

シリーズ (CR 企業の米国特許と技術) : 下巻

米国などケミカルリサイクル企業6社 の米国特許と技術

熱分解法ケミカルリサイクル企業 6 社の米国特許を調査し、公表情報と合わせて工業プロセスを推定した。OMV と ExxonMobil は、熱分解生成物の高沸分（例、沸点 350～370℃以上）を溶媒として使用する熱分解法を採用している。また、前者は管型熱分解炉、後者は流動層型熱分解炉を使用している。Honeywell UOP は二重円筒型熱分解炉を、New Hope Energy/Lummus は掻き取り用攪拌機付き垂直 2 段熱分解炉を、Alterra Energy は内部が 2～4 ゾーンに仕切られたロータリーキルン型熱分解炉を出願している。熱分解法ケミカルリサイクルの将来について、スケールアップと収率向上の観点から考察した。

2025 年 12 月



株式会社 旭リサーチセンター
シニアリサーチャー 府川 伊三郎

まとめ

◆OMV は公表資料によれば、管型熱分解炉と溶媒を使用している。公表資料と No. 2 特許*では、熱分解炉から排出される熱分解ベーパーを部分凝縮器（分離器）でガス成分と液体成分に分離し、液体成分（例、沸点 360℃以上）は加熱した後、熱分解炉に戻し、再度熱分解する。この液体成分が内部溶媒であり、溶媒が不足した場合は外部溶媒を追加する。No. 1 特許*によれば、外部溶媒の一例は沸点 350℃以上の FCC 蒸留残渣である。また No. 2 特許では、ポリマー熱分解液の循環ラインにフィルターをつけてチャーを分離する装置や特殊構造の部分凝縮器（分離器）が開示されている。

*印：各社の出願特許を最も早い出願日の順で番号（No.）を付けた。（5-9 頁）

◆ExxonMobil は熱分解に溶媒を使用していることを公表しており、特許を 1 件出願している（No. 6 特許）。また、No. 5 特許と No. 6 特許は流動層型熱分解炉を開示していることから工業的にこれを使用しているものと推定される。No. 6 特許の熱分解条件の一例は、高温（550℃）、短滞留時間（5～10 秒）で、ワンパスコンバージョンを低めに抑える。また、熱分解ベーパーのうちの 370℃以上の高沸点成分は液化させて分離した後、加熱してポリマー溶解槽（原料廃プラの溶解槽）に戻すプロセスを開示している。370℃以上の高沸点成分は溶媒として働くとともに、熱分解炉で熱分解する。（10-17 頁）

◆Honeywell UOP は、No. 1 特許と No. 3 特許で混合廃プラ中の PVC（ポリ塩化ビニル）をメルトリアクターで事前に分解した後、熱分解炉で混合廃プラを熱分解する方法を開示している。ここで、熱分解炉に塩素吸着剤（ CaCO_3 、 CaO 、 Ca(OH)_2 など）を添加する。また、フラッシュタンク底部から抜き出した熱分解油は吸着ベッドで不純物（塩素と反応した塩素吸着剤など）を除去する。また、No. 3 特許では二重円筒型熱分解炉を開示している。No. 6 特許では（ベーパー洗浄部付き）熱分解炉とコンタクト凝縮カラムの組み合わせを開示している。コンタクト凝縮カラムで凝縮した液体は熱分解炉に戻す循環系が組まれている。（18-23 頁）

◆Alterra Energy は、2020 年に試運転を開始した 2 万トン/年の工場に、直径 3m、長さ 20m のロータリーキルン型熱分解炉を使用している。No. 3～5 特許では、ローターキル

ン内部を仕切りで 2～4 ゾーンに分割して、段階的に温度を上げる方法を開示している。No. 4 特許では、3 ゾーンのロータリーキルン型の例として、第 1 ゾーンは温度 400～425℃、第 2 ゾーンは 450～475℃、第 3 ゾーンは 500～525℃と段階的に温度を上げている。また 4 ゾーンの例では、全滞留時間は 30～90 分と記載されている。また、仕切りの構造が図示されている。この仕切りをつけた複数ゾーンのロータリーキルン型熱分解炉が工業的に採用されているかどうかはわからない。(24-29 頁)

◆Nexus Circular は概念的な出願特許が 1 件で、有効な特許情報は得られなかった。

(30-31 頁)

◆New Hope Energy/Lummus は、No. 3 特許で掻き取り用攪拌機付き垂直 2 段熱分解炉を開示している。上部はメルトポリマーの分散とフィルム状での熱分解、下部はタンク熱分解である。この熱分解炉が工場に使用されているものと推定される。No. 4 特許は段階的昇温によるバッチ熱分解法を開示し、No. 5 特許は重質熱分解油と通常の重油を混合して、既存の重油クラッキング装置で熱分解する方法を開示している。(32-37 頁)

◆日本の環境エネルギーが 2 件の特許を出願している。No. 1 特許は使用済み FCC 触媒を用いた熱分解法で、熱分解時にカルシウム化合物を添加し、PVC の分解で発生する塩化水素を中和する。No. 2 特許はダブルリボン型攪拌機付き縦型熱分解炉で、その熱分解炉の下部にチャーを取り出すための特殊構造を組み込んである。(38-39 頁)

◆混合廃プラ (PE/PP/PS) の熱分解法は、現在 CR の中で最も重要であり将来も変わらない。しかし、技術的課題が多いため、究極のプロセスを目指して積極的な研究開発競争が今後とも続くであろう。将来の方向を考える上で、①熱分解炉のスケールアップの観点から本命プロセスは何かを見極めること、②EU で CR に対して「燃料除外マスバランス方式」が適用になる見込みから、熱分解におけるナフサ (およびディーゼル) の収率アップと水蒸気分解 (ナフサ分解など) における有効成分 (エチレン、プロピレンなど) の収率アップが厳しく求められること、の 2 点について考察した。

(40-45 頁)

目 次

はじめに	1
用語・略語	3
1. OMV(オーストリア)	5
2. ExxonMobil(米国・テキサス州 Baytown)	10
3. Honeywell UOP (米国・イリノイ州 Chicago)	18
4. Alterra Energy(米国・オハイオ州 Akron)	24
5. Nexus Circular(米国・ジョージア州 Atlanta)	30
6. New Hope Energy/Lummus(米国・テキサス州 Tyler)	32
(参考)環境エネルギー	38
おわりに(熱分解法 CR の将来)	40
謝辞	46
参考文献	46

〔上巻〕 ケミカルリサイクル企業主要 12 社の米国特許技術と最新動向

1. 混合廃プラの熱分解法 CR の事業化状況
 - 1.1 世界の熱分解油工場の混合廃プラ(PE/PP/PS)処理能力
 - 1.2 日本の混合廃プラと廃タイヤの CR 技術の事業化と開発
2. 混合廃プラの熱分解法 CR プロセスの概要と課題
 - 2.1 混合廃プラの熱分解法 CR プロセスの概要
 - 2.2 混合廃プラの熱分解法 CR プロセスの技術課題
3. 熱分解油メーカー主要 12 社の公表資料によるプロセスの特徴
4. 熱分解油メーカー主要 12 社の米国特許と公開情報の総合的解析
 - 4.1 熱分解油メーカー主要 12 社の米国特許の検索結果
 - 4.2 熱分解油メーカー主要 12 社の固有要素技術
 - 4.3 熱分解法 CR のスケールアップが難しい理由と対策

〔中巻〕 欧州ケミカルリサイクル企業 6 社の米国特許と技術

1. Quantafuel(デンマーク)
 2. Plastic Energy(イギリス)
 3. Licella(オーストラリア)と Mura Technology(イギリス)
 4. BlueAlp(オランダ)
 5. Pryme(オランダ)
 6. LyondellBasell(欧州と米国)
- (参考)札幌プラスチック

はじめに

(1) 本リポート(シリーズ(CR 企業の米国特許と技術)の下巻)について

過去 5 年間、ケミカルリサイクル (CR) の事業化状況をウオッチしてきたが、混合廃プラ (PE/PP/PS) の熱分解法 (油化法、欧米では Advanced Recycling ということが多い) は、最も注目される CR である。これに焦点を当て、米国特許情報と公表資料より世界の熱分解油メーカー主要 12 社のプロセスを推定した。

シリーズ上巻 (2025 年 10 月掲載)¹では、熱分解法 CR の工場建設状況と熱分解 CR 主要 12 社の固有要素技術とスケールアップ技術について概説した。

また、シリーズ中巻 (2025 年 11 月掲載)²では主要 12 社のうちの欧州 6 社の Quantafuel (デンマーク)、Plastic Energy (イギリス)、Licella (オーストラリア) と Mura Technology (イギリス)³、BlueAlp (オランダ)、Pryme (オランダ)、LyondellBasell (欧州と米国) を取り上げた。また、参考に先行技術である札幌プラスチック (2001~2011 年稼働) の技術内容⁴を取り上げた。

シリーズ下巻となる本リポートでは、主要 12 社のうちの OMV (オーストリア)、ExxonMobil (米国・テキサス州 Baytown)、Honeywell UOP (米国・イリノイ州 Chicago)、Alterra Energy (米国・オハイオ州 Akron)、Nexus Circular (米国・ジョージア州 Atlanta)、New Hope Energy/Lummus (米国・テキサス州 Tyler) の 6 社を取り上げた。

このうち、Honeywell UOP はパイロットをベースに本プラント技術を設計したもので、本プラントは持っていない。また、同社はトルコの Biotrend など数社に技術ライセンスしているが本プラントは建設されていない。

また、参考に日本の環境エネルギー (出光興産と共同で工場建設中) 出願の米国特許 2 件を紹介した。

¹ https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1080.pdf

² https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1081.pdf

³ Licella は Mura Technology に超臨界水熱分解技術をライセンスした。

⁴ 参考文献(7)参照。

各社の内容は、共通して次のような項目で解説した。すなわち、①概要、②公表資料によるプロセスの特徴、③特許検索結果（特許一覧表）と注目される特許プロセス（ポイントとプロセスフロー図や装置図の説明）、④コメント（ポイントと筆者意見）である。

(2) 特許の検索と整理の仕方について

特許は、検索しやすく明細書の著作権問題が少ない米国特許（USP）に絞り、一部国際特許出願（PCT）などで補強した。

各社の米国特許検索結果は、次の基準でまとめた。

- ①出願番号が同一の公開特許と登録特許は勿論、それらの分割特許、継続特許、一部継続特許を含めてまとめて1件でカウントして、特許一覧表を作成した。米国特許は分割特許、継続特許、一部継続特許が多い。
- ②「最も早い出願日」を出願日とした。特許明細書に記載のある米国の Provisional filing date（仮出願日）、優先権主張日、出願日の中で最も早いものを表に記載した。各社の特許はそれぞれ、「最も早い出願日」順にナンバリング（No. 1～）した。
- ③発明者は原則「姓」だけを記載し、筆頭発明者は赤字とした。発明者の記載順は、原則特許明細書の記載に従った。ただし、ExxonMobil、LyondellBasell（中巻）など特許件数が多いところについては、代表的な発明者ベースの記載順にした。これは、代表的発明者がどの特許の発明者になっているかを見分けやすくするためである。

用語・略語

- ・メカニカルリサイクル (Mechanical Recycling (略:MR)) : 粉碎、洗浄、造粒により機械的に廃プラをリサイクルする方法。マテリアルリサイクルと同じ意味。
- ・ケミカルリサイクル (Chemical Recycling (略:CR)) : ポリマーを化学反応で分解して、モノマーや化学品にするリサイクル方法。欧米では Advanced Recycling ということが多い。CR の手法としては、解重合法、熱分解法 (油化法)、ガス化法、コークス炉化学原料化法、高炉還元剤法などがある。
- ・廃プラ (廃プラスチック) : 使用済みプラスチック、プラスチック廃棄物と同じ意味。
- ・CR プラントの設備能力 : 一般には廃プラの処理能力で表す。また、熱分解油 (オイル) の生産能力で表す場合もある。
- ・熱分解炉 (Pyrolysis furnace) : 熱分解リアクター (Pyrolysis reactor)、リアクター (Reactor) と同じ意味である。
- ・ポリマー熱分解液 : 熱分解炉中にあるポリマーとポリマー分解物の混合物。
- ・熱分解物ベーパー (vapor) : 熱分解炉で廃プラが分解されて排出されるガスのこと。
- ・熱分解ガス : 熱分解物ベーパーを室温に冷却しても気体のもの (メタン、エタンなど)。
- ・チャー : 熱分解で生成する炭素系副産物 (カーボンブラック、コーク、炭素など)。
- ・コンタクター、還流塔、部分凝縮塔 (Partial condenser) : いずれも低沸点成分 (製品成分) と高沸点成分 (熱分解炉に戻し再分解させる) を分ける設備を指す。
- ・ロータリーキルン (Rotary Kiln) : 供給装置を使って原料を炉内に供給し、攪拌させながら原料を均一に熱処理する円筒回転加熱炉である。
- ・アップグレーディング (Upgrading) : FCC や水素化分解により、熱分解油の重質成分を軽質化して、ナフサなどの軽質留分にする。
- ・FCC (流動接触分解) : 重質油原料から、ガソリン、ガソリン原料、軽油などを製造する方法・設備。JOGMEC (独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構) によれば、「反応温度は 430~550℃、圧力は移動層式で約 2kg/cm²、流動層式で 0.7~1.1kg/cm² 程度である。触媒再生温度は 550~660℃ である。最近ではゼオライト触媒が主流であるが、

シリカアルミナ触媒も使用される。反応生成物の収率の一例は原料油に対して大体ガソリン 30～60vol%、B-B 留分（C4 留分）5～10vol%、C3 以下のガス 5～10wt%、分解軽油 20～50vol%、コークス 5～10wt%程度である」⁵。

- ・水素化分解：「水素化分解とは、炭化水素を高温・高圧下、水素気流の中で触媒を用いて分解し、より軽質の炭化水素に転化させることである」⁶。
- ・プラスチックの略号

PE:ポリエチレン

PP:ポリプロピレン

PS:ポリスチレン

混合廃プラ（PE/PP/PS）：PE、PP、PS からなる混合廃プラのことで、熱分解に適する。

PO:ポリオレフィン（PE、PP などの総称）

PVC:ポリ塩化ビニル

PET:ポリエチレンテレフタレート

PA:ポリアミド（ナイロン）

⁵ 出所:JOGMEC 資料(<https://oilgas-info.jogmec.go.jp/termlist/1001027/1001092.html>)に基づき作成。

⁶ 出所:JOGMEC 資料(<https://oilgas-info.jogmec.go.jp/termlist/1000971/1000980.html>)に基づき作成。

1. OMV(オーストリア)

1.1 概要

OMV はオーストリアの石油会社で、石油化学企業の Borealis の 75%の株式を有する。

OMV は溶媒を使用する熱分解法技術を自社開発し（OMV ReOil と命名）、2025 年 3 月に新工場（1.6 万トン/年）を完成し、成功裏に稼働を開始した⁷。

OMV は次期計画として、この新工場（1.6 万トン/年）と同じ工場サイト（ウィーン近郊の Schwechat）に 20 万トン/年の工場を建設することを発表した（2025 年 3 月）⁸。既に EU より 8,160 万ユーロのイノベーションファンドを獲得している。FID（最終投資決定）はまだである。

