

環境負荷軽減のための研削スラッジリサイクル (第2報 実用機の開発とテスト結果)

中村 莞爾*・林 昭二*2

Grinding Sludge Recycling to Reduce Environmental Load (No. 2 Development of Practical Machine and Test Results)

Kanji NAKAMURA and Shoji HAYASHI

Synopsis : Report of "No. 1 Basic investigation for grinding sludge recycling" concluded that it was possible to separate the coolant from the grinding sludge economically and grinding swarf and coolant were able to be reused for cost reduction. Based on that investigation, practical machine has been developed. After one year long run test, the results proved that environmental load reduction and cost reduction have been achieved practically at the same time.

Key words: recycle; grinding sludge; briquette; industrial waste.

1. 緒言

地球環境保全が叫ばれる現在、企業が環境負荷軽減のため積極的に産業廃棄物¹⁾削減に取り組むことは社会的な責任である。そこでISO14001²⁾の認証取得を機に軸受け産業の研削工程で発生し、産廃処理されている多量の研削スラッジのリサイクルをコストダウンと同時に実現することを目標に掲げてリサイクル技術の開発に取り組んだ。その第一ステップとして1999年11月にテスト機を製作し、研削スラッジのリサイクル実現に不可欠な固液分離の基礎テストを実施するとともにリサイクルの可能性を調査した。

その結果、研削スラッジは経済的に固液分離が可能で金属成分の再資源化と研削液の再利用ができ、コストダウン効果も期待できることを「第1報 研削スラッジリサイクルのための基礎調査」で報告した。その基礎調査結果に基づき2000年12月に実用機を製作して約半年間基礎テストを実施し、多量の研削スラッジを固液分離した場合に発生する問題点を調査して技術的改善を加えた。その結果2001年10月より本格稼動が可能となり実用レベルで環境負荷軽減とコストダウンが同時に実現できたことを、ここに報告する。

2. 実用機の開発

実用機では無人での連続稼動を想定し、テスト機で抽出した問題点を改善した200トンタイプの圧縮機 (Fig. 1) を2000年12月に開発した。その基本仕様を Table 1 に示す。

3. 製鋼メーカーのブリケット受入れ基準

基礎調査時に製鋼メーカーから研削スラッジ固液分離後のブリケットに対する受入れ基準として、下記3項目の要求が提示された。

- ・ M-Feは85 wt%以上
- ・ 含油率は10 wt%以下
- ・ 取り扱い容易であること

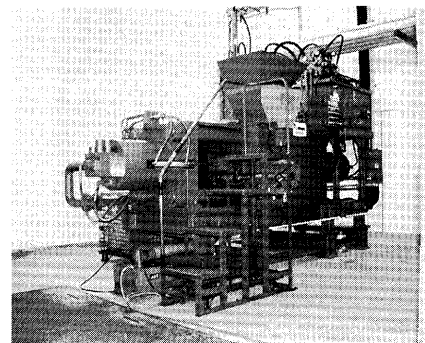


Fig. 1. Practical machine.

Table 1. Practical machine specification.

Machine type	Double cylinder
Maximum power	1960kN
Cylinder bore	φ335mm
Hydraulic pressure	20.6MPa
Briquette diameter	φ80mm
Maximum pressure	392MPa (at briquette)

平成17年11月28日受付 平成18年1月11日受理 (Received on Nov. 28, 2005; Accepted on Jan. 11, 2006)

* 名古屋工業大学大学院生 (Graduate Student, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho Showa-ku Nagoya 466-8555)

* 2 名古屋工業大学大学院ながれ領域 (Graduate School of Materials Engineering, Nagare College, Nagoya Institute of Technology)

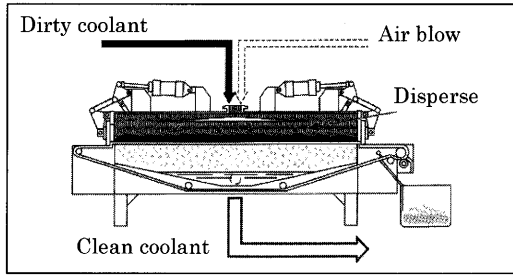


Fig. 2. Pressure type belt filter.

