

令和7年度環境省委託業務

令和7年度脱炭素型循環経済システム構築促進事業

(うち、プラスチック等資源循環システム構築実証事業)

(一般廃棄プラスチックを石油化学プラントにおいてケミカルリサ

イクルするために必要な前処理装置開発検討実証事業)

委託業務

成果報告書

令和7年12月

丸紅株式会社

要旨

廃プラスチックのうち特に容器包装プラスチックのケミカルリサイクルプロセスの確立は、化石資源の使用量削減と循環型社会の構築において大きな課題の一つである。回収した容器包装プラスチックを熱分解で油化し、前処理・後処理工程を経てナフサクラッカーに投入することで、基礎化学品を製造するプロセス（本事業プロセス）は、有効なリサイクル手法として期待されている。本事業プロセスでは、PE（ポリエチレン）、PP（ポリプロピレン）、PS（ポリスチレン）が主要なリサイクル対象物質となる。しかし、塩素系化合物、PET（ポリエチレンテレフタレート）樹脂、無機物、金属成分などの夾雑物質が混入すると、ナフサクラッカーへの直接投入を妨げる忌避物質が生成される。過去の研究により主要な夾雑物質は特定されているものの、プラスチック製品の組成は年々変化しており、石油化学プラントへの投入に際しては、夾雑物質の精密な分析が不可欠である。さらに、夾雑物の由来となるプラスチック製品を特定することで、ケミカルリサイクルに不適合な廃プラスチックの効率的な分別が可能となる。

廃プラスチックのケミカルリサイクルは現在、株式会社レゾナックの川崎工場で操業されている。首都圏は人口密度も高く、廃棄物を集積しやすいといった特長がある。一方、九州地域では、比較的人口の多い都市が点在し、人口密度が低い。このような地域においては、廃棄物が少量かつ分散的に排出されるため、廃プラスチックを減容し、運搬を効率化させるために油化技術が有効である。ただし、経済性を確保するためには小型油化装置を各地域に分散配置することが必要となる。加えて、ナフサクラッカー投入前の処理設備を効率化するためには、これらの小型油化装置においても、可能な限り夾雑物質を除去することが重要である。

令和6年度の事業では、廃プラスチックを手選別・光学選別して8種類の試料を作成し、油化後の生成物を分析した結果、塩素化合物の完全除去は困難だが、PVCやPETの事前除去と熱分解プロセスの制御により塩素濃度を10ppm以下に低減できることが判明した。塩素は主に低沸点の有機塩素化合物として生成油中に残存し、塩化物イオンは残渣に留まることも確認された。また、排出元近郊に小型油化装置を設置するシステムのライフサイクルアセスメントでは、現状よりもCO₂削減が可能との結果が得られ、社会実装の可能性が示された。

令和7年度は国立大学法人九州大学、クラサケミカル(株)、丸紅(株)において次の通り実証を行った。

九州大学にて計8検体の廃プラスチック熱分解油を分析した結果、PE/PP/PS混合物では、PS、PP→PEの順番で段階的に分解が進行し、PET共存により有機カルボン酸が生成され、酸素含有量が増加することを確認した。また、塩素系プラスチック含有試料では、生成された塩化水素がオレフィン類を塩素化するとと

もにステンレス鋼を腐食し、遷移金属イオンを溶出することを明らかにした。さらに、令和6年度に実施した油化実験で得られたサンプル油に含まれる石油化学プラントでの使用に適合しない夾雑物の分析を実施し、得られた分析結果を基に、夾雑物に対する処理技術の調査を行った。

クラサケミカル(株)においては、九州大学が行った夾雑物分析を基に塩素分、含酸素化合物、窒素化合物、炭化水素中の不飽和分等の処理技術、設備に関する技術調査を実施し、適用可能技術として水素化を選定した。また、本調査結果に基づきサンプル油を石油化学プラントで使用するために必要な不純物対策設備のプロセスフローの構築を行った。不適合物を低減させた熱分解油を石油化学プラントに投入可能なレベルまで精製するために必要な前処理設備の開発検討及び社会実装への展開可能性を明確化することを最終目標として検討を進めた。処理プロセスの基礎設計を実施し、石油化学プラントの原料として品質要求を満たすための技術的要件と経済的条件を体系的に整理し、一般廃棄プラスチックのケミカルリサイクルの実現に資する情報を取りまとめた。併せて、構築したプロセスフローにおけるマテリアルバランス、エネルギーバランスの検討、概略設備設置コストを調査し、前処理プロセスの廃プラスチックリサイクルコストへの影響を評価し、前処理プロセスでの夾雑物除去性能のコストへの影響を評価して廃プラスチック分別目標の設定を行った。結果として、廃プラスチック熱分解油の分析により多種類の含酸素・含窒素化合物が不純物として検出され、エチレンプラントへの悪影響リスクを確認したため、不純物形態を問わず確実に除去可能な水素化+水洗プロセスを選定した。精製油の数値目標(塩素分<6wtppm、含酸素化合物<300wtppm等)を設定し、本前処理プロセスにより目標を100%達成できることを確認した。前処理後の精製油をクラッカーで処理した場合、主要製品収率はナフサと同等であることをシミュレーションで確認した。一方、前処理設備を新設し廃プラスチック熱分解油原料を活用する場合、経済的に持続可能な操業を維持するには、エチレンの販売価格で通常約3倍の環境価値プレミアム価格が必要であることが判明した。また、未選別状態の廃プラスチック熱分解油を前処理する場合にはPP/PEのみまで選別した場合と比較し約7倍エネルギー原単位が悪化し、コストに換算すると5倍以上となることが分かった。つまり、廃プラスチックの選別強度が高いほど前処理コストを削減でき、光学選別によるPP/PE分別が最も有利であることを示した。一方で将来的にケミカルリサイクルにはPVCやPET等の多様なプラスチックの処理が求められることになるため、短期的にはPP/PEの高選別化により前処理設備での不純物除去を対応方針としつつ、中長期的には体系的なデータの蓄積によって、前処理設備、エチレンプラント両方の視点から設備増強の可否および是非を判断し、PETやPVC(ポリ塩化ビニル)を含んだ混合素材多様化へと推移することが現実的で

あると考える。

丸紅(株)においては、廃プラスチックのケミカルリサイクルによる原料油製造のライフサイクルアセスメントを実施した。現時点の算定では、2030年の設備稼働時にエネルギー起源CO₂削減は困難だが、低炭素水素調達やオフガス再利用等の追加対策により684t削減が可能となることを確認した。ただし、これらには追加コストが発生するため事業採算性を考慮する必要があり、事業終了後も継続して検討していく。

Summary

The establishment of chemical recycling processes for waste plastics, particularly container and packaging plastics, is crucial for reducing fossil resource consumption and building a circular society. The process converts plastics into pyrolysis oil through pre-treatment and post-treatment before feeding into naphtha crackers to produce basic chemicals.

Polyethylene, polypropylene, and polystyrene are the main recycling targets. However, contaminants such as chlorine compounds, PET resin, inorganic materials, and metals generate undesirable substances preventing direct input into naphtha crackers. Precise contaminant analysis is essential as plastic product composition changes annually.

Chemical recycling of waste plastics is currently conducted at Resonac Corporation's Kawasaki plant. Compared with Tokyo metropolitan area, where high population density facilitates waste collection, the Kyushu region consists of scattered, relatively populous cities with lower overall population density. In such regions, waste is generated in small, dispersed quantities, making oil conversion technology effective for reducing waste volume and improving transportation efficiency. However, to ensure economic feasibility, small-scale oil conversion units must be distributed across the region. Additionally, to maximize the efficiency of these units, contaminants must be removed from the oil as much as possible before the oil is fed into the naphtha cracker.

In the FY2024 project, waste plastics were manually and optically sorted into eight sample types. Analysis of the resulting products after oil conversion showed that complete removal of chlorine compounds is difficult; however, the chlorine concentration could be reduced to below 10 ppm by removing polyvinyl chloride (PVC) and PET prior to oil conversion and by controlling the pyrolysis process. It was confirmed that chlorine mainly remained as low-boiling-point organic chlorine compounds, while chloride ions remained in the residue. A associated life-cycle assessment of a system that installs small-scale oil conversion units near emission sources showed that CO₂ reduction relative to current operations is possible, demonstrating the potential of small-scale oil conversion units for social implementation.

In FY2025, investigations related to small-scale oil conversion units were conducted at Kyushu University, Crasus Chemical Inc., and Marubeni

Corporation.

At Kyushu University, the analysis of eight waste-plastic pyrolysis oil samples revealed that in PE/PP/PS mixtures, decomposition proceeds stepwise: PS→PP→PE. Moreover, their coexistence with PET generates organic carboxylic acids, which increase the oxygen content of the resulting oil. It was also demonstrated that samples containing chlorine-based plastics generate hydrogen-chloride chlorinated olefins, which corrode stainless steel and elute transition-metal ions. Contaminants in the FY2024 pyrolysis oil samples that were unsuitable for use in petrochemical plants were analyzed. Based on the results, treatment technologies for the contaminants were investigated.

Based on this contaminant analysis, Crasus Chemical Inc. conducted technical surveys of suitable treatment technologies and equipment to address chlorine content, oxygen-containing compounds, nitrogen compounds, and unsaturated hydrocarbons. Hydrogenation was selected as the applicable technology, and a treatment process flow for impurity countermeasure equipment was developed. Studies were then conducted to clarify the development of pre-treatment equipment to reduce the level of incompatible materials to a level suitable for input into petrochemical plants and assess the feasibility of its social implementation. The basic design of the treatment process was developed. The technical requirements and economic conditions needed to meet the raw-material quality requirements for petrochemical plants were systematically organized, and information supporting the chemical recycling of general waste plastics was compiled. In addition, the material and energy balances of the treatment process were examined, approximate equipment installation costs were investigated, the impact of the pre-treatment process on waste plastic recycling costs was evaluated, the impact of pre-treatment contaminant removal performance on costs was assessed, and waste plastic separation targets were set.

As a result of the contaminant analysis, waste plastic pyrolysis oil was confirmed to contain various oxygen-containing and nitrogen-containing compounds, indicating a potential risk of adverse impacts on ethylene plants. In response, a pre-treatment process combining hydrogenation and water washing was selected, as it enables stable and reliable removal of impurities regardless of their chemical form.

Quantitative quality targets for the refined oil were defined, including a chlorine content of less than 6 wt ppm and oxygen-containing compounds below 300 wt ppm. Verification tests confirmed that these targets can be fully achieved through the proposed pre-treatment process. Furthermore, process simulations demonstrated that, when the refined oil after pre-treatment is used as feedstock in a cracker, the yields of major products are equivalent to those obtained from conventional naphtha. However, from an economic perspective, to maintain economically sustainable operations of newly installed pre-treatment equipment using waste plastic pyrolysis oil as raw material, an environmental value premium price of approximately three times the normal ethylene price is required. It was also found that when pre-treating unsorted waste-plastic pyrolysis oil, the energy intensity deteriorates approximately seven times compared to sorted PP/PE-only plastics, which, when converted to cost, is more than five times higher. In other words, increasing the degree of waste plastic sorting contributes to a reduction in pre-treatment costs. Among the options evaluated in this study, optical sorting to separate polypropylene (PP) and polyethylene (PE) was identified as the most advantageous approach under the current technical and economic conditions. However, since chemical recycling will be required to process various waste plastics in the future, including PVC and PET, while the short-term approach should be to address impurity removal in pre-treatment facilities through high-level sorting of PP/PE, in the medium to long term, it is considered realistic to accumulate data systematically, judge the feasibility and appropriateness of facility expansion from the perspectives of pre-treatment facilities and ethylene plants, and transition to diversification of mixed materials, including PET and PVC.

Marubeni Corporation conducted a life-cycle assessment of feedstock oil production using chemically recycled waste plastics. Its calculations showed that energy-derived CO₂ reduction would be difficult when facilities begin operation in 2030; however, additional measures, such as low-carbon hydrogen procurement and off-gas reuse, would achieve a reduction of 684 tons. Nevertheless, business profitability must be considered because these measures incur additional costs. This will continue to be examined after the project ends.

目次

内容

要旨	1
Summary	4
第1章	10
第1章 緒言	11
1.1 背景.....	11
1.2 石油由来のプラスチック製造工程とプラスチックのマテリアルフロー	12
1.3 リサイクルプロセス.....	14
1.4 容器包装プラスチックの油化技術の歴史と動向.....	18
1.4.1 油化技術の定義と目的.....	18
1.4.2 油化技術の特徴と処理プロセス.....	19
1.4.3 日本における油化技術の歴史的経緯	19
1.4.4 代表的な実証施設.....	19
1.4.5 国内企業の最近の動向(2020年代)	21
1.4.6 欧州の廃プラスチック油化技術の現状と詳細	22
1.5 本実証業務の目的	25
1.6 令和6年度の成果	26
1.7 令和7年度事業の実施内容.....	28
第2章	32
2.1 目的.....	33
2.2 各種検体の分析手法.....	34
2.2.1 蛍光X線による元素分析	35
2.2.2 誘導結合プラズマ発光分光分析法(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry, ICP-OES)	35
2.2.3 ガスクロマトグラフ質量分析計(Gas Chromatograph-Mass Spectrometer, GC-MS)	36
2.2.4 GC-FID.....	36
2.3 試料検体	37
2.3.1 廃プラスチックの組成分析と試料作成.....	37
2.3.2 油化試料検体の作成(丸紅)	39
2.4 油化試験で得られた分解油の化学物質の分析結果と考察	40
2.4.1 油化後の生成油の元素分析.....	40

2.4.2	油化後の生成油の有機成分分析.....	45
2.5	本事業における不適合物前処理技術調査の概要（クラサスケミカル）	67
2.5.1	調査の目的と背景.....	67
2.6	エチレンプラントの設備構成概略.....	67
2.7	廃プラスチック熱分解油中不純物のクラッカーへの影響.....	70
2.8	不適合物の処理方法の選定方針.....	72
2.9	不適合物の処理方法.....	73
2.10	第2章の実証結果と結論.....	74
第3章	.....	77
3.1	設計に使用した廃プラスチック熱分解油の性状とその検討方法.....	78
3.2	受け入れ数値目標の設定.....	80
3.3	前処理プロセスの設計条件の検討.....	82
3.4	概略ブロックフロー.....	83
3.5	第3章の実証結果と結論.....	84
第4章	.....	86
4.1	製品収率の計算に使用した廃プラスチック熱分解油の組成.....	87
4.2	シミュレーション内容の詳細.....	93
4.3	製品収率の評価結果.....	94
4.4	第4章の実証結果と結論.....	95
第5章	.....	96
5.1	概略設備費および前処理設備の用役費の概算.....	97
5.2	通常スキームと廃プラスチック熱分解油使用スキーム.....	98
5.3	概略設備費のエチレン価格への影響評価.....	99
5.4	第5章の実証結果と結論.....	100
第6章	.....	101
6.1	リサイクルコストへの影響評価の計算方法.....	103
6.2	リサイクルコストへの影響評価結果.....	104
6.3	第6章の実証結果と結論.....	104
第7章	.....	106
7.1	本事業におけるLCAの概要.....	107
7.2	本事業におけるLCAの前提条件.....	108
7.3	インベントリ分析.....	110
7.3.1	廃プラスチック必要収集量及び各工程での歩留の検討.....	110
7.3.2	一般廃棄プラスチック輸送のインベントリデータの検討.....	113
7.3.3	破碎・選別工程のインベントリデータの検討.....	114

7.3.4	熱分解工程のインベントリデータの検討	114
7.3.5	生成粗油輸送距離の検討	115
7.3.6	石油化学プラント投入前処理のインベントリデータの検討.....	117
7.3.7	原油由来の石油精製が不要になる分の控除.....	117
7.4	ベースラインのインベントリデータの検討	117
7.4.1	一般廃棄プラスチック輸送のインベントリデータの検討	117
7.4.2	一般廃棄プラスチック処理のインベントリデータの検討	117
7.4.3	石油精製のインベントリデータの検討.....	117
7.5	LCA の算定結果.....	119
7.6	エネルギー起源排出量を削減するのに必要な更なる対策の検討.....	121
7.6.1	熱分解工程で発生するオフガスのエネルギー利用	121
7.6.2	石油化学プラント投入前処理工程の投入水素を低炭素水素に変更	121
7.6.3	再生可能エネルギー由来の電力の導入	121
7.6.4	更なる対策を導入した場合の LCA の算定結果	122
7.7	LCA の検証・評価結果のまとめ.....	126
7.8	第 7 章の実証結果と結論	126
第 8 章	.....	127