1.2 公表資料によるプロセスの特徴

表1 OMV の公表資料によるプロセスの特徴

企業名 (プロセス名)	プラント所在地	年間処理能力	提携石油化学企業	熱分解条件				反応成績
				触媒	熱分解温度 連続/バッチ	熱分解炉形状	特徴	
OMV (ReOil)	オーストリア・Schwechat	1.6万トン	OMV、Borealis	なし	400～450℃、連続	管（チューブ）型	溶媒使用、分解物の高沸分は一部熱分解炉に循環。	パイロット：100kg/hrの廃プラから、100L/hrのクルード熱分解油が得られる。

出所：公表資料より旭リサーチセンター作成。

公表資料（図 1）によれば、OMV は溶媒を使用するプロセスである。廃プラフレークを押出機で熔融した後に、溶媒と熱分解液の混合物で廃プラフレークを溶解した後、熱分解炉に供給する。蒸発タンク（フラッシングタンク）のボトムより取り出した凝縮液体（熱分解液）を加熱装置とフィルターを通して熱分解炉に循環する。このとき循環ライ

⁷ <https://www.omv.com/en/media/insights/2025/omv-starts-up-new-reoil-plant>
<https://www.omv.com/en/media/press-releases/2025/250318-omv-unveils-innovative-reoil-plant-to-transform-end-of-life-plastics-into-circular-feedstocks>
<https://www.omv.com/en/media/press-releases/2025/250312-omv-premieres-eu-funding-of-eur-81-6-mn-for-its-industrial-reoil-plant>

⁸ <https://www.omv.com/en/media/press-releases/2025/250312-omv-premieres-eu-funding-of-eur-81-6-mn-for-its-industrial-reoil-plant>

廃プラフレーク

押出機

溶解

溶媒

熱分解炉

循環

フィルター

チャー

蒸発タンク

部分凝縮器

LPG & 軽質油

重質油

図の機器名は旭リサーチセンターが日本語に翻訳。

米国特許 2 件が検索された。

番号	特許番号	最も早い 出願日	公開日 登録日	発明者	特許の名称（略）	ポイント
No.1	US 2014/0114098 （WO2012/149590）	2011.5.5	公開日 2014.4.24	Hofer	廃プラのエネルギ－ 効率の高い処理の ための方法と装置	溶媒を使用するプロ セス。熱分解炉中の ポリマー熱分解液を 原料供給系にリサイ クル。
	US 9,920,255		登録日 2018.3.20			
No.2	US 2024/0375127	2021.9.7	公開日 2024.11.14	Hofer、 LECHLEITNER、 BARONCELLI	多相炭化水素流中 の成分分離のための 装置と方法	熱分解ペーパーの成 分分離方法と装 置。

出所: 米国特許検索結果に基づき旭リサーチセンター作成。

No.1 特許が 2011 年に出願されてから 10 年後の 2021 年に、No.2 特許が出願された (2024 年に公開)。両特許とも筆頭発明者は Hofer であり、技術思想は継続していると推定される。

(1) No.1 特許 (US 9,920,255) : 熱分解プロセスフロー

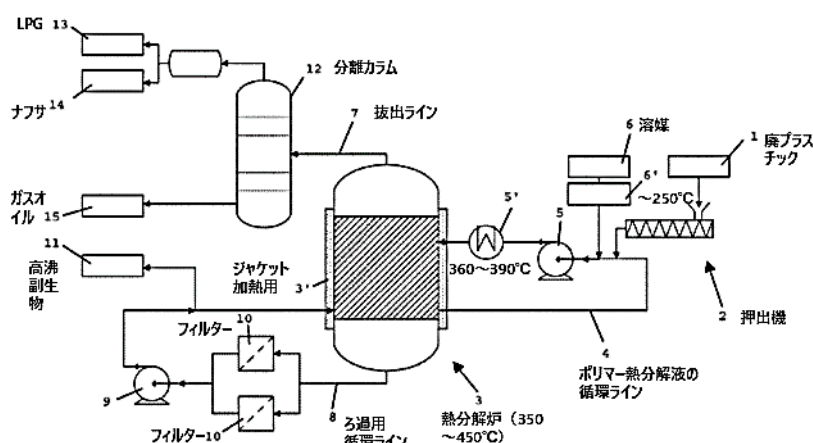


図 2 OMV 特許記載の熱分解プロセスフロー

出所: US 9,920,255 の Fig.1。機器名は、明細書データに基づいて旭リサーチセンターが日本語に翻訳。

図 2 によれば、まず廃プラは押出機で約 250℃に加熱し、次いで溶媒とポリマー熱分解液の混合物に溶解した後に熱交換器で 360～390℃に加熱して熱分解炉に供給する。熱分解炉は 350～450℃で、熱分解炉の下部からポリマー熱分解液を取り出し、押出機出口のラインに戻す循環ラインがあるのが特徴である。ろ過用循環ラインにフィルターを設置し、チャーを分離している。

No.1 特許のプロセス (図 2) はポリマー熱分解液の循環ラインがあること、また熱分解炉の下部よりろ過用循環ラインがあることなどの点で公表資料 (図 1) と異なる。

溶媒には例えば、EINECS no. 265-064-6⁹を使用と明細書に記載がある。また、溶媒を使用することで、熱分解炉壁面でのファウリングが少なくなり、またスケールアップもしやすいので、10 万トン/年も可能となると記載されている。

⁹ FCC(接触分解)蒸留残渣で、沸点 350℃以上、炭素数 20 以上、4-6 の芳香族縮合環化合物を 5%以上含む炭化水素。 <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.059.131>

(2) No.2 特許 (US 2024/0375127) : 多相炭化水素ストリームを分離するプロセス

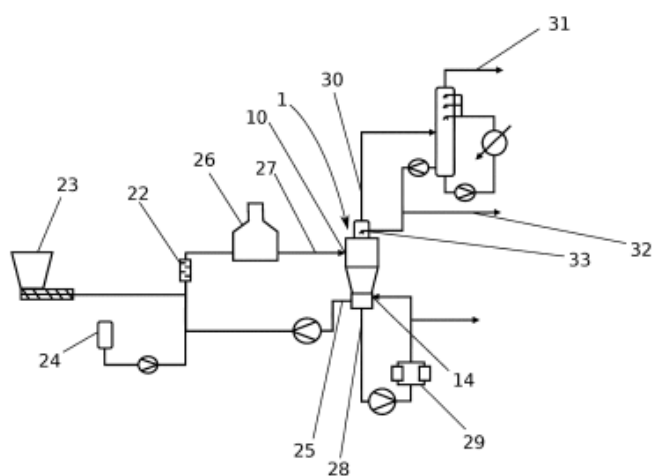


Fig.2

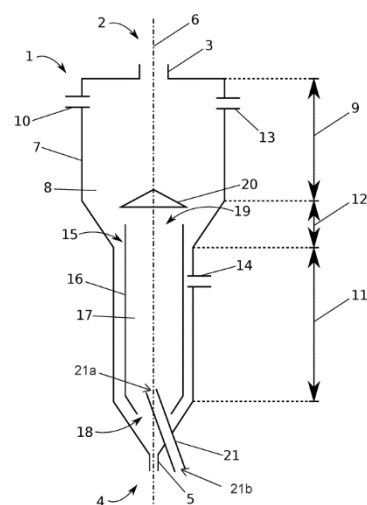


Fig.1

図 3 OMV 特許記載の多相炭化水素ストリームを分離する装置とプロセス

注: Fig.1とFig.2の番号は共通である。

出所: US 2024/0375127のFig.1とFig.2

図 3 の Fig.2 は、押出機 (23)、熱分解炉 (26)、多相炭化水素ストリームの分離器 (1、以下分離器 (1) と略す) からなるプロセスを示す。熱分解炉 (26) で分解された生成物 (多相炭化水素ストリーム (27)、以下ストリーム (27) と略す) は全量、分離器 (1) に供給される。ストリーム (27) は、分離器 (1) でガス成分 (30) と固形物 (チャーなど) を含む液体成分 (25、以下液体成分 (25) と略す) に分離される。分離器 (1) の上部からガス成分 (30) を、下部より液体成分 (25) を抜き出す。そして、加熱した液体成分 (25) と加熱した外部溶媒 (24) の混合物と廃プラのメルトポリマーを、スタティックミキサー (22) で混合してメルトポリマーを溶解した後、熱分解炉 (26) に供給する。熱分解炉 (26) に供給された液体成分 (25) はそこで熱分解するが、同時に溶媒の働きをするいわば内部溶媒である。また、分離器 (1) から固体濃縮用ストリーム (28) が抜き出され、コークキャッチャー (29) で固形物 (チャーなど) を除去した後、分離器 (1) の 14 の位置にタンジェンシャル (接線方向) に供給される (戻される)。

図 3 の Fig.1 に示すように、分離器 (1) は外部ベッセル (7) と内部ベッセル (16) の二重構造である。熱分解炉 (26) からストリーム (27) が分離器 (1) の (10) および (13)

の位置から円筒の接線(壁面)方向に供給される。接線方向に供給されたストリーム(27)は外部ベッセルの壁を伝わって流れ落ち、途中蒸発するガス成分(30)はトップ出口(3)から排出される。また、接線方向の入口(14)から循環ラインの熱分解液が供給される。内筒内(17)に溜まった液体成分から蒸発するガスは(19)の出口を通して、トップ出口(3)から排出される。ここで、ガスと一緒に固形物が上部に侵入するのを防ぐためにバリアー(20)が設置されている。一方、液体成分(25)がボトム出口(5)から抜き出される。また、Traversing conduit(21、横断管)を使って、内筒内(17)の液体成分(25)の液面レベルを調整しているものと推定される。

1.4 コメント

(1)公表資料(図 1)と No.2 特許の共通点

以下のように No. 2 特許は公表資料と 3 つの重要な共通点があり、実際の工場を反映しているものと考えられる。

- ① 公表資料は管型熱分解炉であり、No. 2 特許も熱分解炉の反応生成物の全量がプラグフロー的に分離器に供給されているので、熱分解炉は管型や円筒型と推定される。
- ② 分離器(公表資料の蒸発タンク)の液体成分の熱分解炉への循環ラインが両者にある。
- ③ チャーのフィルターは、公表資料では分離器の液体成分の循環ラインに組み込まれ、また No. 2 特許では分離器の液体成分の専用循環ラインに組み込まれている。

(2)溶媒について

No. 1 特許と No. 2 特許では、外部溶媒と内部溶媒を溶媒に使用している。外部溶媒の例として、特許 No. 1 では EINECS no. 265-064-6 (沸点 350℃以上) が記載されている。また、No. 2 特許の分離器の操作温度は、360～400℃と記されているので、分離器の液体成分(内部溶媒)の沸点は 360～400℃以上になる。これは外部溶媒に近い沸点領域である。なお、内部溶媒と外部溶媒はいずれも熱分解炉で熱分解する。熱分解しすぎて、溶媒が不足する場合は、外部溶媒で補給しているものと考えられる。

2. ExxonMobil(米国・テキサス州 Baytown)

2.1 概要

ExxonMobil は溶媒使用の熱分解法の自社技術 (Exxtend と命名) を開発し、2022 年 12 月にテキサス州 Baytown の自社コンビナート内に 3.6 万トン/年の熱分解法工場を建設、稼働を開始した¹⁰。

そして、2025 年 6 月にはテキサス州 Baytown 工場の能力増工事が完了したことを発表した¹¹。処理能力は 3.6 万トン/年から 7.2 万トン/年に倍増した。

さらに、Baytown (第 3、第 4 系列) と Beaumont 新工場建設計画を発表した (2024 年 11 月と 2025 年 6 月発表)¹²。合計処理能力は 15.4 万トン/年、投資額は 2 億ドルで、2026 年完成見込みである。完成すれば、Baytown・Beaumont 地区の総処理能力は 22.6 万トン/年になる。

2.2 公表資料によるプロセスの特徴

表 3 ExxonMobil の公表資料によるプロセスの特徴

企業名 (プロセス名)	プラント 所在地	年間処理 能力	石油化学企業	熱分解条件			精製・アップ グレード 技術
				触媒	連続/バッチ	特徴	
ExxonMobil (Exxtend)	米国 (Baytown)	7.2万トン	ExxonMobil	なし	連続プロセス	溶媒使用	自社

出所: 公表資料より旭リサーチセンター作成。

同社はウェブサイトの動画で、Baytown 工場の Exxtend プロセスが溶媒を使用していることを明らかにした。動画の説明の要旨は次のようなものである。

¹⁰ <https://www.chemanager-online.com/en/news/exxonmobil-starts-advanced-recycling-plant>

¹¹ <https://corporate.exxonmobil.com/locations/united-states/baytown/newsroom/2025/doubling-down-on-double-capacity>

¹² https://corporate.exxonmobil.com/news/news-releases/2024/1121_exxonmobil-invests-200m-to-expand-advanced-recycling-in-texas
<https://corporate.exxonmobil.com/locations/united-states/baytown/newsroom/2025/doubling-down-on-double-capacity#We%E2%80%99reinvestedinadvancedrecycling>

「収集・選別・粉砕された廃プラは ExxonMobil の Baytown 石化コンプレックスにある北米最大の CR (Advanced Recycling) 工場にトラックで運ばれてくる。トラックから粉砕された廃プラが、石化コンプレックス敷地内の大型サイロに直接供給される。廃プラは不純物（微粉など）除去用ダストコレクターを通った後タンクに供給され、そこで炭化水素液体と混合される。混合物中の廃プラは、熱交換器に送られる前に再粉砕され、熱交換器を通して加熱され粘度が低下する。混合物は熱分解炉に入り、廃プラは加熱され、分解してナフサなどになる。このナフサなどと既存プラントで製造するナフサなどを混合して、再生プラスチックがつくられる。」

2.3 特許検索結果と注目される特許プロセス

表 4 に示されるように 13 件の出願があるが、このうち No. 5 の流動層型熱分解炉を用いる熱分解特許と No. 6 の溶媒と流動層型熱分解炉を使用する熱分解特許が重要である。

