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 (アルミ系廃棄物の乾留技術)

水木 伸明^{a,*} 川口 清司^b

Development of Technology Generating Electric Energy Using Aluminum-based Waste (Technology of Dry Distillation of Aluminum-based Waste)

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

(Received October 11, 2019; revised December 13, 2019; accepted January 8, 2020)

Abstract

The purpose of this research is to generate electric power from aluminum-containing waste materials. Aluminum of high purity is recovered using dry distillation technology from aluminum-containing waste, is reacted with sodium hydroxide aqueous solution, and hydrogen is generated. The generated hydrogen is supplied to fuel cell in order to generate electric power. The cartridge system consist of hydrogen generating device and fuel cell unite is used for variety of applications. Prototype dry distillation system was upgraded so that dry distillation process became simpler, from two-staged process to single-staged system. The simulation showed that by using the heat energy from generated distillation gas and tar, dry distillation process could be self-sustained when the reactor reached the stable operation condition.

キーワード：アルミ系廃棄物，乾留，アルミニウム，ガス分析

Keywords : Aluminum-based waste, Distillation, Aluminum, Gas analysis

1. はじめに

我が国はエネルギーや資源に恵まれないために、それらを外国から輸入して、生産活動に投入するというのが、基本的な経済活動である。しかし、現在の我が国のエネルギーフローと資源フローを考えた場合、それらの入口問題と出口問題を抱えている。

エネルギーフローでは、入口問題としてエネルギー価格の高騰が挙げられる。とくに石油や天然ガスの価格は長期的には上昇すると予測されている。また、出口問題では化石エネルギー使用に伴う二酸化炭素の排出による地球温暖化、それに起因する海面の上昇や異常気象の高

頻度化が挙げられる。日本でも近年の大型台風の上陸や、局所的降雨による河川の洪水、それに伴う地滑り等の災害が頻繁に発生するようになっている。

物質フローでは、入口問題として工業材料等の高騰が挙げられる。基本的な工業用材料であるアルミニウムの価格は長期的に高騰する傾向にある。また、出口問題では家庭や事業所からの廃棄物の増加と、自治体の廃棄物処理場の処理能力の減少があり、廃棄物を今後如何に大幅に減少できるかが重要である。このエネルギーフローと物質フローの改善が、日本における緊急に対応する必要のある課題である。

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

* 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

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が⁽¹⁾⁽²⁾、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や⁽³⁾⁽⁴⁾、アルミ粉からの水素ガス発生特性に関する基礎的研究⁽⁵⁾⁽⁶⁾があるが、アルミにリサイクルした方が良いという課題がある。さらに、アルミ系廃棄物の焼却灰を用いた水素ガス発生特性に関する研究⁽⁷⁾⁽⁸⁾もされているが、コストに課題がある。一方、プラスチックの分解に関する研究として、廃棄プラスチックを溶解してリサイクルする研究⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、廃棄プラスチックの熱分解によるガス化や油分の回収に関する報告例があるが⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、アルミ系廃棄物を乾留することによって、高純度アルミを回収する研究例は見当たらない。

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、アルミ系廃棄物から高純度のアルミを取り出す乾留技術を開発することと、乾留の過程で発生する乾留ガスや副生タールから得られる発熱量を計算して、乾留工程に必要なエネルギーを賄うことができるかどうか検討したので報告する。

2. アルミ系廃棄物から電力を取り出す仕組み

図1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。

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。

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

Fig. 1. Electric energy from aluminum based waste for packing vessel.

Fig. 2. Process of dry distillation of waste aluminum.

において副生される水酸化アルミニウムは、凝集剤やセラミ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。

3. アルミ付きプラスチック・紙の乾留技術

3.1 乾留技術開発の内容

ティーバッグやクッキー等の包装容器は、図2に示すようなアルミ付きプラスチックが用いられている。プラスチックの内面にはアルミ箔またはアルミ蒸着加工されており、常温で数ヶ月の長期保存が可能である。このアルミ付きプラスチ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プラスチックやアルミ付き紙パックから分離したアルミから高純度アルミを分離する乾留技術を確立する。

Fig. 3. Outline of dry distillation.