第 1 章

第1章 緒言

本章では、本実証事業の背景、目的及び業務内容について述べる。まず、廃プラスチックのケミカルリサイクルを取り巻く社会的背景と、容器包装プラスチックの油化技術の歴史・動向を概説

する。次に、令和6年度事業の成果を踏まえ、令和7年度における本実証業務の目的と具体的な業務内容を示す。本事業は、一般廃棄プラスチックを石油化学プラントにおいてケミカルリサイクルするために必要な前処理装置の開発検討を行い、社会実装の実現可能性を評価することを目的としている。

1.1 背景

地球温暖化防止のため温室効果ガスの排出量削減が世界的な課題であり、2050年までにカーボンニュートラルを目指す脱炭素社会の構築は国際的な必達目標として設定されている。日本を含む120以上の国・地域が2050年までのカーボンニュートラル実現を目標として掲げており、脱炭素化には化石資源使用量の削減が不可欠である。産業革命前と比べて平均気温の上昇を1.5℃までに抑える必要があるが、すでに1.1℃の気温上昇が確認されており、2050年の目標達成に向けた取り組みは緊急性を増している。

一方、マイクロプラスチックによる海洋汚染が深刻な環境問題となっている。マイクロプラスチックには有害物質が含まれていることが多く、製造時に添加される化学物質や、漂流中に吸着する化学物質により、物理的・化学的に海洋生物や人間に悪影響を及ぼす。食物連鎖を通じて添加剤が蓄積されることが確認されており、長期的な健康リスクが懸念される。太平洋や北極海など世界中の海でマイクロプラスチックの存在が確認されており、2050年には海洋プラスチックごみの量が魚の量を上回ると予測されている。石油由来のプラスチック、樹脂などを適正に使用し、資源化することが強く求められている。

※マイクロプラスチック(Microplastics, MPs)は、塗料や洗剤などの1次マイクロプラスチック(Primary Microplastics)に加え、投棄されたビニール袋、ペットボトル、合成繊維の衣類が劣化・分解して生成した2次マイクロプラスチック(Secondary Microplastics)に大別されるが、5mm以下の微小なプラスチック粒子を指す。

毎年約800万トンのプラスチックごみが世界の海洋に流出しており、我が国では石油由来のプラスチックのうち、約60%が容器包装用のプラスチックとして利用されている。1990年代に廃棄物処理の問題が顕在化し、1995年に「容器包装リサイクル法」(特定容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律)が制定された。

この法律では廃棄物の発生抑制と資源の有効利用が強調されており、3R(リデ

ユース、リユース、リサイクル)の中でも特にリサイクルが重視され、リサイクルを義務づけることで資源の無駄遣いを防ぐとともに、ごみの減量化を目指している。対象としては飲料や食品を保護するペットボトルや缶などの「容器」、商品を包んで保護するためのフィルムや紙袋などの「包装」に限定されており、これらを使用する企業には、リサイクルのための再商品化義務が課されている。

本法律の施行後、多くのプラスチックや紙容器包装がリサイクルされ、廃棄物の削減が進んだものの、消費者の分別負担が大きく、リサイクルされた素材の品質の問題など、課題も残った。さらに、輸出制限がかかる国々での廃棄物処理問題が浮上するなど、グローバルな課題にも対応する必要がある。

このような課題がありながらも、一般市民にとってプラスチックの資源としての有効活用について強い意識づけがなされており、各自治体において、白色トレイなどのプラスチックの回収が始まるなど、生活に浸透していることは評価される。

しかし、依然として大量のプラスチック廃棄物による環境問題があり、これを解決するために、プラスチックの廃棄物管理と循環利用を促進するための法律「プラスチック資源循環促進法(プラ新法)」が2022年4月に施行された。プラ新法は、製品の設計から廃棄物の処理まで、プラスチックの商流全てにおける資源の循環等の取組を促進するための法律であり、プラスチック製品の設計から廃棄まで、全ライフサイクルをカバーし、環境負荷を減らすことを目指している。また、プラ新法の基本は、従来のリデュース(Reduce)、リユース(Reuse)、リサイクル(Recycle)に加え、再生可能資源(Renewable)の使用を推進することであり、環境配慮設計として製品設計段階で環境負荷の少ない設計を求め、再生プラスチックや代替素材の活用を奨励している。2030年までにワンウェイプラスチックを累積25%排出抑制、容器包装の6割をリユース・リサイクル、2035年までに使用済プラスチックを100%リユース・リサイクル等により有効利用するという野心的なマイルストーンが設定されており、循環型社会の実現に向けた具体的な道筋が示されている。

2050年を見据え、G20大阪サミットで採択された「大阪ブルー・オーシャン・ビジョン」では、2050年までに海洋プラスチックごみによる追加的な汚染をゼロにすることを目指す国際的な枠組みも構築されており、日本は国内法整備と国際協調の両面から脱炭素社会とプラスチック資源循環の実現に取り組んでいる。

1.2 石油由来のプラスチック製造工程とプラスチックのマテリアルフロー

石油由来のプラスチック製造工程を図1.1に示す。我が国は主に中東地域(サウジアラビア(約493,395キロリットル;全体の約40%)、アラブ首長国連邦(約

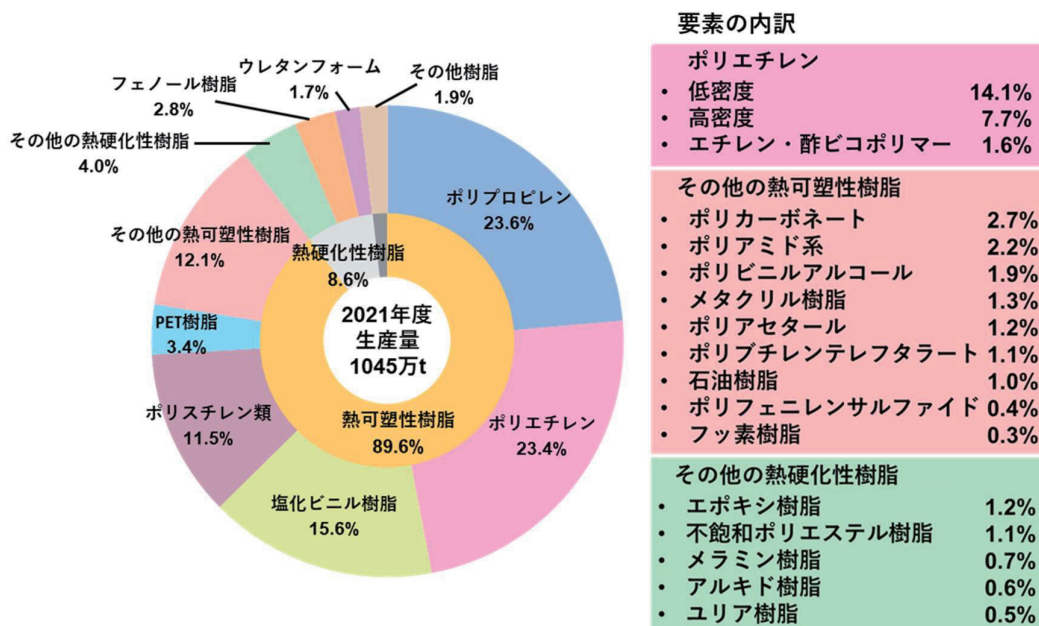


図 1.2 プラスチックの樹脂別生産比率
(石油化学工業協会「石油化学工業の現状」2023年版を元に作成)

図 1.2 に我が国で生産されるプラスチックの樹脂別生産比率を示す。ポリエチレン (PE)、ポリプロピレン (PP)、ポリスチレン (PS) が全体の 6 割弱を占めている。これらは容器包装用プラスチックとしての用途が最も多く、後段で述べるケミカルリサイクルの対象製品となる。

塩化ビニル樹脂 (PVC) の生産量は 15.6%に上り、重要な高分子系化学製品であるが、その用途は配管部材などにも多用されている。

1.3 リサイクルプロセス

リサイクル方法として、サーマルリサイクル、マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクルがある。それらの分類について表 1 に示す。ISO 15270:2008 は、プラスチックのリサイクルに関する国際規格 (“Plastics – Guidelines for the recovery and recycling of plastics waste” (プラスチック廃棄物の回収とリサイクルの指針)) であり、プラスチック廃棄物の適切な処理方法やリサイクルプロセスを標準化し、環境負荷の低減や資源循環型社会の実現を目的としている。

表 1.1 リサイクルの分類

分類（日本）	リサイクルの手法	ISO 15270
マテリアルリサイクル （材料リサイクル）	再生利用・プラ原料化 ・プラ製品化	Mechanical Recycle （メカニカルリサイ クル）
ケミカルリサイクル	原料・モノマー化	Feedstock Recycle （フィードストック リサイクル）
	高炉還元剤	
	コークス炉化学原材料化	
サーマルリサイクル （エネルギー回収）	ガス化	化学原料化
	油化	燃料
	セメント原・燃料化 ごみ発電 RPF* ¹ RDF* ²	

*1 : Refuse Paper & Plastic Fuel（マテリアルリサイクルが困難な古紙と廃プラスチック類を原料とした高カロリーの固形燃料）

*2 : Refuse Derived Fuel（生ごみや可燃ごみや廃プラスチックなどからつくられる固形燃料）

サーマルリサイクル

（ISO 15270：エネルギーリカバリー（Energy Recovery））

プラスチックは有機化合物群に属し、燃焼処理により化学エネルギーを熱エネルギーとして回収できる。プラスチックのサーマルリサイクルは、廃棄物を熱分解や焼却により処理し、エネルギーとして再利用する方法である。しかし、サーマルリサイクルは厳密にはリサイクルとは見做されなくなっており、それにもかかわらず現状では廃プラスチックの約60%がこの方法で処理されている。

サーマルリサイクルの最大の問題点は、廃プラスチックがCO₂となって大気中に拡散されるため、CO₂排出量の低減につながらないことである。このため、脱炭素社会の構築という観点から、廃プラスチックを再びプラスチック製品として再生する技術の確立が急務となっている。

この課題を解決するためには、マテリアルリサイクル（物理的な再生利用）に加えて、ケミカルリサイクル（化学的な分解・再合成による再生利用）を社会実装することが必要不可欠である。これらの技術により、廃プラスチックを新たなプラスチック製品の原料として循環利用することで、CO₂排出量の削減と資源循環型社会の実現が可能となる。

マテリアルリサイクル

(ISO 15270 メカニカルリサイクル (Mechanical Recycle))

プラスチックのマテリアルリサイクル (物理的リサイクル) は、廃棄物を物理的に処理して新たな製品に再生する方法である。サーマルリサイクルとは異なり、プラスチックの素材自体を回収・再利用することで、資源の循環利用を実現する。処理工程は以下の通りである。

- ① 収集と選別：廃棄物を収集し、種類別に選別
- ② 洗浄：汚れや油分、食品残渣等を除去
- ③ 破砕：細かく砕いてペレットやフレーク状に加工
- ④ 熔融と成型：加熱熔融し、新製品に成型

この方法により、原料消費の削減と埋立処分量の減少が可能となり、環境負荷を軽減できる。ペットボトルは新たなボトルや衣料品に、PP・PE は容器や袋等に再生される。しかし、以下の課題が存在する。

- ・ 異種ポリマーの混入による品質低下のリスクがある。
- ・ 食品残渣や接着剤等の不純物により再生品の品質が損なわれる。
- ・ 各工程に多大なエネルギーと時間を要し、サーマルリサイクルと比較してコスト高となる。
- ・ リサイクルの繰り返しによる物理的性質 (強度、柔軟性、透明度) の劣化により、高品質製品への適用が困難となる。これらの技術的・経済的課題の解決が、マテリアルリサイクルの普及拡大には不可欠である。

ケミカルリサイクル

プラスチックのケミカルリサイクル (化学的リサイクル) は、使用済みプラスチックを化学的に分解し、新たな原料として再生する先進的なリサイクル技術である。この方法は、物理的な加工により形状を変えて再利用するマテリアルリサイクルや、燃焼によりエネルギーを回収するサーマルリカバリーとは根本的に異なる特徴を持つ。

ケミカルリサイクルの最大の特徴は、化学反応を用いてプラスチックを分子レベルまで分解し、元のモノマーや化学原料に戻すことである。この分子レベルでの再生により、バージン材と同等の品質を持つ高品質なプラスチック製品の製造が可能となる。マテリアルリサイクルで問題となる品質劣化を回避できるため、食品包装などの高い品質基準が要求される用途にも対応できる点が大きな利点である。

表 1.2 に、プラスチックのケミカルリサイクル方法について比較する。いずれのプロセスにおいても、高分子成分を低分子に変換する方法である。

熱分解 (Pyrolysis) プロセスは、酸素を遮断した状態で 400℃以上の高温に

プラスチックを晒すものである。このプロセスでは、触媒を使用しない場合、PE、PP などが分解され、ガソリンから灯油、軽油、重油成分と同程度の沸点を有する炭化水素成分に転換される。この方法は既に商業化されていた。

熱分解 (Pyrolysis) プロセスは、酸素を遮断した状態で 400°C以上の高温にプラスチックを晒すものである。このプロセスでは、触媒を使用しない場合、PE、PP などが分解され、ガソリンから灯油、軽油、重油成分と同程度の沸点を有する炭化水素成分に転換される。この方法は既に商業化されていた。

熱分解の際に、水素を添加する方法も活用されている (水素化分解: Hydrogenation)。この方法も、雑多なプラスチックを含む複合材料を原料として軽油やナフサ、ガスなどに転換する有望な方法である。

製鉄プロセスでのケミカルプロセスも実用化されている。高炉還元剤として廃プラスチックを直接高炉に投入する、もしくはコークス炉に投入するプロセスが日本で行われている。後者の場合、廃プラスチックは多岐に渡るものが使用されており、コークスに対して 1%程度の量が用いられている。この場合、コークス炉ガスからの化学製品を利用することも可能となる。

モノマーリサイクル (Depolymerization) は、高分子を、その原料であるモノマー成分に分解する方法である。PS は加熱過程でスチレンモノマーに変換されるので、再重合して PS を製造することができる。PET 樹脂のモノマーリサイクルも盛んに検討されている。例えば、PET 樹脂とポリエチレングリコールを混合して加熱するとモノマー成分が得られる。この方法を利用して PET のリサイクルプラントを JEPLAN 社が商業化している。また、より効率性の高いプロセスの構築を目指し、触媒プロセスなどが検討されている。そのほか、自動車解体過程で排出されるアクリル樹脂について、マイクロ波を利用したモノマー化プロセスの開発も行われている。

これらのケミカルリサイクルは、従来のリサイクル方法では難しかった低品質のプラスチックも資源に戻せる有望な技術であるが、コストやエネルギー消費の課題がある。従って、現状、ケミカルリサイクルされている廃プラスチックの比率は 4%に留まっており、更なるリサイクル率の向上が求められている。今後はサーマルリサイクルが ISO 基準ではリサイクルとして認められなくなる可能性も指摘されており、今後の技術革新や政策支援によって、より持続可能なリサイクルシステムの確立が期待される。

表 1.2 プラスチックケミカルリサイクルの分類^{1,2,3)}

技術分類	概要	生成物	対象プラスチック
熱分解（油化） Pyrolysis	無酸素状態で 300～600℃に加熱し、プラスチックを分解して油やガスを生成	合成油（パイロオイル）→石油精製プロセスまたはナフサクラッカーで再利用	PE、PP など
水素化分解（油化） Hydrogenation	水素を用いてプラスチックを低分子の化合物に分解し、石油化学原料を生成	軽油、ナフサ、ガスなど	雑多なプラスチックを含む複合材料
ガス化 Gasification	高温・高圧でプラスチックを分解し、水素や一酸化炭素を含む合成ガスを生成	合成ガス（CO、H ₂ ）→ 化学品や燃料の原料	雑多なプラスチックも処理可能
モノマーリサイクル Depolymerization	プラスチックをモノマー（原料の分子レベル）に分解し、再びプラスチックを製造する	PET（ポリエチレンテレフタレート）→ テレフタル酸とエチレングリコールに分解し、新たな PET を製造	PET、ナイロン、ポリウレタンなど