その他、コーカーを使用した廃プラの熱分解特許が多い (No. 3、8、9、10)。

表 4 ExxonMobil の米国特許 (USP) 検索結果

会社名 ExxonMobil		出願人 ExxonMobil Chemical Patents Inc.		特許件数 13件		
番号	特許番号	最も早い 出願日	公開日、 登録日	発明者	特許の名称 (略)	ポイント
No.1	US 2022/0195309 (PCT)	2019.6.13	公開日 2022.6.23	Patel, Uppili, Smiley, Gros, Go, Maduskar, Foster, Laurent	廃プラスチック (廃プラ) からの軽質オ レフィンの回収	熱分解とスチームクラッカーの 統合。
No.2	US 11,292,973 (PCT)	2019.11.1	登録日 2022.4.5	Sundararaman, Lattner, Ferrughelli, Maduskar, Barrai, Weber, Abichandani	炭化水素のアップグレーディングプロセ スとシステム	触媒を使用した水素化処 理。
No.3	US 2022/0372375 (PCT)	2019.11.5	公開日 2022.11.24	Patel, Smiley, Gros, Harandi	コーカーでの廃プラのコブロセッシング	石油精製のコーカーに廃プラを 投入して、熱分解。
No.4	US 2023/0131108 (PCT)	2020.3.31	公開日 2023.4.27	Patel, Raich, Aldous	重質留分からの抽出可能固体 (粒 子やアスファルト) の除去	溶媒を使ったfractionator (分留装置)。
No.5	US 2023/0159834 (PCT)	2020.4.23	公開日 2023.5.25	Maduskar, Reimers, Weber	溶融押出機付き流動層型熱分解炉	流動層型熱分解炉で熱分 解した後、水蒸気分解でオレ フィンを製造する。
No.6	US 2023/0287276 (PCT)	2020.7.23 2020.11.10	公開日 2023.9.14	Patel, Smiley, Maduskar, Uppili, Weber	溶媒をリサイクルする廃プラの熱分解	溶媒の使用と熱分解生成物 溶液の一部リサイクル。流動 層型熱分解炉使用例。
No.7	US 2024/0191148	2021.4.14	公開日 2024.6.13	Patel, Buchanan, Maduskar, Raich, Bematz, Diaz	廃プラ分解のための塩素除去	廃プラ分解のための各段階で の塩素除去。
No.8	US 2024/0084199	2022.9.8	公開日 2024.3.14	Patel, Raich, Slack, Callander, Yucha, Bernatz, R.Kolb, A.Kolb	コーカーガスから再生化学品をつくるための コーカーでの、コーカー原料と廃プラのコブ ロセッシング	廃プラ由来を含むコーカーガス (エチレン10~30%、硫黄、 酸素を含有する) を重合して ポリマーとする。
No.9	US 2024/0084095	2022.9.8	公開日 2024.3.14	同上	コーカーナフサから再生化学品をつくるための コーカーでの、コーカー原料と廃プラのコブ ロセッシング	廃プラ由来を含む特定純度 のコーカーナフサから少なく ともポリマーをつくる。
No.10	US 2024/0093102	2022.9.8	公開日 2024.3.21	同上	コーカーガスオイルから再生化学品をつくる ためのコーカーでの、コーカー原料と廃プラ のコブロセッシング	廃プラ由来を含む特定純度 のコーカーガスオイルから少 なくともポリマーをつくる。
No.11	US 2024/0247193	2023.1.19	公開日 2024.7.25	Radford, Spicer, Maduskar, Walker, Miller, Slack	炭化水素フィードとプラスチック含有重 質フィードのコブロセッシングのための プロセスとシステム	炭化水素フィードとプラスチ ック含有重質フィードのコブ ロセッシングのためのプロセ スとシステム。
No.12	US 2024/0247194	2023.1.19	公開日 2024.7.25	Radford, Spicer, Maduskar, Walker, Miller, Slack	熱分解炉とスチームクラッキング炉の統 合系から沈着物を除去するためのプロ セスとシステム	熱分解炉とスチームクラッキ ング炉の統合系から沈着物を 除去するためのプロセスとシ ステム。
Exxon Mobilと Plastic Energy との共 願	US 2025/0115815	2022.1.20	公開日 2025.4.10	Johnson, Rougeau, Weber (ExxonMobil)、 McNamara, Lake, Hargreaves (Plastic Energy)	クラッカーフィード用の熱分解油の水洗 浄リサイクル	クラッカーフィード用の熱分 解油の各種水洗浄リサイクル。

注1：黄色地は溶媒使用の熱分解特許

注2：赤字は筆頭発明者、重要発明者はBryan Patel (緑色)、Michael Weber (青色)、Saurabh Maduskar (紫色)。

出所：米国特許検索結果に基づき旭リサーチセンター作成。

(1) No.5 特許(US 2023/0159834) : 流動層型熱分解炉

図4は廃プラ供給の押出機(130)、連結管(138)、押出ダイ(140)、流動層型熱分解炉(150)からなる熱分解装置である。

流動層型熱分解炉(150)の最も好ましい温度は400～500℃、最も好ましい滞留時間は1.0～5.0秒である。加熱と流動のために、流動ガス(砂などの熱媒体粒子を含む)を熱分解炉の底から供給する(151)。また酸化カルシウム(CaO)を砂と一緒に供給する。酸化カルシウムは塩素補足材としての役割もある。

熱分解炉上部から、熱分解ペーパー(155)が排出される。熱分解ペーパーには、砂(チャーが付着)が含まれる。図にはないが、熱分解炉中で冷却された砂(チャーが付着)は、熱分解炉の底から抜き出される。

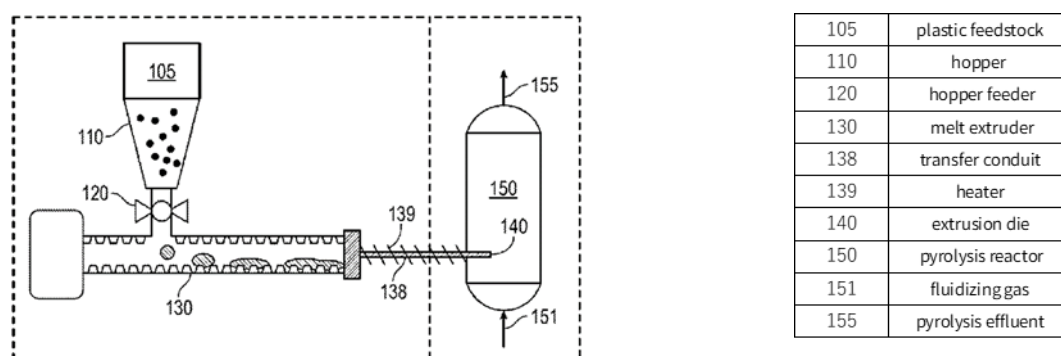


図4 ExxonMobil 特許記載の押出機と流動層型熱分解炉からなるプロセス

出所: US 2023/0159834のFig.1。機器名は明細書に記載されているものを転載。

図5は「熱分解—水蒸気分解」プロセスの全体フローである。図4にないもので、注目されるのは再生器である。再生器において、熱分解炉で冷却された熱媒体の砂(チャーが付着)を加熱するとともに焼成してチャーを除去した後、熱分解炉に供給する。流動化のためのガスには、熱分解で生成した低分子量炭化水素が使われる(252や256)。図にはないが、水蒸気も流動ガスとして併用される。

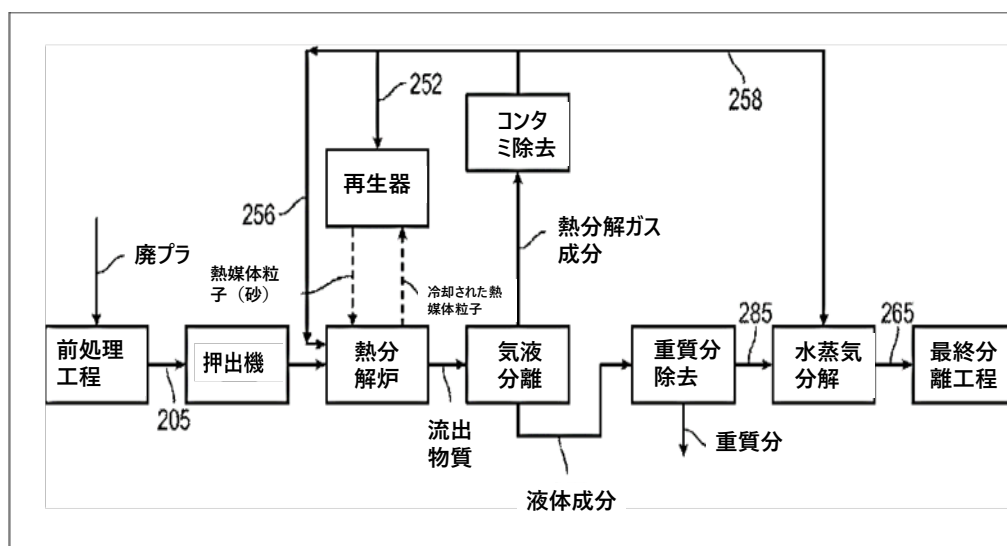


図 5 ExxonMobil 特許記載の「熱分解—水蒸気分解」プロセスのフロー

出所: US 2023/0159834のFig.2。機器名は明細書データに基づいて旭リサーチセンターが日本語に翻訳。

(2) No.6 特許 (US 2023/0287276) : 溶媒使用熱分解プロセス

図 6 に特許記載のプロセスフローを示す。以下はその説明である。

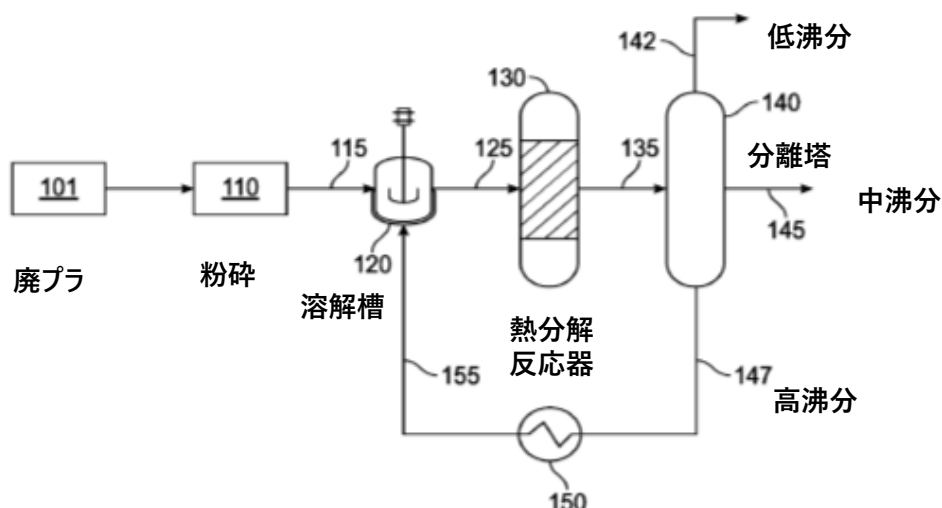


図 6 ExxonMobil 特許記載の熱分解プロセスフロー

出所: US 2023/0287276のFIG.1。機器名は明細書データに基づいて旭リサーチセンターが日本語に翻訳。

廃プラ（101）を粉砕した後に加熱した溶媒に溶解させ、得られた廃プラ溶液（125）を連続的に熱分解炉（図では熱分解反応器：130）に供給する。熱分解で生成した熱分解ベーパー（135）は分離塔（140）に送られ、低沸分（142）、中沸分（145、ナフサなど）、

高沸分 (147) に分けられる。熱分解生成物の中沸分 (145) は最終的に各種製品となる。

一方、高沸分 (147) は溶解槽 (120) に循環される。連続運転では、熱分解系から低中沸分として排出される量と同量の原料廃プラ (101) を供給してバランスをとる。分離塔 (140) のボトムカット温度を 370℃ に設定して、それより沸点の低い低中沸分は分離塔 (140) から排出する。熱分解ベーパー (135) を 1 として、低中沸分の量を X とすると、高沸分 (147) は $1 - X$ になる。X を 370℃ 基準の Per Pass Conversion (ワンパスコンバージョン) と定義する。高沸分 (147、循環分) は $1 - X$ で、Fresh Input は低中沸分として排出される量 (X) と同量なので、Recycle Ratio (循環比) は、 $\text{Recycle/Fresh Input} = (1 - X) / X$ となる。Per Pass Conversion (X) と Recycle Ratio ($(1 - X) / X$) の関係は、計算により図 7 の FIG.3 のようになる。

また、実施例で滞留時間を変えて LDPE の Per Pass Conversion を次のように測定している。パイロットスケールの等温ダウンフロー型熱分解炉で、2% の LDPE の A200 溶液を 120℃ に予備加熱して、550℃ で熱分解した。熱分解炉の滞留時間を変えて、LDPE の転化率を測定した結果を図 7 の FIG.4 に示す。

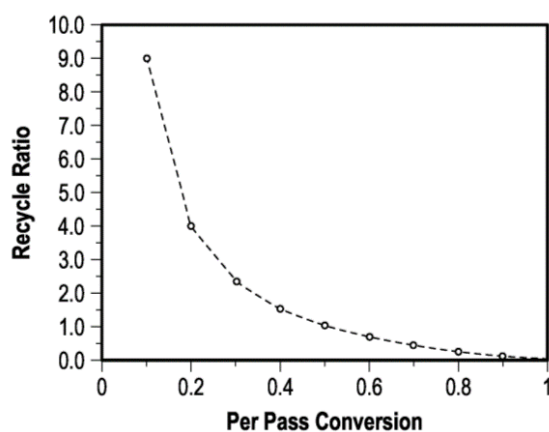


FIG. 3

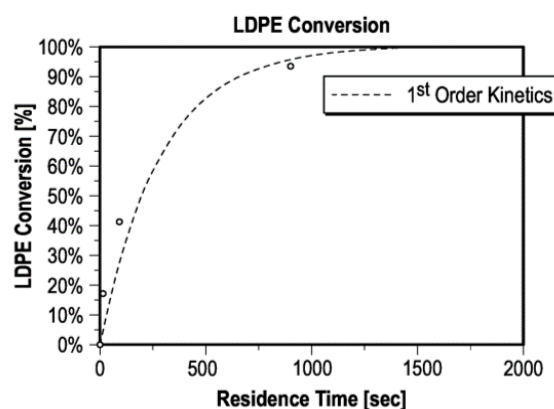


FIG. 4

図 7 ExxonMobil 特許記載の「ワンパスコンバージョンと循環比の関係」および「滞留時間と LDPE の転化率の関係」

出所: US 2023/0287276 の FIG.3 と FIG.4。

FIG.4 の点線は、一次反応を仮定した場合のデータフィッティング曲線である。A200 は ExxonMobil が製造している芳香族溶媒である¹³。

FIG.4 に示すように、熱分解温度 550℃、滞留時間 5～10 秒で熱分解した LDPE の Per Pass Conversion (X) は約 20%であった。したがって、Recycle Ratio $((1 - X) / X)$ (循環比) は 4 となる。熱分解物のうち、低中沸分が 0.2 に対して、高沸分は 0.8 となり、低中沸分の 4 倍を循環することになる。これにより、供給廃プラが 100%低中沸分に転化する形の連続運転が可能となる。

US 2023/0287276 の明細書クレームを抜粋する。

クレーム 1. プラスチックの熱分解法は、以下を含む。

- ・原料は直径 3 cm以下のプラスチックと **recycled effluent fraction** (注：図 6 の循環される高沸分(147)のこと(内部溶媒)と推定)からなるスラリーで、recycled effluent fractionはプラスチックの重量の1倍以上とする。スラリーを150℃以上に加熱する。
- ・スラリーは流動層型熱分解炉にフィードされる前に、滞留時間 30 秒以下で 300℃以上に加熱される。
- ・熱分解は 500～900℃で**流動層型熱分解炉**を使って行う。この際、伝熱用粒子(砂など)を使用する。流動層型熱分解炉から pyrolysis effluent (熱分解ベーパー) が得られる。熱分解条件は、Per Pass Conversion が 15～50%になるようにコントロールする(コンバージョンは、沸点 370℃以下のコンバージョン温度基準)。
- ・pyrolysis effluent から伝熱用粒子の一部を除去する。
- ・pyrolysis effluent を分離し、**recycled pyrolysis effluent** と少なくとも**一種類の追加 fraction** (注：外部溶媒の意味か) からなる **bottoms fraction** を得る。bottoms fraction は、コンバージョン基準温度以上の沸点を有する成分を含む。

クレーム 13. プラスチックの熱分解法は、以下を含む。

¹³ ExxonMobil Aromatic 200 (A-200): 芳香族溶媒(トータルアロマ 98%)、C11、IBP 220℃、FBP 290℃
<https://www.exxonmobilchemical.com/en/chemicals/webapi/dps/v1/datasheets/130000000200/1/en>
コメント:この芳香族溶媒は、廃プラ熱分解条件では分解しないと思われる。