Fig. 4. Structure of dry distillation furnace.

Table 1. Specifications of dry distillation furnace.

Size	: 1000W × 4900L × 2100H
Capacity	: 25 kg/h
Temperature	: 450 – 700 °C
Rotating rate	: 2 – 8 rpm
Heating type	: Heating by hot air

乾留とは図 3 に示すようにアルミ付きプラスチックを空気をほぼ遮断した状態で加熱し、プラスチックをガス化してアルミのみを回収する技術である。乾留温度や供給する空気量により回収するアルミの純度が変化する。本研究では、できるだけ高純度アルミを回収できる乾留技術を確立する。

3.2 乾留炉の開発

図 4 に実験に用いた乾留炉を示す。乾留炉は外径 600mm、長さ 1660mm の円筒形状であり、低速度で回転しながら均等に加熱することができる。乾留炉の外壁に加熱部が設けてあり、内部に高温空気を供給することにより加熱する。アルミ付きプラスチックやアルミ付き紙パックから分離されたアルミは、原料供給用のフィーダーから乾留炉内に投入される。また、乾留炉内には酸化反応用の空気が供給される構造になっている。乾留アルミは乾留炉出口から排出され、プラスチックをガス化した乾留ガスは副生タールとして捕集されるほか、加熱用燃料として使用される。表 1 に乾留炉の仕様、図 5 に乾留炉の外観を示す。

Fig. 5. Appearance of dry distillation furnace.

(a) Test samples.

(b) 550°C.

(c) 600°C.

(d) 650°C.

Fig. 6. Results of dry distillation experiment.

3.3 乾留条件の検討

最初に乾留温度の検討を行った。乾留炉にて、できるだけ密閉して熱分解を行う条件と、空気流量を約 1Nm³/h 取り入れた条件の 2 種類を設定し、試験運転を行った。試験用サンプルは図 6(a) に示す錠剤用アルミ付きプラスチックである。乾留炉内中央部の温度は 600°C を基準に行った。また乾留ガスは、ガス冷却装置（スプレイ塔）で洗浄・冷却後にサンプリングを行った。上記の条件において、以下の結果が得られた。

空気を遮断した条件では回収したアルミにカーボンが付着して純度の高いアルミを得ることができなかった。従って、回収したアルミに含まれるカーボン量を少なくする手段として、空気を約 1Nm³/h 取り入れることが有効と考えられる。

図 6(b)～(d) に温度を変えて乾留した結果を示す。550°C ではカーボンを十分に除去できないが、高温にするとカーボン量が減少する傾向が見られる。650°C 付近では、アルミがちぢれ状になり、溶融が始まっていると推定されるため、乾留温度条件は、約 600°C が適温と思われる。

3.4 アルミ付きプラスチックを原料とした乾留試験

図 7 に示す原料（アルミ付きプラスチック）を用いて乾留試験を行った。乾留温度は 600°C ，原料の供給量を 10kg/h ，供給空気量を $0.5\sim 2\text{Nm}^3/\text{kg-Plastic}$ に変化させて乾留試験を行った。一例として供給空気量を $1.8\text{Nm}^3/\text{kg-Plastic}$ にした場合，図 8 に示すように回収されたアルミは外観が茶褐色であり，炭素を主に含む有機性不純物を含む状態で得られた。不純物を除去する目的で，不純物を含む回収アルミに供給空気量を $10\text{Nm}^3/\text{kg-Plastic}$ に増加させた乾留第二工程処理を行った結果，不純物の少ないアルミとして回収することができた。

乾留第一工程後及び第二工程後のアルミ試料を対象に，図 9 に示すように水酸化ナトリウムと反応させ，水上置換法で発生した水素量を測ることで，アルミ純度に関係する水素発生量率（純アルミにおける水素発生量率を 100% とする）を測定した。

水素発生実験において，乾留第一工程のアルミ（不純物を除去していないアルミ）は 88 パーセント程度の水素ガス発生量率の結果しか得られなかったが，乾留第二工程のアルミ（不純物を除去したアルミ）は， 95 パーセントの水素ガス発生量率の結果が得られた。

Fig. 7. Test sample.

(a) After 1st process.

