アルミ付き廃棄物を用いた電気エネルギー創出技術の開発 (アルミ付き紙系廃棄物を用いたアルミとパルプの分離)

水木 伸明^{a,*} 川口 清司^b

Development of Technology Generating Electric Energy Using Aluminum Based Waste (Separation of Aluminum and Pulp Using Paper-based Waste with Aluminum)

Nobuaki Mizuki^{a,*}, Kiyoshi Kawaguchi^b

(Received October 7, 2019; accepted November 6, 2019)

Abstract

This R&D aims to collect and separate aluminum-containing waste materials (general waste and industry waste), and recover highly-pure aluminum by the efficient dry distillation process. By using the cartridge system (containing the aluminum and reactant), hydrogen energy is generated, and electric power is generated by fuel cell for variety of applications. This system contributes the improvement of aluminum material flow and provides low-carbon solutions. PCR (pulper continual reject) Pulper system could separate aluminum-rich material from the paper-based waste. It was possible to find the condition to recover aluminum and pulp by establishing the model which predicted time to separate aluminum and pulp from the paper-based waste with aluminum.

キーワード：アルミ付き紙系廃棄物，水素，分離，パルプ，パルパー

Keywords : Paper-based waste with aluminum, Hydrogen, Separation, Pulp, Pulper

1. はじめに

エネルギー小国，資源小国であるわが国は，エネルギーと資源を外国から輸入し，それらを生産活動に投入するというのが，基本的な経済構造である。しかし現在，わが国のエネルギーフローと物質フローを考えた場合，図1に示すようにその「入口」と「出口」の両面で大きな問題を抱えている。

まずエネルギーフロー面では，入口問題としてエネルギー価格の高騰があげられる。直近では石油価格は50ドル/バレルまで落ち着いているが，長期的には石油価格は上昇し，2030年には100ドル/バレルを突破すると予測

している。また出口問題としては，化石エネルギー利用に由来するCO₂排出量の増加と，それに起因する地球温暖化がある。

物質フロー面では，入口問題として資源価格の長期的な高騰が挙げられる。基本的な工業素材であるアルミニ

Fig. 1. Problems in energy flow and material flow in Japan.

* Corresponding author. E-mail: n_mizuki@alhytec.co.jp

a アルハイテック株式会社

〒939-1119 富山県高岡市オフィスパーク1番地
Alhytec Inc.

1, Office park, Takaoka-shi, Toyama-ken, Japan 939-1119

b 富山大学大学院理工学研究部 (工学)

〒930-8555 富山市五福3190

University of Toyama

3190, Gofuku, Toyama-shi, Japan 930-8555

ウムの国際価格は、金融危機等の影響を受けて変化しますが、長期的には上昇する傾向にある。出口問題としては、家庭や事業所からの廃棄物の増加と、自治体が抱える廃棄物処理場余剰能力の減少がある。このエネルギーフローと物質フローの改善こそが、日本における緊急の課題である。

食品・錠剤の包装に使用されるアルミニウム（アルミ箔）は年間15万トン程度（アルミ最終需要の3.5%）であるが、その薄さゆえにアルミとして回収は不可能であり、焼却処分や埋め立て処分されている（リサイクル率はほぼゼロ）。またこれまでの調査で、一般家庭の燃えるゴミの1割程度がアルミ系廃棄物であることが分かっている。しかしアルミは低融点であり、アルミ系廃棄物からアルミ分を回収することは困難と見られていた。

廃アルミの有効利用に関する先行研究としては、アルミドロスからの水素生産システムがある⁽¹⁾⁽²⁾が、アルミドロスの品質やアルミ産業の立地依存という課題がある。また、アルミ缶やアルミ箔からの水素ガス発生特性に関する基礎的研究があるが⁽³⁾⁽⁴⁾、金属アルミにリサイクル

した方が良いという課題がある。

一方で、古紙をリサイクルする際に繊維状に離解する技術については報告例があるが^{(5)~(9)}、アルミ系廃棄物の中のアルミ付き紙パックからアルミとパルプに分離する研究は報告されていない。

本研究では、アルミ系廃棄物（産廃、一般廃棄物）を効率よく回収・分別し、それを最適条件で乾留することで高純度アルミを回収、その回収アルミを反応液とともにカートリッジ化することで、社会のエネルギー需要をまかなう新規のエネルギーシステムを構築するための技術開発と社会システム創出を行う。これにより、アルミ資源の利用率を向上させるとともに、低炭素地域システムを実現することを目的とする。

その中で、古紙を繊維状にほぐしてリサイクルする際に用いられるパルパーと呼ばれる機械の離解原理を応用して、アルミ付き紙パックをアルミとパルプに分離する技術を確認するとともに、アルミとパルプを回収するモデル化式を確立することにより、アルミとパルプの回収時間を予測可能にしたので報告する。

Electric energy from aluminum based waste for packing vessel

() Aluminum content rate

Fig. 2. Electric energy from aluminum based waste for packing vessel.