主な参考文献・出典：

1. 環境省（2023）「プラスチック資源循環促進法の概要」
2. 一般社団法人プラスチック循環利用協会（2024）「プラスチックリサイクルの基礎知識」
3. 経済産業省（2022）「資源循環経済政策の方向性」

1.4 容器包装プラスチックの油化技術の歴史と動向

1.4.1 油化技術の定義と目的

容器包装プラスチックの油化技術とは、廃プラスチックを無酸素状態で加熱し、熱分解によって油（熱分解油）を生成する化学的リサイクル手法である。生成された油をナフサ代替として石油化学原料（エチレン、プロピレン等）に再利用することで、資源循環と CO₂排出削減を実現することを目的としている。

1.4.2 油化技術の特徴と処理プロセス

熱分解は 300℃から 600℃の温度範囲で、酸素を遮断した環境下で廃プラスチックを分子レベルで分解し、原材料として再利用可能な状態にする技術であり、混合廃プラスチックの熱分解により、平均して 45-50%の油、35-40%のガス、10-20%の炭素が主な生成物として得られる。技術的課題として塩素、窒素、酸素、金属などの夾雑物質の除去が挙げられる。

1.4.3 日本における油化技術の歴史的経緯

油化技術は 1970 年代から研究が進められてきた。1970 年代のオイルショックを背景に注目を集めたが、その後の石油価格の下落により経済性が低下し、一時的に停滞した。

1990 年代に入ると、環境問題の深刻化により油化技術の研究が再び活発化した。1995 年(平成 7 年)6 月に「容器包装リサイクル法」(正式名称:容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律)が制定され、1997 年(平成 9 年)に一部施行、2000 年(平成 12 年)に完全施行となった。この法律では、家庭から排出される容器包装廃棄物について、消費者が分別排出、市町村が分別収集、事業者が再商品化(リサイクル)するという役割分担を明確にした。

2000 年代には、通商産業省(現:経済産業省)や民間企業による実証研究が本格化した。容器包装リサイクル法に基づき、PVC(ポリ塩化ビニル)を含む廃プラスチックの油化が「その他プラスチックの再商品化手法」として認定された。

1.4.4 代表的な実証施設

歴世礦油株式会社が運営する新潟プラスチック油化センター(2024 年 6 月より「新潟資源リサイクルセンター」に名称変更)が設立され、千代田化工建設、シナネンなどと連携して PVC を含む廃プラスチックの油化実証を実施した。同センターは 2000 年から営業運転を開始している。

また、新日鐵(現:日本製鉄)とクボタが連携し、立川市に油化実証設備を設置した。財団法人廃棄物研究財団と協力し、PVC を含む廃プラスチックの油化実験を実施した。

その他、三笠市や札幌市などでも油化施設が建設され、北海道を中心に実証が進められた。

表 1.3 過去に稼働していた廃プラスチックの主な受入施設とその能力

企業	所在地	処理能力
札幌プラスチックリサイクル	北海道札幌市	14,800t/年
歴世礦油新潟油化センター	新潟県新潟市	6,000t/年

主な参考文献・出典：

草川紀久（高分子環境情報研究所）「わが国のリサイクル関連制度と技術の最新動向」、工業材料（2000）

廃プラスチックの油化技術は、東芝方式とクボタ・歴世礦油方式の2方式に大別される。前者は、株式会社東芝がビーカーレベルから研究を行い、実用化した技術であり、後者は、(社)プラスチック処理促進協会の実証事業で開発した技術をベースにしている。

以下に各方式の技術の概要を示す。

表 1.4 東芝方式とクボタ・歴世礦油方式

方式	処理プロセス
東芝方式	<p>廃プラ→（脱塩素（300℃）→熱分解（400℃））→（冷却（原油相当）→蒸留）→数種類の生成油</p> <p>※（脱塩素→熱分解）プロセスが東芝オリジナルの技術。</p>
クボタ・歴世礦油方式	<p>廃プラ→（脱塩素（300℃）→熱分解（400℃））→（触媒→冷却）→数種類の生成油</p> <p>※（脱塩素→熱分解）プロセスは、東芝方式と考え方は同じ。熱分解した生成油の油質をゼオライト系の触媒を用いて上げる。</p>

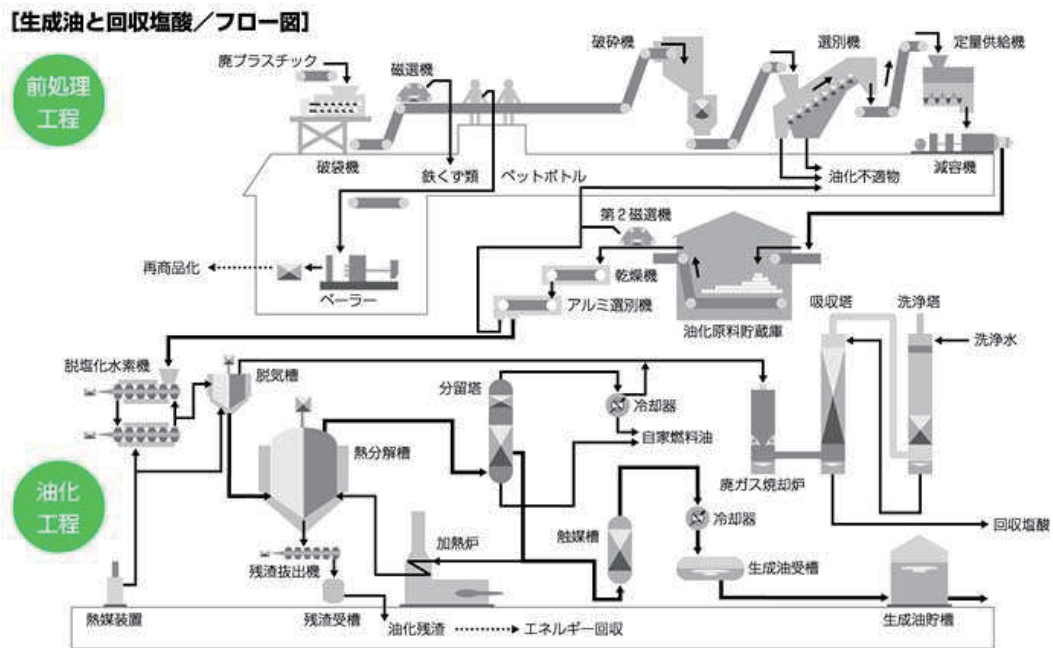


図 1.3 装置フロー図

主な参考文献・出典：

塩ビ工業・環境協会（2009）「塩ビのリサイクル」

<https://www.pvc.or.jp/contents/news/25-9.html>

1.4.5 国内企業の最近の動向(2020年代)

近年、循環型社会の実現に向けて、廃プラスチックを熱分解して得られた油（廃プラスチック熱分解油）をナフサクラッカーに投入するケミカルリサイクルルートが実用化されている¹⁾。

このケミカルリサイクルプロセスでは、マテリアルリサイクルが困難な異種素材や不純物を含む廃プラスチックを熱分解し、得られた熱分解油を既存のナフサクラッカーに石油由来ナフサと混合して投入することで、エチレン、プロピレンなどの石油化学基礎製品を生成することができる¹⁾。

三井化学株式会社は2024年3月より、株式会社CFPから調達した廃プラスチック熱分解油を大阪工場のクラッカーへ投入し、日本初の「バイオ&サーキュラークラッカー」として稼働を開始している²⁾。また、三菱ケミカルグループもENEOS株式会社と共同で、茨城事業所(鹿島)において年間2万トンという国内最大規模のケミカルリサイクルプラントを新設し、リサイクル生成油を石油精製装置およびナフサクラッカーにおいて原料として使用している³⁾。

このルートでは、マスバランス方式により、投入した廃プラスチック熱分解油の量に応じて、製造される化学品・プラスチックの一部をケミカルリサイクル由

来製品として認証することができる^{2,3)}。ISCC PLUS 認証などの国際認証制度に基づくトレーサビリティが保証されており、食品容器や化粧品ボトルなど、これまで品質や衛生面からリサイクル品の使用が困難であった用途においても、バージン材同等の品質でリサイクル由来の素材を適用することが可能となった^{2,3)}。

廃プラスチックの熱分解油化ケミカルリサイクルは、焼却処理と比較してライフサイクル全体での GHG 排出量削減が可能であり、化石資源の消費量の大幅削減にも寄与する。このように、従来の石油由来ナフサだけでなく、廃プラスチック熱分解油をクラッカーに投入する循環ルートの確立により、プラスチックのサーキュラーエコノミーが実現されつつある¹⁾。

主な参考文献・出典：

1. サステナビリティハブ (2023) 「廃プラスチックはどう処理する？注目のリサイクル方法『廃プラ油化ケミカルリサイクル』や環境への影響などを解説」, <https://sustainabilityhub.jp/>
2. 三井化学株式会社 (2024) ニュースリリース「廃プラ分解油によるケミカルリサイクル製品の製造開始」, <https://jp.mitsuichemicals.com/>
3. 三菱ケミカルグループ (2024) 「プラスチック油化ケミカルリサイクル」, <https://www.mitsubishichem-hd.co.jp/>
4. 環境省 (2023) 「容器包装リサイクル法とは」, <https://www.env.go.jp/recycle/yoki/>

1.4.6 欧州の廃プラスチック油化技術の現状と詳細

欧州のプラスチック廃棄物熱分解油市場は、2023年に2億7,020万ドル規模に達し、2024年から2032年にかけて年平均成長率(CAGR)4.6%で成長すると予測され、2032年までにドイツだけで8,500万ドルを超える市場規模になると見込まれている¹⁾。

1) ドイツ

ARCUS Greencycling Technologies: フランクフルト・アム・マインのHöchst工業団地にドイツ初の産業規模熱分解プラントを運営しており、年間約4,000トンの混合プラスチック廃棄物を処理している²⁾。

BASF ChemCycling プロジェクト: BASFはPyrum Innovations AGに1,600万ユーロを投資し、廃タイヤから熱分解油を生産する施設を拡張している。Pyrumは年間最大10,000トンのタイヤを処理可能である³⁾。

2) フィンランド

Neste: フィンランドのポルヴォー製油所で廃タイヤ由来の熱分解油を高品質な化学品・プラスチック原料に加工する試験運転を成功させた。2025 年中に完成予定の施設は、年間 150,000 トンの液化廃プラスチックを処理可能である⁴⁾。

3) オーストリア

OMV: オーストリアの Schwechat サイトに新たな熱分解化学リサイクルプラント「ReOil」を稼働させ、年間 16,000 トンの廃プラスチックを処理する能力を持っている⁵⁾。

4) イタリア

BlueAlp と RES: イタリア初の産業規模先進リサイクル施設を設立する契約を締結し、年間 20,000 トンの混合プラスチック廃棄物を処理・変換する予定である⁶⁾。

5) 米国

ExxonMobil は 2022 年 12 月からテキサス州ベイタウンで北米最大級の先進リサイクル施設を運営しており、年間 8,000 万ポンド（約 36,000 トン）の廃プラスチックを処理する能力を持っている⁷⁾。

表1.5 廃プラスチック熱分解技術の特徴

企業名	国	特徴・動向	出典
Plastic Energy	英国	商業プラントを複数稼働。熱分解油をShellなどに供給。	8)
Pryme	オランダ	処理能力4万トン/年の工場を稼働。2023年に注目の技術ベンチャー。	9)
Brightmark	米国	大規模油化施設を建設。廃プラから燃料・ワックスを生成。	10)
Mura Technology	英国	HydroPRS技術で水熱分解を活用。Dowと提携。	11)
Quantafuel	ノルウェー	熱分解油を再生プラ原料として供給。	12)
LG Chem / SK Geo Centric	韓国	ケミカルリサイクル技術の開発・実証を推進。	13)

主な参考文献・出典：

1. Global Market Insights (2024) "Europe Plastic Waste Pyrolysis Oil Market Size, Industry Analysis Report, 2024-2032", <https://www.gminsights.com/industry-analysis/europe-plastic-waste-pyrolysis-oil-market> (最終アクセス日：2025年11月20日)
2. ARCUS Greencycling Technologies GmbH (2023) "Company Overview", <https://www.arcus-greencycling.com/> (最終アクセス日：2025年11月20日)
3. BASF SE (2022) "BASF invests in Pyrum Innovations AG", Press Release, October 2022, <https://www.basf.com/>
4. Neste Corporation (2024) "Neste's chemical recycling capabilities", Sustainability Report 2023, <https://www.neste.com/>
5. OMV AG (2023) "ReOil - Chemical Recycling at OMV", Press Release, <https://www.omv.com/>
6. BlueAlp (2023) "BlueAlp and RES announce Italy's first industrial-scale advanced recycling facility", Press Release, <https://bluealp.nl/>
7. ExxonMobil Corporation (2022) "ExxonMobil starts operations at large-scale advanced recycling facility", Press Release, December 2022, <https://corporate.exxonmobil.com/>
8. Plastic Energy Ltd. (2024) "Our Technology & Projects",

<https://plasticenergy.com/>

9. Pryme B.V. (2023) "Pryme commissions 40,000 tonnes per year pyrolysis plant", Press Release, <https://pryme-cleantech.com/>
10. Brightmark LLC (2024) "Plastics Renewal", <https://www.brightmark.com/>
11. Chemical Week (2023) "Mura Technology and Dow Partner on Advanced Recycling", July 2023
12. Quantafuel ASA (2023) "Annual Report 2023", <https://www.quantafuel.com/>
13. LG Chem (2024) "Sustainability Report 2023"; SK Geo Centric (2024) "ESG Report 2023"

1.5 本実証業務の目的

廃プラスチック、特に容器包装用プラスチックのケミカルリサイクルプロセスの確立は化石資源使用量を削減し、循環経済社会を構築するために重要な課題である。選別・非選別のプラスチックを熱分解油化し、前処理工程、後処理工程を随伴し、ナフサクラッカーへの投入により、基礎化学製品を製造するプロセスは有効なリサイクル手法と考えられる。同プロセスにおいて、PE、PP、PS が主なりサイクル対象物質であるが、塩素系化合物やPET樹脂、無機、金属成分が夾雑物質として混在すると、忌避物質が生成するため、得られた熱分解生成油を直接ナフサクラッカーに投入することが不可能となる。過去の様々な研究から主な夾雑物質は把握できているが、製品に使用されるプラスチックの組成も年々変わってきており、石油化学プラントに投入するためには、改めて夾雑物質を精度良く分析する必要がある。また、その夾雑物の由来となるプラスチック製品を把握することでケミカルリサイクル不適合物の効率的・実効的な分別が可能となる。

人口密度が低い地域では、少量かつ分散的に排出される一般廃棄プラスチックを最も効率良く減容・運搬する方法として油化技術が有効と考えられ、経済性を確保するためには小型の油化装置を各地域に導入することが現実的である。小型油化装置での減容時にもナフサクラッカー投入前処理設備の効率化のために極力夾雑物質を除去することが求められる。

通常、一般廃棄プラスチックの油化によるケミカルリサイクルには、油化後、石油精製を経由して石油化学プラントに投入するルートと、直接石油化学プラントに投入する2つのルートが考えられる。前者の石油精製には夾雑物の多い原油を処理するため夾雑物の除去装置が常備されているが、後者の場合、除去装

置は無いため、夾雑物を含む廃棄プラスチック分解油をナフサクラッカーに投入するための前処理設備が必要となり、石油精製経由とは異なる、より精緻なケミカルリサイクル不適合物の特定及び分別・除去が必要となる。加えて地域に散在する嵩比重 0.1-0.2 の一般廃棄プラスチックをそのままケミカルリサイクルプラントへ輸送するには経済的・環境的負荷が大きく、排出元での減容化による効率的な運搬検討も併せて必要となる。

