鉄系スラッジの再溶解技術*

Re-melting Technique of Ferrous Sludge

川上雄士** 井手口常巳*** 寺本秀則***

Yuji KAWAKAMI, Tsunemi IDEGUCHI and Hidenori TERAMOTO

Key words industrial waste, recycle, metal grinding sludge, high frequency furnace, metal Fe, press machine

1. はじめに

我が国においては、これまで大量生産・大量消費・大量廃棄のシステムにより経済成長をしてきた。しかしながら、今後のあるべき社会の姿として、地球環境の保全、資源の有効利用などの観点から、循環型社会をめざす必要がある。特に廃棄物に関しては、廃棄物の3R：Reduce（減量）・Reuse（再利用）・Recycle（リサイクル）として、資源の有効利用が求められている。ひっ迫する問題として、次の点が環境省の環境統計集で指摘されている。①廃棄物発生量の高水準での推移、②リサイクルの一層の推進の要請、③廃棄物処理施設の立地の困難性、④不法投棄の増大。その中で、金属系の産業廃棄物として処分される金属くずは、年間800万tにもおよび、これら産業廃棄物を処理する安定型処分場、管理型処分場、しゃ断型処分場として許可されたものの残存年数は4年以下であるといわれている¹⁾。このような廃棄物の問題は、行政の問題だけでなく、企業の経済活動を行ううえにおいても重要な問題となってきた。とくに、産業廃棄物として処理するための費用の高騰、ISO14000シリーズに代表される環境対応企業への一般社会・消費者の要求などが企業にとって環境問題への対応を余儀なさしている現状である。このような、社会の要求のもとで佐賀県工業技術センターと油圧プレス機械の専業メーカーである森鉄工(株)は、金属製品の仕上げ工程で行

われる砥石を用いた加工を行う時に排出される金属くずである研磨・研削スラッジを鉄資源として有効利用するための研究を共同で行ってきた^{2)~4)}。研磨・研削スラッジは、これまで加工時の砥石の成分を含むこと、多量の液体（研磨液）を含むことなどから、この状態からフィルタープレス、遠心分離機などによって一部脱液した後に、産業廃棄物として埋立処分などをされ、リサイクルなど再利用はされていなかった。

2. 研磨・研削スラッジの調査

スラッジの形態は、材質・排出する工場などによって種々多様であるが、リサイクルの実験に供したスラッジは国内のベアリングメーカーの最終研磨工程より排出されるものである。焼き入れ焼き戻しを行った後の硬く加工性の悪いものである。材質はJIS軸受け鋼2種（SUJ2）である。このスラッジは研磨液を多量に含んだ状態で、一般的には約70%の研磨液を含んでいるといわれている。このスラッジをフィルタープレスなどで脱液を行っても、含液率は35-40%程度にしかならない^{5) 6)}。砥石を用いた研磨加工のスラッジは図1に示すような形態をしているものが多い。旋盤加工時に排出される切り粉と同じような形状のく

図1 ベアリング鋼研磨スラッジのSEM観察写真

*原稿受付 平成18年2月2日

**佐賀県工業技術センター材料環境部（佐賀県佐賀市鍋島町八戸溝114）

***森鉄工(株)（佐賀県鹿島市大字井手2078）

川上雄士

1992年Stanford Univ. School of Engineering Dep. of Materials Science and Engineering 修了、Master of Science. 1998年佐賀県工業技術センター入庁。研究分野：パルス通電焼結法による粉末冶金。

井手口常巳

1974年佐賀県立塩田工業高校機械科卒、1974年森鉄工(株)入社、技術部設計課主任。

寺本秀則

1989年長崎総合科学大学工学部機械工学科卒、1997年森鉄工(株)入社、環境事業部。

表 1 ベ어링鋼研磨スラッジの蛍光 X 線分析結果

	スラッジ A	スラッジ B	JIS SUJ2
Al	1.17	0.75	N.A.
Si	0.19	0.25	0.15-0.35
P	0.14	0.15	< 0.03
Cr	1.41	0.81	1.30-1.60
Mn	0.87	1.39	< 0.5
Fe	96.2	96.5	Bal.

図 2 スラッジ固化成型機 (森鉄工(株)製 1000kN)

ずであるが、寸法は旋盤加工時のものと比べると遙かに細かく、幅が数十 μm で長さが数百 μm 程度である。スラッジの化学成分を調査するために、蛍光 X 線分析装置 (日本電子製 JSX-3201) を用いて分析を行った。2 種類のベ어링鋼研磨スラッジの分析結果を表 1 に示す。加工原材料である SUJ2 軸受け鋼の JIS 規格値をあわせて示しているが、主要な合金元素である Cr は確かに含まれていることが分かった。一方、懸念していた研磨加工時に用いられる砥石の成分である Al、Si などの元素は低い割合に押さえられていることがわかり、95 % 以上が Fe であり鉄源としての再資源化が有望であることが分かった。EPMA を用いた元素分布マッピング分析の結果から、残留する砥石分はスラッジに比べると小さく、数 μm 程度の大きさであることが分かった。ベ어링鋼以外の研磨スラッジに関しても同様な調査を行ったが、鉄系のスラッジにおいては上述の結果とほぼ同等な結果で、Fe 含有量は元の材料と遜色がなかった。

