

廃プラスチック熱分解油化プロセスの開発

Development of Thermal Cracking Liquefaction Process for Plastic Waste

機械事業本部 北村 幸夫^{*1}

横浜製作所 貝原 裕二^{*2} 米田 健一^{*3}

佐藤 繁博^{*4}

技術本部 堀添 浩俊^{*5} 末岡 靖裕^{*6}

容器包装リサイクル法の成立により、低処理コストで幅広い廃プラスチックの処理が可能な油化プロセスの開発が急務となっている。当社では、砂を熱媒体とした独自の熱分解油化プロセスを開発中であり、処理量1t/dのパイロットプラントを用いて、都市ごみ廃プラスチックの油化試験に取り組んでいる。その結果、プラスチック1kg当り0.78lの収率で油を回収でき、排ガス規制値も十分クリアできることを確認した。また、コーキングや装置閉そくなどのトラブルもなく、115時間の連続運転を実施し、運転の安定性も確認した。現在、この結果を反映した処理量5t/dの実証設備を建設中であり、平成11年1月より試運転を開始する予定である。

To liquefy plastic waste inexpensively, we developed thermal cracking process using hot sand and constructed a pilot plant with a capacity of 1 ton per day. Test results with municipal plastic waste attained a liquefaction yield of 0.78l-oil/kg-plastic and confirmed that exhaust gas was very clean. A test run of 115 hours continuous operation was achieved free of coking or blockage problems. A capacity of 5 ton per day demonstration plant is now being constructed, and test operation will begin in January 1999.

1. ま え が き

廃プラスチックは、一般廃棄物系及び産業廃棄物系を合せて、平成7年度には884万tにも達している。現在、これらの大半は焼却(51%)ないし埋立て処分(38%)されている。平成7年6月に成立した容器包装リサイクル法では、PETを除くその他プラスチックの油化等へのリサイクルが平成12年4月より義務付けられるため、実用的なりサイクル手法の開発が急務となっている。

現在、廃プラスチックのリサイクル手法としては、油化、高炉吹込みなどの開発が進められている。一般廃棄物系のプラスチックごみは、種々雑多なプラスチックの混合物であるとともに、金属、ガラス等の異物の混入が避けられないことから、これらが事業として成立するためには、異物の混入した雑多な廃プラスチックの処理が可能で、かつ低処理コストで安定して再商品化できる技術であることが必要である。

当社は、昭和40年代に、産業廃棄物系プラスチックを対象として、2段階溶融浴方式の熱分解油化プロセスの基礎を築いた⁽¹⁾。

現在、一般廃棄物系の廃プラスチックにも対象を広げ、上記ニーズに対応できる油化プロセスの開発をねらいとして、砂を熱媒体とした全く新しいコンセプトに基づく熱分解油化プロセスを開発中⁽²⁾であり、平成9年1月に当社横浜製作所内に設置したパイロットプラント(1t/d)を用いてプロセスの実証試験を実施中である。

なお、この開発は、平成8年度から、通商産業省工業技術院の“石油代替エネルギー関係技術実用化開発費補助金”の交付を受けて実施中である。

本報では、パイロットプラントを用いた試験の結果を報告するとともに、これを基に建設を進めている処理量5t/dの実証プラントの概要を紹介する。

なお、当社では、超臨界水を用いた廃プラスチック油化プロセ

スの開発にも取り組んでいる。このプロセスでは、前処理として油化不適物の除去が不可欠となるが、極めて高い反応速度が得られることから、シンプルかつコンパクトな装置で高い収率で油を回収できることを特徴としており、比較的原料組成が均一で安定した産業廃棄物系プラスチックの油化への適用が有望である。詳細は別報⁽²⁾⁽³⁾を参照されたい。

2. プロセスの特徴

図1に本報で紹介する熱分解油化プロセス(以下、本プロセスと称す)の概略フローを示す。本プロセスは、異物の混入した雑多な廃プラスチックを低処理コストで安定して処理することをねらいとしており、以下の特徴を有している。

