

## 二軸押出機 TEX の環境分野への取り組み

### Approach of Twin Screw Extruder “TEX” to Environmental Field



大岡 佑介  
Yusuke Ooka



佐賀 大吾  
Daigo Saga



稲川 憲司  
Kenji Inagawa



村中 航平  
Kouhei Muranaka



木村 嘉隆  
Yoshitaka Kimura

#### 要 旨

世界的な環境意識の高まりや中国での廃プラスチック輸入規制の開始を契機として、再び押出機を利用したケミカルリサイクルが注目されるようになった。二軸スクリュ押出機は連続式プラスチック溶融混練として開発されたが、スクリュ回転速度やバレル設定温度などの運転条件が自由に変更できる柔軟性、高い混練性、原料供給から製品生産までの連続生産性などの利点を活かして、様々な分野へ利用が拡大している。

本報告では、二軸スクリュ押出機の特徴のうち、押出機内でのスクリュによるせん断発熱とヒータによる外部加熱という相乗効果を生かした、有機性廃棄物の熱分解プロセスという新しいケミカルリサイクルプロセスについて、検討した結果を紹介する。

#### — Synopsis —

With the growing global environmental awareness and the start of restrictions on imports of waste plastics in China, anticipation for chemical recycling process using extruders is growing. The twin screw extruder was developed as a continuous plastic melting and kneading machine, and its application is expanding to various applications, with its distinct advantages such as the flexibility to change operating conditions such as screw speed and barrel setting temperature, outstanding kneading performance, and continuous productivity from raw material supply to final product production.

Described in this report is an experimental outcomes of the organic waste pyrolysis process, a new method utilized by vast features of the twin screw extruder, especially synergistic effects of shear heating by screw and external heating from the heater.

## 1. 緒言

我が国では、2011年から原子力による電力供給が減り、火力発電による電力供給が増えたため、CO<sub>2</sub>排出量は急速な増加傾向<sup>(1)</sup>にあることから、燃料発熱量当たりのCO<sub>2</sub>排出量の多い石炭は敬遠されつつある。他方、近年では、地球温暖化や資源枯渇、有限な資源の有効利用の観点から、カーボンニュートラルである家畜糞尿や汚泥をはじめとするバイオマスなどの有機性廃棄物が、新資源・新エネルギー固体燃料として位置づけられ、マテリアルリサイクルやサーマルリサイクルなどの試みが積極的に行われている。しかしながら、一般的に有機性廃棄物のエネルギー密度は小さいこと、廃棄物中の水分などの不純物のためにエネルギー変換効率が低いこと、さらに有機性廃棄物の種類が多いため各廃棄物に合わせた利用技術や用途を構築しなければならないことなど、有機性廃棄物の再利用にはいくつもの課題がある<sup>(2)</sup>。また、中国が2017年に廃棄物の輸入規制を発動した後、その受け皿となっている東南アジア諸国においても段階的な輸入規制が始まっていることから、従来輸出によって解決していた廃プラスチック類の処理も、大きな課題に直面している。

上記の有機性廃棄物の再利用と廃プラスチック類の処理という2つの難題に対する解決案として、廃プラスチック類を反応促進剤として、有機性廃棄物を炭化させる熱分解プロセスが存在する。熱分解され押出された原料は「チャー / BOF」と呼ばれ、炭素を多く含むことから石炭と同等の総発熱量を有する。本テーマでは、有機性廃棄物の熱分解プロセスという新分野への参入にあたり、同熱分解プロセスへの二軸スクリュ押出機の適応可否ならびに生産機への展開が可能か、テストを含めて多角的に調査・検討した。

## 2. 市場調査

有機性廃棄物の熱分解プロセスという、新分野への参入にあたり、市場を調査した。図1に2014年度の廃棄物等の発生量とその割合を示す<sup>(3)</sup>。本図は紙やし尿、汚泥などのバイオマス系、ガラスや陶磁器、コンクリートなどの非金属鉱物系、アルミやスクラップなどの金属系、およびペットボトルや廃プラスチック、廃油などの化石系に分類されている。本図中で燃料として再生可能な廃棄物はバイオマス系および化石系であるが、化石系廃棄物量は15百万トンに対して、バイオマス系廃棄物の量は305百万トンにも達し、廃棄物全体の53%を占めている。バイオマス系廃棄物では、焼却による減量化処理や堆肥化等の自然還元処理が行われるので、実際に

