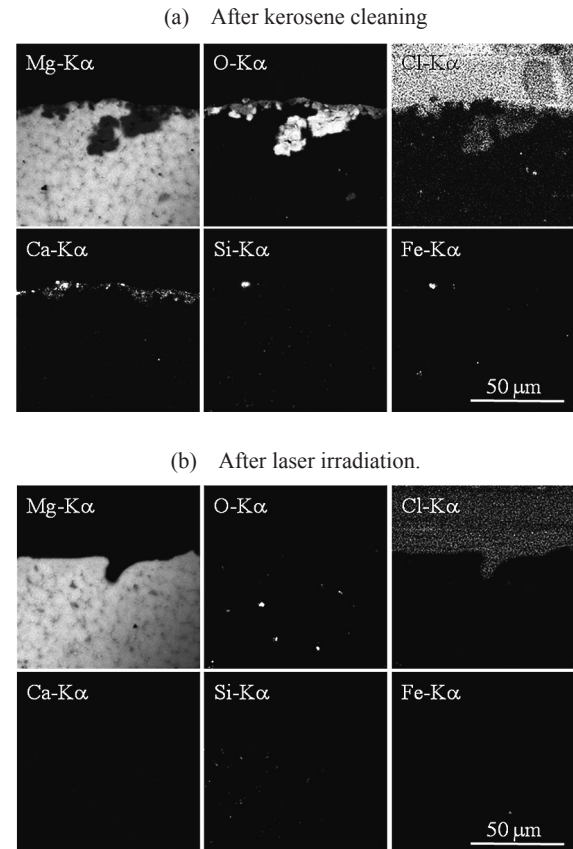
なお、走査速度が速い場合、単位面積当たりの照射量が低下し、有機物の除去能力が低下する。また、周波数の増加に伴う有機物の残存について、本実験に使用したQスイッチレーザ⁸⁾は、周波数の増加に伴い、1ショットあたりのピークパワーが低下するため、アブレーションの発生を低下させることに起因する。

Fig. 3 には、灯油洗浄後およびレーザ照射(走査速度: 1,500 mm/s, 繰返し周波数: 10 kHz)後のシリンダーヘッドカバーのFE-EPMAによる断面方向での反射電子像および元素マッピング結果を示す。

灯油洗浄した試料では、表面から20 μm 程度の酸素リッチ層が存在し、その層から塩素が確認された。このことから、酸素リッチ層は長期間の使用による腐食領域と考えられる。また、表層では、表面処理に対応するカルシウムおよびシリコン等が検出される。これらのことから、灯油洗浄では、軽微に付着した油は除去できるが、焼付油の他、腐食層および表面処理等は除去できないことが分かる。

一方、レーザ照射した試料については、灯油洗浄のそれに存在した酸素リッチ層が消失しており、レーザ照射によって、固着した有機物だけでなく腐食層および表面処理が除去できることを示唆している。

次に、比較的広い領域での断面観察結果を **Fig. 4** に示す。灯油洗浄後(レーザ未照射部)の表面近傍には不均一に分布

**Fig. 3** Cross-sectional backscattered electron images and X-ray maps obtained by FE-EPMA analysis.

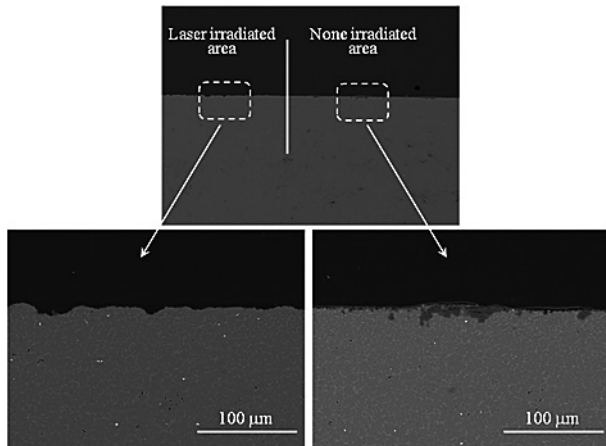


Fig. 4 Cross-sectional backscattered electron images of the magnesium scrap surface after laser irradiation