(b) After 2nd process.

Fig. 8. Effect of two-staged process of dry distillation.

Fig. 9. Experimental method for measuring purity of aluminum.

水素発生実験において，乾留第一工程のアルミでは水酸化ナトリウムとの反応が遅く，乾留第二工程のアルミに比べると，水素発生に長時間を要した。この結果より不純物に覆われている状態では，水素発生量・水素発生時間に影響を及ぼすため，アルミは純度の高い状態で取り出す必要があることがわかった。また，不純物の少ないアルミを回収するため，乾留第二工程操作を行い，不純物を除去する手段は，有効であると考えられる。

プラスチック部が PET 樹脂であるアルミ付プラスチックの乾留試験において，ガス冷却塔内に油性成分（副生タール）が捕集された（図 10）。

ガス冷却塔より取り出したペースト状態にて物性を分析した結果，重油相当のタールであることが分かった。このタール分の有効利用を考えた場合，水分を分離し，燃料として利用する方法が考えられる。この水分を分離する方法として遠心分離操作があり，この遠心分離操作が有効かどうかを確認するために遠沈管試験を行った。ペースト状態のタールで，遠心沈降試験 4000rpm (1800G) を行ったところ，図 11 に示すように油層と水層とに分離した。外観的に上から，(1)油層部 (2)水層部 (3)沈殿物に分かれた。

熱分解処理時に発生する副生タールについて物性等の分析を行った結果，油分はほぼ重油相当の発熱量を持っており，また遠沈管試験により油水分離が可能とされたため廃油バーナー等での燃料利用を考えることができる。ただし，元素組成分析からわずかの N,S が含まれていることが分かり，これは原料に使用されているインクに含まれていたものと考えられる。

Fig. 10. By-product such as tar.

Fig. 11. Component of tar.

3.5 アルミ付き紙を原料とした乾留試験

アルミ付紙パックからパルプを除去した原料を使用した乾留試験を行うにあたり、原料は湿った状態であったため、試験場（屋内）にて自然乾燥を行い使用した。平均的な含水率は約 5%で、局所的な含水率は最高 50～60%あり、ばらつきが大きい状態であった。含水率は、装置処理能力への影響が大きく、水分を多く含む原料の投入により、炉内の急激な温度降下につながるので注意が必要である。

アルミ付プラスチックと同様に、乾留温度を 600℃、原料の供給量を 10kg/h、供給空気量を 0.8～2.3Nm³/kg-PE として乾留試験を行ったところ、回収されたアルミは、アルミ付プラスチックの試験と同様に外観が茶褐色であり、炭素を主に含む有機性不純物を含む状態で得られた。乾留第二工程処理を行った結果、不純物の少ないアルミとして回収することができた。

アルミ付プラスチック原料と比較した大きな違いは、乾留品（第一工程、第二工程共）に箔状物と粉状物が混在する状態であった。図 12 に原料のアルミ付き紙、乾留第一工程後の乾留アルミ、乾留第二工程後の乾留アルミ、粉状の乾留アルミを示す。粉状物の発生については、はっきりとした理由は現在不明であるが、アルミ付紙パック及びアルミ付プラスチックのアルミ箔の厚みの違いや、原料供給用スクリュウ羽根とケーシング間のクリアランス部での粉砕、炉内での回転や炉壁との接触などの影響により削られたこと等が原因として考えられる。乾留第二工程後のアルミ試料を目開 3 mm の篩にかけたところ、篩上 50～60%、篩下 40～50%であった

Fig. 12. Raw material and dry distillation aluminum.

3.6 2種類の原料における乾留試験結果の比較

アルミ付き紙パックとアルミ付きプラスチックの2種類の原料における乾留第一工程後の回収アルミについて、空気量に対する水素発生量率への影響を調べるために、水素発生試験を行った結果を図 13 に示す。

上記の結果は第一工程終了後のアルミ回収品のうち、アルミ部分を目視にて取り出し水素発生試験を行ったものである。アルミ付プラスチック同様、アルミ付紙パック原料でも空気量と水素発生量率との相関はみられなかった。この結果から、アルミ付プラスチック同様に不純物を減らす目的として空気量を供給してもアルミ純度と関係のある水素発生量率への影響は小さいといえる。空気量とアルミ純度との相関がないことから、PET系原料との反応時間の違いは原料に起因していると考えられる。