再利用された量はわずか17%<sup>(2)</sup>にとどまっている。このように「チャー」として利用可能な有機性廃棄物の賦存量は豊富である。しかしながら、有機性廃棄物を「チャー」に変える熱分解プロセスは大規模な設備を必要とするため、一定品質かつ大量の廃棄物の持続的な確保が可能な企業や自治体が主なターゲットとなる。以下の内容では、ある有機性廃棄物の再利用について検討した結果を述べる。

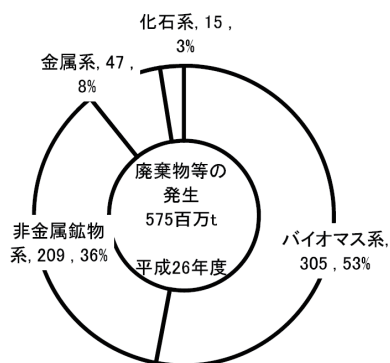


図1 2014年度の廃棄物等の種類別の発生状況

図2に我が国のプラスチックくずの輸出量の推移<sup>(4)</sup>を示す。年間輸出量は約150万トンあることから、図1と比較すると日本の化石系廃棄物の1割が輸出されている計算となる。また、2017年に中国がプラスチックくずの輸入規制を始めたことで、2017年以降の中国へのプラスチックくずの輸出量が減少する代わりに、その受け皿となっている東南アジア諸国への輸出量が増えていることが読み取れる。その上、東南アジア諸国においても段階的な輸入規制が開始されていることから、従来輸出していた年間約150万トンの廃プラスチック類の処理が大きな課題となっている。

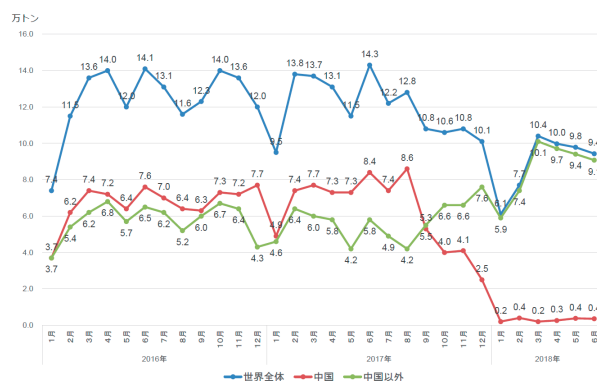


図2 日本からのプラスチックくず輸出量

### 3. 有機性廃棄物の有効発熱量

燃料として有機性廃棄物を利用する場合、発熱量が一つの大きな指標となるため、図3<sup>(5)</sup>に示すような含水率と有効発熱量の評価軸に基づき分類されることもある。有効発熱量とは、総発熱量から含まれる水分の蒸発潜熱、顕熱、灰分吸熱(顕熱と融解熱)および排煙の顕熱を差し引いた発熱量であり、燃料としての自然可能限界を示している。図3は1173Kでの有効発熱量を示しているが、火炎の状態や温度により数値が若干変わることには注意が必要である。参考文献<sup>(5)</sup>で述べられているように、同じ物質でも含水率や灰分割合が高いほど、有効発熱量は小さくなる。また、汚泥のように含水率が60%を超える有機性廃棄物の有効発熱量はゼロ以下になるため、自然は不可能であり、燃料としての価値はネガティブ、つまり燃やすためには逆にエネルギーの投入が必要となる<sup>(2)</sup>。有効発熱量というエネルギー的な利用価値から見ると、水は不純物であり、燃焼前に効率的に取り除くことがエネルギー変換効率を向上させる上で、極めて重要なファクターとなる。