した黒い部位が観察され、これは Fig. 3 に示した腐食層に相当する。他方、レーザ照射部では、そのような黒い部位は認められず、部分的に凹の形成が見られた。この形状は腐食部位と類似しており、腐食部位が除去されたことが確認できる。比較のために、同様の条件で、マグネシウム合金素地へレーザ照射したが、表層は最大でも $2\text{ }\mu\text{m}$ 程度しか除去されなかった。このことから、腐食部位は積極的に除去されることがわかる。腐食部位には、Table 2 および Fig. 3 に示したように、カルシウム、硫黄、シリコンおよび塩素等が含まれている。これらの元素はコンタミとしてリサイクル時に悪影響を及ぼすことから、腐食部位の積極的な除去は、表面に固着した有機物の除去とともにリサイクルに対して有効に作用する。

しかしながら、腐食部が積極的に除去されるメカニズムの詳細は明らかではない。Q スイッチレーザは、パルス幅を短くし、その分ピークパワーの極めて高いレーザを発振させることができる。蓄えられたエネルギーが瞬時(数 ns ~ 100 ns)に放出され、そのピークパワーは、 10^6 から 10^{10} W/cm^2 に達することから、アブレーション加工が可能になる⁸⁾。そのため、水酸化物や水和物を含む腐食部では、水酸化物や水和物がアブレーションにより気化し、その体積膨張によって腐食部が吹き飛ばされることが考えられる。また、腐食部と金属表面ではレーザ光の吸収率が異なることから、これらも密接に関与していることが予想される。マグネシウム合金へのリン酸塩陽極酸化皮膜についても、Q スイッチパルス発振レーザを用いた場合、陽極酸化皮膜が素材よりも積極的に除去されることが判明している⁹⁾。今後、これらの結果も参考にメカニズムを明らかにする予定である。

3.2 リサイクルして得られた再溶解材の特性

灯油洗浄を施したシリンダーヘッドカバーは、爆発を回避するために、さらに表面を金ブラシで表面を粗削りした後、溶解を行った。他方、レーザ処理したシリンダーヘッドカバーは、表面の有機物が除去されているため、発火することなく容易に溶解することができる。

市中スクラップをレーザ照射した後、溶解・精錬および

Table 3 Chemical compositions of the remelting specimens and user specification (mass%) : (a) User specification, (b) Consumer scraps irradiated laser, (c) Processing scraps

	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni
(a)	8.5 -9.5	0.45 -9.0	0.17 -0.40	Below 0.05	Below 0.004	Below 0.025	Below 0.001
(b)	9.0	0.72	0.22	0.03	0	0.003	0.001
(c)	8.8	0.71	0.21	0.04	0.002	0.005	0.001

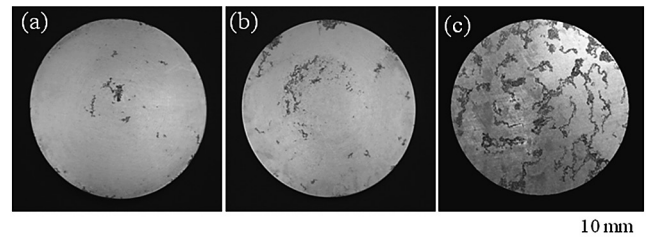


Fig. 5 Appearance of the various recycling specimens after salt spray tests for 48 hours. (a) Consumer scraps irradiated laser, (b) Manufacture scrap, (c) Consumer scraps cleaned Kerosene