2. アルミ系廃棄物から電力を取り出す仕組み

2.1 アルミ系廃棄物を用いたエネルギー創出

図2に容器包装用アルミ系廃棄物を用いて、電力エネルギーを取り出す過程を示す。現在世の中で生産されている容器包装用アルミ系廃棄物は、アルミ付き紙系一般廃棄物（ジュースやお茶の紙パック等）、アルミ付きプラスチック系一般廃棄物（スナックの袋、錠剤のパッケージ等）、ほぼアルミの一般廃棄物（アルミ箔等）に分類される。

第1段階として、この中のアルミ付き紙パックはパルパーを用いてアルミとパルプに分離される。パルプはトイレットペーパーやティッシュペーパーにリサイクルされる。（図2の①）

第2段階として、この過程で分離されたアルミやアルミ付きプラスチック系一般廃棄物は、乾留技術により純度の高いアルミを取り出すことができる。その際に燃料となる副生タールを回収することができる。（図2の②）

第3段階として、乾留したアルミに水酸化ナトリウム水溶液を反応させることによって水素を発生させ、燃料電池に水素と空気を供給することによって電気エネルギーを取り出すことができる。また、この水素発生過程において副生される水酸化アルミニウムは、凝集剤やセラムックス等の原料として有効利用することができる。

上記の乾留アルミと水酸化ナトリウム水溶液を詰めたカートリッジと燃料電池、コントローラから構成されるカートリッジシステムは、非常用電源、電源インフラのない場所における電源、電動車椅子、自動販売機等の幅広い用途に用いることが期待される。（図2の③）

2.2 アルミとパルプの分離技術の開発

古紙を繊維状にほぐしてリサイクルする際に用いられるパルパーと呼ばれる機械の離解原理を応用して、アルミ付き紙パックをアルミとパルプに分離するとともに、高効率でアルミを回収する技術を開発する。

2.3 高効率乾留技術の開発

アルミ系廃棄物から高純度アルミを回収するための乾留の最適条件を特定し、実証炉を開発する。特に廃棄物に付着する紙・プラスチックの自己燃焼熱を利用して乾留を持続させるほか、余剰に発生するガスを利用することで、全体として投入エネルギーなしで乾留を行う技術を確認する。

2.4 カートリッジ式水素発生技術の開発

乾留で得られたアルミを用いた、カートリッジ式水素発生装置と発生した水素を燃料電池に供給して電気エネルギー発生させる装置を開発する。技術課題は乾留アルミと水酸化ナトリウム水溶液との反応特性を把握すること、水素を発生する際の圧力制御方法の検討、燃料電池を用いたカートリッジ式小型電源の開発である。

Fig. 3. Separation of aluminum and pulp raw material.

3. アルミ付き紙パックの分離技術

お茶やジュース等の包装容器は図3に示すようなアルミ付き紙パックが用いられている。紙パックの内面にはアルミ箔がコーティング加工されており、常温で数ヶ月の長期保存が可能である。このアルミ付き紙パックは廃棄後リサイクルされずに大部分が焼却処分されていた。本研究はこのアルミ付き紙パックをアルミとパルプに分離する技術を確認し、アルミからは電気エネルギーを取り出し、パルプからはトイレットペーパーやティッシュペーパーにリサイクルする。

3.1 スラッシュパルパーを用いた分離技術の予備検討

アルミ付き紙パックをアルミとパルプに分離する技術を確認するための予備検討を行った。図4に示すスラッシュパルパーという装置を使用して、アルミとパルプを分離できるかどうかを実験した。スラッシュパルパーは中央にスラッシュ翼を持つスクリーンがあり、そのスクリーンによる水の流れ作用とストレーナーによる水を妨げる作用の相互作用によってアルミ部とパルプ部に分離できる可能性がある。

実験した結果、図5に示すようにスラッシュパルパーを用いることでアルミ部とパルプ部に分離することができた。しかし、アルミ部とパルプ部を分けて回収する機構が無い場合、回収物はアルミ部とパルプ部が混在しており、そこからアルミを取り出すことが課題となった。

Fig. 4. Slash pulper.

Fig. 5. Recovered aluminum and pulp.