3. 脱液固化成型の技術

研磨スラッジの脱液固化成型技術は、森鉄工(株)が油圧プレス機器メーカーとして長年蓄えてきた技術により開発されたものである。当初、比較的固化成型が容易な金属切り粉 (ダライ粉) 圧縮成型機を開発した。本開発品は、平成 7 年より商品名「カタメル α 」として国内並びに海外に 90

図 3 研磨・研削スラッジブリケット

台以上の納入実績を持っている。これらの技術をベースに、平成 10 年度中小企業創造活動促進法企業として認定され、佐賀県中小企業創造技術研究開発費補助金の支援を受け「研磨スラッジブリケットマシーンの開発」を始めた。平成 11 年には 1 号機を試作し、大手ベ어링メーカーの研磨スラッジを脱液固化成型することに成功した。本開発機は、加圧出力 2 000 kN 両押し型で、 $\phi 80\text{ mm}$ の金型を用い加工面圧 400 MPa の能力を持つ、スラッジ専用の機器である。(商品名「スラメル Z」) 脱液固化成型のメカニズムは、研磨スラッジを円筒形状の金型に投入し、油圧シリンダーを用いて圧縮成型を行うものである。研磨スラッジに残った研磨液は、この時に排出される。また、残留する砥石分は、金属部分に比べると小さく圧縮成型時に研磨液と同時に選択的に排出されることが分かった。本開発機に関して、特願 2000-114303、特願平 11-288363、特願 2001-205291、特願 2002-227912 の特許が出願されている。加圧力 1 000 kN タイプの固化成型機を図 2 に示す。スラッジ固化成型機により脱液固化成型されたもの (ブリケット) の様子を図 3 に示す。

4. 溶解実験

脱液固化成型したスラッジ (ブリケット) を溶解することにより元の鉄鋼材料としてリサイクルするために、高周波誘導溶解炉 (富士電波工業 FTH-50-3M 最大溶解量鉄換算 30 kg) を用いて再溶解の実験を行った。

4.1 溶解による鉄としてのリサイクル

高周波誘導溶解炉を用いて、スラッジブリケットを溶解し、鉄鋼材料としてリサイクルするための実験を平成 12 年から行ってきた。当初、自前の実験設備がなかったため、長崎県工業技術センター、富士電波工業(株)の設備を借用して実験を行った。実験では、ブリケット単体のみを溶解しようと試みたが、ブリケットの一部が溶解することはあったが、元の材料に戻すようなレベルではなかった。その後、スターティングブロック (種湯) を重量比で 1/3 使用することで、追加投入したブリケットを完全に溶解する

図4 研磨・研削スラッジ再溶解の様子（左から高周波溶解炉、金型への鋳造の様子、回収されたメタル）

表2 再溶解品化学成分分析

	再溶解品	スラグ	JIS SUJ2
C	0.2		25
Si	0.1	13	0.25
Mn	0.22	12	0.25
P	0.06		0.02
S	0.056		0.02
Cr	0.75	14.5	1.45
Al	—	34.8	—
Fe	98.61	20.8	96.985
Other	—	4.9	—

ことに成功した。インゴット形状で回収できた金属の重量から、スターティングブロックの重量を差し引いて、再溶解による歩留まりを求めた。求められた歩留まりは72%であり、予想よりも歩留まりが低い結果となった。次に、研磨スラッジのリサイクル率を高めるためにスターティングブロックを用いずに、研磨スラッジブリケット品のみで溶解が可能であるかを調べる実験を行った。高周波誘導溶解炉を用いてブリケットのみで溶解するためには、投入する電力が効率よくワークに伝達されなければならない。誘電加熱に係る単位体積あたりの電力は、材料の比誘電率(er)に比例する。ブリケットの比誘電率を高めるためにはブリケットの密度を高め空隙による比誘電率低下を防止しなければならない。実際に、これまでの溶解実験でスターティングブロックを用いてきたのは、空隙のない（密度の高い）材料を用いることにより、効率よく溶解を行うためである。まずは、比較的固化成型の容易な特殊合金元素を含まない炭素鋼の研磨スラッジを用いて実験を行った。ブリケットの密度を上げるために、成型時の面圧を255, 274 MPaの2条件で成型を行った。ブリケット品のかさ密度は、それぞれ3.58, 3.53 g/cm³であり、これらの成形圧ではかさ密度に差はみられなかった。作製したブリケットは、脱水のために乾燥炉にて110℃で乾燥を行い溶解実験に供した。電力投入当初は、電圧をかけても電流が十分に流れない状態が20分ほどあったが、電力投入後30分で溶落が確認された。その後、ブリケットを追加投入し、電力投入から50分で完全に溶解し、スラグ除去などの溶湯清浄化を行い出湯し金型へ鋳造した。使用電力量は30.5 kWhであった。溶解実験時の高周波溶解炉るつぽ内での