水と同様、燃焼において不必要(エネルギーとして価値がない)なのが灰分であり、廃棄物の種類によって、灰分割合や成分は大きく異なっている。灰分は不燃性の鉱物や無機物であり、バイオマス中に含まれる不燃物質や回収時に同伴する土壌、廃プラスチック中の金属などがある。灰分は発熱量を持たないため、灰分割合が半分を占めれば、当然のことながら単位重量当たりの有効発熱量も半分となり、しかも灰分吸熱によるエネルギーのロスも大きくなってしまふ<sup>(2)</sup>。

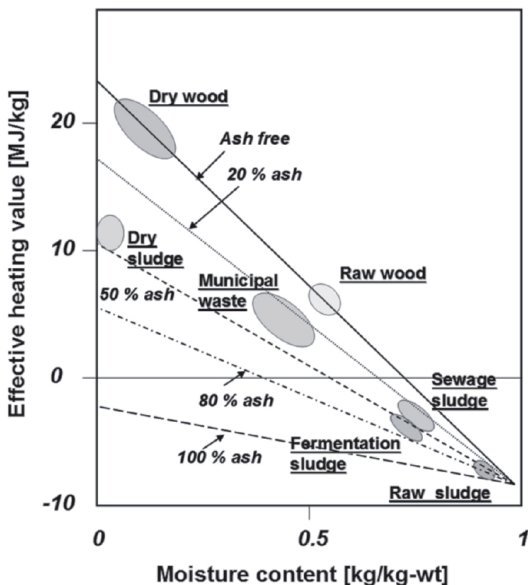


図3 低品位有機炭素燃料の有効発熱量

### 4. 炭化の原理

炭化は有機物を無酸素あるいは酸素不足の状況下で高温にすることによって、有機化合物を熱分解させ、炭素主体の物質に変換させる反応である。有機物を加熱していく際、酸素の存在する状況では燃焼してしまうが、酸素の少ない状況下では有機物から水分や揮発性の不純物が除かれ熱分解反応をおこす。この熱分解プロセスを利用すれば、不純物を除くと同時に、有機性廃棄物のエネルギー密度の増加や、有機物であれば種類を問わず炭化させることができる。日本製鋼所製二軸スクリュウ押出機(TEX)は、低酸素量状態のもとで、連続的に原料を高温化できることから、有機物の熱分解反応プロセスに適応できると考えた。

### 5. 競合調査

本テーマは新分野への参入となるため、競合となりうる炭化装置を調査した。運転方式をもとに炭化装置を分類すると、バッチ式と連続式に分けられるが、現在の主流は連続式の炭化炉である。同じく、加熱方式をもとに分類すると、内熱式と外熱式に分けられる(図4)<sup>(6)</sup>。

内熱式は炭化材料と熱風を直接接触させる方式であり、ロータリーキルン型などが実用化されている。同方式の長所は、材料と熱風を直接接触させるため、熱効率が良い点にある。一方、短所は炉内を無酸素状態にできない為、ダイオキシン類特別対策措置法により、炉内温度800℃以上の完全燃焼に近い条件が求められるので、そのための設備が必要となる点である。炭化工程で発生した乾留ガスは、再燃炉で燃焼させて材料の乾燥に利用される。

外熱式は炭化材料を接触加熱によって装置外部から加熱する方式であり、ロータリーキルン型やスクリュウコンベア型等が代表例として挙げられる。同方式の長所は、間接加熱のため炉内を完全に無酸素状態にできるので、ダイオキシンの発生が抑制できる点にある。一方、短所

項目	内熱式ロータリーキルン型	外熱式ロータリーキルン型	外熱式スクリュウコンベア型
特徴	バーナー熱風による直接加熱によって炭化する。乾留ガスの一部は炉内で燃焼し、未燃ガスは2次燃焼炉で完全燃焼する。燃焼排ガスは乾燥機の熱源などに利用できる。	乾留ガスを回転キルンの外熱部で燃焼。あるいはバーナー熱風により加熱して炭化する。燃焼排ガスは乾燥機の熱源などに利用できる。炉内酸素濃度の調整がしやすい。	トラフ外面からバーナーの熱風、乾留ガスの燃焼により加熱を行う。充填率が高くなるため多段式は設置がコンベアになる。トラフ上部から乾留ガスを抽出させ炉内外熱部で燃焼する方式などがある。
構造			
システム概要			