- ・原料は直径 3 cm以下のプラスチックと recycled effluent fraction からなる溶液で、recycled effluent fraction はプラスチックの重量の 0.2 以上。
- ・熱分解は熱分解炉（注：熱分解炉の限定はない）を用い 500～900℃で行う。熱分解炉から pyrolysis effluent が得られる。熱分解条件は、Per Pass Conversion が 40%以下になるようにコントロールする。
- ・pyrolysis effluent を分離し、recycled pyrolysis effluent と少なくとも一種類の追加 fraction からなる bottoms fraction を得る。bottoms fraction は、コンバージョン基準温度 370℃以下の沸点を有する成分を含む。

2.4 コメント

No. 5 と No. 6 の特許に流動層型熱分解炉が記載されているので、実際に Baytown 工場で使用されているものと推定される。流動層型熱分解炉はかなり難しい技術と考えられるが、同社は類似技術である FCC 工場を持っているので、その設計や運転ノウハウを利用して工業化に成功したのであろう。

また、溶媒使用を公表した Baytown 工場のビデオと No. 6 特許は対応している。同社は 13 件の特許を出願しているが、溶媒使用の熱分解特許は No. 6 特許のわずか 1 件だけである。

No. 6 特許のフロー図(図6)にあるように、溶媒は分離塔ボトムからの recycled effluent fraction（高沸分（147））である。recycled effluent fraction は、熱分解ペーパーを分離塔で液化した高沸点成分（例えば、沸点 370℃以上）である。OMV のいう内部溶媒であり、両者が使用している内部溶媒の沸点領域は近い。

実施例で A200（沸点範囲 220～290℃の芳香族溶媒）を溶媒に使用しているが、これは実験的に使われたもので、工場には使われていないと考えられる。A200 は、芳香族溶媒なので熱分解されないのがメリットであるが、分離塔のボトムカット温度の 370℃より沸点が低く、熱分解油製品との分離が必要となる。

3. Honeywell UOP（米国・イリノイ州 Chicago）

3.1 概要

Honeywell UOP（Honeywell と略す）はグローバルなエンジニアリング会社である。同社の熱分解技術（UpCycle Process Technology と命名）は、Chicago 近郊にある同社の「Sustainable Technology Solutions（STS）グループ」が開発したものである。

同社はパイロットをベースに本プラント技術を開発したもので、本プラントは持っていない。また、同社はトルコの Biotrend をはじめ数社に技術ライセンスしているが、本プラントはまだ建設されていない。

3.2 公表資料によるプロセスの特徴

表 5 Honeywell の公表資料によるプロセスの特徴

企業名 （プロセス名）	プラント 所在地	年間処 理能力	ライセンス	熱分解条件			アップグレーディ ング・精製	反応成績
				触媒	・熱分解条件の特徴 ・連続/バッチ	熱分解炉 構造		
Honeywell UOP （UpCycle Process Technology）	米国 （Chicago）	パイロット	数社にラ イセンス	なし	・「moderate」な熱分 解条件。 ・連続プロセス	「vertical cylinder」型 熱分解炉	重質留分はFCC 処理に、市販の 吸着剤で不純 物除去。	廃プラがクラッカー原 料に転換されるのは 80～90%である。

出所：公表資料より旭リサーチセンター作成。

3.3 特許検索結果と注目される特許プロセス

No. 1 特許と No. 3 特許は、廃プラ中の PVC（ポリ塩化ビニル）をメルトリアクターで分解した後、熱分解炉で熱分解する。札幌プラスチックの方式に類似している（中巻、45 頁参照）。No. 6 特許は熱分解炉と分離プロセスに関するものである。

表 6 Honeywell の米国特許(USP) 検索結果

会社名 Honeywell 出願人 UOP LLC 特許件数 7件						
番号	特許番号	最も早い出願日	公開日、登録日	発明者	特許の名称 (略)	ポイント
No.1	US 2022/0010213	2020.7.10	公開日 2022.1.13	<u>Sun</u> , Tyska, Montalbano	塩ビ含有混合廃プラの熱分解法	熱分解炉の前のメルト反応器で塩ビを分解、熱分解後生成物中の塩素は吸着剤で取る。
	US 2024/0327719		公開日 2024.10.3			
	US 12,024,680		登録日 2024.7.2			
No.2	US 2022/0010217	2020.7.11	公開日 2022.1.13	Barger, Shi, <u>Sun</u> , Montalbano, Allegro, Davydov	2段熱分解で廃プラからモノマーを得る方法	1段目は低温で、2段目は高温で分解し、エチレン、プロピレンなどのモノマーを得る。
No.3	US 2022/0204861	2020.12.31	公開日 2022.6.30	<u>Sun</u> , Chen	塩ビ含有混合廃プラの熱分解生成物を、J3相で処理できる熱分解炉で熱分解する方法	メルト反応器、熱分解炉、吸着剤添加で塩素を除去。熱分解炉が二重の円筒構造になっている。
	US 11,987,756		登録日 2024.5.21			
No.4	US 2023/0039224	2021.7.15	公開日 2023.2.9	Bozzano, Anderle, Fichtl, <u>Sun</u>	塩素と金属不純物を含まない熱分解オイル	hydrotreaterを使わずに、前処理の段階で処理する。
No.5	US 2023/0183580	2021.12.13	公開日 2023.6.15	Frey, <u>Sun</u>	廃PPから熱分解でアロマを製造する方法	C9リッチな成分をリフォーミングする。
	US 11,680,209		登録日 2023.6.20			
No.6	US 2023/0193139	2021.12.20	公開日 2023.6.22	Kapaun, Montalbano, Tyska, <u>Sun</u> , Pickens	ポリマーオイルの回収方法	熱分解炉を出たeffluent (蒸気ベーパー) はコンタクト凝縮カラムで分離して、ガスは製品に、液体は熱分解炉に戻す。
	US 11,746,298		登録日 2023.9.5			
No.7	US 2024/0343980	2023.4.17	公開日 2025.4.8	Kapaun, Ladendorf	ポリマーオイルの回収方法と装置	熱分解炉の底部から抜き出された重質ストリームは、重質分用熱分解炉 (ロータリーキルン) で分解し、熱分解油を回収し、残渣はチャーラインに送られる。

注：赤字は筆頭発明者、Ping Sunがほとんどすべての特許の発明者になっている（下線）。

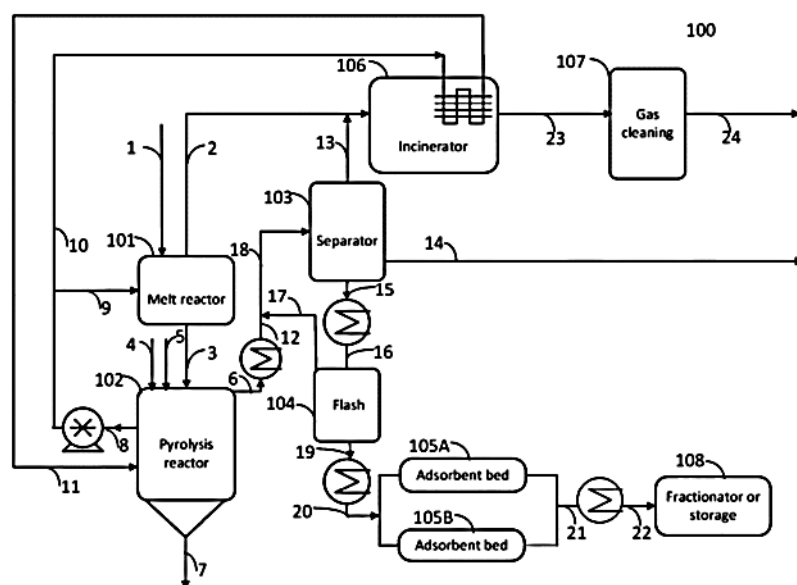
出所：米国特許検索結果に基づき旭リサーチセンター作成。

(1) No.1 特許(US 2022/0010213) :PVC メルトリアクター分解と熱分解のフロー

メルトリアクターで廃プラ中のPVCを分解し、その後熱分解炉で残りの廃プラを熱分解する(図8)。熱分解炉に塩素吸着剤(CaCO₃、CaO、Ca(OH)₂など)を添加する。フラッシュタンク底部から抜き出した熱分解油は吸着ベッドで不純物(塩素と反応した塩素吸着剤など)を除去する。熱分解炉からポリマー熱分解液を取り出し、incinerator(焼却炉)を使って外部加熱した後、熱分解炉に戻すことにより、熱分解炉の加熱負担を減らしている。

明細書によれば、図8の主要機器の運転条件は、a. メルトリアクター：温度280～320℃、圧力：0.138～0.345Mpa、空間速度：0.2～0.5hr⁻¹、スweepガス：170～340Nm³/m³、b. 熱

分解炉：温度 380～450℃、圧力：0.138～0.345Mpa、空間速度：0.2～0.5hr⁻¹、スweep
 ガス：170～340Nm³/m³、c. 吸着ベッド：温度 120～200℃、圧力：0.138～1.38Mpa、空間
 速度：0.1～2.0hr⁻¹。



1：廃プラ、2：塩化水素、3：メルトポリマー、4：スweepガス、5：吸着剤、6：熱分解ベーパー、
 7：固形物（チャーなど）の多い成分、8：外部加熱のための循環ライン（出）、
 11：外部加熱のための循環ライン（戻り）、14：水分、20：粗熱分解油、21：精製熱分解油、
 24：燃焼排ガス、105：吸着ベッド、108：製品貯槽。

図 8 Honeywell(UOP)特許記載の塩ビ含有廃プラの熱分解プロセスフロー

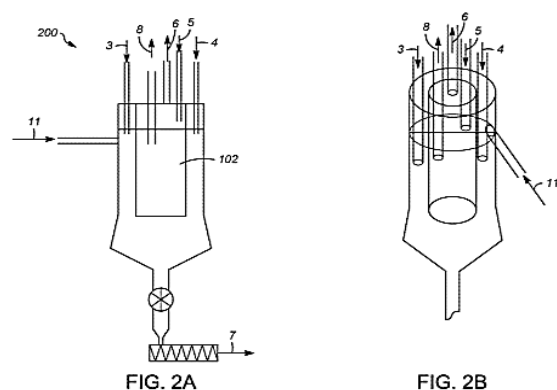
出所:US 2022/0010213のFig.1。図中の重要な番号の名称は、明細書データに基づき
 旭リサーチセンターが日本語に翻訳。

(2) No.3 特許(US 2022/0204861)：二重円筒型熱分解炉

No. 3 特許の全体フロー図は No. 1 特許とほぼ同じであるので省略する。

二重円筒型熱分解炉（図 9 の FIG.2A と FIG.2B）を採用していることが特徴である。

熱分解液体の熱分解炉への循環ラインの戻り（図 9 の番号 11）は、外筒の内面の壁に
 タンジェンシャル（接線方向）に供給される点に特徴がある。



3：メルトポリマー、4：スweepガス、5：吸着剤、6：熱分解ペーパー、7：固形物（チャーなど）の多い成分、
8：外部加熱のための循環ライン（出）、11：外部加熱のための循環ライン（戻り）

図 9 Honeywell(UOP)特許記載の二重円筒型熱分解炉の構造

出所:US 2022/0204861のFIG.2A、FIG.2B。図中の重要な番号の名称は、
明細書データに基づき旭リサーチセンターが日本語に翻訳。

(3) No.6 特許(US 11,746,298)：熱分解ユニットとコンタクト凝縮カラム

図 10 は熱分解ユニットとコンタクト凝縮カラムからなるプロセスを示す。

熱分解炉からポリマー熱分解液が抜き出され、加熱後熱分解炉に戻す。

コンタクト凝縮カラムは複数のコンタクトステージがあり、それぞれのコンタクトステージはスプレー分散器がついている。スプレー分散器は壁面からカラムの中心部に伸びている。コンタクト凝縮カラムの凝縮液はすべて加熱後熱分解炉に供給され、再度熱分解させる。

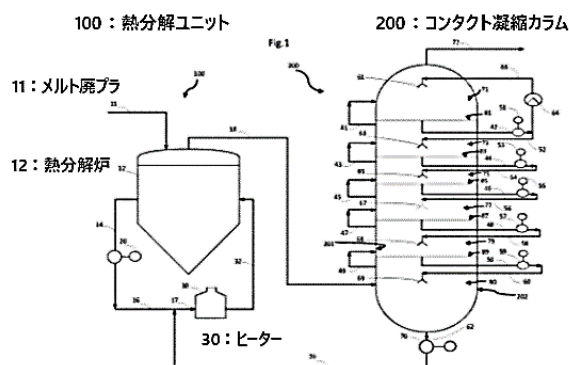


図 10 Honeywell(UOP)特許記載の熱分解炉(左)とコンタクト凝縮カラム(右)

出所:US 11,746,298のFig.1。番号の機器名は明細書データに基づいて旭リサーチセンターが日本語に翻訳。

図 11 左の図 (Fig.2) はベーパー洗浄部付き熱分解炉とコンタクト凝縮カラムの組み合わせである。右の図 (Fig.3) は、ベーパー洗浄部付き熱分解炉の詳細である。