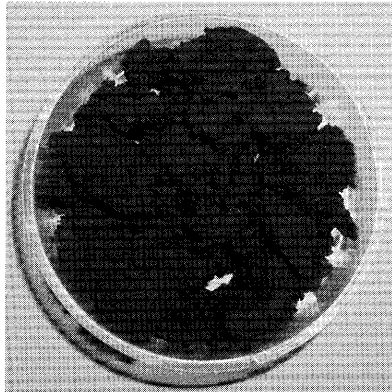


Fig. 3. Grinding sludge flakes.

Table 2. Basic data for grinding sludge.

Coolant	Oil-based
Steel	SUJ2
Oil wt%	40~60wt%
Specific gravity	≒ 0.4

4. テスト方法

4.1 研削スラッジの種類と回収方法

実用機では研削液の再利用で大きなコストダウン効果が期待できる不水溶性研削液³⁾を使用した研削工程から排出される油性研削スラッジを使用してテストを実施した。今回のテストでは加圧式ベルトフィルタ (Fig. 2) で濾過後に回収された研削スラッジを使用した。この研削スラッジの含油率は通常約50 wt%で、手で搾っても油は出て来ない程度まで脱油されている。

4.2 研削スラッジの基本特性

加圧式ベルトフィルタで回収されて排出される研削スラッジは幅1 m、厚さ20 mm程度のシート状で取り扱いが困難なため、Fig. 3に示すような綿状の小さな塊に粉碎した。その基本特性をTable 2に示す。さらに研削切粉の顕微鏡写真をFig. 4に、レーザー回折/散乱式粒度分布測定装置による粒度分布をFig. 5に示す。

4.3 固液分離方法

研削スラッジはFig. 6に示すようなシリンダ状の金型に投入し、加圧シリンダで加圧して研削液を金型と加圧ロッドの隙間から排出後、残った金属成分である研削切粉を高

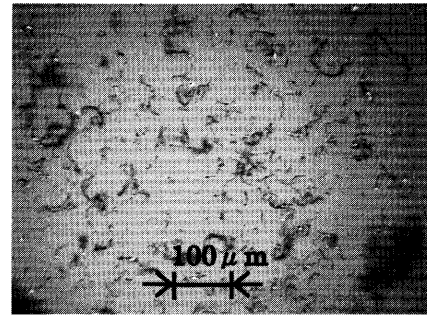


Fig. 4. Magnified grinding swarf.

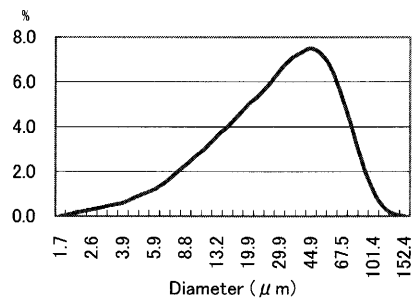


Fig. 5. Size distribution of grinding swarf.

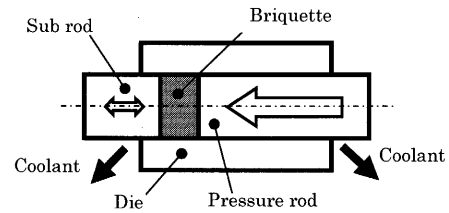


Fig. 6. Separation method.

圧で固形化処理する方法を採用した。

4.4 最終面圧の影響調査

ブリケットに加える最終面圧を98 MPa, 196 MPa, 294 MPa, 353 MPaに調整し、各最終面圧におけるブリケットの含油率と比重を測定した。

4.5 ブリケットの成分分析

製鋼メーカーの協力を得て蛍光X線分析と加熱融解法でブリケットの成分分析を行った。

4.6 固液分離工程の分析

加圧シリンダに圧力センサーを取付け、油圧の圧力変化を記録して固液分離工程を分析した。

4.7 固液分離工程で発生する問題の調査

実用機を2直 (16時間/日) で連続稼働し、固液分離時に発生した問題を調査するとともに技術的改善を加えた。

5. テスト結果

5.1 最終面圧の影響調査

5.1.1 最終面圧とブリケット含油率の関係

最終面圧とブリケット含油率の関係をFig. 7に示す。製

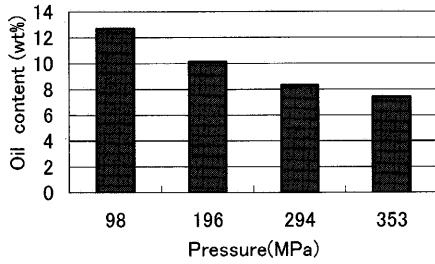


Fig. 7. Relation between pressure and oil content of oil-based briquette.