(6) 岡山県環境整備推進センター 17年3月「家庭排せつ物を中心とした熱焼・炭化施設に関するガイド」p.97

図4 炭化炉の特性比較

は間接加熱のため、直接加熱の内熱式炭化装置と比較して熱効率が劣る点である。炭化工程で発生した乾留ガスはバーナーで完全燃焼させ、炭化炉の加熱と材料の乾燥に利用される<sup>(6)</sup>。

TEX は加熱方式に基づく分類であれば外熱式に属するので、長所として、押出機内の無酸素状態化によるダイオキシンの発生抑制が挙げられる。また、外熱式は内燃式よりも熱効率に劣るといふ短所については、スクリュのせん断機能によって、効率よくせん断エネルギーを付与できる。これらの相乗効果によって、TEX は既存の内熱式炭化炉に比べて、熱分解プロセスに適していると考えられる。

## 6. テスト実施と結果

図5にテスト装置の構成概要を示す。押出機に投入される原料は85% wt% 有機性廃棄物と15wt% ポリプロピレン(PP)であり、今回用いた有機性廃棄物は水分を22% 含んでいる。なお、今回の実験では有機性廃棄物の炭化を促進させるためのプラスチックとして、未使用のPPが投入されているが、実際は廃棄プラスチックが想定される。原料中の水分が引き起こす押出機ベント部からのエントレ(Entrainment)の抑制対策には、図6と図7に示されたTSV (Twin Screws Vent stuffer)を利用した。

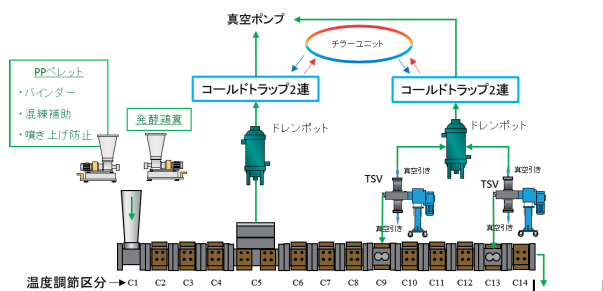


図5 テスト装置の構成概要

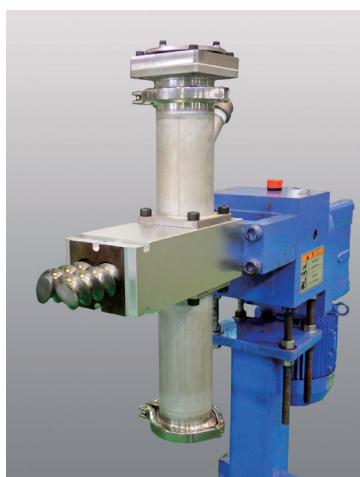


図6 TSV 外観写真

今回のテストの最大処理量は、TSVからのエントレによる原料吹き出し限界 $Q=260\text{kg/h}$ であり、この時の運転データを表1に示す。また最大処理能力において、押出機先端から回収されるチャーの歩留まりをトルク別に比較した結果を図8に示す。発生した乾留ガスは押出機に設置された真空装置によって吸引され、コールドトラップによって液化回収される。ただし、回収液には引火性液体等が含まれているため、後述のように、回収液の処理が今後の課題となる。

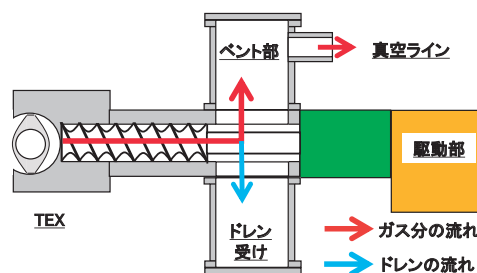


図7 TSV 構造

表1 最大処理量時の運転データ

Test No.	C1 °C	C2 °C	C3 °C	C4 °C	C5 °C	C6 °C	C7 °C	C8 °C	C9 °C	C10 °C	C11 °C	C12 °C	C13 °C	C14 °C	Q kg/h	Ns rpm	Z kW	Exp kWh/kg	備考
1	SV	30	250	250	250	250	250	250	250	280	280	280	280	280	260	289	64.1	0.247	α IIトルク限界
2	SV	30	250	250	250	250	250	250	250	280	280	280	280	280	260	229	66.2	0.255	α IIIトルク限界