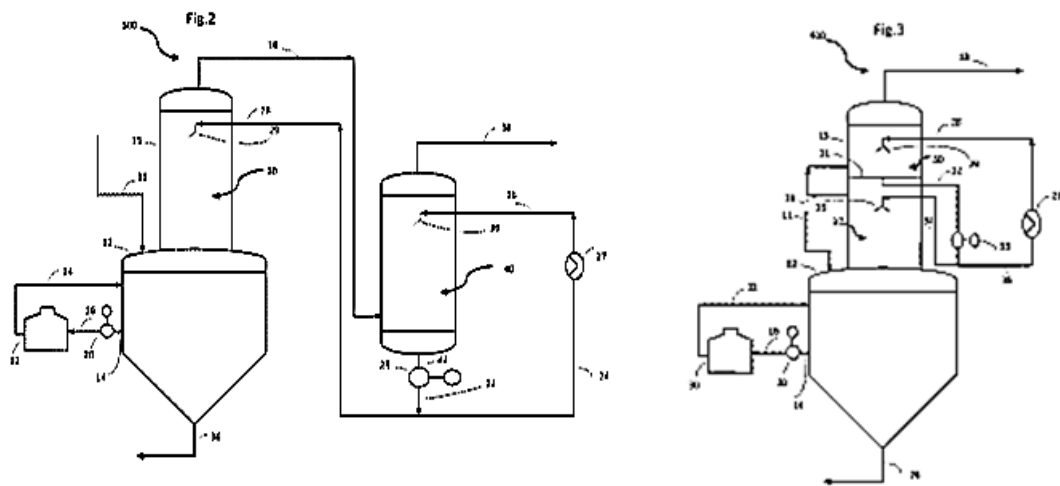


図 11 Honeywell (UOP) 特許記載のベーパー洗浄部付き熱分解炉とコンタクト凝縮カラム

出所: US 11,746,298のFig.2(左)とFig.3(右)。

(4) No.7 特許 (US 2024/0343980) : 重質ストリームから熱分解油を回収する方法

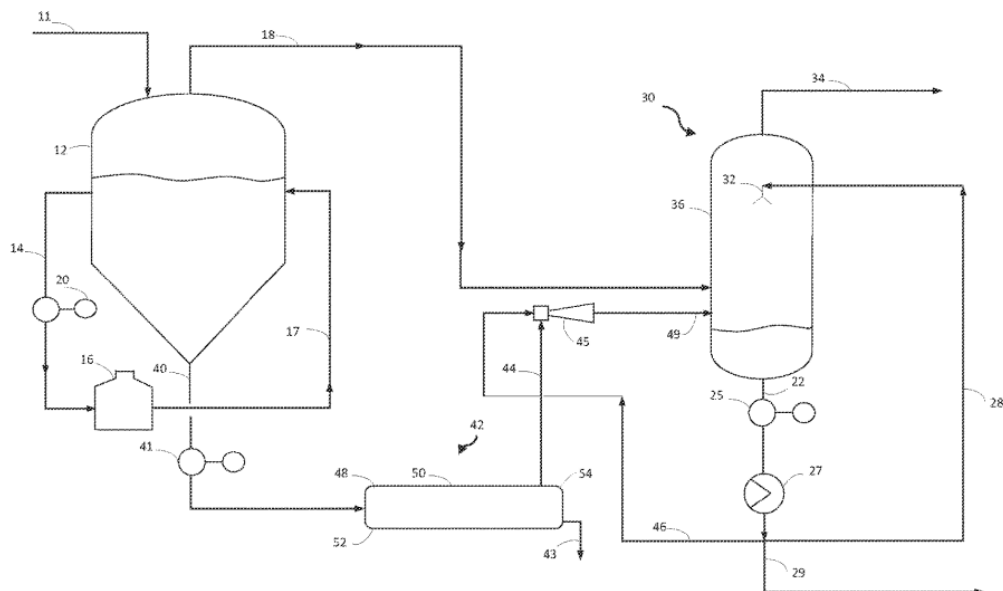


図 12 Honeywell (UOP) 特許記載の重質ストリームから熱分解油を回収する方法と装置

出所: US 2024/0343980のFig. 1。

図 12 の熱分解炉 (12) の底部から抜き出された重質ストリーム (40) は、重質分熱分解炉 (50) (ロータリーキルン (48)) で分解し、熱分解油 (44) を回収し、残渣はチャーライン (43) に送られる。熱分解油は液体ジェットエジェクター (45) を通して、凝縮器 (36) に供給される。一方、熱分解炉 (12) からポリマー分解液を抽出 (14) して、燃焼加熱器 (16) で加熱後、熱分解炉に戻す。熱分解炉 (12) からの熱分解ベーパー (18) は凝縮器 (36) に供給される。凝縮器 (36) のボトムから取り出された熱分解油は、ライン (28) を通って凝縮器 (36) 内部に噴霧されるもの、製品として抜き出されるもの (29)、エジェクターに送られるもの (46) に 3 分岐する。

3.4 コメント

- (1) PVC をメルトリアクターで事前分解するプロセスに関する特許が 2 件 (No. 1 特許と No. 3 特許) 出願されている。この工程が、実際の工場設計に入っているかどうかはわからない。
- (2) No. 3 特許に二重円筒型熱分解炉が開示されていて、公表資料にある「vertical cylinder」型熱分解炉に対応している。攪拌機がなく、スweepガスを供給して混合しているようである。ポリマー熱分解液を循環して戻りのラインで廃プラのメルトポリマーと混合してから熱分解炉に供給している。
- (3) No. 6 特許では、熱分解炉と凝縮器の 2 つの組み合わせ (Fig.1 と Fig.2) が開示されている。Fig.2 のベーパー洗浄部付き熱分解炉とコンタクト凝縮カラムの組み合わせがより確実な方法なので、採用されている可能性が高い。なお、Fig.1 と Fig.2 のいずれにおいても凝縮した高沸分は熱分解に循環され、再度熱分解される。

4. Alterra Energy(米国・オハイオ州 Akron)

4.1 概要

オハイオ州 Akron に 60 トン/日 (2 万トン/年) の連続プロセスの工場が 2020 年に試運転を開始した¹⁴。同社のビジネスモデルは熱分解技術のライセンスである。既に Neste などにライセンスしている。

4.2 公表資料によるプロセスの特徴

表 7 Alterra Energy の公表資料によるプロセスの特徴

企業名	プラント所在地	年間処理能力	主たる提携先	原料廃プラ	熱分解条件		
					熱分解温度・圧力・連続/バッチ	熱分解炉形状	特徴
Alterra Energy	米国 (Akron)	2万トン	Neste (ライセンス)	PE、PP、PSが望ましい。PVC、PET、PAは除去。	400～550℃・常圧、連続	回転円筒型傾斜熱分解炉 (ロータリーキルン) (3×20m)	塩素除去剤使用

出所: 公表資料より旭リサーチセンター作成。

ACS の C&EN 記者の工場訪問記事 (2022 年 11 月訪問)¹⁵によれば、Alterra Energy は直径 3m、長さ 20m のロータリーキルンを使用している。直径 3m、長さ 20m がロータリーキルン型熱分解炉のサイズとすれば、体積は 140m³ と計算される。直径 3m、長さ 20m がロータリーキルンの外形とすれば、反応炉部分の体積は 140m³ より小さくなる。仮に反応炉部分が全体積の 70% とすると、約 100m³ となる。

¹⁴ <https://alterraenergy.com/how-we-do-it/#plant>

<https://alterraenergy.com/news/plastics-industry-sees-sustainable-start-in-an-ohio-plant/>

¹⁵ <https://cen.acs.org/environment/recycling/Plastics-industry-sees-sustainable-start/101/il>

4.3 特許検索結果と注目される特許プロセス

表 8 Alterra Energy の米国特許 (USP) 検索結果

会社名 Alterra Energy (旧Vadxx Energy) 出願人 Vadxx Energy、Alterra Energy 特許件数 5件							
番号	出願人	特許番号	最も早い出願日	公開日、登録日	発明者	特許の名称 (略)	ポイント
No.1	Vadxx Energy	US 2013/0174363	2012.1.6	公開日 2013.7.11	Ullom	パイプとパイプジョイントのクリーニング用防汚装置	磁石を含む可動式外部コンポーネントと可動式内部ワイピングコンポーネント、上下部パイプフランジからなる装置。装置内の複数ナイフにより固着不純物を除去する。
		US 9,222,612	2012.1.6	登録日 2015.12.29			
		US 2016/0074914	2012.1.6	公開日 2016.3.17			
No. 2	同上	US 2016/0017232 (WO 2013・119941)	2012.2.9	公開日 2016.1.21	Ullom	廃プラのゾーン熱分解装置	複数ゾーンを有する円筒型スクリュウ型押出・熱分解装置。
		US 10,731,081		登録日 2020.8.4			
No.3	同上	US 2016/0024390 (WO 2013/23377)	2012.2.15	公開日 2016.1.28	Ullom	熱分解装置 (押出機と熱分解炉)	押出機は少なくとも3ゾーン、熱分解炉 (サーマルキルン) は少なくとも2ゾーンを有する熱分解装置。
		US 10,421,911		登録日 2019.9.24			
No.4	Alterra Energy	US 2022/0372376	2021.3.5	公開日 2022.11.24	DeBenedictis、Prybyla、Rosace、Sass、VanSuch	有機ポリマーを処理するための液体-固体分離装置	複数ゾーンのロータリーキルン型熱分解炉や熱分解物中の液体成分と固体成分の分離装置を含む全プロセスを規定した特許。
		US 12,146,107		登録日 2024.11.19			
No.5	同上	US 2023/0078319	2021.3.5	公開日 2023.3.16	* Sass、DeBenedictis、Prybyla、Rosace、* * Rosace、DeBenedictis、Prybyla、Sass、VanSuch	有機ポリマーを処理するための分離システムと方法	No.4の関連特許。複数ゾーンのロータリーキルン型熱分解炉や熱分解物中の液体成分と固体成分の分離装置を含む全プロセスを規定した特許。
		US 2023/0085993		公開日 2023.3.23			
		US 2023/0279298		公開日 2023.9.7			
		US 12,031,092 (*)		登録日 2024.7.9			
		US 12,269,994 (**)		登録日 2025.4.8			

注:赤字は筆頭発明者

出所:米国特許検索結果に基づき旭リサーチセンター作成。

No. 1 特許～No. 3 特許の 3 件の発明者の Ullom は Alterra Energy の創設者である。

(1)No.1 特許 (US 9,222,612): 磁石を使ったパイプとパイプジョイント(フランジ)の防汚装置

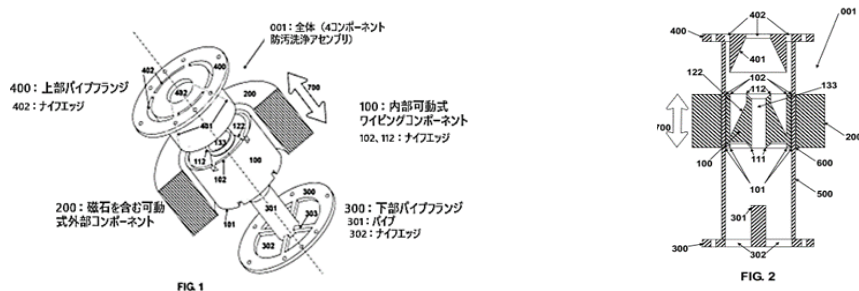
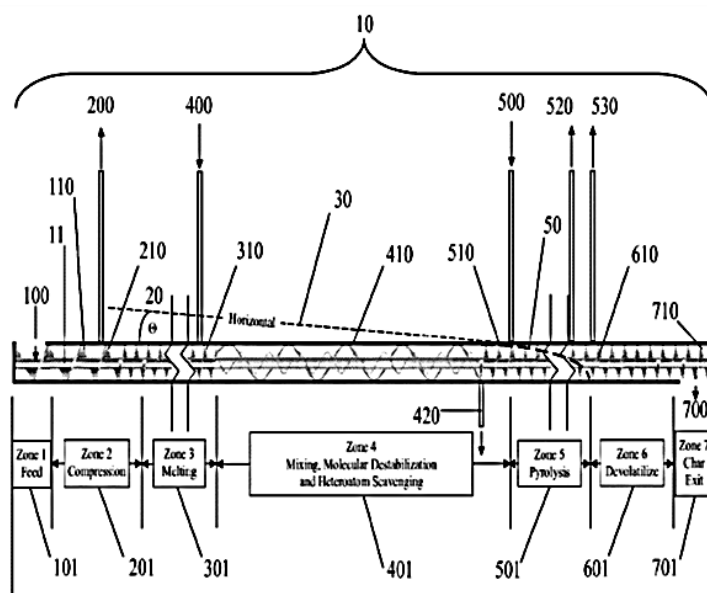


図 13 Vadxx Energy (現 Alterra Energy) 特許記載の磁石を使ったパイプとフランジの防汚装置

出所: US 9,222,612 の FIG.1 と FIG.2。図中の部品名は明細書に基づいて旭リサーチセンターが日本語に翻訳。

ナイフエッジを有する内部可動式ワイピングコンポーネントを外部磁石により回転し、パイプやパイプフランジの内部壁面に堆積した汚染物質（結晶化物など）を除去する。パイプやフランジを外さずに、汚染物質を除去できる。用途の一つが廃プラの熱分解装置のリフラックスコンデンサーのパイプやフランジの汚染防止である。リフラックスコンデンサーには、チャーや、PET の熱分解物のテレフタル酸やイソフタル酸が結晶化して付着する。

(2) No.2 特許(US 10,731,081):円筒スクリー型押出・熱分解一体装置で、押出—熱分解



- 101/ゾーン 1 (供給)
 201/ゾーン 2 (圧縮) : 温度室温～104℃、滞留時間 15～45 分以下、圧力 0.1atm 以下
 301/ゾーン 3 (熔融) : 温度 104～300℃、滞留時間 15～45 分
 401/ゾーン 4 (混合など) : 温度 300～365℃、滞留時間 30～120 分、リボンミキサー
 501/ゾーン 5 (熱分解) : 温度 365～488℃、滞留時間 30～90 分、圧力 5psig 以下
 601/ゾーン 6 (蒸発) : 温度 454～982℃、滞留時間 15～60 分、圧力 5psig 以下
 701/ゾーン 7 (チャー出口)

図 14 Vadxx Energy(現 Alterra Energy)特許記載の円筒スクリー型押出・熱分解一体装置

出所:US 10,731,081のFIG.1。ゾーン名とそれぞれの熱分解条件は、明細書に基づき
 旭リサーチセンターが日本語に翻訳。

(3) No.3 特許 (US 10,421,911)： 押出機とサーマルキルン型熱分解炉直結装置

押出機とサーマルキルン（ロータリーキルン）を直結させた熱分解炉装置に関するものである。サーマルキルン内部には攪拌と輸送のための羽根がついている。

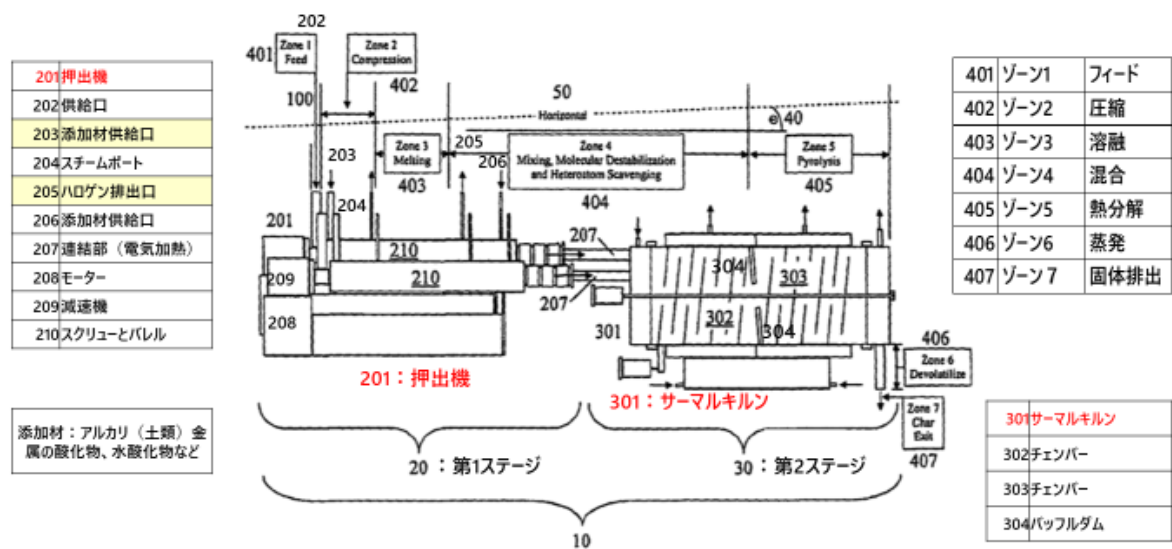


図 15 Vadxx Energy (現 Alterra Energy) 特許記載の押出機とサーマルキルン型熱分解炉装置

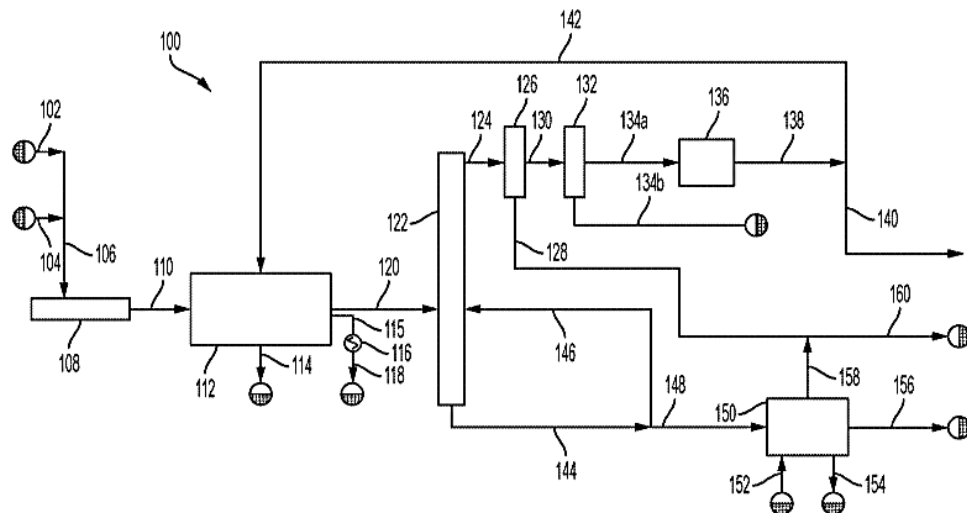
出所: US 10,421,911 の FIG.1。図の機器名などは明細書データに基づいて
旭リサーチセンターが日本語に翻訳。