空気量を変化させた場合の乾留ガスの発生量及び発熱量を図 14 と図 15 に示す。ここでの乾留ガスとは供給した空気も含むガスとして示す。図より、アルミ付きプラスチック（PET）と同様にアルミ付き紙パック（PE）においても、空気量が多くなると、乾留ガスの発生量が多くなり、乾留ガス発熱量は減少する傾向が見られた。

また、アルミ付プラスチック及びアルミ付紙パックの比較では、乾留ガス量はアルミ付紙パックの方が多く、またその発熱量に大きな違いがあった。

Fig. 13. Relation between purity of aluminum and air flow rate.

Fig. 14. Relation between gas flow rate and air flow rate.

Fig. 15. Relation between calorific value and air flow rate.

Table 2. Composition of dry distillation gas.

Component of dry distillation gas	Calorific value of pure gas [kcal/Nm³]	A-1 [vol %]	A-2 [vol %]	A-3 [vol %]	B-1 [vol %]	B-2 [vol %]	B-3 [vol %]	B-4 [vol %]
H ₂	2.579	2.24	3.29	2.37	4.24	2.8	2.7	2.77
CO	3.018	9.16	5.58	4.17	8.74	11.7	13.45	12.26
CH ₄	8.561	3.36	2.69	1.8	9.19	8	8.24	6.76
CO ₂		7.63	12.95	12.31	7.38	10.59	7.61	6.66
C ₂ H ₂	13.407	0	0	0	0.4	0	0	0
C ₂ H ₄	14.112	7.63	6.67	4.17	6.71	8.1	7	5.24
C ₂ H ₆	15.239	1.22	0.8	0.28	2.93	3.81	2.2	1.44
C ₂ H ₈	21.79	0	0	0	0.35	0.1	0.1	0
C ₄ H ₁₀	28.343	0	0	0	0.46	0.1	0	0.2
C ₃ H ₆	20.541	0	0	0	4.25	1.5	0.8	0
C ₄ H ₈	28.277	0	0	0	1.67	0.2	0.1	0
N ₂		67.14	66.73	71.02	47.88	49.9	56.1	61.85
O ₂		1.63	1.29	3.88	5.79	3.2	1.93	2.72
Air flow rate [Nm³/kg-Plastic]		0.48	1.46	1.85	0.78	1.09	1.44	2.31
Calorific value of dry distillation gas [kcal/Nm³]		1900	1500	900	4200	3200	2700	2000

これは、それぞれに含まれるプラスチック成分（PE, PET）の構造上の違いの影響であると考えられる。つまり PET にはベンゼン環がついており、タール分としても生成していることから PE よりもガス化しにくく、PE の方がよりガスとして生成されると考えられる。

また、図 15 における各点（A-1～3, B-1～4）のガス成分を表 2 と図 16 に示す。ガス分析はクロマトグラフィーを用いて測定した。

図 16 の円グラフは窒素、酸素を除いた成分についての構成比を示す。A, B どちらにおいても供給空気の増加によりガス中の窒素濃度が上昇するため、ガスの発熱量は減少する。窒素、酸素を除いたガス成分の構成比を見ると、特に B-1～4 において CO と CH₄ の低分子ガスの構成比が供給空気に合わせて増加する傾向が見られた。これは C₂ 以上の可燃ガスが供給された酸素と反応するが酸素が不足状態のため、反応が不完全燃焼となり、CO, CH₄ が生成するためと推定される。それに対し、A-1～3 においては酸素（空気）が増加するにつれ、二酸化炭素が増加する傾向が見られた。これは B-1～4 に比べて C₂ 以上の可燃ガスが少なく、CO や CH₄ と供給された酸素との反応が進行したものと推定される。

Fig. 16. Composition ratio of dry distillation gas.

Fig. 17. Structure of dry distillation furnace with 2 processes.