3.2 小型パルパーを用いた予備実験

図 6 に示す PCR (Pulper Continual Reject) パルパーを用いて実験を行った。図 7 に示すようにパルパー中心部に回転羽根と多数の孔を持つプレートがあり、回転羽根 1000rpm で回転することでアルミ部とパルプ部に分離する。プレートは孔径 $\phi 20\text{mm}$ のプレートの下に孔径 1.5mm のプレートがある二重構造である。2 枚は相互に僅かにスライド可能であり、その左右の振動で分離されたパルプ繊維は孔を通過し、アルミ部は通過せずに残存する。回収アルミには、アルミ部以外は残るが、アルミを分離して回収することが期待できる。

今回の試験では常温の水道水 700ℓ に対して 10kg のアルミ付紙系 (箔アルミ) を投入し、約 15 分間運転を行った。図 8 に回収したアルミとパルプを示す。PCR パルパーを用いることでアルミ部 (重量比 60%水分 + 重量比 15%パルプ) を回収することができた。

Fig. 6. PCR Pulper.

(a) Structure of pulper.

(b) Structure of two plates.

Fig. 7. Structure of pulper with moving blades and plates.

(a) Aluminum.

(b) Pulp.

Fig. 8. Recovered aluminum and pulp.

3.3 ミニライン用分離機を用いた分離実験装置

PCR パルパーを用いてアルミ付き紙パックをアルミとパルプに分離できることがわかったので、システムに組み込めるミニライン用分離機を製作してアルミとパルプの分離実験を行った。

図 9 と図 10 に分離機の構造と外観を示す。前述の PCR パルパーと同様に内部に回転羽根と多数の孔をもつ二重構造プレート (孔径 $\phi 20\text{mm}$ のプレートの左側に孔径 $\phi 1.5\text{mm}$ のプレートがある二重構造) があり、回転羽根が 1000rpm で回転することで、アルミ部とパルプ部に分離する。スクリーンを有する回収用ボックスが 2 つ備えてあり、アルミ部とパルプ部を別々に回収することができる。パルパー容量 700ℓ、貯水タンク容量 1000ℓである。

原料となるアルミ付き紙パックを原料投入口から入れ、ポンプによりタンクから水を吸い上げてパルパー内に注入する。モーターにより回転翼を回転させると、アルミ付き紙パックはパルパー内でアルミ部とパルプ部に分離され、図 11 に示すように (i) に通じるバルブを開けるとプレートの孔をパルプ部が通過し、パルプ回収用ボックスに送られる。次にパルパー内に残ったアルミ部をア

ルミ回収用ボックスに送る。(i) のバルブを閉じ、(ii) に通じるバルブを開けると、水の流れてアルミ部がアルミ回収用ボックスに回収される。また、図 12 に示すように各回収用ボックスの壁面にはスリットを有するスクリーンが設けてある。スリットの幅を 0.1mm にすることにより、水は通過するが、アルミやパルプは通過しないような構造になっている。

Fig. 9. Structure of separator.

Fig. 10. Appearance of separator.

Fig. 11. Boxes for recovering.

Fig. 12. Slits for filter.

3.4 ミニライン用分離機を用いた分離実験結果

この製作したミニライン用分離機を用いて、アルミとパルプの分離実験を行った。原料となるアルミ付き紙パック 20kg を投入し、水流量 124L/min の条件で分離実験を実施した。具体的には、ミニライン用分離機を動作させながら、アルミプラ部を回収してアルミプラ部とパルプ部の分離状態を観察するとともに、アルミプラ部を強熱減量して不純物の付着割合を調査した。

図 13 に分離開始後におけるアルミプラ部(アルミに不純物であるプラスチックやパルプが付着したもの)のアルミの重量割合と不純物の重量割合の時間変化を示す。分離開始時では、不純物の重量割合が 95.67%, アルミの重量割合が 4.33%であることを示している。時間の経過とともにアルミからパルプやプラスチックの不純物が分離され、アルミの純度が増大していることがわかる。分離開始後 160min では、不純物の重量割合が 84.19%, アルミの重量割合が 15.81%まで増大する。図 15 より 160min 後ではパルプの回収量は 13.3kg であること、アルミ付き紙パックのアルミ含有量が約 5%であることを考慮すれば、大部分のアルミを回収することができる。

また、表 1 に時間経過ごとの観察結果を示すとともに、以下に観察結果について説明する。

〈観察結果の説明〉

- ①Time:0min 投入前の原料の外観
- ②Time:5min アルミプラ部とパルプ部の離解が始まる。
- ③Time:10min パルプ部が剥がれているものも有れば、まだ剥がれきっていないものもある。
- ④Time:15min アルミプラ部とパルプ部に剥がれている。
- ⑤Time:20min 剥がれたパルプ部が小さくなっている。
- ⑥Time:40min パルプ部が剥がれているが、アルミプラ部表面にはまだパルプが残っている
- ⑦Time:80min アルミプラ部表面のパルプが減少する。
- ⑧Time:160min アルミプラ部表面のパルプはほとんど残っていない。

Fig. 13. Changes of impurities and aluminum.