(1) 前処理の簡素化

一般廃棄物系の廃プラスチック中には、金属、ガラス等の不燃物や熱硬化性樹脂、ポリ塩化ビニル(PVC)、PET等の油化不適物が約30wt%程度含まれており、従来の油化設備ではこれ

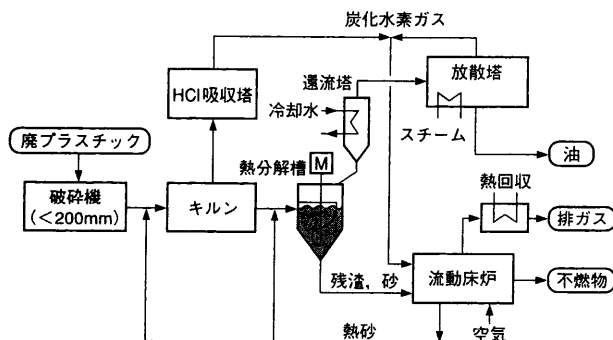


図1 熱分解油化プロセス 砂を熱媒体とした脱塩素用キルン、還流塔付き熱分解槽及び熱分解残渣燃焼用流動床炉等で構成される。

Thermal cracking liquefaction process of plastic waste

*1 環境装置第一部技術グループ主務

*2 環境装置技術部新製品開発グループ主査

*3 環境装置技術部機械設計課主査

*4 環境装置技術部機械設計課

*5 横浜研究所環境装置研究推進室長 工博

*6 横浜研究所環境装置研究推進室主査

らを除去するための前処理が重要であると同時に設備費のうちの大きな割合を占めている⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

本プロセスでは、砂を熱分解の媒体としており、異物は砂と共にコンベヤで搬送され、熱分解工程を経た後、流動床炉で焼却処理され、さらに不燃物は系外に排出される。したがって、異物が原料中に混入しても差支えなく、前処理は粗破碎のみであり、選別は不要である。つまり、油化できない熱硬化性樹脂などの油化不適物も燃料として有効利用できるのである。

(2) 熱分解工程でのコーキングトラブル防止

従来の油化プロセスでは、プラスチックの加熱を加熱炉等を用いて伝熱面を介して間接的に行うのが一般的である。しかしながら、この方式では伝熱面での炭素質の析出（コーキング）が避けられず、炭素質の蓄積により伝熱効率の低下、処理量の低下、さらに閉そくを招く。

本プロセスでは、従来の間接加熱方式に代り、熱源として循環した高温の砂を用い、廃プラスチックとこれを直接混合し、均一に加熱する方式を採用している。これにより、コーキングトラブルが解消でき、その結果熱分解温度を 450°C 程度に高く設定でき（従来 400°C 程度）、反応速度が大きくなり、効率よく油を回収できる。

(3) 安全で安定した熱分解残渣(さ)の処理と有効利用

プラスチックの種類によって程度の差異はあるものの、熱分解工程では分解と並行して炭素質が重縮合してできた残渣が生成する。この炭素質残渣は、熱分解工程に残留するため、連続あるいは定期的に系外に排出する必要がある。従来の熔融浴方式では、残渣と熔融プラスチックの分離が厄介であり、また、排出においては高温の熔融プラスチックの流出の恐れがあった。さらに、この残渣はそのまま排出すれば廃棄物となり、その処理が別途必要となる。

本プロセスでは、熱分解残渣は、系外へ排出することなく砂と共に流動床炉へ搬送し、燃焼させる。すなわち、残渣を燃焼することにより、得られる高温の砂を熱媒体として有効利用するのである。また、焼却後は金属、ガラス等の不燃物のみが砂と分離・排出される。これら焼却残渣は可燃物を含まず処分が容易である。

(4) 簡便な熱分解ガスの軽質化（無触媒で軽質化）

ポリエチレン等の熱分解で生じるワックス分が回収油に混入すると、液体燃料として使用が困難となるとともに装置閉そくの要因ともなる。この対策として、触媒を用いて軽質化する手法があるが、触媒劣化の懸念や、運転・保守費がかさむ等コストアップの要因となる。

