

300kg 高周波溶解炉におけるマンガン除去技術の優位性調査*

高川 貫仁**、池 浩之**、岩清水 康二**、

小綿利憲***、高橋直之****

マンガン含有量の高い鋼スクラップを原材料とする鑄鉄からのマンガン酸化除去技術について、溶解量 300kg の高周波溶解炉を用いて溶解実験を行った。そして、作業性やコスト、得られた鑄鉄の機械的性質について、マンガン希釈法やマンガン無害化技術と比較し、酸化除去技術の優位性について調査した。得られた結果は、次のとおり。

- 1) 無害化技術および希釈法と比較し、除去技術により得られた鑄鉄の機械的性質は、目標材質である JIS G 5502 の FCD450 の規格値を十分満足した。
- 2) 酸化除去の溶解作業は、除滓作業が作業者への負担となった。
- 3) 酸化除去技術の処理コストは希釈法の約 1/4 であり、無害化技術の処理コストは非常に安価で、希釈法の約 1/10~1/5 であると試算された。
- 4) 除去技術の処理コストは、無害化技術より高く、その主な要因は加珪に要するコストであった。

キーワード：鑄鉄、マンガン除去、酸化鉄、機械的性質

Superiority Investigation of the Manganese Removal Technology in the 300kg-High Frequency Induction Furnace.

TAKAGAWA Takahito, IKE Hiroyuki, IWASHIMIZU Kouji,
KOWATA Toshinori and TAKAHASHI Naoyuki

The oxidation removal technology of manganese from cast iron using steel scrap of high manganese content as raw materials was verified by the melting experiment in the 300kg-high frequency induction furnace. And the superiority of the removal technology was investigated by comparing with the dilution method and the neutralization technology about mechanical property of the obtained cast iron, operation efficiency, and cost of the process. The results are summarized as follows,

- 1) The mechanical property of cast iron treated by the removal technology satisfied the standard value of FCD450 in JIS G 5502 enough compared with neutralization technology and dilution method.
- 2) In the melting operation of removal technology, slagging operation had become a burden to the melter.
- 3) It was provisionally calculated that the processing cost of removal technology was about 1/4 of the dilution method. And the cost of the neutralization technology was very cheap, about 1/10-1/5 of it.
- 4) The processing cost of the removal technology was higher than that of the neutralization technology. The processing cost of the removal technology became expensive to need the supply of silicon.

key words : cast iron, manganese removal, iron oxide, mechanical property

1 緒 言

現在、自動車産業をはじめ、造船、建設産業において、省エネルギーを目的とした部材の軽量化のために高張力鋼の採用割合が増えている。高張力鋼の高強度化は、主にマ

ンガンの添加により行われており、その添加割合は最大で 2.7%と高い。一方、国内の鑄鉄鑄物メーカーでは、コスト低減のため鉄スクラップを主原料としているが、上述のことより鉄スクラップにおける高張力鋼の割合も高まり、こ

* 交付金

** 材料技術部

*** 国立大学法人岩手大学

**** 福島製鋼株式会社

れに含まれるマンガンによる鑄鉄材料の脆化が大きな問題になっている。

鑄鉄材料のマンガンを除くために、著者らは、酸化鉄(FeO)添加による鑄鉄溶湯のマンガンを除去技術に取り組んだ^{1),2)}。本技術は、マンガンを酸素と反応しやすいことを利用したマンガンを除去技術であり、酸化鉄の添加量にほぼ比例してマンガンを除去することができる。しかし、実装業に即して実施した例がないことや、発生するスラグ処理の問題もあり、実用化には至っていない。

そこで本調査では、「酸化鉄添加による除去技術(以下、除去技術と記す)」の実用化を目的に、溶解量300kgの高周波溶解炉を用いて検証実験を行い、作業性やコスト、得られた鑄鉄の機械的性質について、マンガンを含有量が高いままで鑄鉄の脆化を解決しようとする「マンガンを無害化技術(以下、無害化技術と記す)」や一般的な解決方法である「銑鉄による希釈法(以下、希釈法と記す)」と比較し、除去技術の優位性について調査した。

2 実験方法

2-1 目標材質および組成

目標とする鑄鉄の材質は、延性の高いFCD450 (JIS G 5502)とした。FCD450の一般的なマンガンを規定値は0.4%である。

鑄鉄鑄物メーカーに納品される鉄スクラップのマンガンを含有量は、2008年度に自動車メーカー等に聞き取り調査した結果、現在の0.4%から、今後0.8%まで増加することが予想された。また、高周波誘導炉などの電気炉による鑄鉄の溶解原材料配合比は、大きくは、鑄鉄戻り材が50%で、鉄スクラップが50%である。