(4) No.4 特許 (US 2022/0372376)

図 16 に全体フロー図を示す。この中のロータリーキルン型熱分解炉（112）の例として、3 または 4 ゾーンのものが記載されている。3 ゾーンの例として、第 1 ゾーンは温度 400～425℃、第 2 ゾーンは 450～475℃、第 3 ゾーンは 500～525℃である。また 4 ゾーンの例で、全滞留時間は 30～90 分と記載されている。

ゾーンの仕切り構造に関する図面が記載されている（図 17）。

ロータリーキルン型熱分解炉は水平から若干傾斜をつけたものが示されている。



図中の番号の名称

102：廃プラ、104：添加剤（オプションで CaO 、 CaCO_3 、 Ca(OH)_2 、 NaOH などを添加）、108：押出機、
 112：ロータリーキルン型熱分解炉、114：ガス、115：チャー、122：第1コンデンサー、126：第2コンデンサー、
 150: liquid-solid separator train（液体－固体分離装置）、152：情報インプット、154：情報のアウト
 プット、156：チャーなど、158：熱分解油、160：熱分解油製品、140：フレア行き合成ガス（syngas）、
 142：燃焼炉行き合成ガス（syngas）

図 16 Alterra Energy 特許記載の熱分解プロセスフロー図

出所：US 2022/0372376のFIG.1。図中の番号の名称は、明細書データに基づいて
 旭リサーチセンターが日本語に翻訳。

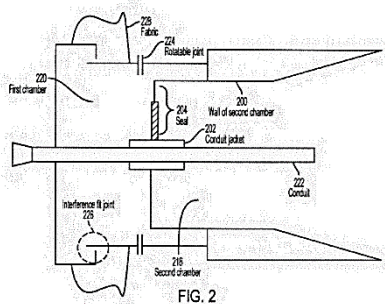


FIG. 2

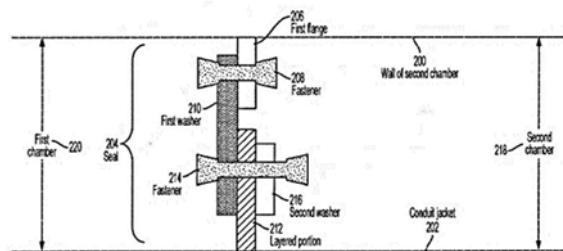


FIG. 3

図 17 Alterra Energy 特許記載のキルン熱分解炉の仕切りの構造

出所：US 2022/0372376のFIG.2とFIG.3。

(5) No.5 特許 (US 2023/0078319)

No. 5 特許の内容は No. 4 特許とほぼ同じなので、説明は省略する。

4.4 コメント

公表資料も特許もロータリーキルン型熱分解炉である。

仕切りをつけて、段階的に熱分解温度を上げる熱分解法を開示している No. 4 特許と No. 5 特許が重要で、仕切りの構造に Alterra Energy の固有技術があると考えられる。工場に採用されている可能性があるが、同社の次世代技術かもしれない。

仕切りをつけて、段階的に熱分解温度を上げる熱分解法がまだ工業化されていないとすると、No. 3 の特許技術が工業化されている可能性がある。

No. 1 特許は、パイプやフランジの壁面につく汚染物質を、装置を開放せずに外部磁石の力で除去するというもので、連続運転する上で重要な特許と考えられる。熱分解炉の上にリフレックスコンデンサーをつけて反応蒸留を行うときに有効であろう。PET の熱分解物のテレフタル酸やイソフタル酸結晶がリフレックスコンデンサー周辺の配管に析出してトラブルとなっている。

No. 2 特許は、実用化されていないと考えられる。

5. Nexus Circular(米国・ジョージア州 Atlanta)

5.1 概要

旧社名は Nexus Fuels で、Shell (テキサス州) と提携して熱分解油プラントをスケールアップしてきた会社である。

5.2 公表資料によるプロセスの特徴

表 9 Nexus Circular の公表資料によるプロセスの特徴

企業名	プラント所在地	年間処理能力	主たる提携石油化学企業	原料廃プラ	熱分解条件			反応成績
					触媒	熱分解圧力	精製	
Nexus Circular	米国 (Atlanta)	1.7万トン	Braskem、Shell、CPCChem	PE、PP、PS。PVCとPAは避ける。	なし	常圧	後処理が不要	収率が標準的な熱分解法工場より20%以上高い。
Nexus Circular	米国 (Atlanta)	1.7	Braskem、Shell、CPCChem、	PE、PP、PS PVCとPAは避ける。	なし	常圧プロセス	後処理が不要	収率が標準的な熱分解法工場より20%以上高い。

出所: 公表資料より旭リサーチセンター作成。

5.3 特許検索結果と注目される特許プロセス

表 10 Nexus Circular の米国特許 (USP) 検索結果

会社名 Nexus Circular		出願人 Nexus Circular		特許件数 1件			
番号	特許番号	最も早い出願日	登録日	出願人	発明者	特許の名称 (略)	ポイント
No.1	US 11,884,884	2023.3.31	登録日 2024.1.30	Nexus Circular	Gold、Cudney	廃プラ原料からの熱分解油の製造と使用	廃プラ原料の粗熱分解油を分離精製して製造された熱分解油。特に固有の特性を持つワックスの製造と物質の特許。
	US 11,891,518		登録日 2024.2.6				
	US 11,952,545		登録日 2024.4.9				

注: 赤字は筆頭発明者、Jeffrey Gold、Connor Cudneyでも検索。

出所: 米国特許検索結果に基づき旭リサーチセンター作成。

(1) No.1 特許 (US 11,952,545)

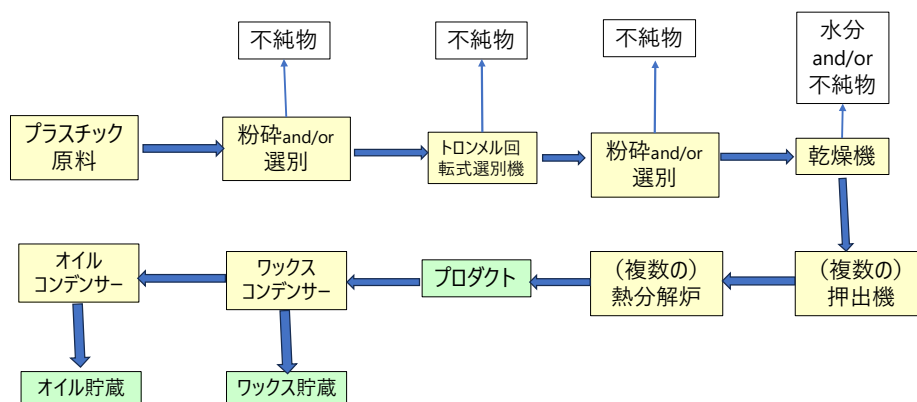


図 18 Nexus Circular 特許記載の熱分解プロセスフロー

出所: US 11,952,545のFig.5を基にしたもので、□内の用語は旭リサーチセンターが翻訳。

5.4 コメント

プロセスを推定できる特許はなかった。

6. New Hope Energy/Lummus(米国・テキサス州 Tyler)

6.1 概要

New Hope Energy は、Johnny Combs、Karen Combs 夫妻が、2013 年に設立した熱分解技術のスタートアップで、2018 年にテキサス州 Tyler にテスト工場をつくった。2020 年 10 月 14 日に New Hope Energy は Lummus と提携契約を締結した¹⁶。2021 年 5 月に New Hope Energy 元 CEO の Johnny Combs が死去した。

New Hope Energy/Lummus のテキサス州 Tyler 工場で、2024 年夏に火災が発生して、工場停止と伝えられる¹⁷。同社の正式な発表は見当たらず、同社のウェブサイト（ホームページ）は削除された。2025 年 10 月にウェブサイトは再開したが、火災には触れていない。

6.2 公表資料によるプロセスの特徴

原料の前処理方法や反応器デザインにプロセス固有技術がある。熱分解で、チャーではなくアスファルトが生成する。また原料は PE、PP、PS が望ましく、PVC と PA は最小にするかまたは避ける。

表 11 New Hope Energy/Lummus の公表資料によるプロセスの特徴

企業名	プラント所在地	年間処理能力	主たる提携石油化学企業	原料廃プラ	熱分解条件			反応成績
					特徴	熱分解炉の設計	精製	
New Hope Energy/Lummus	米国 (Tyler)	5万トン (火災停止中か)	Total Energies	PE、PP、PS。	固有の廃プラ処理技術	反応器デザインに固有技術	水素化技術	精製処理される炭化水素 70%、アスファルトライク材料 5%、ガス成分 25% である。

出所：公表資料より旭リサーチセンター作成。

¹⁶ <https://www.prnewswire.com/news-releases/lummus-announces-agreement-with-new-hope-technologies-to-license-waste-plastics-conversion-technology-301152408.html>

¹⁷ <https://news.oilandgaswatch.org/template/brief/despite-big-growth-plans-chemical-plastics-recycling-plant-in-east-texas-unexpectedly-stops-operating>

6.3 特許検索結果と注目される特許プロセス

表 12 New Hope Energy/Lummus の米国特許(USP) 検索結果

会社名 New Hope Energy /Lummus 特許件数 5件						
出願人：No.1はJohnny Combs（注1）、No.2はLummus Technology LLCとKaren Combs（注2）、No.3~5はLummus Technology LLC						
番号	特許番号	最も早い出願日	公開日、登録日	(住所) 発明者	発明の名称 (略)	ポイント
No.1.	US 2016/0046880	2014.8.14	公開日 2016.2.18	(Tyler) Johnny Combs（注1）	廃プラを燃料にするシステム	1. プレミキサータンク：廃プラと流動パラフィン混合 2. 熱分解炉：上部で熱分解ペーパー発生、下部で溶融塩存在下に熱分解ペーパー発生 3. 溶融塩・触媒使用の分解炉：上記熱分解ペーパーをさらにクラッキングする。
	US 9,714,391		登録日 2017.7.25			
	US 2017/0283714		公開日 2017.10.5			
No.2	US 2022/0228070	2021.1.5	公開日 2022.7.21	(Houston) Chakraborty, Fernald, Guymon, Herbaneck, Jibb, (Tyler) Johnny Combs, (Kilgore) Lindesey	廃プラの石油化学原料への転化	廃プラをメルトタンク（～300℃）で溶解した後、熱分解炉で熱分解する方法。メルトタンク出口で塩素スクベンジャーとしてライム（CaO）などを添加する。
	US 11,795,401		登録日 2023.10.24			
	US 2024/0010921		公開日 2024.1.11			
No.3	US 2023/0227729	2022.1.14	公開日 2023.7.20	(Houston) Guymon, Fernald, Herbaneck, Jibb, Chakraborty, Alan, (Tyler) Johnny Combs, (Kilgore) Lindesey, Mays	熱分解炉	熱分解炉の構造：上部より廃プラメルトを供給して炉壁面に分散する部分、炉上部でフィルム状にして熱分解する部分、その下に攪拌機付きタンク内で熱分解する部分からなる。
	US 12,297,387		登録日 2025.5.13			
No.4	US 2023/0227731	2022.1.14	公開日 2023.7.20	(Houston) Chakraborty, Chen, Chu, Som, Guymon, Fernald, Jibb, Herbaneck	熱分解加熱/反応レシピー	段階的昇温によるバッチ熱分解反応。
No.5	US 2023/0332051	2022.4.13	公開日 2023.10.19	(Houston) Gillis, Chakraborty, Som, Chen, Cabrales	廃プラの熱分解と重質油の熱クラッキングの統合	廃プラを熱分解してできた重質留分を既存の重質油の熱クラッキング装置にかけて分解する。
	US2025/0109338		公開日 2025.4.3			
	US12,209,221		登録 2025.1.28			

注1：Johnny Combs、Karen Combsは、New Hope Energyの創始者夫妻、注2：赤字は筆頭発明者。

出所：米国特許検索結果に基づき旭リサーチセンター作成。

No. 1～3 特許には、New Hope Energy 元 CEO の Johnny Combs の名前があるが、No. 3 の出願日には既に死去している。

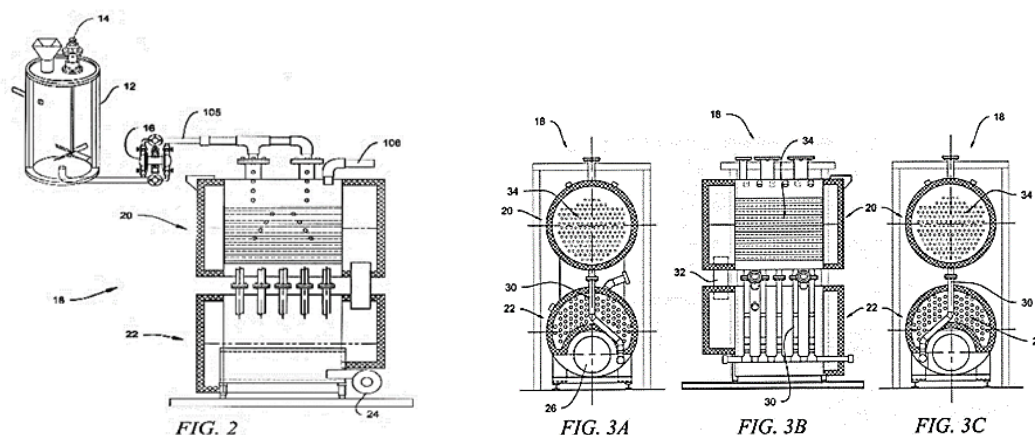
2020 年 10 月 14 日に New Hope Energy は Lummus と提携契約を締結した。その後、Lummus の技術者が New Hope Energy の技術者と一緒に、2021 年 1 月には No. 2 特許を、

2022年1月にはNo. 3特許(熱分解炉の構造特許)を出願している。New Hope Energy/Lummusは公表資料で、同社の固有技術として「反応器(熱分解炉)デザイン」を挙げているので、No. 3特許がそれに当たるものと考えられる。No. 3特許で開示されている熱分解炉が、既に建設されていた実証工場の熱分解炉なのかどうかはわからない。

(1) No.1 特許(US 9,714,391)