本プロセスでは、低コストで運転・保守の容易な、より簡便な手法として、熱分解槽上部に還流塔を設け、還流塔の温度コントロールにより常温ではワックスとなる重質分を冷却・凝縮させて熱分解槽に還流し、再分解させる方式を採用している。これにより、無触媒でも、ワックスを含まない熱分解油を高い収率で得ることができる。

3. パイロット試験

プロセスの実証を行うため、処理量 1t/d のパイロット試験装置を製作し、油化試験を実施中である。本試験では、昼夜連続運転によるプロセス適正条件と安定性の確認とともに、物質・熱収支、回収油性状、排ガス組成等のプロセス設計データの取得を目的としている。

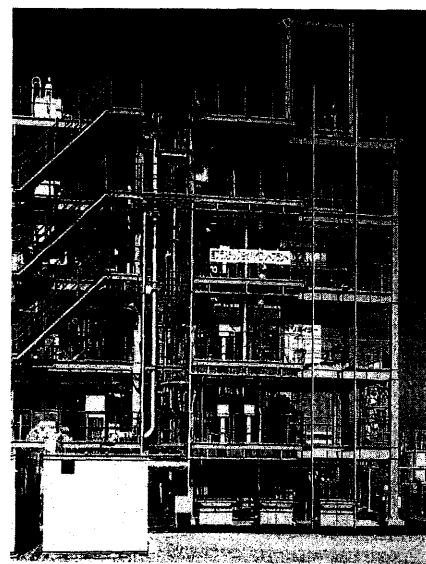


図2 熱分解油化パイロット試験装置
Photograph of pilot plant (Thermal cracking liquefaction process)

3.1 プラントの構成

図2にパイロット試験装置の外観を示す。本プロセスは、原料の粗破碎工程、脱塩素工程、熱分解・油回収工程、残渣燃焼工程、排ガス処理工程から成る。

原料の粗破碎工程では、2軸のせん断式破碎機を用いて廃プラスチックごみを 50 mm 以下程度（実機では 200 mm 以下を想定）まで粗破碎する。脱塩素工程では、ロータリキルンを用いて廃プラスチックごみを高温の砂と混合・加熱（約 300°C）し、塩素分を塩化水素として分離した後、スクリーコンベヤで熱分解槽へ送る。分離された塩化水素ガスは HCl 吸収塔にてアルカリ水溶液で洗浄し中和処理する。ロータリキルンは内部に機械可動部がなく、構造が簡単でメンテナンスが容易である。

熱分解・油回収工程では、立形の機械攪拌式熱分解槽を用いてキルンから排出される脱塩素後のプラスチックと砂の混合物に、新たに高温の砂を供給して、均一に混合・加熱（約 450°C）する。

熱分解ガスは熱分解槽上部の還流塔にて約 300°C まで冷却され、重質油を分離した後、放散塔で更に冷却され油として回収される。熱分解残渣は砂と共に熱分解槽下部から拔出され、スクリーコンベヤで流動床炉へ供給される。還流塔で凝縮した重質油は熱分解槽に戻されて再度分解される。放散塔では、油中に溶解している炭素数 1～4 の炭化水素ガスや、HCl、CO 等の無機ガスを分離・除去するとともに、温度調整により低沸点留分の除去も可能である。

残渣燃焼工程では、流動床炉を用いて熱分解槽から排出される残渣中の可燃分、放散塔及びキルン排ガスを完全燃焼させて無害化するとともに、流動媒体の砂は空気輸送によりキルン及び熱分解槽へ循環させる。燃焼工程の排ガスは、排ガス処理工程を経て系外へ排出し、焼却残渣は不燃物として分離する。なお、残渣燃焼工程及び排ガス処理工程は既存のごみ焼却技術の応用である。

3.2 供試原料ごみ

試験には、A市の一般家庭から分別収集された廃プラスチックを用いた。表1に原料ごみの性状及び含有プラスチック類の組成を示す。本原料ごみには、油化に適したポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレンの3種が合せて約 60%、油化不適物である PVC が約 4%、PET が約 10% 含まれていた。