これらより、本調査におけるマンガンを含有量の目標値は、「除去技術」においては0.6%から0.4%まで下げる

($0.6\% = [\text{戻り材のマンガンを含有量}]0.4\% \times [\text{戻り材の配合比}]0.5 + [\text{鉄スクラップのマンガンを含有量}]0.8\% \times [\text{鉄スクラップの配合比}]0.5$)、「無害化技術」においては0.8%($= [\text{戻り材のマンガンを含有量}]0.8\% \times [\text{戻り材の配合比}]0.5 + [\text{鉄スクラップのマンガンを含有量}]0.8\% \times [\text{鉄スクラップの配合比}]0.5$)、「希釈法」においては0.4%とした。

2-2 溶解方法

溶解は300kg高周波溶解炉により行った。「希釈法」は、マンガンを含有量を溶解炉内で0.4%に調整し、サンドイッチ法により球状化処理、次いで1次接種を行った。「除去技術」は、溶解炉内に酸化鉄を2%添加しマンガンを含有量を0.6%から0.4%まで下げた後にフェロシリコンによりシリコン含有量を調整し、球状化処理ならびに1次接種を行った。「無害化技術」はレアアース添加³⁾による処理およびビスマス添加⁴⁾による処理を行った。レアアース添加技術は、レアアースを予め球状化処理剤と一緒に球状

表1 各処理技術により得られた鑄鉄の化学組成

	C	Si	Mn	P	S	Mg	Ce	O
銑鉄による希釈法	3.76	2.73	0.44	0.036	0.009	0.039	0.005	11
酸化鉄添加による除去技術	3.43	2.55	0.44	0.034	0.004	0.036	0.005	10
レアアース添加による無害化技術	3.64	2.66	0.77	0.039	0.027	0.032	0.030	7
ビスマス添加による無害化技術	3.60	3.25	0.77	0.037	0.013	0.035	0.006	15

(単位：C~Ceはmass%，Oはmass ppm)

化処理取鍋のポケットにセットしておき、鑄鉄組成をマンガンを含有量0.8%、硫黄含有量0.05%に調整し、球状化処理すると共に無害化処理を行い、1次接種を行った。ビスマス添加技術は、鑄鉄組成をマンガンを含有量0.8%に調整し、球状化処理ならびに1次接種した後、鑄型注湯時にビスマス系接種剤を注湯流接種した。

鑄込みは、JIS G 5502 Y型供試材B号(肉厚25mm)に行い、その後、引張試験片(JIS4号試験片)及びシャルピー衝撃試験片(JIS 2mmUノッチ)を作成し、試験に供した。得られた鑄鉄の化学組成を表1に示す。

3 実験結果

3-1 組織観察

図1に、各処理技術により得られた組織観察結果を示

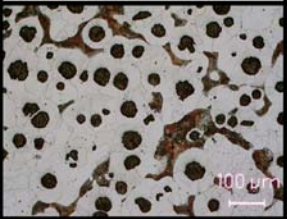
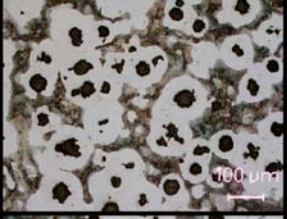


	光学顕微鏡組織	黒鉛および基地組織
銑鉄による希釈法		黒鉛球状化率：98% 黒鉛粒数：193個/mm ² 黒鉛平均粒径：25 μm 黒鉛面積率：11% フェライト面積率：73% パーライト面積率：16%
酸化鉄添加による除去技術		黒鉛球状化率：93% 黒鉛粒数：187個/mm ² 黒鉛平均粒径：20 μm 黒鉛面積率：8% フェライト面積率：55% パーライト面積率：37%
レアアース添加による無害化技術		黒鉛球状化率：78% 黒鉛粒数：202個/mm ² 黒鉛平均粒径：25 μm 黒鉛面積率：12% フェライト面積率：40% パーライト面積率：48%
ビスマス添加による無害化技術		黒鉛球状化率：97% 黒鉛粒数：524個/mm ² 黒鉛平均粒径：16 μm 黒鉛面積率：10% フェライト面積率：76% パーライト面積率：14%

図1 各処理技術により得られた組織観察結果

す。「希釈法」による鑄鉄組織は、フェライト率が73%と高く、黒鉛粒数が193個/mm²、黒鉛粒径は25μmであった。「除去技術」および「レアアース添加技術」は、黒鉛組織ならびに基地組織共に似た組織であり、フェライト面積率が約50%、黒鉛粒数が約200個/mm²、黒鉛平均粒径は約25μmであった。「希釈法」と比較して、黒鉛組織は似ているが、基地組織ではフェライト面積率が低かった。「ビスマス添加技術」は、フェライト面積率が76%、黒鉛粒数が524個/mm²、黒鉛平均粒径が16μmであり、「希釈法」と同等のフェライト面積率であり、黒鉛粒数は他の2倍以上であった。