3.7 2段階乾留工程のための試験装置の改良

これまでの実験結果より、アルミ乾留品（第一工程品）の不純物を除去する目的で、第二工程を行う手段は有効であることがわかった。そこで、乾留第一工程と第二工程を同時に同じ乾留炉で行うことができれば、乾留工程に必要な時間の短縮化ができ、製造コストの低減に大きく寄与することができる。

Fig. 18. Structure of improved dry distillation furnace.

Fig. 19. Structure of improved dry distillation furnace.

図 17 に第一工程, 第二工程の 2 回の乾留工程を 1 回で行うことができる試験装置を示す。従来の試験装置における乾留炉の内部に一部に切り欠きを有する隔壁を設けてあり, 乾留アルミは第一工程の室内から第二工程の室内へと移動する。それぞれの室内は異なる温度に設定可能であり, また異なる空気量を供給することが可能である。図 18 と図 19 に改良した試験装置を示す。

3.8 2 段階乾留工程によるアルミ純度の向上

改良を施した試験装置を用いて, 2 回の乾留工程を 1 回で行う操作が有効であるかどうかを確認するため, 以下の 2 条件による乾留試験を行った。

(1) 試験 No.1

不純物の少ない銀白色のアルミを 1 回の乾留操作で得られるかどうかの確認を目的として, 原料の供給量を少なく (5 kg/h), 第一工程空気量を多く (5Nm³/kg-PET), 第二工程空気量を 30Nm³/kg-Al に設定した運転を行った。

(2) 試験 No.2

乾留装置を 1 回通過させることで得られる回収アルミに含まれる不純物含有量が改善されるかどうかを確認することを目的として, これまでの試験運転における供給量と同等の原料を供給し (25kg/h), かつ, 第一工程空気量を 1 Nm³/kg-PET, 第二工程空気量を 10Nm³/kg-Al と設定した試験を行った。

Table 3. Results of dry distillation with 2 processes.

		No.1	No.2
Dry distillation temperature	1st process	600~640℃	580~620℃
	2nd process	590~620℃	560~620℃
Supply amount of raw materials		5kg / h	25kg / h
Air flow rate	1st process	5 [Nm ³ / kg-PET]	1 [Nm ³ / kg-PET]
	2nd process	30 [Nm ³ / kg-Al]	10 [Nm ³ / kg-Al]
Raw materials		Dry distilled aluminum	Dry distilled aluminum

Adulterant dosage		Less than 1%	5%

Fig. 20. Dry distilled aluminum by only 1st process.

過去の同等条件での試験において回収された第一工程のみのアルミとの比較を行った。原料はアルミ付プラスチック原料 (Al 20%, PET 80%) である。試験条件と結果について表 3 と Fig.20 に示す。乾留温度は装置内の温度 (第一工程, 第二工程) を観察しつつ, 目標温度 600℃ になるように空気量, 原料供給量の調整を行った。

試験 No.1 では銀白色のアルミを得ることに成功した。また, 試験 No.2 では茶褐色の部分が残るため, 原料供給量が本装置の処理能力を超えていると判断されるが, Fig.20 に示すこれまでの第一工程品 (空気量 1 Nm³/kg-PET, 不純物 23%) に対し, 不純物が少ない状態で得ることができた。

3.9 乾留炉の処理能力

本試験装置におけるアルミ付プラスチック原料 (プラスチック PET) の処理能力を評価することを目的として, 原料の供給量を 5~14 kg/h と変化させ, 回収されるアルミについて不純物量を測定した。各試験の回収アルミの不純物量の測定結果を図 21 に示す。

この結果から 5 kg/h, 8kg/h, 11kg/h までは不純物量が 5% 以下であり, 水素発生に用いるアルミの純度としては必要純度をクリアすることができた。14kg/h では不純物量が 5% を若干超える結果となった。

Fig. 21. Relation between supplied amount of raw material and amount of impurities.

Fig. 22. Model of dry distillation.