本業務は、排出元で油化した分解油を石油化学プラントで受入するための暫定的な成分等の数値目標の設定を行い、またケミカルリサイクル不適合物を分別・除去するための装置の開発検討及び社会実装の実現可能性を評価するための基礎データ収集のための実証試験を行うことを目的とする。

1.6 令和6年度の成果

令和6年度での本業務の目的は、排出元で油化した分解油を石油化学プラントで受入するための暫定的な数値目標の設定を行い、またケミカルリサイクル不適合物を分別・除去するための装置の開発検討及び社会実装の実現可能性を評価するための基礎データ収集のための実証試験を行った。主な実証内容は以下の通りである。

● 項目1 不適合物特定のための試料検体作成

最終目標： 前処理設備及び簡易分別機の開発検討のためのデータを取得するためのサンプルを作成する。

再商品化事業者から提供された廃プラスチック試料を手選別し、樹脂別の組成調査を実施した。PEはレジ袋が50%以上を占め、汚れの多いチューブ類が次に多かった。PPは菓子パン等の包装類が最多で、汚れの多いカップ類が続いた。PSは大半がトレイ、PETは容器が63%で、汚れの多いボトルも確認された。アルミニウム(A1)は主に菓子や冷凍食品の蒸着フィルム、塩素系プラスチックは大半がラップであった。

問題点として、アルミ蒸着フィルムの完全分類は手作業・機械選別とも不可能で、油化後の固体残渣に析出することが判明した。また、廃プラスチックには食品や洗剤等の残渣が付着し、特にPPチューブとPETボトルの液体残渣に含まれる食塩が、ケミカルリサイクル生成物への塩素溶出リスクとなる可能性が示唆された。さらに、直近20年でPET樹脂の割合が増加傾向にあり、今後の増加により容器包装プラスチックのマテリアルリサイクル比率50%以上の維持が困難になると考えられる。

● 項目 2 九州大学での不適合物特定分析

最終目標： 夾雑物化学物質の特定及びその由来となるプラスチック製品を特定する。

作成した 8 検体の油化後試料について、蛍光 X 線、FTIR、NMR、シンクロトロン放射光を用いて塩素含有量の定量と不純物特定を行った。

塩素含有化合物の分析では、手選別・光学選別を行った全試料で熱分解・油化後も塩素が検出され、含塩素化合物の完全除去は困難であることが判明した。ポリ塩化ビニル等を含む試料では塩素含有量が多かったが、調味料（塩分）添加では塩素濃度は増加しなかった。

熱分解・油化過程では、初期留分で塩素濃度が最も高く、中期・後期で減少し、光学選別試料の後期留分では 10ppm 以下まで低減した。シンクロトロン放射光分析により、生成油中の塩素は有機系塩素として存在し、塩化物イオンは検出されなかった。一方、熱分解残渣には無機系塩素が検出された。

PET を含まない試料からも含酸素化合物が生成し、PET 含有量増加によりカルボン酸が若干増加した。金属・無機成分は生成油中には検出されず、Ca、K、Si、Al 等が残渣に含まれていた。これらの結果から、熱分解過程の制御により生成油中の塩素濃度を低減できる可能性が示された。

● 項目 3 塩素・テレフタル酸対策実証テスト

最終目標： 排出元での分別及び前処理設備で、夾雑物質を除去する方策を確立する。

項目 2 の分析結果を踏まえ、塩素、テレフタル酸除去方法について検討を行った。光学選別を行い、PVC、PET を除去することにより、塩素含有化合物やテレフタル酸の生成を抑制できることを実証した。また、塩化水素のトラップを熱分解装置に装填し、その有効性を示すことができた。

● 項目 4 LCA の検証・評価

最終目標： 再エネを使用する設計への変更等エネルギー起源 CO₂ を削減する方策を検討し、処理フロー設計を行う。

一般廃棄プラスチック排出元からの効率的な運搬を行うための手段として排出元近郊に小型油化装置を導入するシステムを想定し、石油化学プラント（ナフサクラッカー）投入前の前処理までをシステム境界（バウンダリ）としてライフサイクルアセスメントを実施した。廃棄プラスチック輸送、破碎・選別工程、熱分解工程、生成粗油輸送などの各工程について精査し、現時点の想定では、現状よりもエネルギー起源、非エネルギー起源共に削減が可能との結果が示された。

1.7 令和7年度事業の実施内容

(1) 石油化学プラントでの受入技術検討及び実証

①不適合物前処理技術調査（クラサスケミカル（株）、九州大学）

令和6年度に実施した不適合物低減対策(小型油化装置での塩素、テレフタル酸除去実証)にて得られたサンプル油について、石油化学プラントでの使用に適合しない夾雑物の分析を実施すること。

得られた夾雑物分析結果を基に、石油化学プラントでの使用に適合しない夾雑物に対する処理技術の調査を行うこと。

具体的には塩素分、含酸素化合物、炭化水素中の不飽和分等の処理技術、設備に関する技術調査を実施し適用可能技術を調査、選定すること。

②石油化学プラントでの前処理プロセスの概略設計（クラサスケミカル（株））

①の調査結果に基づき、サンプル油を石油化学プラントで使用するために必要な不純物対策設備のプロセスフローを構築すること。

また、構築したプロセスフローにおけるマテリアルバランス、エネルギーバランスの検討、概略設備設置コストを調査し、前処理プロセスの廃プラスチックリサイクルコストへの影響を評価すること。その際、前処理プロセスでの夾雑物除去性能のコストの影響を評価し、廃プラスチック分別目標に反映すること。

(2) LCAの検証・評価

①ナフサクラッカー投入前処理のインベントリデータの検討（丸紅（株））

本実証業務では、一般廃棄プラスチックを排出元において小型油化装置で油化したものを、大分コンビナートへ輸送し原料として利用することを想定している。(1)を通じて検討予定であるコンビナート内で生成粗油をナフサクラッカーに投入する際に必要な前処理装置の概要を踏まえ、前処理プロセスのインベントリデータを検討すること。令和6年度の成果から、少なくとも水素添加反応が必要であると想定されているため、当該反応に関する文献やクラサスケミカル株式会社へのヒアリング等に基づき(クラサスケミカル株式会社大分コンビナートでのヒアリング含む(計4回程度))、生成粗油の性状を考慮した値を検討すること。

②エネルギー由来CO₂を削減するのに必要な更なる対策案の検討（丸紅（株））

令和6年度の成果及び①の検討結果を踏まえて、本実証業務とベースラインシナリオそれぞれのCO₂排出量と削減量を再算定すること。その際、年間約2万トン程度のケミカルリサイクル原料油(前処理後の生成油)等の製造を前提とする。また、エネルギー由来CO₂の削減に向けて、とり得る対策を検討すること。

表 1.6 令和 7 年度事業の各項目の目標

	項目	採択時の技術の状況	令和 7 年度の目標	最終目標
1	石油化学プラントでの受入技術検討及び実証	廃プラスチック熱分解油中で石油化学プラントでの受入に適合しない夾雑物は凡そ特定されているが、石油化学プラントへの投入可否までは未検討である。	令和 6 年度事業で得られた廃プラスチック分解油の夾雑物分析結果を基に、石油化学プラントで使用するのに適合しない夾雑物の対策、処理技術の調査し、処理プロセスの基礎設計を実施する。	令和 6 年度事業で得られた廃プラスチック分解油の夾雑物分析結果を基に、石油化学プラントで使用するのに適合しない夾雑物の対策、処理技術の調査し、処理プロセスの基礎設計を実施し、石油化学プラントの品質要求を満たすための技術的要件と経済的条件を体系的に整理することで、一般廃棄プラスチックのケミカルリサイクルの実現に資する。
2	LCAの検証・評価	排出元から化学プラントに投入するまでの工程に係るLCA分析結果はない。	令和 6 年度事業で得られた結果に加え、石油化学プラントでの前処理プロセスの基礎設計の検討を踏まえて令和 6 年度事業で報告のあったLCA分析内容を更新する。また、エネルギー起源排出量をより削減する方策を検討する。	令和 6 年度事業で得られた結果に加え、石油化学プラントでの前処理プロセスの基礎設計の検討を踏まえてエネルギー起源排出量をより削減する方策を示す。

表 1.7 本事業の全体目標

	項目	採択時の技術の状況	令和7年度の目標	最終目標
0	全体目標	<p>一般廃棄プラスチックの熱分解については、過去の研究から問題となる夾雑物はおよそ特定されているものの、時を経てプラスチックごみの組成も変わってきていることから現状分析は必要である。また小型分散型装置を利用した効率的な収集運搬、石油精製を経ない石油化学プラントへの投入は未検討である。</p>	<p>・不適合物を低減させた熱分解油を石油化学プラントに投入可能なレベルまで精製するために必要な前処理設備の開発検討及びその実現可能性を明確化する。</p> <p>・原油からナフサを製造した場合と、廃プラスタックからナフサ代替原料を製造した場合のケースにつき、前処理設備の検討と並行してLCA分析を通じてCO₂削減への貢献を定量化する。</p>	<p>・クラサケケミカル(株)にて、不適合物を低減させた熱分解油を石油化学プラントに投入可能なレベルまで精製するために必要な前処理設備の開発検討及び社会実装への展開可能性を明確化する。</p> <p>・原油からナフサを製造した場合と、廃プラスタックからナフサ代替原料を製造した場合のケースにつき、前処理設備の検討と並行してLCA分析を通じてCO₂削減への貢献を定量化する。</p>

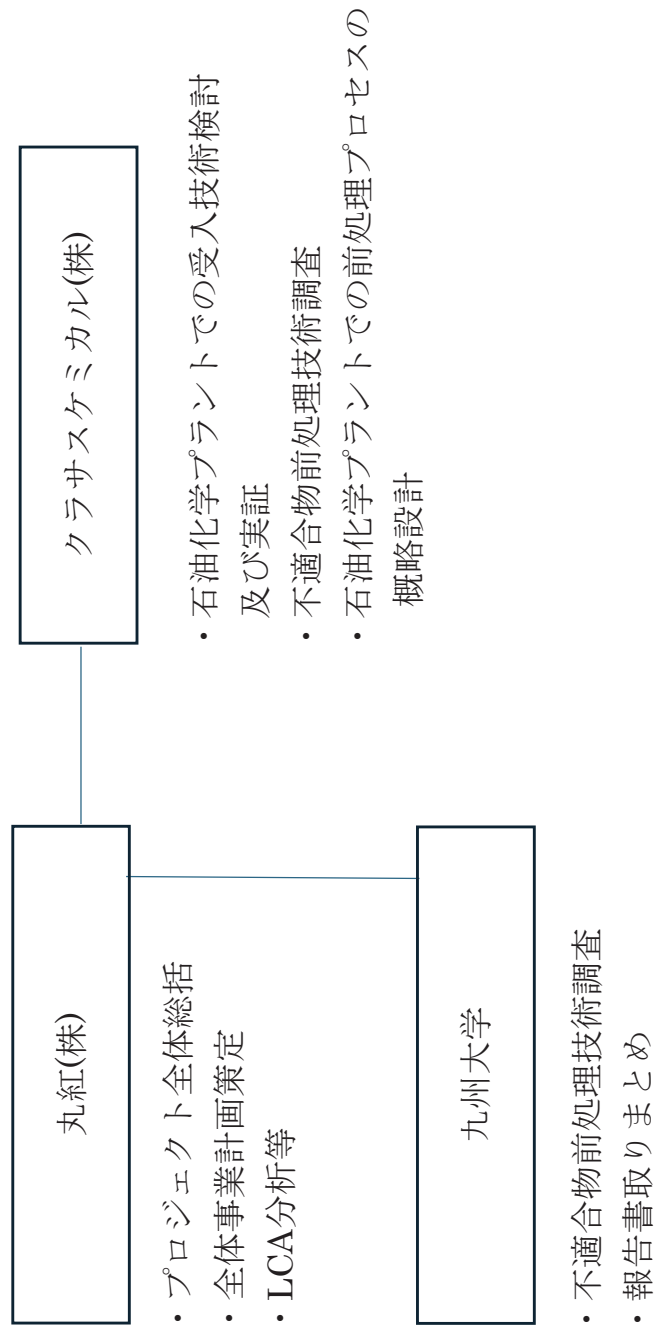


図 1.4 業務実施体制図

第 2 章

第 2 章 不適合物前処理技術調査（クラサケミカル（株）、九州大学）

本章では、廃プラスチック熱分解油に含まれる不適合物質の分析結果および前処理技術の調査結果について述べる。令和 6 年度事業で得られた 8 種類の油化試料について、九州大学にて蛍光 X 線、FTIR、NMR 等を用いた夾雑物分析を実施し、石油化学プラントでの使用に適合しない物質を特定した。また、クラサケミカル（株）において、これらの夾雑物に対する処理技術の調査を行い、適用可能技術として水素化プロセスを選定した。

令和 6 年度の事業では、廃プラスチックを手選別・光学選別して 8 種類の試料を作成し、油化後の生成物を分析した。これらの結果に基づき、廃プラスチックの熱分解油化から石油化学プラントでの処理工程において不適合物質となる元素について調査を行った。塩素や無機系元素に加え、有機成分について、サンプル油に含まれる石油化学プラントでの使用に適合しない夾雑物の分析を実施し、得られた分析結果を基に、夾雑物に対する処理技術の調査を行った。クラサケミカル（株）においては、九州大学が行った夾雑物分析を基に塩素分、含酸素化合物、窒素化合物、炭化水素中の不飽和分等の処理技術、設備に関する技術調査を実施した。

2.1 目的

九州大学では、PE、PP、PS を熱分解・油化し、生成油をナフサクラッカーに投入して基礎化学製品に変換するプロセスを開発している。しかし、このプロセスには以下の技術的課題が存在する。

- ① ポリ塩化ビニル（PVC）やポリ塩化ビニリデン（PVDC）の混在により、塩素成分が他の有機成分と反応して含塩素化合物を生成し、油化成分の性状に悪影響を及ぼす。
- ② PET の多量混在により、テレフタル酸や安息香酸が大量に生成され、熱分解装置の配管に固着・堆積して閉塞を引き起こす
- ③ 微量の無機成分や金属種の夾雑物が後段処理工程での触媒劣化の原因となる。

これら課題解決のため、含塩素化合物やカルボン酸類の定量分析技術の確立と、これら問題物質の生成抑制技術の開発が必須である。

本研究では、PE、PP、PS、PVC、PVDC などの他種のプラスチック成分が混在した試料、及びこれらに NaCl（塩化ナトリウム）を添加した試料について、油化後の検体に含まれる微量無機成分の分析を行った。令和 6 年度では蛍光 X 線法などを用いた生成油検体中の無機成分分析を行い、塩素成分を定量するとともに、金属種の成分が ppm レベルで存在していないことを報告した。令和 7 年度は、誘導結合プラズマ発光分光分析装置（ICP-OES）を用い、ppb レベルでの無機

成分分析を行った結果を報告する。また、各分解生成油検体中の有機化合物成分の分析を行い、塩素、酸素、窒素含有生成物を同定するとともに、これらの成分が廃プラスチックの熱分解過程に及ぼす影響について明らかにした。

2.2 各種検体の分析手法

表 2.1 に、本事業で用いた分析手法とそれぞれから得られる情報を整理した。塩素含有量の測定には蛍光 X 線分析法が有効であり、固体・液体試料の両方に対して簡便に適用できる。塩化物イオンの定量にはイオンクロマトグラフィーが優れた精度を示す。C-C1 結合を有する有機系塩素化合物の構造解析には、NMR や FTIR が有効である。本事業で行った分析手法の特筆すべき点は、シンクロトロン放射光を用いた C1 の K 吸収端 XANES 法の導入である。この手法により、従来困難であった有機系塩素化合物と無機系塩素化合物の識別が可能となり、廃プラスチック油化過程における塩素の化学形態を詳細に解明することができた。これらの分析手法を組み合わせることで、塩素成分の総合的な評価が実現した。

令和 7 年度は、さらに、GC-MS（ガスクロマト質量分析計）による廃プラスチック熱分解生成油の分析を行った結果について報告する。廃プラスチックの熱分解により生成される熱分解油は、PE、PP、PS などの混合廃プラスチックを 300～400℃で脱塩素・熱分解して得られる複雑な炭化水素混合物である。GC-MS を用いることで、この複雑な混合物中に含まれる個々の炭化水素成分（芳香族炭化水素、脂肪族炭化水素など）を分離・同定し、その組成比を定量的に把握することができる。これにより、熱分解油がナフサ代替原料として石油化学プロセスに適用可能かどうか科学的根拠をもって判断することが可能となる。