「除去技術」および「レアアース添加技術」のフェライト面積率が「希釈法」より低かったのは、CE値が低いと考えられる。また「ビスマス添加技術」の場合、注湯流接種することにより黒鉛粒数が増し、その結果フェライト面積率が高くなったものと考えられる。

黒鉛球状化率は、「希釈法」および「除去技術」、「ビスマス添加技術」において90%以上と良い結果であったが、「レアアース添加技術」においては78%と低かった。この原因は分からないが、今後、くり返し溶解試験を行い検証する必要がある。

3-2 機械的性質

表2に、各処理技術により得られた鑄鉄の引張試験および硬さ試験結果を示す。いずれの鑄鉄も、目標材質であるFCD450を満足する材質であった。「希釈法」および「ビスマス添加技術」の引張強さが約500N/mm²で、伸びが16~22%と延性があるのに対し、「除去技術」および「レアアース添加技術」は、引張強さが約600N/mm²と高く、伸びが10~13%と若干低かった。これはフェライト面積率と黒鉛球状化率の影響が大きいと考えられる。

次に衝撃試験結果を図2に示す。試験は-40℃、-20℃、0℃、室温(20℃)で行った。「希釈法」および「ビスマス添加技術」は、温度に対して共にほぼ同じ値を示し、室温で約13J、-20℃で約9J、-40℃で約4Jであった。「除去技術」は、室温で8Jであり、0℃以下では約3Jでほぼ一定であった。「レアアース添加技術」は、本温度範囲では約3Jで一定であった。「除去技術」および「レアアース添加技術」は、「希釈法」や「ビスマス添加技術」に比較して吸収エネルギーが低かったが、これは、黒鉛球状化率が約80~90%と低かったことが大きな要因と考えられる。

3-3 作業性

各処理技術の作業性評価結果を表3

表2 各処理技術により得られた鑄鉄の引張試験および硬さ試験結果

	耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	ブリネル硬さ HBW(10/3000)
鉄鉄による希釈法	352	492	22	163
酸化鉄添加による除去技術	370	579	13	183
レアアース添加による無害化技術	407	599	10	192
ビスマス添加による無害化技術	389	514	16	174
FCD450 (JIS 規格)	280 以上	450 以上	10 以上	140~210 (参考)

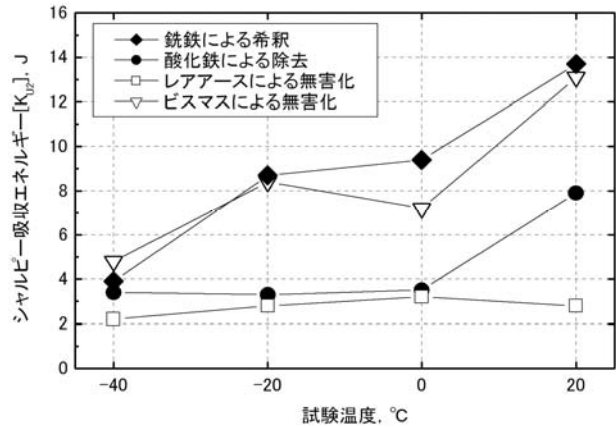


図2 各処理技術により得られた鑄鉄の衝撃試験結果

に示す。作業性では、「除去技術」が、他の処理技術に比較してスラグが多く発生するために、除滓作業において、時間や危険性が増す評価結果となった。

「除去技術」における粉塵については、炉内に酸化鉄を添加したときに、酸化鉄由来の黒っぽい粉塵が舞う。

表3 各処理技術の作業性評価結果

	処理にかかる時間	粉塵や異臭の有無	作業における危険性	スラグ発生量
鉄鉄による希釈法	0分	無し	無し	0.3kg 溶湯重量の0.1%
酸化鉄添加による除去技術	9分 (内訳) 1)除滓:3分 2)処理前後のMn,Si量の分析:6分	若干有り(粉塵) 黒い粉塵が若干発生。	有り 除滓が重労働。除滓時に火傷注意。	4.5kg 溶湯重量の1.5% (酸化鉄添加量は溶湯重量の2%)
レアアース添加による無害化技術	3分 処理前のSの分析:3分	無し 添加する硫黄の量に応じて異臭の発生の可能性有り。	無し REを炉内で添加する場合は、溶湯攪拌の必要あり。火傷注意。	0.3kg 溶湯重量の0.1%
ビスマス添加による無害化技術	0分	無し	有り 接種作業時に火傷注意。自動で接種できる場合は、危険性は無い。	0.3kg 溶湯重量の0.1%