表1 供試原料ごみの性状
Properties of plastic waste as feed

組成分析 (湿ベース wt %)	水分	2.14
	灰分	8.34
	可燃分	89.52
元素分析 (乾ベース wt %)	C	68.2
	H	11.1
	N	0.38
	S	0.07
	O	7.4
	Cl	4.36
低位発熱量 (kcal/kg 乾ベース)		7370
分類 (乾ベース wt %)	プラスチック類	87.0
	プラスチック類以外	13.0
プラスチック類 の組成 (乾ベース wt %)	ポリエチレン	26.2
	ポリプロピレン	15.3
	ポリスチレン	26.7
	ポリ塩化ビニル	4.7
	ポリ塩化ビニリデン	0.7
	ポリエチレンテレフタレート (PET)	12.0
	その他	14.4

3.3 運転概要

本プラントは、平成9年1月より、基礎試験で選定したプロセス条件をベースに昼夜連続運転を行い、不具合点の改良を行ってきた。運転初期には砂搬送スクリーコンベヤのトリップが発生したが、スクリー構造の改善等により安定した輸送が可能となった。また、その後運転時間の増加とともにダスト及びテレフタル酸による塔、配管の閉そくが顕在化した。ダストについては還流塔入口にダスト除去装置を設けることで、また、テレフタル酸については塔、配管をテレフタル酸の昇華温度以上に温度管理し、還流塔後段に分離器を設けることで解決した。これらの対策により長時間の連続運転が可能となり、115時間の連続運転後、トラブルなく通常停止できている。

なお、熱分解槽内壁面に摩耗が生じたが、同内壁面に砂のセルフプロテクト層を形成する改良を行った結果、その後摩耗はほとんど進行していない。

3.4 プラント性能

安定運転時に得られた主なプラント性能について以下に示す。

(1) 脱塩素性能

表2にキルン温度とキルンにおける脱塩素率及び回収油中の塩素濃度を示す。これより、キルン温度を310℃程度に設定すれば、キルンでの脱塩素率は94%が得られ、回収油中の塩素濃度も100ppm以下まで低減できることが確認できた。キルン温度を更に増加すると、キルンでの脱塩素率は向上するが、PVC以外のプラスチックの熱分解が始まり、油の回収率が低下するので、これ以上の温度増加は得策ではない。

最終的な脱塩素は熱分解槽で行われるが、キルンと熱分解槽を併せた脱塩素率は99.9%以上となる。

(2) 回収油の収率

図3に油、残渣、ガスの収率を示す。油の収率は、プラスチックベースで68wt% (0.78 l/kg-プラスチック) であり、エネルギー回収率 (回収油の発熱量/原料ごみの発熱量) は79%が

表2 脱塩素性能
Removal efficiency of chlorine

脱塩素キルン温度 (°C)	280	308
キルンでの脱塩素率 (%)	84	94
回収油塩素濃度 (ppm)	2700	63

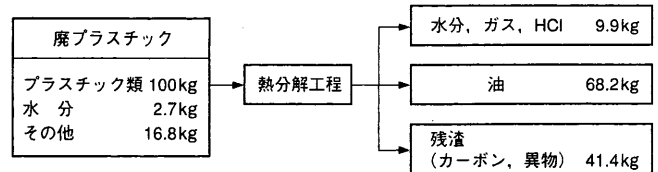


図3 油の収率 A市分別プラスチックごみを油化した結果、油の収率はプラスチックベースで68wt%であった。
Yields of thermal cracking of plastic waste of A-city

表3 回収油の性状
Properties of recovered oil

条 件	原 料	
	A市分別プラスチックごみ	
回 収 油 の 性 状	脱塩素温度 (°C)	308
	熱分解温度 (°C)	452
	還流温度 (°C)	306
	蒸留性状	
	初留点 (°C)	37
	50%留出温度 (°C)	205
	終 点 (°C)	486
	主要性状	
	流動点 (°C)	-2.5
	引火点 (°C)	+7.0
回 収 油 の 性 状	密 度 (g/cm³ 15°C)	0.865
	低位発熱量 (kcal/kg)	10160
	化合物タイプ (vol %)	
	飽和分	11.5
	オレフィン分	32.8
	芳香族分	55.7
	元素組成 (wt %)	
	C	82.78
	H	10.73
	N	0.09
	S	0.03
	O	1.25
	Cl	0.0063