Q [kg/h] : 押出量  
 Ns [rpm] : スクリュ回転速度  
 Z [kW] : 押出機運転中のモーター動力  
 Exp. [kWh/kg] : 比エネルギー(Z/Q)

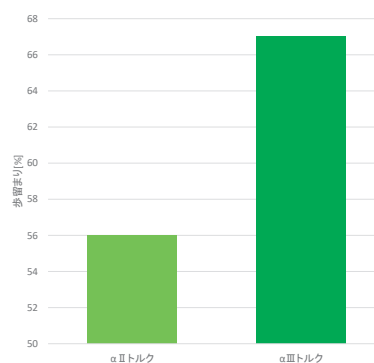


図8 歩留まり比較

今回の実験では、日本製鋼所製 TEX シリーズにおいて世界最高レベルのトルクを持つ、TEX54aIIIが使用された。表2にTEXシリーズの変遷を示す。TEX-aIIIは、数々の新しい設計・製造技術の導入された超ハイスペックの二軸スクリュ押出機である。従来、二軸スクリュ押出機の主要な市場は汎用プラスチック混練であったが、TEX-aIIIは従来よりも低温混練の必要とされるスーパーエンジニアリングプラスチックコンパウンド市場やリサイクル関連のコンパウンド市場への展開も可能となった。今回の実験においても、低スクリュ回転速度の

高トルク運転は滞留時間の延長およびガス速度のコントロールに対して有効であった。その結果、図8に示すようにαⅡトルク運転よりも低スクリュ回転速度のαⅢトルク運転の方が押出機先端から回収される「チャー」の歩留まりが9%向上した。

表2 TEXシリーズ履歴

世代・形式	第1世代 S	第2世代 SS	第3世代 C	第4世代 HCT	第5世代 XCT	第6世代 α	第7世代 αⅡ αⅡ	第8世代 αⅢ
西暦年	1979-1984	1985	1986	1987-1989	1990-1993	1994~	1996~	2012~
減速機	異方向回転	同異切替式	同方向回転	同方向回転 HIGHトルク	同方向回転 SUPERトルク	同方向回転 HIGHトルク	同方向回転 ULTRA HIGHトルク HIGHトルク-γ	同方向回転 ULTRA HIGHトルク HIGHトルク-γ
入力	1本物軸 縦置き	浅溝2・3条 斜め軸 6角軸	浅溝2・3条 斜め軸 6角軸	深溝2条 斜め軸 6角軸	超深溝2条 斜め軸 6角軸	超深溝2条 斜め軸 6角軸	超深溝2条 斜め軸 6角軸	超深溝2条 斜め軸 6角軸
シリンダ	ラジアル・ロータ	アーク	アーク	アーク	アーク	アーク NIC(特許) DOB(特許)	アーク NIC(特許) DOB(特許)	アーク NIC(特許) DOB(特許)
制御	-	-	-	-	-	EXANET 重量式フィード	EXANET 重量式フィード 遠征機能 運転監視 データロギング	EXANET 重量式フィード 遠征機能 運転監視 データロギング
TEX65t(増産率)	2489 (1.00)	2489 (1.00)	2489 (1.00)	3185 (1.28)	3499 (1.41)	4018 (1.61)	4903 (1.93)	6741 (2.71)

### 7. TEXを用いた熱分解プロセスの課題

図9に複数回の実験により確認された、実プラント向けの装置構成と、製品ができるまでの原料の流れを示す。本プロセスは、乾燥工程と炭化工程に分けられる。これは、4項で述べたように熱分解プロセスでは、最初に水分が蒸発し、その後揮発分が除かれ炭化するためである。乾燥工程で発生した気体は主に水分を含み、チャーにより液化されたものはpH調整を行えば排水基準を満たしているため、排水が可能である。他方、炭化工程で発生した気体は水分だけでなく、可燃性ガスも含んでいるので、液化されたものは排水基準を満たしておらず、排水処理も困難であるため、焼却処理が必要となる。この焼却処理については、気体のまま炉に搬送して焼却する方法と、回収された気体を液化させてから炉に供給する方法がある。気体のまま焼却する方法は、蒸発潜熱を考慮する必要が無い場合、エネルギー効率が良い反面、運転中は大量の水分を含む気体が炉に送られるため、炉の運