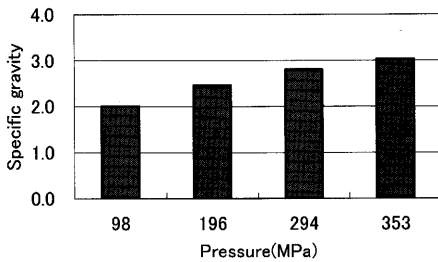


Fig. 8. Relation between pressure and specific gravity of oil-based briquette.

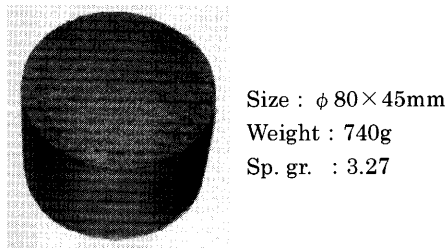


Fig. 9. Oil-based briquette (392 MPa).

鋼メーカーの受入れ基準は含油率 10 wt% 以下であるのに対して、この結果より最終面圧は 294 MP 以上で加圧する必要のあることが判る。

5.1.2 最終面圧とブリケット比重の関係

最終面圧とブリケット比重の関係を Fig. 8 に示す。製鋼メーカーの受入れ基準は取り扱い容易であることに對してブリケット形状保持のためには比重が高いほうが望ましいが、比重が 2.5 以上あれば実用上支障がないことから最終面圧は 196 MPa 以上で加圧する必要のあることが判る。

5.2 ブリケット成分分析の結果

最終面圧と含油率、比重の関係調査結果に基づき最終面圧 392 MPa とした時のブリケット写真を Fig. 9 に、その成分分析の結果を Table 3 に示す。製鋼メーカーのブリケット成分に対する受入れ基準が M-Fe 85 wt% 以上であるのに対して、今回の分析結果では 91.7 wt% と良好であった。さらに含油率も 5.9 wt% で受入れ基準の 10 wt% 以下を満足していた。

5.3 固液分離工程と加圧力変化の関係

固液分離工程の加圧力変化を加圧シリンダ内の圧力変化

Table 3. Chemical analysis of oil-based briquette (392 MPa).

	P	S	Ni	Cr	Cu	T-Fe	M-Fe	Water	Oil
wt%	0.12	0.05	0.01	1.30	0.07	92.8	91.7	0.70	5.90

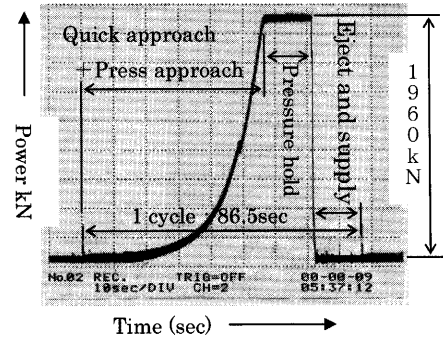


Fig. 10. Pressure curve of pressure cylinder.

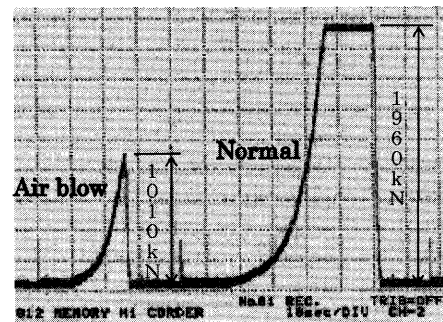


Fig. 11. Pressure curve for air blow with grinding swarf.