铸造した再溶解材(レーザ照射による市中スクラップの再溶解材)について、材料組成を発光分光分析によって求めた結果を Table 3 に示す。比較のために、加工スクラップからの再溶解材の分析値ならびに再溶解材に対するユーザーの要求値を併記した。レーザ照射による市中スクラップ再溶解材は、アルミニウム、亜鉛、マンガン、シリコン、鉄、銅のいずれの成分も要求値を満足しており、加工スクラップからの再溶解材とほぼ同等値であることが確認できた。

また、金属中炭素硫黄同時分析装置による残留炭素量について、レーザ照射による市中スクラップ再溶解材および加工スクラップからの再溶解材は、それぞれ $0.00113\text{ wt\%}$ および $0.0010\text{ wt\%}$ であり、大差なかった。

Fig. 5 には、リサイクルして得られた各再溶解材に対する塩水噴霧試験 48 時間後の外観を示す。灯油洗浄による市中スクラップの再溶解材からは激しく腐食が発生した。一方、レーザ照射による市中スクラップの再溶解材では、僅かに腐食が発生するものの、灯油洗浄によるそれよりも著しく抑制され、加工スクラップからの再溶解材と同等の耐食性を示した。

現状、加工スクラップは、ほぼ 100% リサイクルされていることから、レーザ照射による市中スクラップの溶解材も十分にリサイクルが可能と思われる。

4. マグネシウム合金製造に係る環境負荷の試算

インベントリ分析は、製品のライフサイクルにおいて物質およびエネルギーの入出力量を定量的に評価することであり、積み上げ法および産業連関法がある¹⁰⁾。本分析には、(株)STU が収集したフォアグラウンドデータを使用し、ISO14040 に準拠した市販ソフトウェア JEMAI-LCA Pro ((社)産業環境管理協会製)に掲載されたバックグラウンド

データにより排出二酸化炭素量および原油, 一般炭, 天然ガスのエネルギー消費量を積み上げ法に基づいて算出した。

(株)STU のフォアグラウンドデータについては, 中国電力(株)の電力値を使用し, 1 kWh 発生における排出二酸化炭素量およびエネルギー消費量は, それぞれ 0.6 kg および 6.96 MJ である。また, 陸上輸送では, 最大積載重量が 10 ton のディーゼル車を使用し, 積載量を加味して, その燃費を 4.5 km/L とした¹¹⁾。海上輸送においては, 載貨重量が 80 kton 未満のバルク運搬船を用いて, 排出二酸化炭素量の係数を 6.43 g/(t・km) とした¹²⁾。

4.1 原材料からマグネシウム合金製造に係る環境負荷の試算

Table 4 は, 原材料からマグネシウム合金を 1 ton 製造した場合(**Fig. 1** 太実線枠内)のインベントリ分析による入力値および出力値である。分析に際し, (マグネシウムの製造), (マグネシウム合金の製造)および(輸送)のプロセスに分けて, 各プロセスでの排出二酸化炭素量およびエネルギー消費量を積算した。

なお, 試算に関して, (マグネシウムの製造)では, Feng Gao らの報告値¹³⁾を重量換算して使用した。マグネシウム 1 ton の製造に係わる排出二酸化炭素量, エネルギー消費量に係るコークスオープンガスの熱量, 使用量および電力量は, それぞれ 32.2 t, 17,354 MJ/m³, 6.42×10³ m³ および

1.00×10³ kWh であった¹³⁾。また, (マグネシウム合金(AZ91D)の製造)および(輸送)については, (株)STU のフォアグラウンドデータを使用した。

試算の結果, 原材料からマグネシウム合金を 1 t 製造した時の排出二酸化炭素量およびエネルギー消費量は, それぞれ 32.2 t および 143.0 GJ となる。

4.2 市中スクラップからマグネシウム合金製造に係る環境負荷の試算

Table 5 には, 本プロセスで市中スクラップをリサイクルしてマグネシウム合金を 1 t 製造した場合(**Fig. 1** 太破線枠内)のインベントリ分析の結果を示す。ここでは, プロセスを(灯油洗浄), (レーザ照射), (マグネシウム合金の再溶解)および(輸送)に分け, 試算および積算を行った。