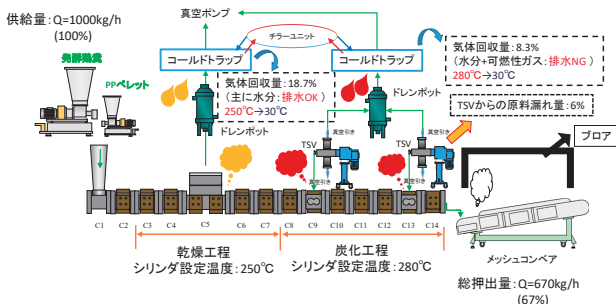


図9 想定される有機性廃棄物処理装置構成と製品ができるまでの原料の流れ

転制御が難しい。具体的には、炉のバーナーやブローの運転を起動・停止する際に炉内圧が正圧になるため、発生した気体がベントを通して押出機内へ戻ってくるといった問題が発生する。一方、回収された気体を液化させてから炉に供給する方法は、炉へ定量供給可能なので、炉の運転制御が容易である反面、蒸発潜熱等のエネルギー消費を考慮する必要がある。

現状では、ベントガスの逆流を避けるために、発生した気体を全て回収して液化する方法をベースに検討しているが、将来的には気体のまま焼却処理する方法を確立していきたい。

### 8. エネルギー計算

有機性廃棄物の燃料化の際、化石系エネルギーの大量消費は、コスト面および社会情勢面からも避けたい。また、5項にて述べた競合との優位性比較のためにも、TEXを用いて「チャー」を生産するために必要なエネルギーを明確にしておく必要がある。

表3にTEXを用いて生産した「チャー」の燃焼時の総発熱量を示す。比較用の輸入一般炭の総発熱量は参考文献(7)の値を引用した。

表4に「チャー」生産時のエネルギー収支を示す。計算にあたって、電気代は1kWhあたり17円(8)、エネルギー変換効率率は35%(9)とした。チャーを用いて熱交換する気体に関しては、理論上不可能ではあるが100%回収とし、乾燥工程で発生する気体はシリンダ設定温度と同様の250℃、炭化工程で発生する気体はシリンダ設定温度と同様の280℃と仮定して、それぞれ30℃の液体まで熱交換するために必要なエネルギーを算出した。ただし、チャーを除いた補機の消費動力と「チャー」燃焼時の熱損失は含めずに計算した。

表3 「チャー」燃焼時の総発熱量

輸入一般炭	総発熱量	
	チャー	(チャー)/(輸入一般炭)*100
[kJ/kg]	[kJ/kg]	[%]
25970	19400	74.7

5項で述べた競合となりうる炭化装置の一般的な処理コストは、有機性廃棄物(含水率25%)1kgあたり約26円(6)である。一方、表4よりTEXを用いたケースの試算では、処理コストは有機性廃棄物(含水率19%)1kgあたり約9.2円であり、競合他社の炭化装置が処理する有機性廃棄物をTEXが処理する場合は、有機性廃棄物(含水率25%)1kgあたり約12.1円なので、TEXの利用は競合他社の炭化装置に比べて処理コストを約53%低減できる。

また、表4より「チャー」の発電量は、歩留まりを考慮しても単位処理量あたり1.264kwhのエネルギー(電力)が得られるため、生産時の消費エネルギーを大きく上回る、233%のエネルギーが回収できると推算される。

表4 「チャー」生産時のエネルギー収支

単位処理量に対する消費エネルギー					仕出物(チャー)の発電量				
モータ	ヒータ	チラーユニット	計	電費代	総熱熱量	エネルギー変換効率	歩留まり	歩留まり考慮	エネルギー回収
[kWh/kg]	[kWh/kg]	[kWh/kg]	[kWh/kg]	[円/kg]	[kWh/kg]	[kWh/kg]	[%]	[kWh/kg]	[%]
0.255	0.072	0.215	0.542	9.2	5.389	1.886	67	1.264	233