を検出することで測定した結果を Fig.10 示す。この図から加圧力は固液分離が脱液工程から固化工程に移行するに従って急激に上昇する様子が判る。なお加圧前進速度は脱液が進むに従って負荷が増大するため遅くなり、最終加圧力に到達した時点では、ほぼ停止状態となり設定時間だけ最終加圧力を保持した後に加圧を完了してブリケットを排出する。

5.4 固液分離時に発生する問題の調査

連続稼働時に発生した問題の調査結果を下記に示す。

5.4.1 研削スラッジ空間に含まれる多量の空気による噴き出し

研削スラッジを加圧すると、加圧初期段階で空気と共にスラッジが噴き出る場合がある。正常な場合と異常な場合の加圧シリンダの圧力変化を Fig.11 に示す。機械は加圧シリンダストローク前進端手前に監視点が設けられており、その監視点で所定の圧力に到達しない場合は材料不足と判断して加圧を中断するよう制御されるため、空気と共にスラッジが噴き出した場合には投入した研削スラッジの大部分が噴き出して監視点で所定の圧力に到達せずサイクルが中断されている。

この現象の発生する原因としては研削スラッジ片が大きすぎて空間に多量の空気が含まれているため、加圧初期段階

階で流動性の高い空気が圧縮されて内圧が上がって噴き出し、その空気の流れに乗って研削スラッジも噴き出すためと考えられる。問題の発生したスラッジには大きなスラッジ片が含まれていたため、細かく破碎したところ噴き出しはなくなった。このことから研削スラッジは投入前に細かく破碎し、空間にある多量の空気を排出しておく必要のあることが判った。

5.4.2 高含油率による流出

固形化処理初期段階から研削スラッジの一部がヘドロ状になって流出ながら脱液処理が進行し、流出が無い場合に比べて短時間で固形化処理が完了する場合がある。その原因として研削スラッジ含油率の高さが考えられるので、その影響を調査した。調査に当たっては5台の濾過機の内、最も含油率の低い研削スラッジと最も含油率の高い研削スラッジを選んで加圧力変化の違いを比較した。

- ・ No. 1…最も含油率が低い研削スラッジ
(含油率40 wt%で押し潰しても油が出ない)
- ・ No. 2…最も含油率が高い研削スラッジ
(含油率60 wt%で押し潰すと油が搾り出される)

No. 1とNo. 2の研削スラッジを固液分離した時の加圧力変化をFig.12に示す。そして含油率が60 wt%の研削スラッジよりできたブリケットの写真をFig.13に示す。観察の結果、含油率の高い時には加圧開始直後から研削液と研削切粉の混合したヘドロ状物質が流出して見かけ上早く固液分離が進行し、残った研削スラッジが固形化するためブリケット重量は通常800 g前後に対して700 g以下と大幅に軽くなることを確認され固液分離の障害となることが判った。この結果より研削スラッジの含油率が50 wt%程度以下となるよう加圧式ベルトフィルタを管理するとともに、含油率が高い場合には遠心分離機等で50 wt%程度まで脱油してから固形化処理機に投入することで安定した固液分離をする必要があると考えられる。

5.4.3 操業開始直後の固形化不良

これまでのテストで操業開始直後の数個はブリケット固形化が十分でないことが判っているため、その状況を調査した。

(サイクルタイム70秒の時)

前日の連続運転時にサイクルタイムを70秒(加圧速度2 mm/s)で連続稼働して正常なブリケットができることを確認後、翌日の操業開始直後2個のブリケットを調査した。その結果をTable 4に示す。なおテスト時の気温は13°Cで、機械は油圧をONしてから10分後にスタートした。

結果は2個とも正常に固形化ができず、加圧力の瞬間的低下から噴き出しが発生していることが判る。噴き出しの原因は機械が冷えた状態では研削液は加熱されず粘性が高いため搾り出すのが困難となり、金型内の圧力が上昇して液状化現象⁴⁾と同様の現象が発生し、絡み合っていた研削切粉の一部が解れて研削液と均等に混ざりヘドロ状になっ