New Hope Energy 創始者 Johnny Combs の発明で、同社の初期の工場プロセスであろう。

図 19 に示すように、熱分解炉上部で分解されたガスは、下部で触媒(ゼオライトやシリカアルミナ)と溶融塩(Dynalene など)の混合物と接し、さらに分解される。従来技術では8~12時間かかるところが20~30分で済む。



12：プレミキサー、18：熱分解炉、20：プレメルトチャンバー、22：下部熱分解炉、24：バーナー、28：バーナーチューブ、30：熱分解チューブ、34：プレメルトチューブ

図 19 New Hope Energy 特許記載の廃プラと流動パラフィンのプレミキサーと熱分解炉
(上部(プレメルト分解)と下部(触媒・溶融塩熱分解))

出所: US 9,714,391のFIG. 2とFIG. 3。番号の名称は、明細書データに基づいて
旭リサーチセンターが日本語に翻訳。

(2) No.3 特許(US 2023/0227729): 掻き取り用攪拌機付き垂直 2 段熱分解炉

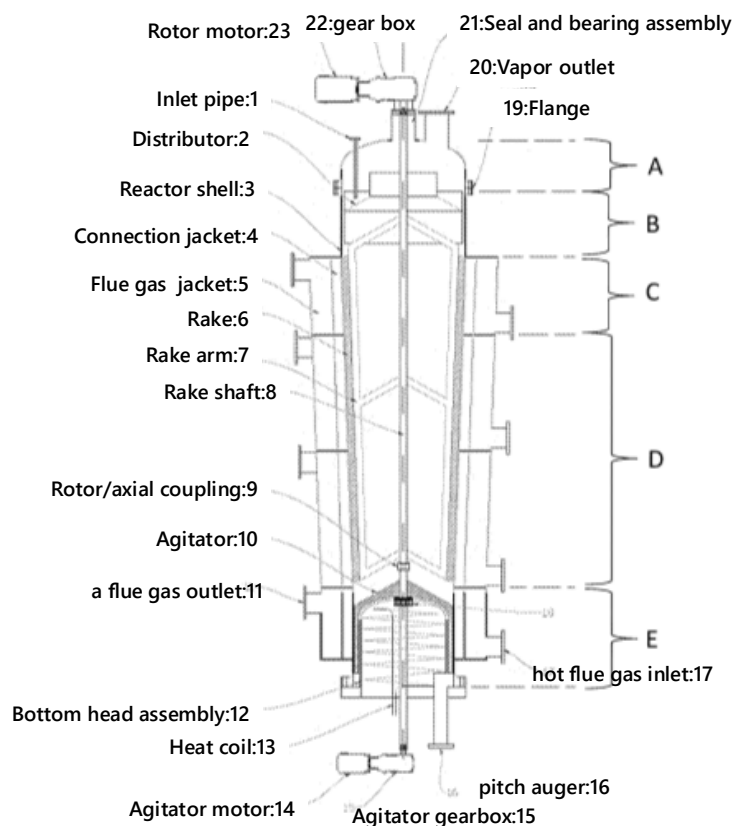


図 20 Lummus 特許記載の熱分解炉

出所: US 2023/0227729のFig.1。

図 20 の掻き取り用攪拌機付き垂直 2 段熱分解炉の A は Feed Inlet (供給口)、B は Distributor (分配機)、C と D は Ranked Film Reactor (RFR: 高度フィルム熱分解炉) セクション、E は Stirred Tank Reactor (STR: 攪拌槽型分解炉) セクションからなる。

Feed Inlet から供給されたメルトポリマーを Distributor で Reactor 壁面に均一に落下させる。RFR では落下メルトポリマーを上部攪拌機でフィルム状にして熱分解する。STR では、落下してたまった分解中のポリマーを下部にある上向きの攪拌機 (10) で攪拌しながら、熱分解する。RFR の熱分解温度は 420～490℃、滞留時間は 2～10 分、STR の熱分解温度は 440～490℃、滞留時間は 20～60 分である。

(3) No.4 特許(US 2023/0227731): バッチ熱分解法

段階的昇温によるバッチ熱分解法が示されている (図 21)。

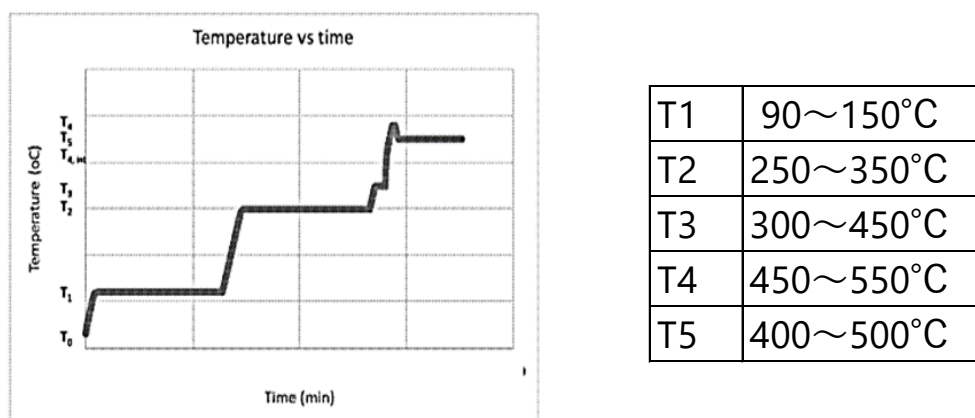


図 21 Lummus 特許記載の熱分解温度プロファイル

出所: US 2023/0227731のFig.2と明細書。

(4) No.5 特許(US 12,209,221): 重質熱分解油と重油との混合物を既存重油クラッキング装置で分解する方法

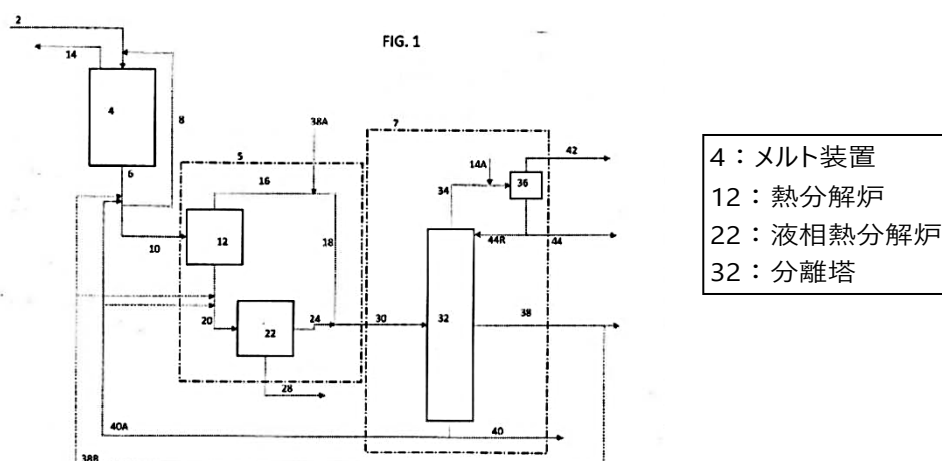


図 22 Lummus 特許記載の重質熱分解油と重油の既存重油クラッキング装置での分解

出所: US 12,209,221のFIG.1。番号の名称は、明細書データに基づいて旭リサーチセンターが日本語に翻訳。

図 22 において、廃プラ (2) をメルト装置 (4) で熔融した後に、ライン (6) と (10) を通って、熱分解炉 (12) で熱分解させる。熱分解炉 (12) で生成した熱分解ベーパー

はライン（18）とライン（30）を経て分離塔（32）に送る。一方、熱分解炉（12）で生成したポリマー分解液はボトムよりライン（20）を通して、液相熱分解炉（22）に供給する。また、液相熱分解炉（22）にライン（38B）やライン（40A）を通して重油を供給する。これらの供給物は混合して、液相熱分解炉（22）で熱分解を行い、発生する熱分解ペーパーはライン（24）を通して、分離塔（32）に送られる。分離塔（32）で、軽質炭化水素（42）、ナフサ（44）、ディーゼル（38）、重油（40）に分離する。

熱分解炉（12）の操作圧力と温度は、1.3～1.7bar、400～450℃である。液相熱分解炉（22）は液相を保つために操作圧力は14～36barと高く、温度は490～520℃と高い。滞留時間は過度のクラッキングを防止するため、熱分解炉（12）よりも短くする。

6.4 コメント

(1)No.1 特許は出願日が New Hope Energy と Lummus が提携する前なので、New Hope Energy の独自技術である。No.2 特許と No.3 特許は New Hope Energy と Lummus の研究者の共同発明である。No.4 特許と No.5 特許は Lummus の研究者のみの出願となっている。

(2)繰り返しになるが、2020年10月14日に New Hope Energy は Lummus と提携契約を締結した。その後、Lummus の技術者は New Hope Energy の技術者と一緒に、2022年1月に No.3 特許（熱分解炉の構造特許）を出願している。New Hope Energy/Lummus は公表資料で、同社の固有技術として「反応器（熱分解炉）デザイン」を挙げているので、No.3 特許がそれに当たるものと考えられる。仮にそうだった場合、No.3 特許が開示する熱分解炉が、既に建設されていた工場の熱分解炉なのか、それを改良したものか、それとも工場とは関係なく Lummus が開発したものなのかは興味のあるところである。

(参考)環境エネルギー

環境エネルギー関係（発明者：藤元薫ら）の米国特許が2件出願されている。

(1) No. 1 特許：US 8,350,104

①特許の書誌的事項

特許の名称：Method for catalytically cracking waste plastics and apparatus for catalytically cracking waste plastics、登録日 2013 年 1 月 8 日、優先権主張日：2006 年 1 月 26 日、2006 年 7 月 26 日 発明者：藤元薫、Xiaohong Li、出願人：Kitakyuushuu Foundation for Advancement of Industry, Science and Technology

②特許の概要

特許請求の範囲のクレーム 1 では、熱分解時に使用済み FCC 触媒とともにカルシウム化合物（副生 HCl の中和）を使用することを記載している。

図 23 に、横型シリンダー型熱分解炉と分解生成物の回収・分析装置が示されている。

図 24 に、使用済み FCC 触媒 10g を使って、75g の PE を分解した時の累積生成物の経時変化データが示されている。比較は、無触媒である。図 25 に、使用済み FCC 触媒を使用した場合と無触媒の場合の熱分解生成物の炭素数分布が示されている。図 26 は、FCC 触媒を使用して異なる温度で熱分解した場合の生成物累積量の経時変化データの例である。

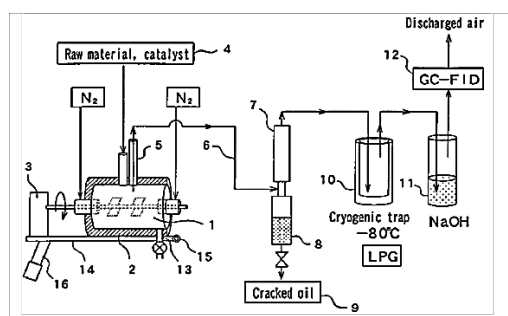


図 23 熱分解装置 (US 8,350,104 の Fig.1)

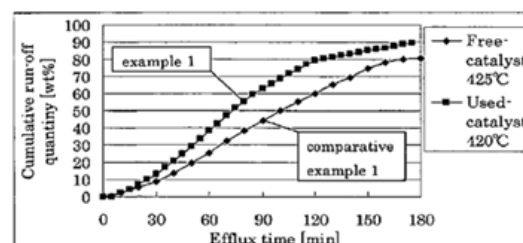


図 24 熱分解時の累積生成物の経時変化
(US 8,350,104 の Fig.2)

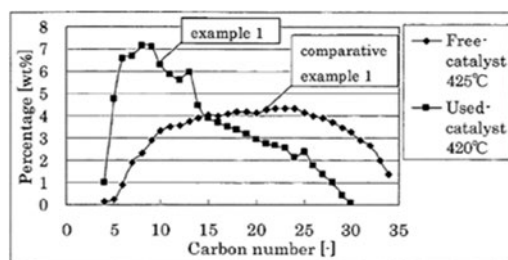


図 25 炭素数分布 (US 8,350,104 の Fig.3)

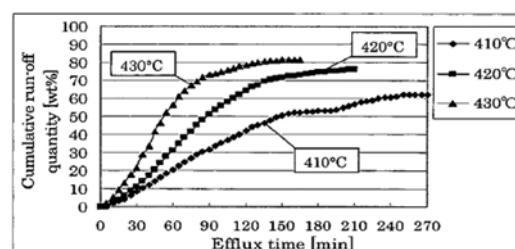


図 26 熱分解温度と累積生成物の経時変化
(US 8,350,104 の Fig.4)

(2) No. 2 特許 : US 2025/0297163

①特許の書誌的事項

特許の名称 : CONTINUOUS ORGANIC MATTER PYROLYSIS DEVICE AND CONTINUOUS ORGANIC MATTER PYROLYSIS METHOD、公開日 : 2025 年 9 月 25 日、優先権主張日 : 2022 年 5 月 16 日 (日本)、発明者 : 野田修二 (広島、日本)、藤元薫 (福岡、日本)、出願人 : 環境エネルギー株式会社 (広島、日本)、出光興産株式会社 (東京、日本)

②特許の概要

No. 2 特許は、熱分解炉と、熱分解炉から固形物 (廃触媒やチャーなど) を排出するための装置に関するものである。熱分解炉は垂直型で、ダブルリボン型攪拌機を有している。連続的に廃プラは供給され (10)、熱分解ペーパーが連続的に抜き出される (18)。固形物は、回転するロッドメンバー (34) により狭い排出部を通り、スクリーンコンベヤー (42) に排出される。