Table 1. Experimental results of recovering aluminum.

Time: 0 min	Time: 5 min	Time: 10 min	Time: 15 min

Time: 20 min	Time: 60 min	Time: 80 min	Time: 160 min

Fig. 14. Change of amount of recovered pulp.

Fig. 15. Change of amount of recovered pulp.

次にアルミ付き紙パックをアルミとパルプに分離するために必要な時間について検討する。アルミとパルプを分離して、回収するパルプ量の時間的変化を求めることができれば、パルプの回収時間とアルミの回収時間を求めることができる。分離するために必要な時間は、アルミ付き紙パックの投入量と循環させる水流量に依存すると考えられる。そこで、アルミ付き紙パックの投入量と循環させる水流量をそれぞれ変化させながら、回収したパルプ量の変化を実験により求めた。図 14 と図 15 に実験結果を示す。

図 14 にアルミ付き紙パックの投入量を 10kg～30kg に変化させて、パルプ回収量の変化を求めた実験結果を示す。循環させる水流量は 70L/min である。アルミ付き紙パックの投入量を増やした方がパルプ回収量は当然増大するが、回収するための時間は投入量が少ない方が短いことがわかる。

また、図 15 に循環させる水流量を 50L/min～124L/min に変化させて、パルプ回収量の変化を求めた実験結果を示す。アルミ付き紙パックの投入量は 20kg である。循環させる水流量を増大させた方がパルプを回収する時間は短くなることがわかる。例えば、循環水流量 50L/min と 124L/min では、8kg のパルプを回収するための時間が 2 倍程度異なることがわかる。

3.5 アルミとパルプの分離時間の予測

このように条件によりパルプ回収時間が大きく異なるために、異なる条件の場合でも回収時間を短くできるような条件を見出すことが重要である。そこで、パルプ回収をモデル化して、異なる条件の場合でも回収時間を予測することを検討する。図 16 にパルプ回収モデルを示す。タンクに質量 M の水を貯めておき、その中にアルミ付き紙パックから分離したパルプが投入される。投入されるパルプの質量は W である。また、タンクの側面からはフィルターを介してポンプで水を流量 Q で循環させる。タンク内部のパルプはフィルターで捕捉されて回収される。

Fig. 16. Analysis model of pulp concentration in tank.

Fig. 17. Analysis model of pulp concentration in tank.

Fig. 18. Comparison of experiment and calculation ($Q=67\text{L/min}$).

図 17(a)に循環水流量がない場合におけるタンク内のパルプ濃度の変化を示す。この場合のモデル化式は式(1)で表すことができる。

$$\frac{dD}{dt} = C e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (1)$$

ここで C はタンク内のパルプ飽和濃度を τ_1 で除した値である。時間の経過とともに、分離したパルプがタンク内に溜まっていき、パルプ濃度が増大する。

図 17(b)にタンク内に溜められたパルプが循環水によって、パルプ濃度が減少していく過程を示す。この場合のモデル化式は式(2)で表すことができる。

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{1}{\tau_0} D \quad (2)$$

ここで τ_0 は初期のパルプ濃度が $1/e$ 倍に低下するまでの時間である。実際のアルミ付き紙パックにおける分離されたパルプ濃度の変化は、式(1)と式(2)を組み合わせた式(3)で表すことができる。

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{1}{\tau_0} D + C e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (3)$$

式(3)を積分することによって式(4)が得られ、パルプ濃度の時間変化を求めることができる。

$$D = \frac{C}{\frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau_1}} \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right) \quad (4)$$

Fig. 19. Comparison of experiment and calculation ($Q=67\text{L/min}$).

Fig. 20. Comparison of experiment and calculation ($Q=67\text{L/min}$).