石油化学用ナフサは、炭素数 5～12 程度の炭化水素混合物であり、特定の沸点範囲と組成プロファイルを持つ。GC-MS により廃プラスチック熱分解油の炭化水素組成と分子量分布を詳細に分析することで、石化由来ナフサとの組成比較：熱分解油が石油由来ナフサと同等の組成プロファイルを持つかを検証する。クラッカーへの投入適性を判断するため、軽質成分（C5～C8）と重質成分（C9～C12 以上）の比率を把握し、既存のナフサクラッカー設備での処理可能性を判断する。

廃プラスチックには、その製造・使用過程において以下に示す様々な金属元素が混入する可能性がある。

- ・ 添加剤由来の金属：熱安定剤（Sn、Pb、Ba、Cd、Zn 系）、顔料・着色剤（Ti、Fe、Cu、Cr、Cd、Pb 系）、充填剤（Ca、Mg、Al 系）、難燃剤（Sb、Br 系）
- ・ 汚染由来の金属：廃プラスチック収集・選別過程での土壌、金属片、異物混入による Fe、Al、Cu、Zn、Ni など
- ・ 包装内容物由来の金属：食品・化粧品容器からの Ca、Mg、Fe、Zn、Na など ICP-OES（誘導結合プラズマ発光分光分析法）を用いることで、これらの金属

元素を一斉に定性・定量し、熱分解生成油中の金属不純物プロファイルを包括的に把握することができる。特に、廃プラスチックは原料性状が変動しやすいため、バッチごとの金属元素組成の変動を監視することが重要である。

これらの成分が生成油に微量含まれていた場合、クラッカー設備に悪影響を及ぼす可能性がある。したがって、ICP-OES を用いて、熱分解生成油中の微量無機成分の分析を行った。

2.2.1 蛍光 X 線による元素分析

蛍光 X 線分析は、試料に X 線を照射した際に発生する特性 X 線を検出することで、含有元素の定性・定量分析を行う手法である。廃プラスチック熱分解生成油の分析において、この手法は特に以下の点で優れている。

第 1 に、非破壊分析であるため、貴重な試料を損なうことなく繰り返し測定が可能である。第 2 に、前処理が簡便であり、液体試料をそのまま、あるいは簡単な希釈のみで分析できる。第 3 に、複数元素の同時分析が可能であり、短時間で包括的な元素組成情報が得られる。

廃プラスチックの熱分解処理は、プラスチック廃棄物を化学的に分解して燃料油や化学原料として再利用可能な油分を生成する重要なケミカルリサイクル技術である。この熱分解によって得られる生成油の品質管理と安全性確保において、蛍光 X 線分析 (XRF) は極めて重要な役割を果たす。

熱分解生成油中には、原料プラスチックに由来する様々な元素が含まれる可能性がある。特に塩素、硫黄、リンなどの元素は、燃料として使用する際の腐食性や環境への影響を左右する重要な指標となる。XRF により、これらの元素濃度を迅速かつ正確に把握することで、生成油の品質を適切に評価し、必要に応じて精製プロセスの最適化を図ることが可能である。また、重金属類 (鉛、カドミウム、水銀、クロムなど) の検出も可能であり、これらの有害元素の含有量を監視することで、環境規制への適合性を確認し、安全な再利用を保証することができる。

2.2.2 誘導結合プラズマ発光分光分析法 (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry, ICP-OES)

ICP-OES は、無機元素の定性・定量分析に用いられる代表的な分析手法である。アルゴンプラズマ (約 6,000~10,000K) を励起源として使用し、霧状にした溶液試料をプラズマに導入することで、試料中の金属元素や半金属元素が各元素固有の波長の光を放出する。この発光線を検出することで、波長から元素の定性分析を、発光強度から元素の定量分析を行う。

ICP-OES の主な特徴として以下が挙げられる。

1. 多元素同時分析:同一条件で約 70~75 元素を迅速に測定可能。
2. 広いダイナミックレンジ:検量線の直線範囲が 5~6 桁と極めて広く、ppb から ppm レベルの微量元素から主成分元素まで同時に分析できる。
3. 高い励起温度:アルゴン ICP の励起温度が 5,000~7,000K と高温であり、多くの元素を効率よく励起できる。原子吸光法の空気-アセチレン炎(2,000~3,000K)と比較して、希土類元素や B、P、S など難励起元素の分析も可能。
4. 化学干渉の少なさ:プラズマが高温であり、不活性ガス(アルゴン)を用いるため、酸化物や窒化物が生成しにくく、化学干渉がほとんどない。
5. 有機溶媒試料への対応:適切な試料導入系を用いることで、オイルや有機溶媒を含む試料の直接分析が可能。

2.2.3 ガスクロマトグラフ質量分析計(Gas Chromatograph-Mass Spectrometer, GC-MS)

GC-MS は、ガスクロマトグラフ(GC)と質量分析計(MS)を組み合わせた分析装置である。複数の成分で構成される試料が、まずガスクロマトグラフで分離され、次に分離された成分毎に質量分析計へ導かれ、質量スペクトルを得ることで成分の定性(同定)および定量を行う。

測定方法として、試料の気化と分離(GC 部):試料を加熱して気化させ、不活性のキャリアガス(ヘリウムなど)に運ばれながらキャピラリーカラム(ガラス製の細い管)に送られる。カラム内部の固定相との親和性の違いや沸点の違いを利用して、ガス中の成分を分離する。

分離された各成分は質量分析計でイオン化され、質量数(m/z)に応じて検出される。電子イオン化(EI)法により、分子イオンやフラグメントイオンが生成され、これらのマススペクトルパターンから分子の構造情報を得る。

得られたトータルイオンクロマトグラム(TIC)やマススペクトル(MS)から、60~70 万件の膨大なライブラリを活用して迅速に有機成分の同定および定量分析が可能となる。

2.2.4 GC-FID

GC-FID (ガスクロマトグラフィー水素炎イオン化検出器)は、混合物中の有機化合物を分離・定量する分析装置である。その動作原理は、分離段階と検出段階の2つから成る。まず分離段階では、試料を気化させてキャリアガス(通常はヘリウムや窒素)により運びながらカラム内を通過させる。この際、化合物は沸点や極性の違いにより異なる速度で移動するため、時間差で分離される。続く検出段階では、分離された化合物を水素炎で燃焼させ、生成したイオンを電極で捕集する。イオン電流の強さは炭素数にほぼ比例することから、高感度で定量的な分

析が可能となる。

廃プラスチックの熱分解油に含まれる炭化水素の組成、特に C5 から C20 程度の範囲の成分を詳細に把握することで、ガソリン留分、灯油留分、軽油留分の割合を正確に評価し、燃料としての適性を判断できる。また、プロセス最適化の面では、温度、触媒、反応時間といった分解条件による生成物分布の変化を定量的に追跡することで、目的とする留分を最大化する条件の探索が可能となる。

表 2.1 各種分析方法

分析手法	特徴	本事業での用途	備考
蛍光 X 線分析法	特性 X 線の分析による元素の定性・定量	塩素濃度の定量	固体、液体試料ともに可
イオンクロマトグラフィー	各種陰イオンの分離・定量	塩化物イオンなどの定量	液体(水系)試料
核磁気共鳴分光法	C1 種の核磁気共鳴スペクトル	塩素成分の化学状態の解明	^1H , ^{13}C -NMR
赤外吸収分光法	C-Cl 結合、C=O 結合などの特性振動スペクトル	カルボン酸類の同定と定量	生成油中のカルボン酸類の定量
ラマン分光法	Raman 振動の分析	炭化物種の分析	固体残渣の分析
ガスクロマトグラフ質量分析	化学物質の同定	生成油中の炭化水素の同定	有機分子の同定
ガスクロマトグラフィー	化学物質の定量	生成油中の炭化水素の定量	有機分子の定量
シンクロトロン放射光	X 線吸収スペクトル	塩素の化学状態分析	固体、液体試料ともに可
ICP-OES 誘導結合プラズマ発光分光分析法	微量無機成分の定性・定量分析	生成油中の微量の夾雑物質の分析	試料の前処理が必要

2.3 試料検体

2.3.1 廃プラスチックの組成分析と試料作成

令和 6 年度では不適合物特定のための試料検体作成を行った。再商品化事業者から提供された試料検体を人為的に手選別し、PE、PP、PS のみの試料、夾雑

物質を含む 5 試料、及び選別、非選別試料を作成した。その組成調査結果を表 2.2 に示す。

表 2.2 廃プラスチックに含まれる素材の組成

プラスチック種別	重量/kg	割合	
		ゴミあり	ゴミなし
PE	7.01	17%	20%
PP	8.56	21%	25%
PS	5.6	14%	16%
アルミ蒸着	2.02	5%	6%
PET	8.39	21%	24%
PVC	1.11	3%	3%
PA	0.07	0%	0%
複合	1.33	3%	4%
不明	0.23	1%	1%
ゴミ	6.04	15%	0%
合計	40.36	100%	100%

- 1) PE はレジ袋が 50%以上。汚れが多く付着するマヨネーズ等のチューブ類が 2 番目に多く確認された。
- 2) PP は菓子パン等の包装類が最も多く、重量だけでなく、数量も多く確認された。汚れが多く付着するカップ類が 2 番目に多かった。
- 3) PS は大半がトレーであった。
- 4) アルミ蒸着は、蒸着フィルムが大半であった。お菓子や冷凍食品の包装フィルムが主であった。
- 5) PET では、容器が 63%で最も多く、卵パックやキムチパック等の容器が多く確認された。また、焼肉のたれやドレッシング等の汚れが多いボトルも確認された。
- 6) 塩素系プラスチックは大半がラップであった。
- 7) 複合材としては、ナイロンを含む複合材（柔軟剤の詰め替え容器等）が半分を占めた

- 8) アルミ蒸着フィルムを完全に分類することは、手作業・機械選別によらず不可能であり、混入した Al は油化後の固体残渣内に析出した。特に、機械選別では多量の Al 蒸着フィルムが存在した。
- 9) 廃プラスチックには食品や液体調味料、洗剤等の残渣の付着がみられた。とりわけ、PP のチューブ及び PET のボトルには液体残渣が付着していた。これらの残渣には食塩が含まれており、ケミカルリサイクルによる生成物に食塩由来の塩素が溶出する可能性が示唆される。
- 10) 直近 20 年において、廃プラスチックに含まれる PET 樹脂の割合は増加傾向にあり、PET 樹脂の割合が今後更に増えると、容リプラスチックからのマテリアルリサイクルの比率を 50%以上に保つことが難しくなると考えられる。

以上の結果に基づいて、8つの混合廃プラスチック試料を作成した。

表 2.3 作成した試料中の組成

	素材	実測値	素材	実測値	素材	実測値	素材	実測値	総重量
		(kg)		(kg)		(kg)		(kg)	(kg)
試料①	PE	3.30	PP	4.00	PS	2.60			9.90
試料②	PE	2.50	PP	3.05	PS	2.00	PET	2.49	10.04
試料③	PE	3.20	PP	3.91	PS	2.56	PVC /PVDC	0.30	9.97
試料④	PE	3.25	PP	3.96	PS	2.59	PA	0.20	10.00
試料⑤	PE	3.15	PP	3.84	PS	2.51	調味料		9.50
試料⑥	PE	3.12	PP	3.81	PS	2.49	アルミ 蒸着	0.60	10.02
試料⑦	選別 後 PE	5.00	選別 後 PP	5.00	-	-	-	-	10.00
試料⑧	混合 プラ	100%	-	-	-	-	-	-	10.00

2.3.2 油化試料検体の作成

本事業では、株式会社エコポート九州の協力の下、自治体からの容器包装用プラスチックを種々の方法で選別した後、トスミック株式会社において熱分解・油化を行った。各生成油の調製過程について表 2.4 に示す。試料①～⑥について

は、未選別の容器包装用プラスチックを手選別により PE、PP、PS、PET、PVC、PVDC、PA に分別した後、6 種類の試料を作成した。株式会社エコポート九州で光学選別した試料は試料⑦、未選別試料は⑧である。

各試料ともに、試料量は 10 kg とし、熱分解炉では 300℃から 400℃、450℃まで昇温させ、初期留分、中期留分、後期留分の 3 種類の生成油を入手した。

表 2.4 本事業で生成した廃プラ分解油の種類とその性質

試料	選別方法
①	PE、PP、PS のみを熱分解
②	試料①に PET を添加
③	試料①に塩素系プラスチックを添加
④	試料①にポリアミド系プラスチックを添加
⑤	試料①に調味料（市販のソース）を添加
⑥	試料①にアルミ蒸着フィルムを添加
⑦	株式会社エコポート九州にて光学選別
⑧	未選別試料

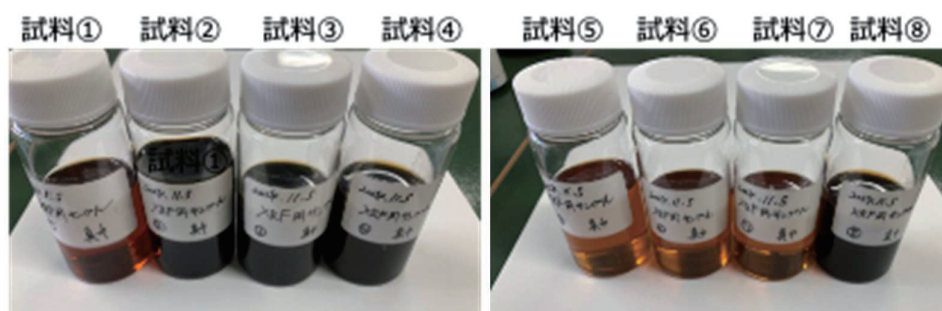


図 2.1 油化試料検体

2.4 油化試験で得られた分解油の化学物質の分析結果と考察

2.4.1 油化後の生成油の元素分析

未選別の廃プラスチックを熱分解して得られた生成油（試料⑧）の蛍光X線スペクトルではCl、Sの明瞭なピーク及びSiの微小なピークが観測されたが、油化前の粉体試料にて観測された無機成分（Ca、K、Fe、Ti）は検出されなかつ

た。本研究で使用した蛍光X線分析装置では、これらの元素の検出限界は1-10 ppm程度であり、これらの元素が混入していたとしても数ppm以下のレベルであると考えられる（表2.5）。

表 2.5 検出された元素の濃度と形態について

元素	油中濃度	形態	由来(推定)	備考
Cl	3500 ppm (未選別) 270 ppm (選別)	有機塩素 1-フェニル-1-クロロエタン 2-クロロ-2-メチルペンタン 等	・PVC の熱分解で HCl 生成 ・HCl がオレフィンと反応	-
O	2.4% (未選別) 1.1% (選別)	アルデヒド、ケトン、アルコール、アセトフェノン、ベンズアルデヒド 等	・残存酸素による部分酸化 ・PET 等含酸素プラ	-
N	~0.12%	アミド、シアノ化合物、シアノベンゼン、ε-カプロラクタム等	・ナイロン、ウレタン、ABS 等の熱分解により生成	-
S	76 ppm (未選別) 23 ppm (選別)	SO ₄ ²⁻	・エラストマー等の熱分解により生成	-
Hg	8.1 ppb	-	-	-
Si	~数 ppm サンプルにより変化	-	・タルク、エラストマー等の熱分解により生成	含有量 監視継続