得られている。

(3) 回収油性状

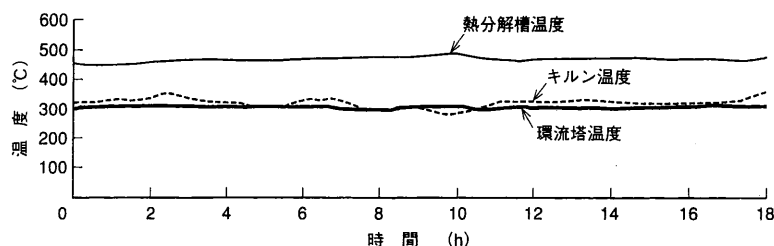
表3に回収油の性状を示す。密度は約0.87 g/cm³であり、軽油相当の値である。動粘度は30°Cにおいて1.63 mm²/sであり、灯油相当である。また、蒸留性状から、回収油はガソリン留分33 vol%，灯・軽油留分49 vol%，重油留分18 vol%から成る。流動点は-2.5°Cと軽油並みで、常温で液体の取扱いの容易な良質の油である。ただし、引火点は+7°Cと低く、第一石油類の扱いとなるが、必要に応じ分留により留分調整が可能である。

図4に回収油中の留分及び塩素濃度の経時変化を示す。いずれも変動は少く安定していることが確認できた。

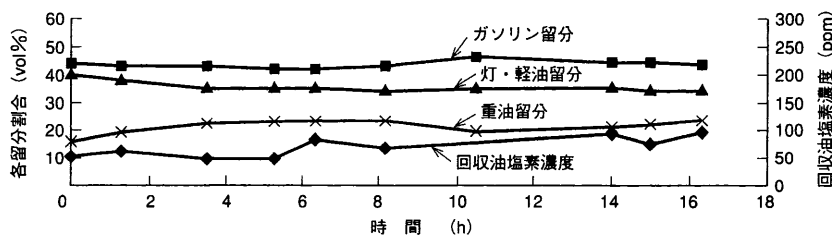
(4) 回収油の用途

油の用途としては、低位発熱量が10160 kcal/kgと軽油等の一般燃料油並みであり、ボイラや加熱炉等の燃料として十分使用可能である。本プラントでは、回収した油を残渣燃焼炉の助燃油として使用しているが、通常の流動床炉用バーナを用いて全く問題なく燃焼可能であった。腐食性の評価値である銅板腐食も1aと良好であり、部材の腐食等の問題も生じていない。

一方、将来的に石油精製原料へ戻すことも考えられるため精油所の原料油としての評価も行った。重質軽油の接触分解工程への供給を想定し、要素試験を行った結果、従来の重質軽油を原料とした場合と全くそん色のないガソリン主体の精製油が得られ、塩素分(3 ppm以下)、オレフィン分、有機酸(ND)も低減し改質されることが分かった。現時点では、国内の精油所



(a) 各部の温度



(b) 回収油性状

図4 回収油性状の経時変化 Trend of oil properties
回収油中の塩素濃度は低く、各留分とともに安定している。

の処理量に対して、廃プラスチックから回収される油量が極めて少ない比率であるため、商業ベースでの受入れは難しいとされている。輸送や受入れなどに掛る費用の負担を社会的に考えるような環境整備がなされれば、実現する可能性は高いといえる。

(5) 残渣燃焼と排ガス性状

熱分解残渣は、キルン排ガス及び放散塔排ガスと共に、当初の計画どおり燃焼炉において容易に燃焼でき、燃焼排ガスも規制値を十分クリアする性状であることが確認できた。主な燃焼排ガスデータを表4に示す。