なお, 試算には, (株)STU のフォアグラウンドデータを用いた。灯油洗浄では, 洗浄後の灯油を燃焼し, 発生した二酸化炭素は大気中に開放した。

試算の結果から, 本プロセスで市中スクラップをリサイクルしてマグネシウム合金を 1 t 製造した時の排出二酸化炭素量およびエネルギー消費量は, それぞれ 1.3 t および 15.3 GJ となる。

これより, マグネシウム合金 1 t の製造に関して, 本プロセスでのリサイクルでは, 原材料から製造する場合と比較して, 排出二酸化炭素量およびエネルギー消費量をそれぞれ 95.9% および 89.3% 削減できる。

Table 4 Inventory analysis value of manufacturing process of the magnesium alloy

		Mgnesium manufacturing	Mgnesium alloy manufacturing	Transportation	Total
Inputs	Dolomite	*9,187 kg/t			
	Ferrosilicon	*993 kg/t			
	Fluorite	*160 kg/t			
	Al		91.8 kg/t		
	Zn		7.2 kg/t		
	Mn		2.3 kg/t		
	Coal	*2,095 kg/t			
	COG	*5,898 m ³ /t			
	Electric power	*98.7 kwh/t			
	LPG		3,985 MJ/t		
	Mg 918.7 kg				
	From A to B			by a truck in 50 km	
	Mg alloy 1 ton				
Outputs	From B to C			by a truck in 600 km	
	From C to D			by a tanker in 3,010 km	
	From D to E			by a truck in 135 km	
	Mg	918.7 kg/t			
	Mg alloy		1 t		
	CO ₂	*29.6 t/t	2.1 t/t	4,877 kg/t	32.2 t/t
	Energy consumption	*112 GJ/t	24.7 GJ/t	6,030 MJ/t	143.0 GJ/t
	Reclamation of residue		20 kg/t		

* : Feng Gao らの報告値¹⁰⁾

A is a magnesium factory, B is a magnesium alloy factory, C is Tianjin port in China. D is Nagoya port, E is Gifu pref. in Japan.

Table 5 Inventory analysis value of recycling process of the magnesium alloy

		Kerosene cleaning	Laser irradiation	Resolution	Transportation	Toatal
Inputs	Cylinder head cover Kerosene Electric power LPG	1,020 kg/t 24.5 kg/t 123.9 kWh /t	619.1 kWh/t	3,990 MJ/ t		
	Cylinder head cover 1,020 kg From A' to B' From B' to C'				by a truck in 362 km by a truck in 385 km	
Outputs	Mg alloy CO ₂	155 kg/ t 1,870 MJ/t	377 kg/ t 4,300 MJ/t	1 t 250 kg/ t 3,300 MJ/t 20 kg/ t	446 kg/ t 5,750 MJ/t	1.3 t/ t 15.3 GJ/ t
	Energy consumption Reclamation of residue					

A' : Aichi pref., B' : STU, co. Ltd. Okayama pref. and C' : Gifu pref. in Japan.

以上、今後、増加が予想されるマグネシウム製品の市中スクラップへのリサイクル技術は重要な課題であり、レーザ照射による表面の清浄化は、その課題に対して有効な解決策であることが示唆された。本プロセスでのリサイクルにより、原材料から製造する場合と比較して、環境負荷を大幅に低減できる。今後は、二酸化炭素以外の地球温暖化に係わる排出温室効果ガスについても特性化し¹⁴⁾、リサイクルの環境負荷に対する有効性を検討することが重要となる。