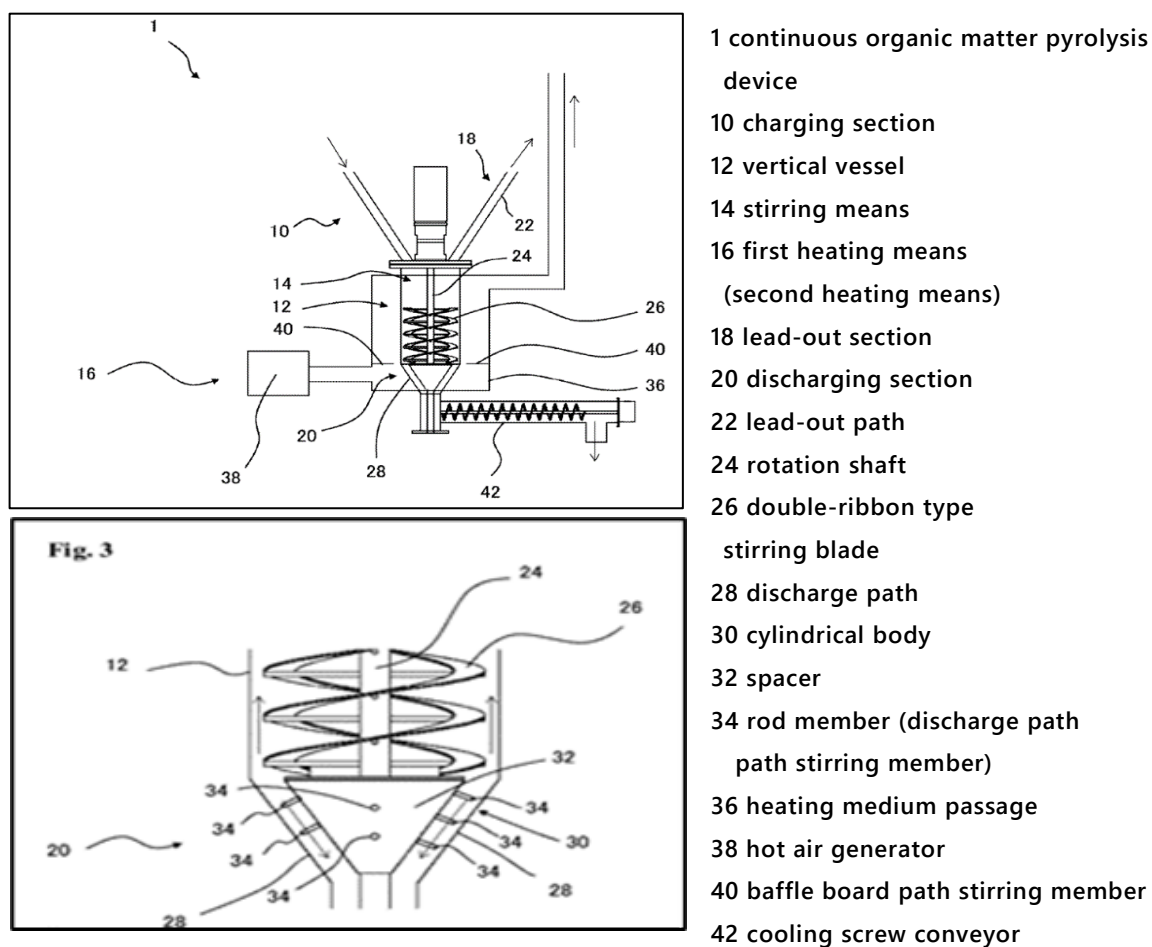


図 27 熱分解炉と固体排出装置 (出所 : US 2025/0297163 の Fig.1 と Fig.3)

おわりに(熱分解法 CR の将来)

(1) 本レポート(シリーズ(CR 企業の米国特許と技術)の下巻)について

特許調査により、公表資料では窺うことのできない特許技術を新たに知ることができた。特に、ExxonMobil については、公表資料からは知り得なかった流動層型熱分解炉を用いた高温・短滞留時間の熱分解方法を知った。また、OMV と ExxonMobil は、溶媒を使用するということであるが、特許より熱分解ベーパーを部分凝縮して得られた高沸点成分(350~370℃以上)を溶媒としていることがわかった。この高沸点成分は、熱分解炉に戻され、溶媒として働くとともに、自らは熱分解して低分子量化する。

Honeywell UOP、Alterra Energy、New Hope Energy/Lummus については特許より、各社の固有技術の設計による独自の熱分解炉を知ることができた。

(2) 本シリーズ(上巻、中巻、下巻)の有効活用

混合廃プラ(PE/PP/PS)の熱分解法は CR の本流であり、将来においても最重要である。技術課題は数多いが、それらを克服して究極プロセスの確立を目指す研究開発が、今後とも活発であろう。その際に先行特許技術を知っておくことは重要であり、本シリーズ(上巻、中巻、下巻)が、参考になれば幸いである。なお、筆者の特許明細書の理解が適切でない点や正しくない点が多々あると思われるので、その点をご容赦ください。また、重要なポイントについては、是非明細書に当たって確認することをお勧めする。

また、この特許調査を利用して、専門家による各社プロセスの設計とコスト見積もりが行われることを期待する。PET の解重合 CR については、Adam McNeeley¹⁸がメタノール分解法、グリコール分解法、加水分解法の 3 つのプロセスについて、設計とコスト試算を行っている¹⁹。

¹⁸ AspenTech Center of Excellence in Process System Engineering

¹⁹ Adam McNeeley, and Y. A. Liu, Assessment of PET Depolymerization Processes for Circular Economy. 2. Process Design Options and Process Modeling Evaluation for Methanolysis, Glycolysis, and Hydrolysis, REVIEW February 16, 2024

(3) 混合廃プラの熱分解法 CR の将来の方向についての一考察

混合廃プラ（PE/PP/PS）の熱分解法は、現在も将来も CR の中で最も重要である。

技術課題を念頭に、①将来の主流プロセスは何か、②熱分解や水蒸気分解（ナフサ分解など）における有効成分の収率アップの強い要請、の2点について以下考察した。

① 将来の主流のプロセスはどうなるかを、主としてスケールアップの観点から考察

現在は多数のプロセスが群雄割拠しているが、将来の本命技術は何か？ それは何で決まるか？ ここでは、スケールアップの観点を中心に本命技術を考えてみた。

まず、将来の熱分解油工場の処理能力を大幅に拡大する方法として、イ．小型熱分解炉のナンバリングアップによる方法と、ロ．熱分解炉のスケールアップによる方法の2つのケースについて考えた。

イ．小型熱分解炉のナンバリングアップによる大型化の実現

2,000～5,000 トン/年スケールの小型熱分解炉は、熱供給（伝熱）律速にならず、チャーの生成も抑制できる。この小型熱分解炉をナンバリングアップで処理能力を拡大することが可能である。例えば、熱分解炉を10基並べて2～5万トン/年の工場にする。Plastic Energy、CFP（日本）、Xycle（オランダ）などがこの戦略を取る可能性がある。Xycleは熱分解炉を10基並べた21,000 トン/年のプラントを建設中で、2026年に完成予定である²⁰。

この場合、10～20か所の熱分解油工場で製造された熱分解油を近隣の石油精製工場に集め、一括して蒸留精製—水素化処理による不純物除去—アップグレーディング（FCC 処理など）を行い、最終製品化することが考えられる。かさ高い廃プラの熱分解油工場への輸送距離を短縮できるメリットがある。現在の焼却炉を熱分解炉に変えたイメージである。

ロ．スケールアップによる大型処理施設の実現

²⁰ <https://xyclegroup.com/construction-progress/>

伝熱律速とチャー生成の問題を解決したスケールアップ技術が求められる。候補プロセスとして、次が考えられる。

- a. Pryme や BlueAlp の方法：二軸押出機や外部加熱装置により熱分解炉での熱供給負担を減らすことにより、スケールアップを容易にする。
- b. ExxonMobil の流動層型熱分解炉使用の高温・短滞留時間の熱分解方法：砂などの伝熱媒体と流動ガスが必須である。同社は熱分解生成物の高沸点成分を溶媒に使用している。流動層型反応器は FCC の実績がありスケールアップは可能と考えられるが、溶媒の循環量が大きいのでエネルギーコストが高くなることはないだろうか。
- c. OMV の伝熱性が高い管型熱分解炉を使用し、また熱分解生成物の高沸点成分（例は沸点 360℃以上）を循環させて溶媒の働きをさせる熱分解法：熱分解炉の熱供給律速（伝熱律速）を緩和して、スケールアップしやすくなる。溶媒の循環量が大きく、エネルギーコストが高くなることが懸念される。
- d. Mura Technology 超臨界水熱分解方式：スケールアップ性についてはわからない。

以上の候補プロセスのうち、何が主流になるかを予測することは難しいが、世界の最先端技術を常にウォッチする必要がある。そのためには CR の各分野の専門家が、新たに公開された特許や公開情報を持ち寄って、情報交換と議論をする場（研究会など）を持つことが有効と考えられる。

②CR の「燃料除外マスバランス方式」法制化に対応する熱分解工程と水蒸気分解工程の有効成分収率アップの強い要請

イ. 背景：CR に適用される可能性が高い「燃料除外マスバランス方式」とは

EU は CR における再生材含有量の算定の方法として、「燃料除外マスバランス方式」を採用することを骨子とする規則案（ドラフト）を提案した（2025 年 7 月 8 日）²¹。

²¹ https://environment.ec.europa.eu/news/commission-consults-new-rules-chemically-recycled-content-plastic-bottles-2025-07-08_en
https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13467-Single-use-plastic-beverage-bottles-EU-rules-for-calculating-verifying-and-reporting-on-recycled-plastic-content_en

「燃料除外マスバランス方式」では、熱分解やその後の熱分解油の水蒸気分解（ナフサ分解など）で、生成する成分のうちの燃料に使用されるものや生成する固体成分（チャーなど）は、再生材の計算にカウントしない。分解生成物のうち、最終的にポリマーや化成品になる成分のみが再生材としてカウントされるというものである。

例えば、熱分解で得られた熱分解油中のナフサ・ディーゼル成分の収率が合計 70%あり、ナフサ・ディーゼル成分を水蒸気分解したときの有効成分（エチレン（C2）、プロピレン（C3）、C4、アロマ）の収率が 70%とすると、全体収率は 49%の収率になる。約半分の 49%だけが再生材としてカウントされることになる。その他の 51%である燃料用成分やチャーは再生材にはカウントされない。

今回の EU の CR の「燃料除外マスバランス方式」採用の規則案（ドラフト）は PET ボトル CR における再生材含有量を計算するためのものである。しかし、EU はドラフトの中で、今後この「燃料除外マスバランス方式」を容器包装全体、自動車用プラスチック、繊維の CR に適用することを明記しているので、影響は大きい。

熱分解油企業や石油化学企業にとっては、「燃料除外マスバランス方式」はこれまで認められると考えていたフリーのマスバランス方式（生成物は 100%再生材にカウントできる）に比べて相当厳しい。各収率アップの強い要請が企業トップから出されるだろう。いたって不十分ながら、想定される対策をリストアップしてみた。

ロ. 収率アップの要請

対策 1：熱分解工程の収率アップ

熱分解のナフサ（およびディーゼル）収率のアップである。

まず、これまで熱分解油工場の燃料に使用していた熱分解副生物のガス成分（メタンやエタン、あるいは合成ガス）を化学品原料用やポリマー原料用に転換することになるだろう。代わりに外部燃料を購入するか電気加熱に変える。メタンやエタンは合成ガスに変換できるので、それからメタノールをつくり、化学品（ホルマリン、MMA など）やポリマー（フェノール樹脂、ポリアセタール、PMMA（アクリル樹脂）など）を製造する。

次に、熱分解触媒による収率アップが期待される。近々完成する LyondellBasell のドイツ工場と出光興産一環境エネルギー合弁会社の千葉県市原市工場の稼働状況が注目される。

今後、収率アップのためにどうしても触媒の力を借りなければならない事態が予想される。この場合、触媒自体の開発と、触媒の性能が十分に発揮されるプロセス開発の両方が重要であろう。

一方、熱分解生成物のガス成分やチャーを減らす研究も当然必要になる。

対策 2：水蒸気分解工程の原料多様化と有効成分収率の向上

水蒸気分解はナフサ原料のいわゆるナフサクラッキングが一般的であるが、既存ナフサクラッキング装置を小改造することにより、ディーゼル（石油化学ではガスオイルという）の水蒸気分解が可能になる。世界的には、両方の原料を使用できる工場は少ない。ただし、ガスオイルの水蒸気分解はナフサ分解よりも採算性が悪いので、その改良も必要となる。いずれにしても水蒸気分解の原料多様化は必要になろう。

次の対策は、水蒸気分解工程におけるエチレン、プロピレンなど有効成分（C2、C3、C4、アロマ）の収率アップである。水蒸気分解工場で副生し、工場の燃料に使用されていたガス成分（メタン、エタン、水素など）や重質油成分を、化学品原料や、ポリマー原料に転換する必要がある。

当然、水蒸気分解自体の改善、改良による収率アップも期待される。そういう開発も既に行われているかもしれない。水蒸気分解の有効成分の比率は、約 70% と低い²²。

かつて日本において、ナフサを水蒸気分解でなく、接触分解（ゼオライト触媒使用）にすることにより、熱分解温度を下げ、有効成分の収率を上げる開発が NEDO プロジェクトで行われた。有効成分の収率を上げる目標は達成されたが、触媒がコーキングして失活する時間（触媒寿命）に問題があることと、既存の水蒸気分解設備利用に対して、接

²² ARC リポート「天然ガス化学、石油化学、石炭化学」15 頁の表 5 参照
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1011.pdf

触分解は新規設備に大型投資をしなければならず採算性に問題があることから、開発は断念された。

対策 3：熱分解と FCC の有効な統合

熱分解油のうちの高沸点成分を、既存の FCC 設備を利用して接触分解してナフサやディーゼルに転換することが試みられており、一部実用化されているだろう。

既存の FCC 設備で原料に熱分解油を使用する際には、それに適した FCC 触媒や最適な熱分解条件があるであろう。その開発が進めば、FCC による熱分解油のナフサ（およびディーゼル）収率のアップが進むであろう。

なお、米国はナフサクラッキング設備が少ないので、FCC を活用した熱分解油のアップグレーディングや重層接触分解によるプロピレンの直接製造に注力するだろう。

対策 4：熱分解プロセスで直接オレフィンまたはアロマを製造する技術の開発

既に世界で数社が取り組んでいる革新技术であり、注目すべきである。プロセス全体が新設になるので、熱分解と既存の水蒸気分解を統合する従来法に対してコスト優位性が出るかがポイントである。また、直接オレフィンやアロマを製造できるといっているが、実際には何段階のプロセスで構成されているかを見ておく必要がある。2 段階以上になると、設備費が重くなることに注意が必要である。

以上、力不足ながら、熱分解法 CR の将来について考察した。議論のたたき台になれば幸いである。

将来、熱分解法の各種課題を様々なブレイクスルーにより解決し、究極のプロセスが確立されることを期待する。

謝辞

知的財産に関して貴重なアドバイスとコメントをいただいた旭化成知的財産部の糸井陽平氏に深く感謝いたします。

参考文献

(1)～(4)はARC リポート：https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/

(1)は府川伊三郎、下田晃義、(2)～(4)は府川伊三郎

- (1)ケミカルリサイクルの最新動向（2023年1月～2024年3月） 2024年5月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1069.pdf
- (2)世界で建設が進むケミカルリサイクルプラントの動向 2023年7月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1063.pdf
- (3)2030年の日本のプラスチック（リサイクルとバイオマスプラスチック） 2023年4月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1062.pdf
- (4)プラスチックのケミカルリサイクルとその技術開発（上）、（下） 2020年5月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1046.pdf
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1047.pdf
- (5)府川伊三郎 「プラスチックリサイクル（MR&CR）の技術と産業化」 PETROTECH（石油学会情報誌） 2025年4月号（第48巻）191-203頁
- (6)府川伊三郎 「触媒を利用したプラスチックケミカルリサイクルの開発・工業化の動向」 触媒 Vol.65 No.2 120頁（2023）
- (7)福島正明、伊部英紀、若井慶治、杉山英一、安部裕宣、呉倍莉、北川希代彦、鶴賀重徳、志村勝美、小野栄一 「外熱式ロータリーキルンを使用した容器包装廃プラスチックの熱分解技術の開発」 廃棄物資源循環学会論文誌，Vol. 22, No. 2, pp. 114-126, 2011
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsmcwm/22/2/22_2_114/_pdf/-char/ja

<本レポートのキーワード>

プラスチックケミカルリサイクル、米国特許、熱分解プロセスと装置、PE、PP、PS、
混合廃プラの熱分解、熱分解油メーカー

(注) 本レポートは、ARC の WEB サイト (<https://arc.asahi-kasei.co.jp/>) から検索
できます。

このレポートの担当

シニアリサーチャー 府川 伊三郎

お問い合わせ先：03-6699-3095

E-mail：fukawa.ig@om.asahi-kasei.co.jp