ただし、酸化鉄がスラグ化する2~3分程度でこれは収まった。通常溶解においても粉塵の発生がないわけではなく、また、集塵設備が付いている溶解炉では、粉塵は問題にならないと思われる。「除去技術」の作業の危険性については、大変危険というわけではなく、注意が必要という程度の危険性である。

3-3 処理コスト

各処理技術の処理コストの試算結果を表4に示す。「除去技術」の処理コストは「希釈法」の26%、「無害化技術」の処理コストは「希釈法」の10~20%であり、いずれも「希釈法」と比較して採算性に大変優れていた。「希釈法」では、銑鉄(マンガン含有量が0.15%と仮定)を3割も配合しないと0.4%Mnの鑄鉄を得られず、配合割合が高く、さらに鉄スクラップとの価格差が大きいことから、高価な対策方法であることが分かる。

表4 300kgの鑄鉄溶湯に対する各処理コスト試算結果

	添加剤費用 (運搬費込み) A	産廃処理 費用 B	合計 A+B	鑄鉄 1ton 当 たりの処理費用 (A+B)/0.3
銑鉄による 希釈法	3,150 円	10 円	3,160 円	10,530 円
	(内訳) 1)銑鉄費用 3,150 円			
酸化鉄添加 による除去 技術	720 円	100 円	820 円	2,730 円
	(内訳)			
	1)酸化鉄費用 180 円			
	2)フェロシリコン費用 500 円 3)除滓剤費用 40 円			
レアアース 添加による 無害化技術	650 円	10 円	660 円	2,200 円
	(内訳) 1)RE 合金費用 650 円			
ビスマス添 加による無 害化技術	340 円	10 円	350 円	1,170 円
	(内訳) 1)Bi 系接種剤費用 340 円			

「除去技術」は、「無害化技術」と比較して、コストが高かった。「除去技術」における処理費用のうち、フェロシリコン(Fe-75%Si)がその費用の6割を占める。つまり、「除去技術」が他の処理技術に比較してコスト的に有利か否かはフェロシリコンの添加量および値段に大きく左右されることが分かる。

一番低コストの技術は、「ビスマス添加による無害化技術」であった。ビスマス接種剤の単価は、本調査で使った添加剤の中で一番高いのだが、添加量が少量であることから、処理費用は大幅に低かった。

3-4 「除去技術」の優位性

「酸化鉄添加による除去技術」は、300kgの高周波溶解炉において、充分対応可能であることが分かった。

「除去技術」の「希釈法」に対する優位性は、コスト面はかなり高いことが分かった。機械的性質については、いずれも目標材質をクリアしており、伸びの確認は今後も必要だが、鑄鉄の組成がそろえば、大きな差はないものと考えられる。

「除去技術」と「無害化技術」を比較した場合、作業性やコスト面で「無害化技術」の方が若干優位性が高いことは否めない。「無害化技術」では無害化剤にレアアースやビスマスという希少金属を用いているため、環境面からは「除去技術」の方が優位性はかなり高い。しかし、製造現場においては環境面の優位性のみでは技術のインパクトが小さい。

酸化鉄添加によるシリコンの酸化は、酸化鉄を無駄に消費するだけでなく、処理後の加圧コストも高くなり、スラグの発生ボリュームが増えることから除滓にかかる負担も大きくなる。そのため、今後、「除去技術」の作業面やコスト面における優位性を高めるために、できるだけシリコンを酸化させないでマンガンを優先酸化させる方法を検討する必要がある。

4 結 言

「酸化鉄添加によるマンガン除去技術」の実用化を目的に、300kg高周波溶解炉を用いて検証実験を行い、作業性やコスト、得られた鑄鉄の機械的性質について、「無害化技術」や「希釈法」と比較し、除去技術の優位性について調査した。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 無害化技術および希釈法と比較し、除去技術により得られた鑄鉄の機械的性質は、目標材質であるJIS G 5502のFCD450の規格値を十分満足した。
- 2) 除去技術の溶解作業は、除滓作業が作業者への負担となった。
- 3) 酸化除去技術の処理コストは

希釈法の約1/4であり、無害化技術の処理コストは非常に安価で希釈法の約1/10~1/5であると試算された。

- 4) 除去技術の処理コストは、無害化技術より高く、その主な要因は加圧に要するコストであった。

文 献

- 1) 高川貫仁, 勝負澤善行, 池浩之, 茨島明: 岩手県工業技術センター研究報告, 11 (2004) 132
- 2) 高川貫仁, 池浩之: 岩手県工業技術センター研究報告, 12 (2005) 87
- 3) 小綿利憲, 堀江皓, 平塚貞人: 鑄造工学, 79 (2007) 481
- 4) 齋藤弘典: 日本鑄造工学会東北支部大会講演概要集, 2006

この研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の平成20年度エコイノベーション推進事業により行った。