最後に、マグネシウム合金の製造に関して、環境負荷の大部分は、マグネシウムの製造が占める。現在、中国では、マグネシウムの製造に係わる環境負荷低減に積極的に取り組んでおり、2015年には、マグネシウム1tの製造に係わる排出二酸化炭素量およびエネルギー消費量をそれぞれ10.0~14.0tまで低減することを目標としている¹⁵⁾。今後、マグネシウム合金の製造およびリサイクルに関する技術開発が進み、マグネシウム合金の適用が拡大し、地球環境に貢献することを強く望む。

5. 結 言

本研究では、マグネシウム合金製品からなる市中スクラップのリサイクルシステムの構築を目的として、シリンダヘッドカバーを対象に、レーザ照射による表面の清浄化について検討した。照射条件による表面の清浄化状況、リサイクルして得られた鑄造材の化学成分および防食性について調査するとともに、本プロセスを用い、市中スクラップからマグネシウム合金がリサイクルできた場合の排出二酸化炭素量およびエネルギー消費量を算出し排出した結果、以下の結論を得た。

- (1) 適切な条件でレーザ照射することで、市中スクラップ表面の付着物は除去される。その際、腐食部位はより積極的に除去され、リサイクルに対して有効に作用する。
- (2) レーザ照射による市中スクラップの再溶解材は、加工スクラップからの再溶解材と同等の化学成分および耐食性を示した。

- (3) マグネシウム合金1tonの製造に関して、本プロセスでのリサイクルでは、原材料から製造する場合と比較して、排出二酸化炭素量およびエネルギー消費量をそれぞれ95.9%および89.3%削減できる。

謝 辞

日本マグネシウム協会の専務理事小原久氏には、マグネシウム合金の製造またはリサイクルにおけるインベントリ分析において、貴重なご意見を賜りましたことを心より篤く御礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本マグネシウム協会：マグネシウム技術便覧，カロス出版，(2000)，385-391.
- 2) 経済産業省ホームページ http://www.meti.go.jp/policy/nonferrous_metal/strategy/magnesium02.pdf
- 3) 日本マグネシウム協会：マグネシウム技術便覧，カロス出版，(2000)，48-50.
- 4) 社団法人鉄リサイクル工業会ホームページ <http://www.jisri.or.jp/kankyo/index.html>
- 5) 日本アルミニウム協会：現場で生かす金属材料シリーズアルミニウム，工業調査会，(2007)，279-284.
- 6) Adam J. Gesing, Alain Dubreuil. : 消費者の手を離れたマグネシウムスクラップのリサイクル, *Magnesium*, **38-3**, (2009), 9-12.
- 7) Mitooka, Y., Hashimoto, Y. : Recycle Technology of Magnesium Commercial Scrap Using Laser Beam, *ALUTOPIA*, **41-5**, (2011), 9-16.
- 8) 安井武司：レーザ加工，大河出版，(1990)，79.
- 9) Mitooka, Y., Murakami, K., Hino, M., Nishimoto, K., Kanadani, T. : Laser Irradiation on High-Purity Magnesium Anodized by Phosphate Electrolyte, *J. Jpn Laser Processing Soc.*, **17-3**, (2010), 40-44.
- 10) 稲葉敦：LCAの実務，産業環境管理協会(2005)，32.
- 11) 比護正志，堂脇清志，玄地裕：Journal of Life Cycle Assessment, Japan, **14-3**, (2008)，253-259.
- 12) 平岡克英，亀山道弘：Journal of Life Cycle Assessment, Japan, **2-3**, (2006)，273-280.
- 13) Feng, G., Zuoren, N., Zhihong, W., Xianzheng, G., Tieyong, Z. :

218 技術論文 水戸岡, 甲加, 日野, 橋本, 金谷: レーザ照射によるマグネシウム合金市中スクラップ表面の清浄化

Int. J. Life Cycle Assess, **14** (2009), 480-489.

14) 伊坪徳宏, 田原聖隆, 成田暢彦: LCA 概論, 産業環境管理協会 (2007), 110-113.

15) 徐晋湘: 年次例会論文精選 中国マグネシウム業, (2011), 1-13.