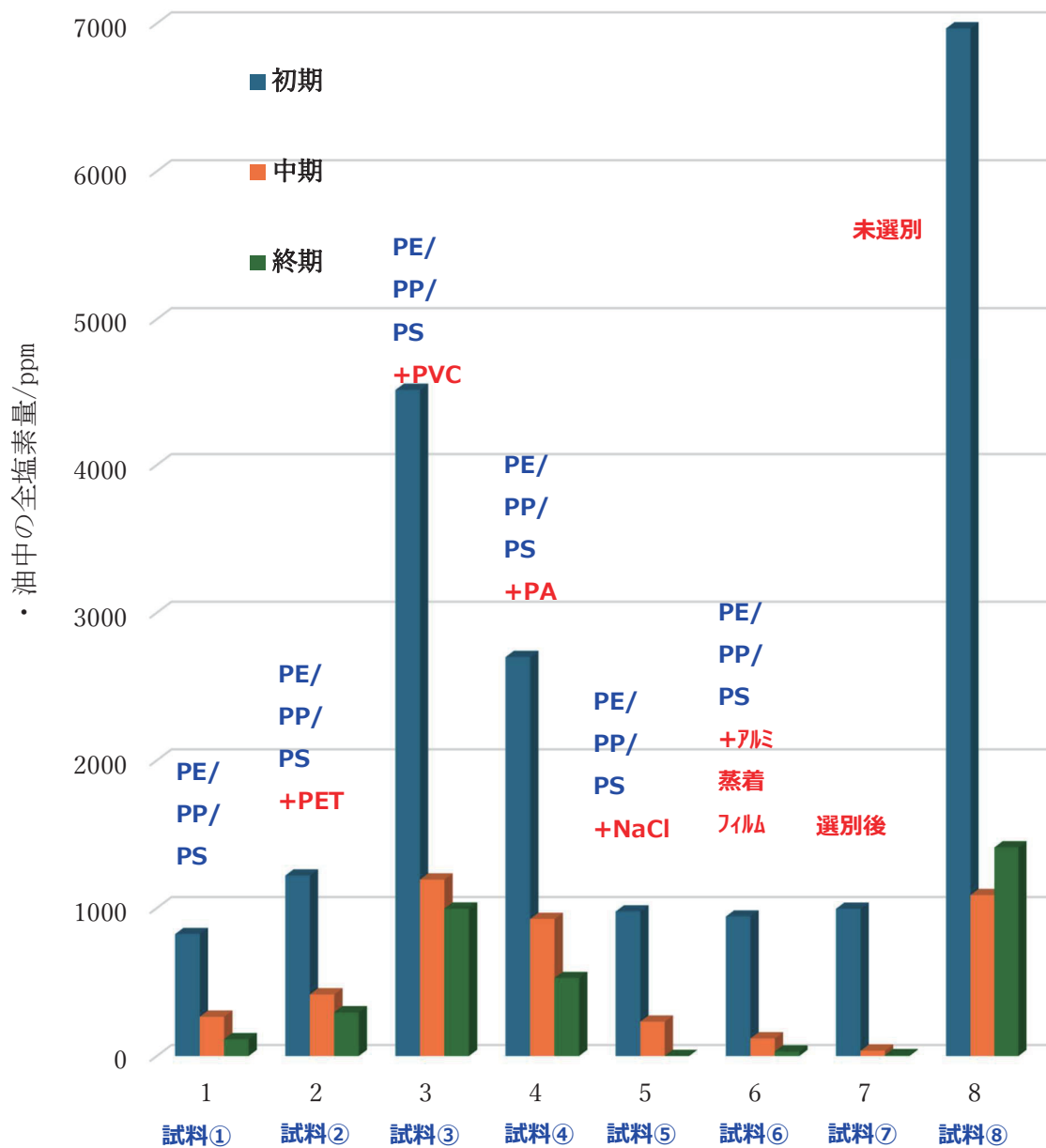


図2.2 各種生成油に含まれる塩素成分の量

試料①：PE/PP/PP 試料②：PE/PP/PP/PET

試料③：PE/PP/PP/PVC/PVDC 試料④：PE/PP/PP/PA

試料⑤：PE/PP/PP+調味料（ソース） 試料⑥：PE/PP/PP+アルミ蒸着フィルム

試料⑦：エコポート九州にて光学選別 試料⑧：未選別

熱分解過程では、廃プラスチック中に含まれる高分子成分が分解されて気化した後、冷却されて液化する。この過程において、沸点の低い金属、無機成分

は気化せずにリアクタに残存する。実際に、熱分解実験後のリアクタ内の残渣には多種の金属、無機成分が検出された。一方、有機系の塩素は、熱分解過程において塩素ラジカルなどを経由して、比較的 low molecular weight の含塩素化合物に変換され、気化、液化を通して油化試料中に混入する。塩化水素や塩素ガスは液化せずにオフガスとして排出される。硫黄種としては、 H_2S や SO_2 として気化された後、冷却後に油化試料に添加されると考えられる。

表2.6 検出された元素(主に金属、無機系元素)

元素	油中濃度	備考
Ti	< 5 ppb	HCl 等による配管成分等からの金属溶出の可能性
Cr	< 5 ppb	
Fe	~ 50 ppb	
Cu	< 5 ppb	濃度レベルからして廃プラからの積極的な混入ではないと推測
Zr	< 5 ppb	
Ca	~ 1.0 ppm	
Na	~ 1.0 ppm	
Mg	~ 0.1 ppm	
Al	~ 0.1 ppm	
K	~ 1.0 ppm	
P	未検出	-
Br	未検出	-
Sn	未検出	-
Sb	未検出	-
Pb	未検出	-

ICP-OESにより検出された金属種、無機成分を表2.9に示す。第四周期の遷移金属には、超純水の値と比べて有意な数値が見られたが、その濃度はいずれも ppb レベルである。最も高い値を示したFeは、環境水中に含まれているとともに、熱分解装置の部材、配管（主にステンレス鋼）に含有されており、コンタミネーションもしくは、塩化水素とステンレス鋼との反応に由来する可能性が

ある。Ti, Cr, Cu, Zrなども極微量検出されているが、いずれも5 ppb以下のレベルと低い値に留まった。これらも同様に熱分解装置の配管部材の成分であり、同様に、塩化水素とステンレス鋼との反応によると考えられる。一方、Sn, Sb, Pbなどの金属種もICP-OESでは検出されなかった。

比較的、高濃度で検出された成分として、Na, Mg, Al, Caが挙げられる。これらはいずれも表2.7の通りプラスチックの成分として利用されているが、油化前の試料検体中にはNa, Mgが検出されなかった。Al, CaはPE, PP, PS, PETの試料中に検出された。これらの元素は一般的に環境水、水道中にも含まれており、装置や容器の洗浄工程でコンタミネーションされた可能性がある。Zn, Pも油化前の試料中で検出されたが、これらは熱分解生成油中には検出されず、残渣中に含有されることがわかった。

表2.7 プラスチックに用いられる元素

元素	用途・役割	代表的な化合物例	粉碎後のプラスチック試料検体中の有無
Na	核剤、透明化剤、安定剤	リン酸エステルNa塩、安息香酸Na	未検出
Mg	滑剤、安定剤	ステアリン酸Mg	未検出
Al	顔料、核剤	酸化アルミニウム、安息香酸Al塩	検出
Ca	充填剤、滑剤、安定剤	炭酸カルシウム (CaCO ₃)、ステアリン酸Ca	PE, PP, PS, PET 試料中で検出
Zn	安定剤、紫外線吸収剤	Zn系光安定剤	PE, PP 試料中で検出
P	酸化防止剤、難燃剤	Irgafos®168などのリン系添加剤	PP, PS 試料中で検出
Cu	顔料	フタロシアニン銅 (青色顔料)	未検出
Sb	難燃剤	三酸化アンチモン (PETなどで使用)	未検出

2.4.2 油化後の生成油の有機成分分析

(1) 標準物質

標準物質としてGL-Science 炭化水素混合試料 ヘキサン溶液を用い、GC-MS、GC-FIDにより分析を行った。同試料は、炭素含有量XからXまでの直鎖アルカンを含み、n-ヘキサンを溶媒とする試料である。このうち、n-デカン (n-C10)、(n-C20)、(n-C30)の量は10 μ L、それ以外の炭化水素は5 μ Lである。本研究で使用しているカラムは非極性であり、概ね沸点の順番で溶出するため、これらの炭化水素の分子量と沸点の関係を理解すれば、廃プラスチック分解油の定性・定量分析も容易となる。

各直鎖アルカンの沸点を図2.3に示す。軽質ナフサ成分(炭素数5~12)は沸点約35~80°Cの範囲、重質ナフサ成分(炭素数6~12)は沸点約80~180°Cの範囲、軽油成分(炭素数8~24)は沸点約180~370°Cの範囲、重油(炭素数16~40)は沸点約300°C以上の範囲であり、この範囲の有機成分を定性・定量することが重要である。

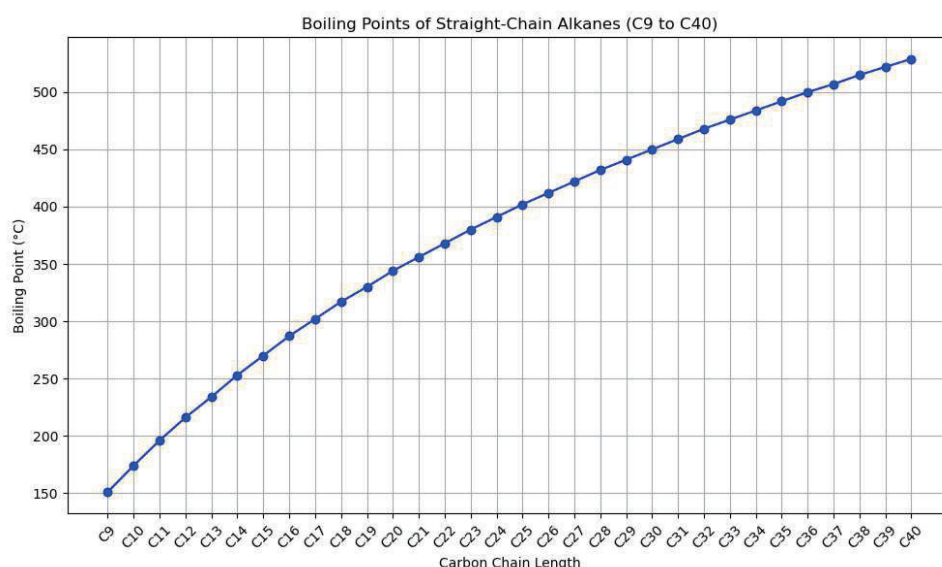


図2.3 アルカンの炭素数と沸点の関係

分析の結果を図2.4に示す。GC-MS、GC-FIDのチャートともに良好な分離性を示し、沸点の低い順に検出されている。GC-FIDチャートにおける各成分の面積値を同じく図2.4に示す。含有量が100 μ gの炭化水素は面積値が10,000程度であり、50 μ gの炭化水素は5,000程度となり、十分な定量性を示している。なお、n-C28、n-C29、n-C30はこれらの値からのズレが大きい。これは、カラム温度の上昇によりベースラインの変動が非常に大きく、ピーク表面積値を過大評価したためである。

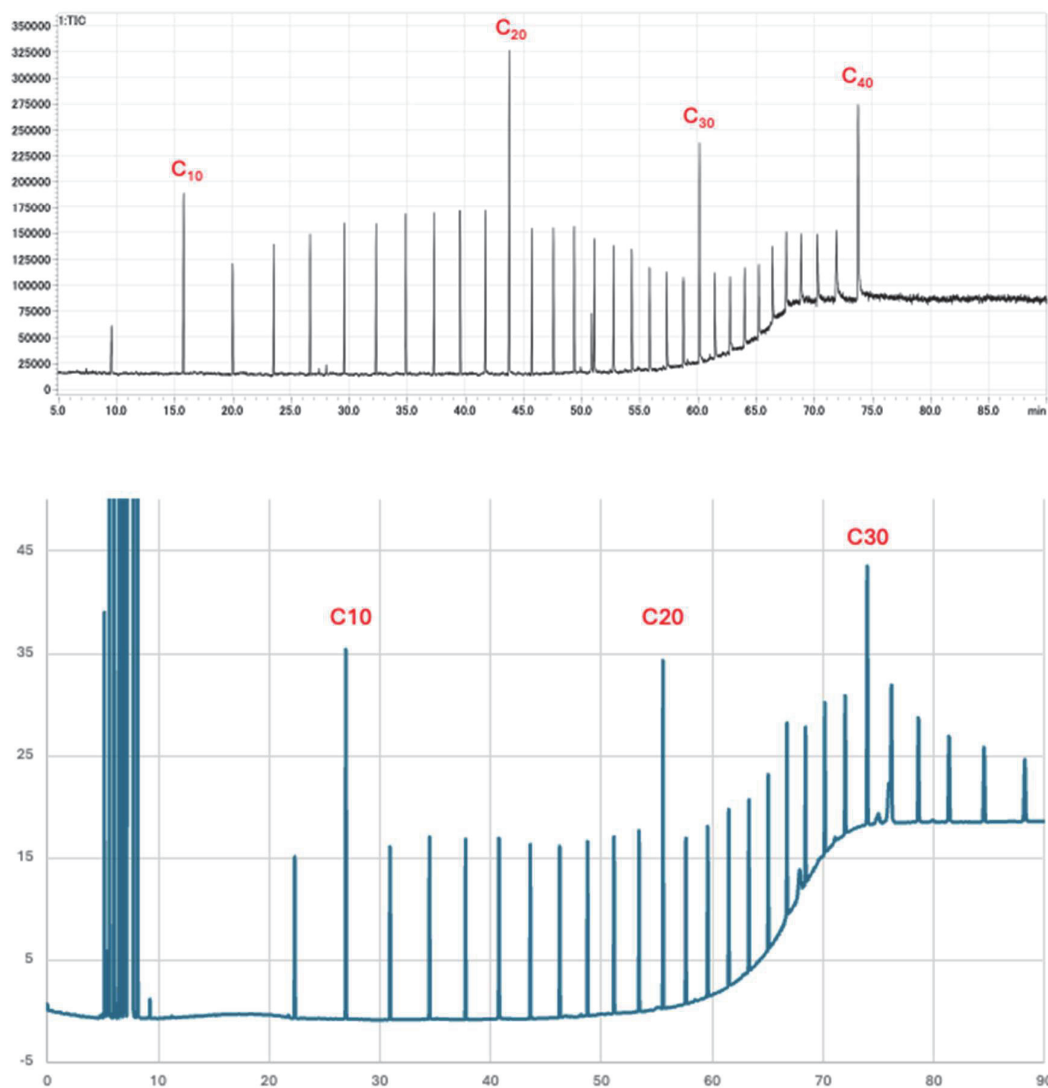


図2.4 標準物質のGC-MSおよびGC-FIDクロマトグラフ

GC-MS、GC-FIDにおける、各炭化水素成分の保持時間を表2.8に示す。いずれの測定においてもカラム (GL Science InertCap) にはポリジメチルシロキサン100%の固定層を使用しており、炭化水素の溶出順序は炭化水素の分子量、沸点に従っている。一方、溶出時間はGC-FIDで使用しているカラムの長さはGC-MSで使用しているカラムの2倍であるため、両者で異なっている。従って、GC-FID、GC-MSの結果を併せて解析する際には、表2.8に示す保持時間を参考に行うこととした。

表2.8 各種炭化水素の保持時間と沸点

保持時間 GC-FID	保持時間 GC-MS	炭化水素	沸点/°C	GC-FID の 面積値
7.522	-	n-C6	-	-
-	-	n-C7	98.4	-
-	-	n-C8	125.6	-
22.250	10.155	n-C9	151.0	4854
26.872	15.880	n-C10	174.1	10487
30.858	20.165	n-C11	196.0	4960
34.415	23.710	n-C12	216.3	5087
37.668	26.925	n-C13	234.4	4994
40.685	29.880	n-C14	252.0	5075
43.503	32.630	n-C15	268.4	4838
46.162	35.180	n-C16	283.5	4910
48.675	37.585	n-C17	297.7	4952
51.057	39.855	n-C18	311.0	5087
53.318	42.005	n-C19	323.5	5121
55.483	44.060	n-C20	335.3	9939
57.547	46.000	n-C21	346.4	4820
59.520	47.880	n-C22	356.9	4958
61.415	49.690	n-C23	366.8	5087
63.232	51.390	n-C24	376.2	5025
64.982	53.050	n-C25	385.1	5109
66.667	54.650	n-C26	393.6	5586
68.333	56.190	n-C27	401.6	5270
70.072	57.670	n-C28	409.3	8254
71.907	59.110	n-C29	416.6	7933
73.885	60.465	n-C30	423.6	16279
76.048	-	n-C31	430.3	5393
78.460	-	n-C32	436.7	5174
81.200	-	n-C33	442.8	-
84.345	-	n-C34	448.7	4994
87.987	-	n-C35	454.3	4806