次に、炭化工程で発生した気体の処理方法別のエネルギー消費量を比べた。具体的には、炭化工程で発生した気体をそのまま焼却させる方法と、一旦、全て液化させる方法のエネルギー消費量を調査した。

気体を全て液化させる方法の場合、必要なエネルギーは280℃の気体を30℃の液体にするエネルギーに、30℃の液体を280℃の気体に戻すエネルギーも加算される。従って、発生した気体を全て液化させる方法は、そのまま焼却する方法に比べて、単位処理量あたり0.134kWh/kgのエネルギーを消費するので、処理コストは約2円アップと見込まれる。

## 9. 結 言

実験結果より、有機性廃棄物の熱分解プロセスに対して、日本製鋼所製TEX54aⅢにTSVを搭載することでベントアップを抑制でき、安定運転が可能であることを確認した。また、押出機にて処理された「チャー」の品質も問題ない結果となっており、本リサイクルプロセスへTEXは適応可能と考えられる。

処理コストに関しては、スクリュのせん断作用によって、効率よくせん断エネルギーを付与できるので、8項の試算では、競合他社の炭化装置に比べて、コストは約53%低減できると推算される。「チャー」の生産に必要なランニングコスト(電力)に関しても、8項の試算から、「チャー」で発電した場合、歩留まりを考慮した上で、単位処理量あたり1.264kwhのエネルギー(電力)が得られるため、TEXの消費エネルギーを大きく上回る233%のエネルギーを回収できると推算される。

炭化工程で発生した気体の処理についても、8項の結果から、液化せずにそのまま焼却したほうが、単位処理量あたり約2円のコストダウンが見込まれる。焼却炉の運転制御を重視するか、若しくは約2円/kgのコストダウンを重視するかは、将来、実際にプロセスの維持・管理に携わるユーザ側の判断が重視されるものの、焼却炉の安定運転が比較的容易と考えられ、発生した気体は全て液化する方法を推奨していく。

さらに、TEXの利用は、現存する炭化装置である内

熱式炭化装置と同様、押出機内を無酸素状態にできるので、ダイオキシンの発生を抑制できる。以上の事から、TEXは競合の炭化装置に比べて優秀な炭化装置であると言える。

本熱分解プロセスは有機物の種類に関係なく適応可能なので、今回の実験結果をベースとして、個別のケースに合わせて調整を行えば、様々な有機性廃棄物の処理ニーズに適した装置構成を提案可能である。

そこで、廃棄物の品質が安定しており、水処理設備等も充実した飲料メーカーの活性汚泥や植物残渣等、比較的難易度の低いとされる案件に取組みながら、下水汚泥の処理などの難易度の高い案件に対する適用可能性を見極めたい。また、実プラントでの処理量は大きいため、スケールアップ手法などの確立も必要と考える。

## 参 考 文 献

- (1) National Greenhouse Gas inventory Report of Japan (NIR) (2014).
- (2) 小林信介, 板谷義紀: 低品位有機炭素資源とその利用技術, 日本燃焼学会誌 (2015).
- (3) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部: 平成28年度廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用実態調査報告書 (2017).
- (4) 環境省: プラスチックを取り巻く国内外の状況 (2018).
- (5) 佐野寛: バイオマス燃焼, 高温学会誌, 33, 3-8 (2007).
- (6) 薬師堂兼一, 家畜排せつ物の炭化処理技術の現状と課題, 畜産環境情報 (38), 3-6 (2007).
- (7) 資源エネルギー庁総務課, エネルギー源別標準発熱量, [https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/pdf/stte\\_016.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_016.pdf)
- (8) 東京電力ホームページ, [https://www.tepco.co.jp/ep/corporate/plan\\_h/plan04.html](https://www.tepco.co.jp/ep/corporate/plan_h/plan04.html)
- (9) 関西電力ホームページ, [https://www.kepco.co.jp/sp/energy\\_supply/energy/newenergy/water/shikumi/index.html](https://www.kepco.co.jp/sp/energy_supply/energy/newenergy/water/shikumi/index.html)