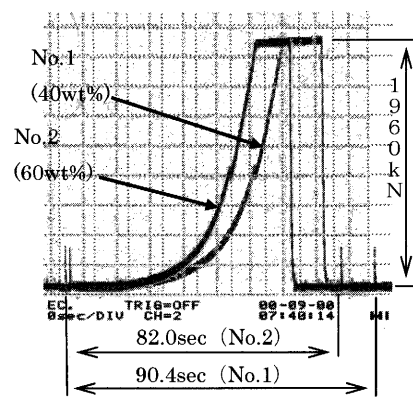
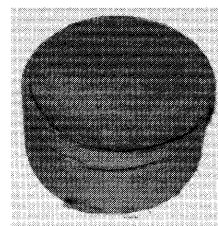


Fig. 12. Pressure curve for 40 wt% and 60 wt% of oil-based grinding sludge.



Size : φ 80×44
Weight : 660g
Sp. gr. : 2.99

Fig. 13. Briquette made from 60 wt% oil-based grinding sludge.

Table 4. Briquette at machine start (cycle time 70 s).

No.	1	2
Weight	850g	450g
Thickness	(80mm)	(40mm)
Sp. gr.	***	***
Cycle time	74.5sec	74.2sec
Briquette		
Pressure curve	 1 pressure down	 2 pressure down

て噴き出したものと推定される。なお研削液の粘性は23.8 cSt (20°C)である。

(サイクルタイム90秒の時)

サイクルタイム70秒では操業開始直後に噴き出しが発生したため、同様のテストをサイクルタイムが90秒(加圧速度1.5 mm/s)になるよう調整してテストを実施した時の結果をTable 5に示す。

サイクルタイムを90秒にすると噴き出しは発生しなくなったが、最初の2個は十分脱液がされないまま最終加圧力に達してしまい軟らかブリケットができた。この結果より最初の数個はさらに加圧速度を下げ稼働し、機械の温

Table 5. Briquette at machine start (cycle time 90 s).

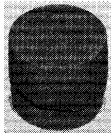
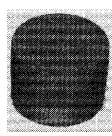

No.	1	2	3
Weight	960g	875g	760g
Thickness	83mm	65mm	49mm
Sp. gr.	2.30	2.68	3.09
Cycle time	93.3sec	93.3sec	87.1sec
Briquette	 Soft	 Soft	 OK



Fig. 14. Briquette recovery.

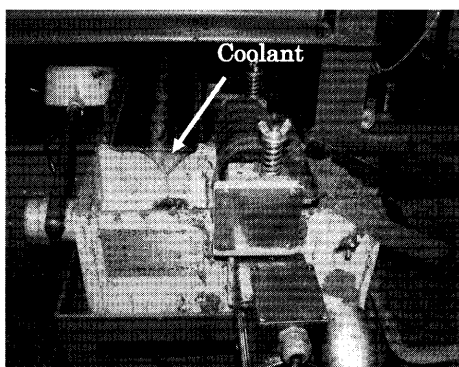


Fig. 15. Coolant recovery.

度が上昇した時点で通常の加圧速度に戻すことが有効と考えられる。今回のテスト結果より実用機では最初の10個は加圧速度を通常の半分（加圧速度1mm/s）に落とすことで1個目から正常なブリケットができるよう対策した。

6. 環境負荷軽減と経済的効果

6.1 ブリケットと研削油の回収状況

実用機で研削スラッジを連続処理した時のブリケット回収状況をFig.14に、研削油の回収状況をFig.15に示す。

6.2 長期テスト結果

実用機を使用して2001年4月から半年間の基礎テストを実施後、10月より本格的稼働に移行した時の研削スラッジ処理量をFig.16に、油性研削液回収量の結果をFig.17に

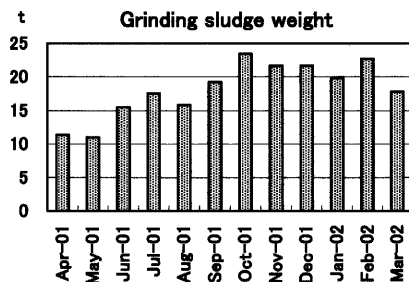


Fig. 16. Supply weight of grinding sludge.