(2) PP熱分解油

試薬グレードのPP (Sigma-Aldrich) を $\sim 500^{\circ}\text{C}$ までで熱分解して得られた生成油のGC-MSのTICクロマトグラフを図2.11に示す。TICピークの大半は50分までで検出され、それ以降は微小ピークのみが検出されている。従って、 $n\text{-C}_{24}$ までのアルカン、アルケン成分が主に生成することがわかった。単純な熱分解ではナフサ、軽油から重質油までの成分が生成することが明らかになった。各ピークのマスピーク (MIC) を調べたところ、分岐状の炭化水素 (アルカン、アルケン) と考えられる成分が検出されている。1,3,5-trimethyl-cyclohexaneなどの環状アルカンの生成も見られている。一方、芳香族炭化水素は生成しておらず、本事業で検討している $\sim 500^{\circ}\text{C}$ までの単純熱分解プロセスでは脱水素を伴う芳香族炭化水素の生成反応は進行しないことが明らかになった。

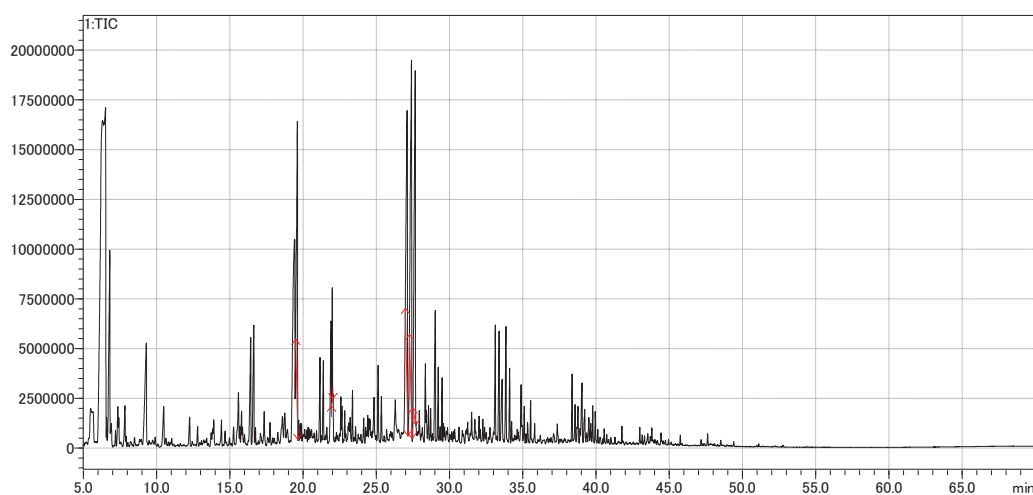


図2.5 ポリプロピレン熱分解油のGC-MS TICクロマトグラフ

ナフサ成分領域 (沸点約 $35\sim 180^{\circ}\text{C}$)、軽油成分領域 (約 $180\sim 370^{\circ}\text{C}$)、重油成分領域 (約 300°C 以上) に分けて主なピークを分析すると、PPの熱分解油はほぼナフサ、軽油成分であり、重油成分は存在していないことがわかった。

(3) 廃プラスチックからの生成油

試料①を熱分解して得られた生成油のGC-MS TICクロマトグラフとGC-FIDクロマトグラフを図2.6と図2.7に示す。炭素数C17までの軽油相当成分は50分までに観測され、それ以降はC18以上の重質油成分が生成する。初期留分は軽油までの成分が多く、中期、後期留分になるほど重質油の成分が比較的に増加している。ナフサ成分(Cx)は20 minまでに観測されるが、中期、後期留分ではその量が相対的に減少している。

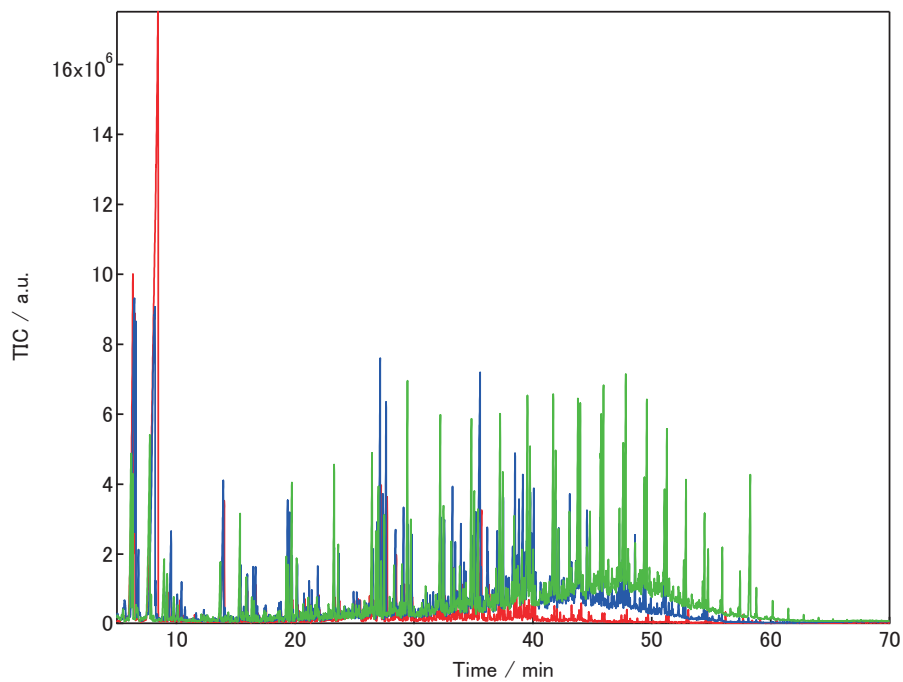


図2.6 試料①熱分解油のGC-MS TICクロマトグラフ

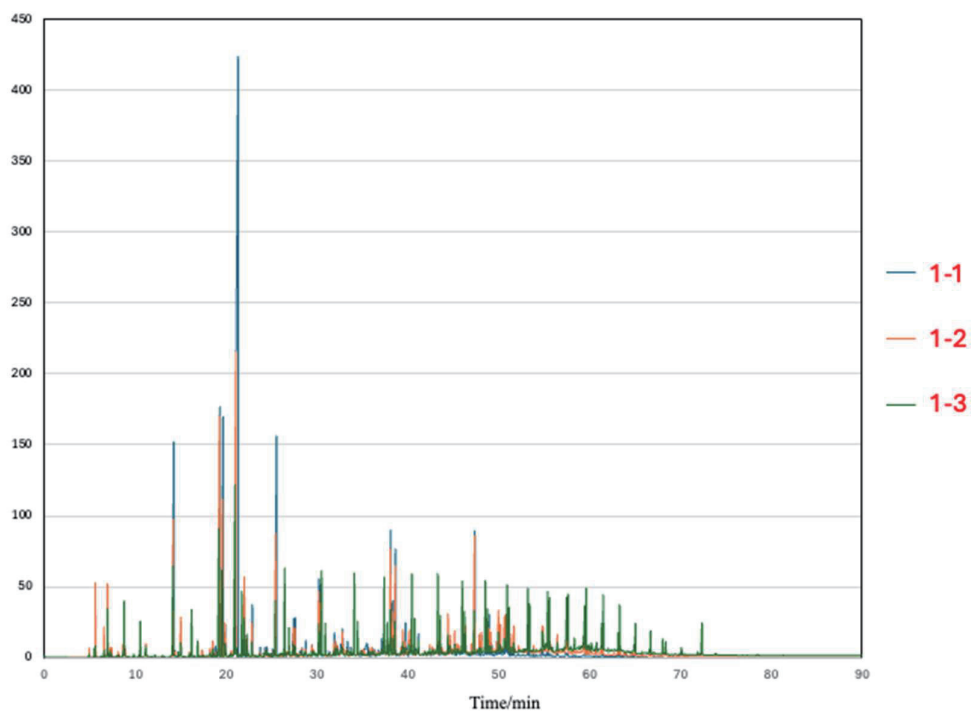


図2.7 試料①熱分解油のGC-FIDクロマトグラフ

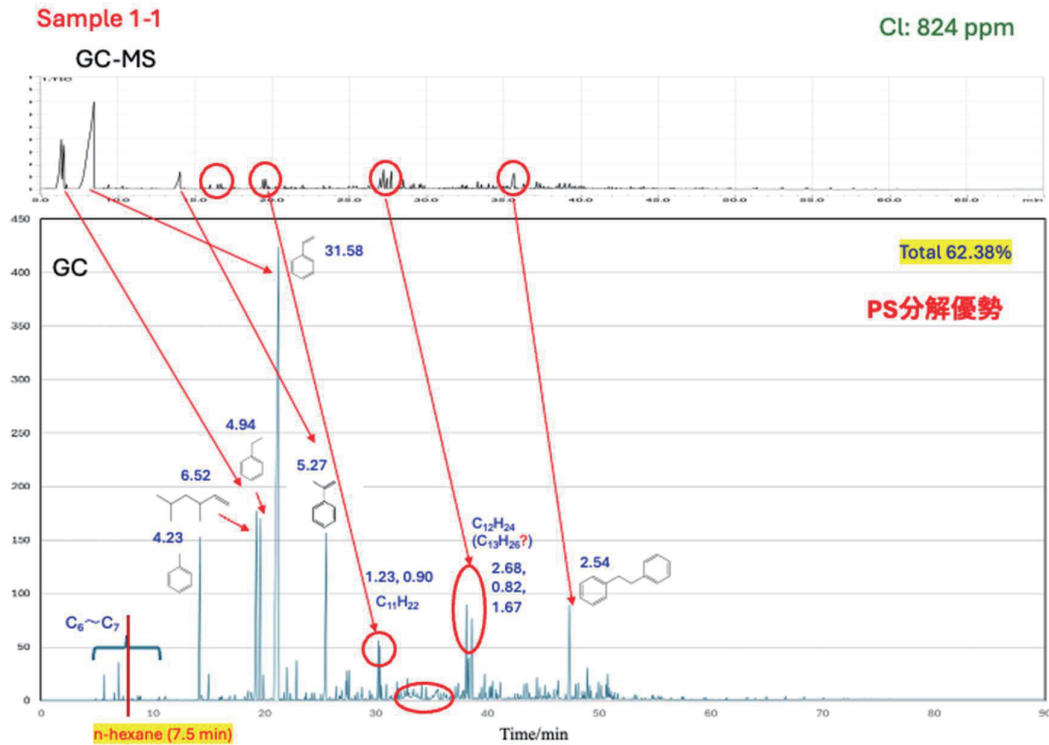


図2.8 試料①熱分解油のGC-MS、GC-FIDクロマトグラフ

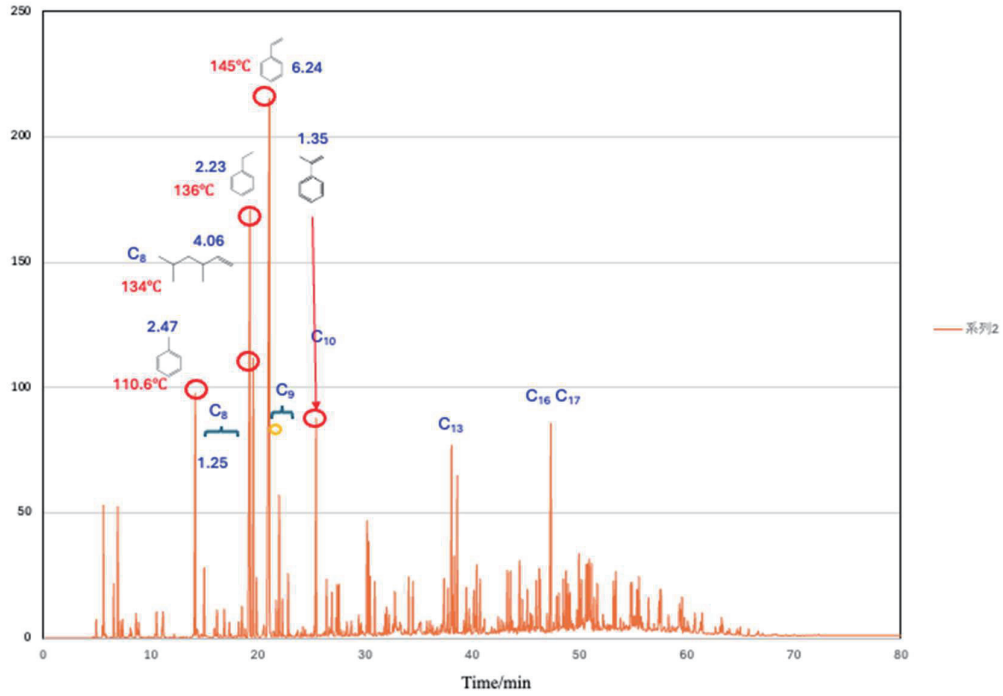
試料①の初期留分についてGC-MS、GC-FIDにて分析した結果を図2.8に示す。各ピークの帰属は質量分析ピークのMICより行った。同定したピークの一部に化合物の構造を示している。主な成分として芳香族炭化水素化合物が生成している。また、分岐状のアルケン、C11、C12のアルケンが検出されている。

表2.9 検出された主な炭化水素

化合物	濃度%	種別
スチレン	31.58	芳香族炭化水素
α -メチルスチレン	5.27	芳香族炭化水素
エチルベンゼン	4.94	芳香族炭化水素
トルエン	4.23	芳香族炭化水素
1,2-ジフェニルエタン	2.54	芳香族炭化水素
2,4-ジメチルヘキセン	6.52	環状アルカン

Sample 1-2

Cl: 265 ppm



Sample 1-3

PE分解優勢

Cl: 113 ppm

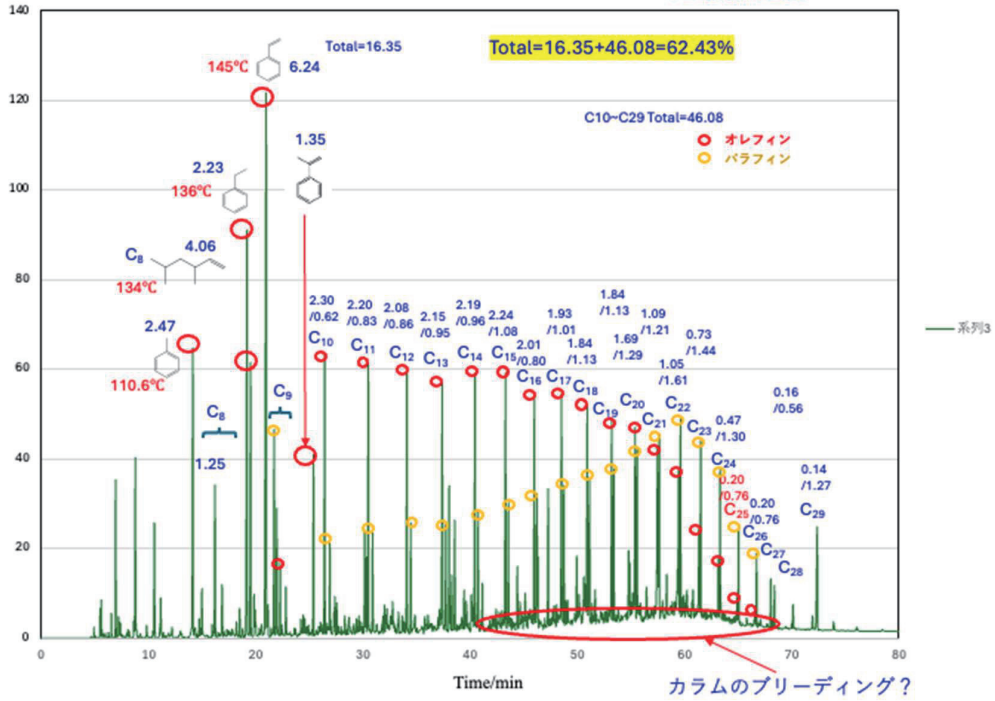


図2.9 試料①熱分解油のGC-MS、GC-FIDクロマトグラフ

これらの芳香族炭化水素の合計で生成油中の50%程度に達している。上述した通り、PPの熱分解過程では芳香族炭化水素が生成しにくいため、これらの化合物はPSの熱分解によるものと考えられる。