図 18 にアルミ付き紙パック 20kg を投入して、循環水流量 $Q=67\text{L/min}$ の条件でアルミとパルプの分離実験を行い、回収されたパルプを加えることによって、実質的にパルプが離解してパルプ濃度が増加していく様子を示す。この結果より τ_1 を求めることができる。

図 19 にアルミ付き紙パック 20kg を投入して、循環水流量 $Q=67\text{L/min}$ の場合について、タンク内パルプ濃度の変化を実験と式(1)を用いて計算した値の比較を示す。ただし、回収したパルプはタンク内パルプ濃度に加えている。計算値は実験値とほぼ一致している。

図 20 にアルミ付き紙パック 20kg を投入して、循環水流量 67L/min の場合について、タンク内パルプ濃度の変化を実験と式(3)を用いて計算した値の比較を示す。この場合、回収したパルプはタンク内に戻していないので、実際の現象を表している。計算値は実験値とほぼ一致している。パルプの回収量は式(4)から求めたパルプ濃度に循環水量を乗じて、時間積分することにより算出することができる。

以上により、パルプ回収のモデル化式を確立すること

ができたが、アルミ付き紙パックからパルプ回収式を使用して、パルプの回収量を求めることができるので、同時にアルミの回収量も求めることができる。

4. おわりに

本研究では、現時点において廃棄されているアルミ系廃棄物から電気エネルギーを取り出すシステムを検討するとともに、アルミ付き紙パックから高効率でアルミを分離回収する技術を開発した結果、以下の知見が得られた。

- (1) アルミ系廃棄物（産廃、一般廃棄物）を効率よく回収・分別し、それを最適条件で乾留することで高純度アルミを回収、その回収アルミを反応液とともにカートリッジ化することで、社会のエネルギー需要の一部を賄うことができる新規のエネルギーシステムを提案した。
- (2) パルパー中心部に回転羽根と多数の孔を持つ2重構造のプレートを設けた PCR (Pulper Continual Reject) パルパーを用いて、アルミとパルプの分離実験を行った結果、回転羽根によりアルミとパルプを分離することができ、孔径の異なる2枚のプレートが振動することによって、分離されたパルプ繊維は孔を通過し、アルミ部は通過せずに残存するのでアルミ部とパルプ部を分けて回収することができることを見出した。
- (3) PCR パルパーを応用したミニライン用分離機を製作し、アルミとパルプの分離性能を実証するとともに、アルミとパルプを回収するモデル化式を確立した。これにより、アルミ付紙パックの投入量や循環水量を変化させた条件でもアルミとパルプの回収時間を予測できるようになった。

文 献

- (6) 藤田 和巳：「古紙原料品質低下に対応する DIP 製造技術」，紙パ技協誌 72(8)，pp.865-874，2018.
 - (7) 三浦 俊和，永瀬 伸一：「省エネ型パルパによる難離解性古紙処理」，紙パルプ技術タイムス 49(9)，pp.5-9，2006.
 - (8) 岡 作次郎：「新聞古紙の製造技術」，紙パ技協誌 51(7)，pp.1032-1046，1997.
 - (9) PETTIT, P: "POST BLEACHING OF DEINKED PULP FOR NEWSPRINT PRODUCTION", APPITA JOURNAL Vol.45, No.6, pp.385-388, 1992.
-

水木 伸明

1983 年 3 月桃山学院大学経営部経営学科卒業。
1983 年 4 月トナミ運輸株式会社に入社。2013 年 10 月よりアルハイテック株式会社。現在代表取締役を務め、廃アルミを用いた水素利用の研究に従事。

川口 清司

1979 年 3 月金沢大学工学部機械工学科卒業。同年 4 月日本電装㈱（現㈱デンソー）入社，2001 年 4 月富山大学に移り，現在富山大学大学院理工学研究部（工学）教授，工学博士。ファン騒音の低減，再生可能エネルギー，アルミ水素エネルギー等，熱流体の研究に従事。
- (1) 大菅 広岳，中島 謙一，横山 一代，長坂 徹也：「アルミドロスの MFA およびその有効利用技術に関する LCA」，日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集 2006(0)，pp.72-72，2006.
 - (2) Arunabh Meshram, Kamallesh Kumar Singh, "Recovery of valuable products from hazardous aluminum dross: A review", Resources, Conservation and Recycling, Vol.130, pp.95-108, 2018.
 - (3) Ho, Ching-Yuan: "Hydrolytic reaction of waste aluminum foils for high efficiency of hydrogen generation", INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY Vol.42, No.31 pp.19622-19628, 2017.
 - (4) Ching-Yuan Ho, Chi-Hang Huang: "Enhancement of hydrogen generation using waste aluminum cans hydrolysis in low alkaline de-ionized water", International Journal of Hydrogen Energy Vol.41, No.6, pp.3741-3747, 2016.
 - (5) 青嶋 和男，藤田 和巳：「脱墨工程の問題点と解決に関する提案」，紙パ技協誌 66(10)，pp.1075-1082，2012.