溶解の様子を図4左に示す。るつぽ中にある黒色のものが未溶解のブリケット片である。

上記条件でスターティングブロックなしで、研磨スラッジのみでの溶解が可能であり、研磨スラッジが確かに鉄源としてリサイクル可能なことが分かった。

つぎに、過去に溶解実験を行ってきた、ベアリングの研磨スラッジについてスターティングブロックなしでの溶解を試みた。ブリケット成型時の面圧は255, 274 MPaの2条件で成型を行い、そのかさ密度は、それぞれ2.76, 2.83 g/cm³であった。ベアリング材として用いられる軸受鋼であるため、硬くブリケットの成型性が悪いため、かさ密度が低くなったと考えられる。ベアリング研磨スラッジも、電力投入後70分で完全に溶解し、金型へ鋳造することができた。再溶解したベアリング研磨スラッジの化学成分分析例を表2に示す。投入したブリケット量は30.0 kgで、再溶解によって得られた回収メタルの量は23.3 kgで材料歩留まりは78%であった。

4.2 メタルFe度の調査と材料歩留まり

溶解実験の材料歩留まりの結果は、ブリケットした研磨スラッジの素性によって異なり、高くても80%程度の歩留まりしか得られていない。この値は、蛍光X線分析でのFe定量値(95%以上)と比較すると大きな差がある。この原因はブリケット中のFeには酸化鉄となって、単純に溶解するだけでなく、製錬工程を経なければ鉄分として回収できないものが多く含まれていることが考えられた。そこで、JIS M8213で規定されている「鉄鉱石-酸可溶性鉄(Ⅱ)定量方法」を用いて、研磨スラッジブリケット中の金属鉄(メタルFe)の分析を行った。メタルFe度は以下の式で与えられる値である。

$$\text{メタルFe度}(\%) = \frac{\text{ブリケット中の金属鉄の重量(g)}}{\text{ブリケット全体の重量(g)}} \times 100$$

実際の分析に供する試料は1分析あたり0.5 g程度であり、試料のサンプリング位置により分析結果にばらつきが出るのが予想された。そこで、同一試料で数点分析を行い平均値化した。

次に、メタルFe度を調べたブリケット4種類の溶解実験を行い、材料歩留まりとメタルFe度の関係を調べた。その結果を図5に示す。材料歩留まりとメタルFe度には正比例の関係があることが分かった。この結果から研磨・

図5 材料歩留まりとメタル Fe 度の関係

研削スラッジのメタル Fe 度を低下させる要因は、スラッジの酸化であると考えられる。このことは、スラッジを排出する側においての管理が重要であることを示唆している。つまり、スラッジの排出からなるべく早い段階でブリケット化を行えばブリケット内部の酸化は防止でき、溶解したときのメタル回収率も高くなることが分かった。

4.3 企業での実用例

研磨ラインで発生する研磨スラッジ（2000 t/年）の処理対策として、脱液固化成型機をシステム化して、金属ブリケットと研磨液に分離し、金属ブリケットを鉄鋼材料として再資源化し、研磨液の再利用を実現している企業がある。本システム導入前には 140 万円/月の産業廃棄物としての処理費用が発生していたものが、導入後、これまでとは逆に金属ブリケットを金属資源として販売することができるようになってきている。

5. おわりに

産業廃棄物として処分されてきた研磨・研削スラッジの有効なリサイクル技術を確認するための研究を行ってきた。その結果として、以下のようなことが分かった。

- (1) 研磨・研削スラッジは、脱液固化成型することにより、高周波誘導溶解炉で溶解を行い鉄鋼材料としてリサイクルできることが分かった。
- (2) 研磨・研削スラッジ排出後の管理を行うことで、材料の歩留まりを向上させることができることが分かった。

今後は、これらの技術が広く普及しこれまでゴミとして処分されていた研磨・研削スラッジが有用な金属資源として認知され、資源の有効活用がさらに進むことを期待する。

参考文献

- 1) 環境省環境統計集
<http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/index.html>
- 2) 川上雄士, 井上誠吾, 井手口常巳: 産業廃棄物の再資源化及び無害化処理に関する研究: 平成 13 年度佐賀県工業技術センター研究報告書, 10 (2001) 9.
- 3) 川上雄士, 井上誠吾, 井手口常巳: 産業廃棄物の再資源化及び無害化処理に関する研究, 平成 14 年度佐賀県工業技術センター研究報告書, 11 (2002) 1.
- 4) 川上雄士, 井上誠吾, 井手口常巳, 寺本秀則: 産業廃棄物の再資源化及び無害化処理に関する研究, 平成 15 年度佐賀県工業技術センター研究報告書, 12 (2003) 1.
- 5) 吉永信義, ステンレス研削屑の資源化, クリーンジャパン, 116 (1996) 1, 47.
- 6) 高木均, 宮崎高信, 山本和敏, 森本正文: 研削スラッジの再利用技術-カイト用鉄粉への適用, 日本機械学会環境工学総合シンポジウム講演論文集, 9th (1999) 193.
- 7) 例えば日経産業新聞 2000 年 8 月 30 日 環境・新エネルギー など.