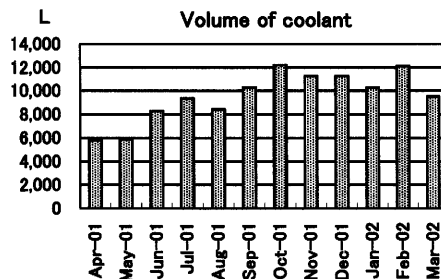


Fig. 17. Recovered volume of coolant.

示す。

6.3 経済的効果の確認

実用機による2001年4月から2002年3月までの1年間の実績を基に、コストダウン金額を算出すると下記のようになる。

- ・処理した油性研削スラッジ総重量：217,383 kg
- ・回収した研削油総体積：114,710 L

A) 産廃処理費用削減によるコストダウンメリット

$$45 \text{ 円/kg} \times 217,383 \text{ kg} = 9,782 \text{ 千円/年}$$

…産廃処理単価45円/kg

(注) ブリケットは有価物⁵⁾ (0~2円/kg程度)

B) 研削油回収によるコストダウンメリット

$$91 \text{ 円/L} \times 114,710 \text{ L} = 10,438 \text{ 千円/年}$$

…研削油単価91円/L

以上よりコストダウンメリットの合計は

$$A)+B)=20,220 \text{ 千円/年}$$

となり、非常に大きなコストダウン効果のあることが実証された。

6.4 環境負荷軽減とコストダウンの両立に対する結果

今回の実用機を使用したテストで研削スラッジは固液分離された後金属成分は製鋼原料として再利用し、研削液は濾過して研削ラインに戻して再利用したことで産廃処理量はゼロとなり、環境負荷軽減が達成されると同時に産廃処理費用ゼロと研削液購入量の大幅削減が実現して、目標として掲げた環境負荷軽減とコストダウンの両立が実用レベルで実証された。

7. 今後の技術開発課題

研削スラッジは性状が安定しないため固形化处理機の実用化は困難と予想していたが、1年間連続稼動できたことで実用化が達成されたと判断する。今後は下記の技術開発課題に取り組むことが重要と考える。

7.1 小型・省エネタイプ固形化处理機の開発

今後さらに研削スラッジのリサイクルを推進するためには、研削スラッジの金属成分である研削切粉の品質保証をすることで、製鋼メーカーで安心してブリケットを製鋼原料として使用してもらえる条件を満たす必要がある。そのためには研削スラッジを分別回収・分別処理することが理想で、それを実現するためには研削スラッジの発生場所に設置可能な小型の固形化处理機の開発が必要となる。

さらに今回開発した実用機に採用した油圧駆動方式は発熱が大きく、環境機器として備えるべき省エネ設備とはなっていないためエネルギー効率の高い機械の開発が不可欠と考える。

7.2 新たな固液分離技術の開発

研削スラッジの固液分離に取り組む過程で、世の中には研削スラッジ以外にも固液分離をして産廃処理から脱却する必要のあるものが多く存在することが判ってきた。例え

ばホーニングスラッジ⁶⁾、超仕上げスラッジ⁷⁾、ガラスの研削切粉、超硬の研削切粉、オカラ等で、これらは今回開発した固形化处理機では固液分離できないため、新たな固液分離技術の開発が必要と考える。

8. 結言

研削スラッジを固液分離することで環境負荷軽減がコストダウンと同時に達成出来ることを実用レベルで実証したが、他方で今回開発した固液分離方式では対応不可能なスラッジが多く存在することも判ったため、固液分離技術の基礎的な研究することで改善を図り、更なる環境負荷軽減に取り組む。

文 献

- 1) 中山哲夫：廃棄物処理・再資源化技術ハンドブック，(1993)，5.
- 2) 吉澤 正：ISO14001環境マネジメント便覧，(1999)，60.
- 3) 竹中規雄：機械工作法⑤研削加工，(1968)，52.
- 4) 松岡 元：基礎土木工学シリーズ 土質工学，(1999)，170.
- 5) 安井 至：リサイクル百科事典，(2002)，757.
- 6) 竹中規雄：機械工作法⑤研削加工，(1968)，170.
- 7) 竹中規雄：機械工作法⑤研削加工，(1968)，176.