3.10 アルミ回収における熱収支モデルの検討

これまでの試験結果を基準として、アルミ付プラスチック（プラスチック PET）及びアルミ付紙（プラスチック PE）を原料とした乾留システムの熱収支モデルについて図 22 に示す。

試算を行った条件としては、原料の処理量を 11kg/h、原料中に含まれるプラスチックとアルミをそれぞれ 80wt%、20wt%とした。

- (1)原料供給量 11 kg/h
8.8 kg-プラスチック/h
2.2 kg-Al/h
- (2)第一工程の空気量 1.0 Nm3/kg-プラスチック
- (3)第二工程の空気量 10 Nm3/kg-Al
- (4)乾留ガス及びタールの発熱量・発生量

プラスチック成分	PET	PE
乾留ガス 発生量	1.3Nm3/kg-PET	1.6Nm3/kg-PE
発熱量	1,400kcal/Nm3	3,300kcal/Nm3
タール 発生量	0.15kg/kg-PET	発生しない
発熱量	10,000kcal/kg	

- (5)乾留装置 寸法：φ 600×1,660 L
保温材厚み 150 t

- (6)乾留装置放熱量及び消費熱量(Q1)^{※1} 11,197kcal/h
- (7)熱風炉 寸法：φ 1,150×2,275L
耐火材厚み 150 t
- (8)熱風炉放熱量(Q2)^{※2} 2,723kcal/h

※1 乾留装置本体から外気への熱ロス及びプラスチックの乾留で消費される熱量の推定値

※2 熱風炉本体から外気への熱ロスの推定値

アルミ付プラスチック原料（①）を 11kg/h 供給し、PET 樹脂を乾留・除去し高純度のアルミニウム（②）として取り出す。アルミニウムの回収率は試験結果から 80%とした。

第一工程空気（⑤）、第二工程空気（⑥）はそれぞれ試験結果から 1.0Nm3/kg-PET, 10Nm3/kg-Al を基準とした。

乾留装置を加熱する外筒へ供給する熱風については、熱風バイパス⑫を考慮して必要熱量を決定した。

アルミ付プラスチック（プラスチック PET）の場合、第一工程の乾留ガス（③発熱量 1,400kcal/Nm3）は 11.44Nm3/h、副生タール（⑦発熱量 10,000kcal/kg）は 1.32kg/h 発生する。この結果、乾留ガス及びタールとして回収される熱量は

$(1,400) \times (11.44) + (10,000) \times (1.32) = 29,216\text{kcal/h}$ であり、熱風炉に必要な熱量は図 22 において⑩－⑫＋Q₂で求められ、

$(93,742) - 71,593 + 2723 = 24,872\text{kcal/h}$ として推定される。

また、アルミ付紙（プラスチック PE）の場合、第一工程の乾留ガス（③発熱量 3,300kcal/Nm3）は 14.08Nm3/h 発生する。この結果、乾留ガスとして回収される熱量は $(3,300) \times (14.08) = 46,464\text{kcal/h}$ であり、熱風炉に必要な熱量は同様に 24,872kcal/h として推定される。

以上から、定常状態においてアルミ付プラスチック（プラスチック PET）の場合、発生する乾留ガスとタールを燃料として使用すること、また、アルミ付紙（PE）の場合は、発生する乾留ガスを燃料として使用することにより、外部からの投入エネルギーなしで運転が可能であると判断することができる。

表 4 と表 5 にアルミ付プラスチック（プラスチック PET）とアルミ付プラスチック（プラスチック PE）の場合において、図 22 の各工程で流出入する熱量に関する熱収支を示す。各工程におけるガスの種類、ガス温度と流量、および発熱量の計算過程の詳細を示す。

Table 4. Heat balance of dry distillation (PET).

Process side heat balance							
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	Raw material	Recovered aluminum	Dry distillation gas	Exhaust gas	First supplied air	Second supplied air	Tar
Temperature [°C]	20	600	300	300	20	20	40
Aluminum [kg/h]	2.2	1.76					
PET [kg/h]	8.8						
Air [Nm ³ /h]					8.8	22	
Dry distillation gas [Nm ³ /h]			11.44				
Exhaust gas [Nm ³ /h]				22			
Tar [kg/h]							1.32

Hot air side heat balance

	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
	Supplied hot air	Exhaust hot air	Bypass hot air	Exhaust gas	Air	Dry distillation gas	Tar
Temperature [°C]	700	594	594	594	20	20	20
Hot air flow rate [Nm ³ /h]	440.00	420.00	400.00	20.00	40.00	11.44	
Heating value [kcal/h]	93,742	75,361	71,593	3,768		16,016	13,200

Table 5. Heat balance of dry distillation (PE).