熱分解残渣は燃焼炉で焼却処理されるので、系外へ排出されることがなく安全である。また、焼却残渣は不燃物として通常の焼却灰と同様に処理できる。

(6) 運転性

試験後の開放点検の結果、熱分解槽等装置内にはコーキング物は見られず、基礎試験と同様、熱媒体として砂を用いることによるコーキング防止効果を検証できた。熱分解槽から排出される残渣は砂の表面に均一に付着してさらさらした状態であり、砂と共にコンベヤで容易に流動床炉に搬送することができ、運転上の支障は全くなかった。

本プロセスでは、シャットダウン時の操作としてプラスチックが完全に排出されるまで高温の砂を循環させるので、系内にはプラスチックが残存せず溶融したプラスチックの固着等がないため、ホットオイルによる配管の加熱が不要で、保守とともに装置の起動停止が容易である。

4. 今後の展開

現在、茨城県牛久市にて、通産省の補助金を得て処理量5t/dの実証設備の建設を進めている。表5に設備の主な仕様と図5に完成姿図を示す。本設備は、中小規模の都市（人口7万人規模）で分別収集される廃プラスチックを処理できる能力を有しており、大都市あるいは広域処理を対象とした50t/d規模（人口70万人規模）のプラント設計に備えるものである。今後、本設備により、実機設計データを取得するとともに運転コスト及び設備コストの最終評価及び回収油の用途評価・拡大を図っていく計画である。

表4 排ガス性状

Properties of exhaust gas from incinerator of residue and gas furnace

項目	計測値
CO (炉出口)	1 ppm 以下
NOx (炉出口)	89.8 ppm
HCl (煙突出口)	10 ppm
ダイオキシン (煙突出口)	0.049 ng-TEQ/Nm ³

表5 実証設備の主仕様

Specification of demonstration plant

項目	仕様
処理能力	5 t/d
設置面積	18×56 m
主要機器	
脱塩素装置	ロータリキルン $\phi 1.3 \times L 8$ m
熱分解槽	立形攪拌槽式 $\phi 1 \times H 3$ m
残渣焼却炉	流動床式 炉断面積 0.36×0.36 m

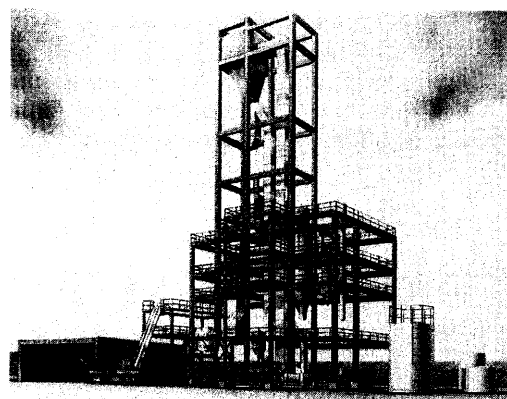


図5 実証設備完成姿図

Overview of demonstration plant

5. むすび

一般廃棄物系のプラスチックごみを用いたパイロットプラント試験により、異物の混入した雑多な廃プラスチックからも前処理・分別することなく高い収率で安定して良質の油を回収できることを確認した。また、運転ノウハウやメンテナンス及び安全面についても貴重なデータを得ることができ、5t/d実証設備の設計製作に反映した。本実証設備は平成11年1月には試運転開始の予定であり、廃プラスチックリサイクル技術の一翼を担うべく早期実用化を図りたい。

参考文献

- (1) 栗栖ほか、廃プラスチック熱分解装置の開発、三菱重工技報 Vol.10 No.5 (1973) p.787~794
- (2) 桜田ほか、廃プラスチック油化プロセスの開発、三菱重工技報 Vol.34 No.3 (1997) p.170~173
- (3) 木村ほか、超臨界水による廃プラスチック油化プロセスの開発、三菱重工技報 Vol.34 No.6 (1997) p.438~441
- (4) (社)プラスチック処理促進協会、廃プラスチックの熱分解油化技術のブラッシュアップ研究 (1995)
- (5) 待鳥ほか、一廃系廃プラスチックの油化技術の実用化に向けて、都市と廃棄物 Vol.27 No.2 (1997) p.34~46
- (6) 長井ほか、廃プラスチック油化設備、日立造船技報 Vol.57 No.2 (1996) p.49~54