Process side heat balance							
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	Raw material	Recovered aluminum	Dry distillation gas	Exhaust gas	First supplied air	Second supplied air	Tar
Temperature [°C]	20	600	300	300	20	20	40
Aluminum [kg/h]	2.2	1.76					
PE [kg/h]	8.8						
Air [Nm ³ /h]					8.8	22	
Dry distillation gas [Nm ³ /h]			14.08				
Exhaust gas [Nm ³ /h]				22			
Tar [kg/h]							0

Hot air side heat balance

	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
	Supplied hot air	Exhaust hot air	Bypass hot air	Exhaust gas	Air	Dry distillation gas	Tar
Temperature [°C]	700	594	594	594	20	20	20
Hot air flow rate [Nm ³ /h]	440.00	420.00	400.00	20.00	40.00	14.08	0.00
Heating value [kcal/h]	93,742	75,361	71,593	3,768		46,464	0

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、アルミ付き紙やアルミ付きプラスチックから高純度のアルミを回収する乾留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（アルミ付き紙、アルミ付きプラスチック）から高純度アルミを回収可能な乾留炉を開発した。また、その乾留炉を用いて高純度アルミを回収できる乾留温度や供給空気量の条件を見出した。
- (2) 乾留第一工程で得られた乾留アルミを再度乾留第二工程で乾留することにより、高純度のアルミを回収できることを見出した。また、乾留炉の内部に一部切り欠きを有する隔壁を設けることにより、第一工程と第二工程の2回の乾留工程を1回で行うことのできる乾留炉を開発し、その効果を確認できた。

- (3) 定常状態においてアルミ付プラスチック（プラスチック PET）の場合、発生する乾留ガスとタールを燃料として使用すること、また、アルミ付紙（PE）の場合は、発生する乾留ガスを燃料として使用することにより、外部からの投入エネルギーなしで運転が可能であることを明らかにした。

文 献

- (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, Kamalesh Kumar Singh, “Recovery of valuable products from hazardous aluminum dross: A review”, Resources, Conservation and Recycling, Vol.130, pp.95-108, 2018.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Yinon Yavor, Sam Goroshin, Jeffrey M. Bergthorson, David L. Frost, Robert Stowe, Sophie Ringuette: “Enhanced hydrogen generation from aluminum-water reactions”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.38, No.6, pp.14992-15002, 2013.
- (6) Hangqi Yang, Honglei Zhang, Ruichao Peng, Shanshan Zhang, Xiurong Huang, Zengdian Zhao: “Highly efficient hydrolysis of magnetic milled powder from waste aluminum (Al) cans with low - concentrated alkaline solution for hydrogen generation”, International Journal of Energy Research, Vol.43, No.6, pp.4797-4806, 2019.
- (7) Amirhomayoun Saffarzadeh, Nithiya Arumugam, Takayuki Shimaoka: “Aluminum and aluminum alloys in municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash: A potential source for the production of hydrogen gas”, International Journal of Energy Research, Vol.41, No.6, pp.820-831, 2016.
- (8) Arumugam Nithiya, Amirhomayoun Saffarzadeh, Takayuki Shimaoka: “Hydrogen gas generation from metal aluminum-water interaction in municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash”, Waste Management, Vol.73, No.6, pp.342-350, 2018.
- (9) J.G.Poulakis, C.D.Papaspyrides: “Recycling of polypropylene by the dissolution / reprecipitation technique: I. A model study”, Resources, Conservation and Recycling, Vol.20, No.1, pp.31-41, 1997.
- (10) J.G.Poulakis, C.D.Papaspyrides: “A model process for the recycling of a Surlyn® Ionomer”, Advances in Polymer Technology, Vol.19, No.3, pp.203-209, 2000.
- (11) 鈴木 基之:「プラスチックの熱分解による油の回収」, 生産研究 25(2), pp.85-88, 1973.
- (12) 国井 大蔵:「流動層反応装置による可燃物の熱分解ガス化」, 石油

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。