試料①の中期留分、終期留分についてGC-MS、GC-FIDにて分析した結果を図2.9に示す。芳香族炭化水素はこれらの生成油においても観測されており、PSの分解反応が引き続き進行していることを示す。しかし、これら芳香族炭化水素の量は中期、終期となるにつれて減少しており、同反応は主に初期過程で進行すると考えられる。一方、中期留分では、C13、C16-C17の炭化水素およびC10-C30の炭化水素、すなわち軽油、重質油成分の炭化水素の量が増加している。また、終期留分の油の分析結果に焦点を当てると、以下の考察ができる。

- ・ C10～C28までの炭化水素において、直鎖状アルカンおよび同じ分子量の直鎖状アルケンが生成している。PEが熱分解する際に、C-C結合が切断されるが、アルケンとアルカンが同時に生成すると考えられる。
- ・ 生成する炭化水素について、オレフィンとパラフィン比率は炭素数の数が増加するとともに低下する。即ち、C-C結合が切断される際には、長鎖の直鎖アルカンと比較的短鎖の直鎖アルケンが生成する。
- ・ 分岐状炭化水素は直鎖状炭化水素に比べて少量である。従って、後期留分にはPPの熱分解生成物が少ないと考えられる。

以上の結果より、単純熱分解反応におけるPE/PP/PSの転換過程は以下のよう
に進行する。

- ・ 初期段階
PSが分解し、芳香族炭化水素が主に生成する。一方、PP、PEの分解はあまり進行せず、重質油成分の生成も少ない。
- ・ 中期段階
PSの残存量が減少するため、その分解量は減少し、PPの分解が活発化され、ナフサ成分も生成するが、軽油、重質油成分が増加する。
- ・ 後期段階
PEの熱分解が主に進行し、直鎖状パラフィン/オレフィンが生成する。軽油のみならず重質油の成分も増加する。

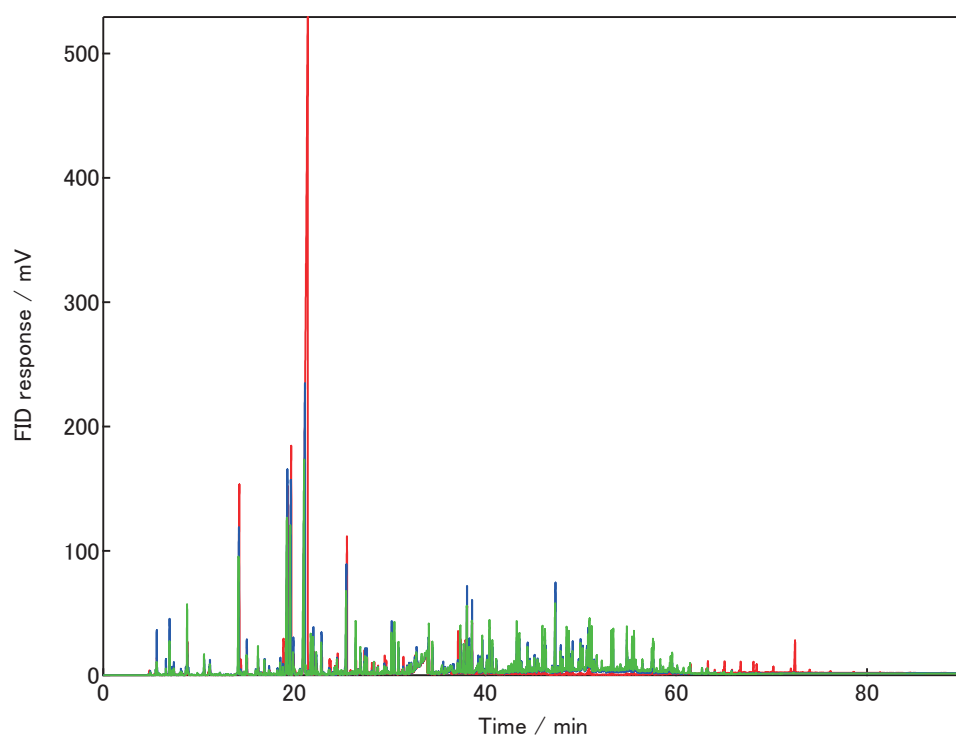
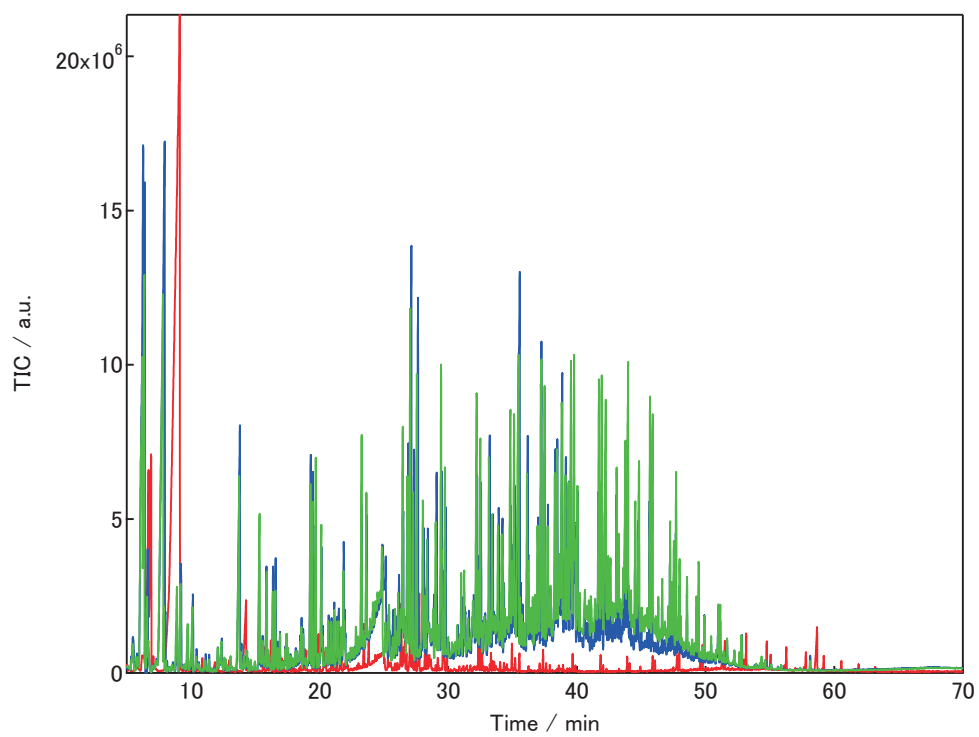


図2.10 試料②熱分解油のGC-MS、GC-FIDクロマトグラフ

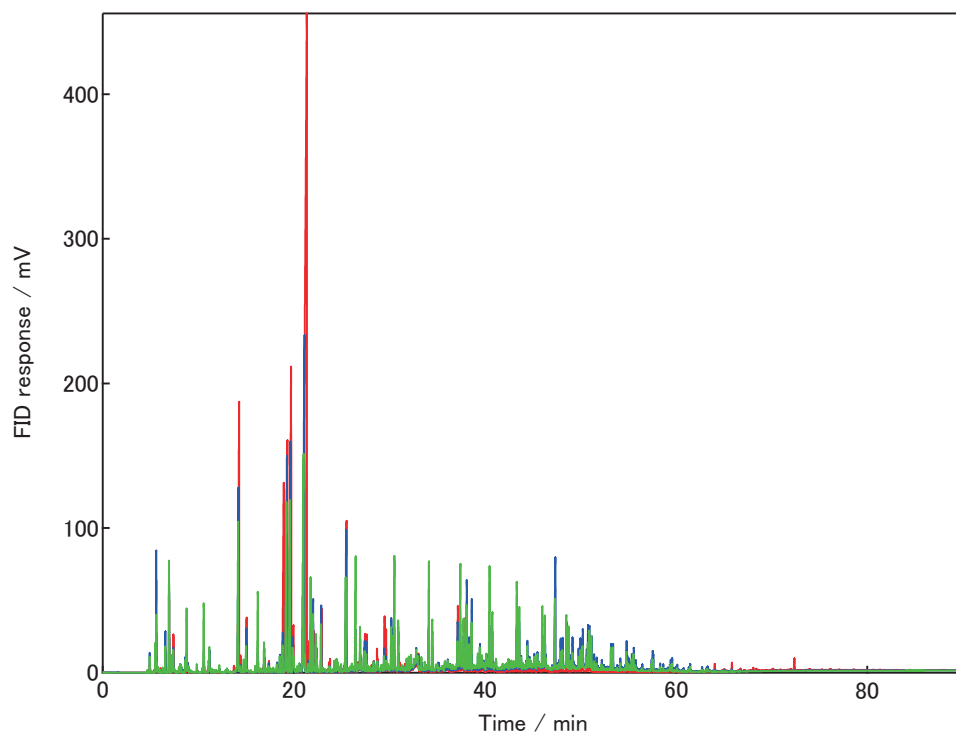
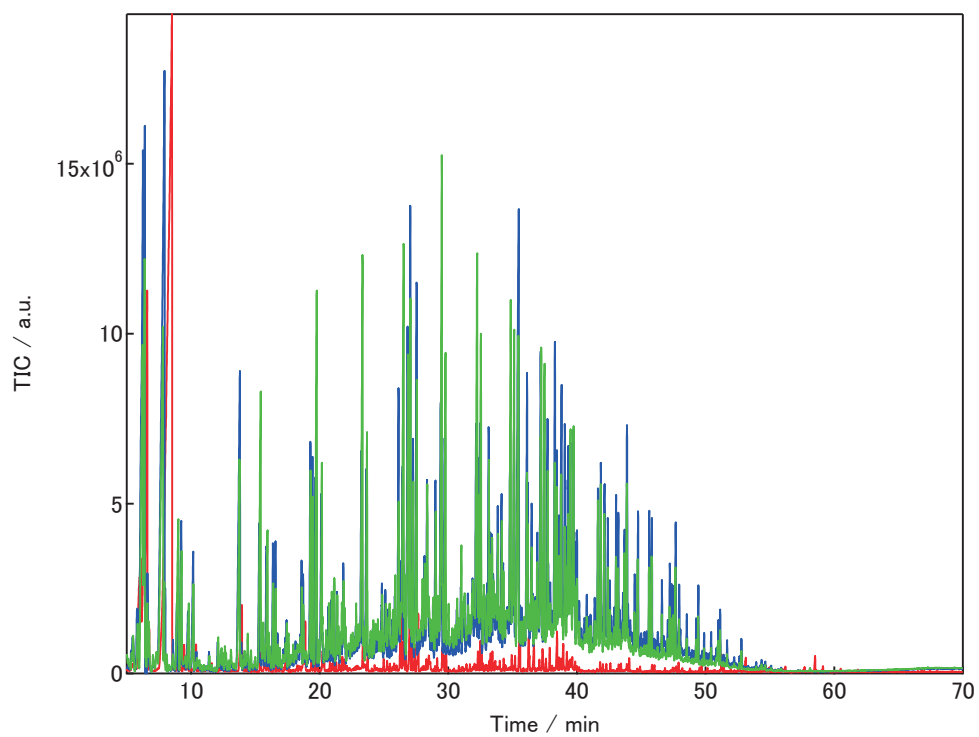


図2.11 試料③熱分解油のGC-MS、GC-FIDクロマトグラフ

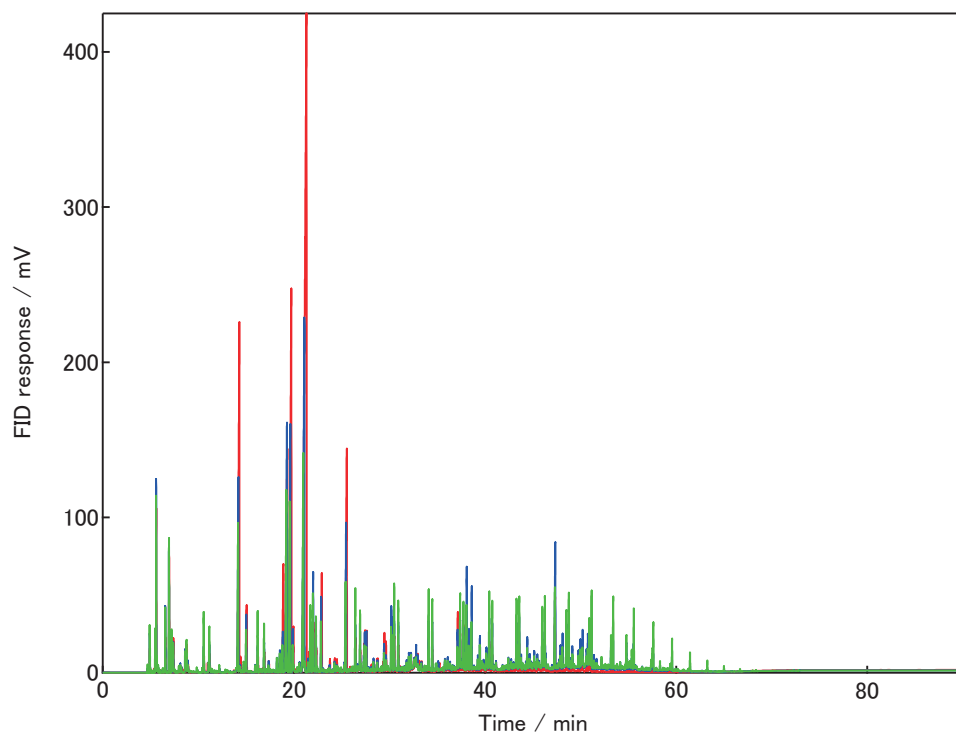
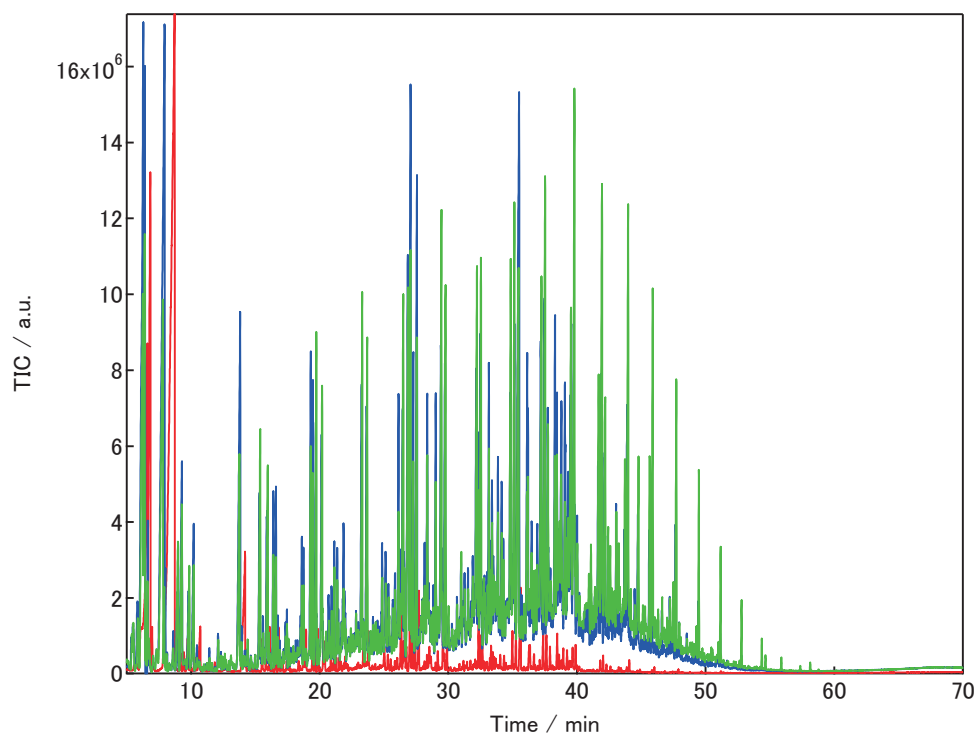


図2.12 試料④熱分解油のGC-MS、GC-FIDクロマトグラフ

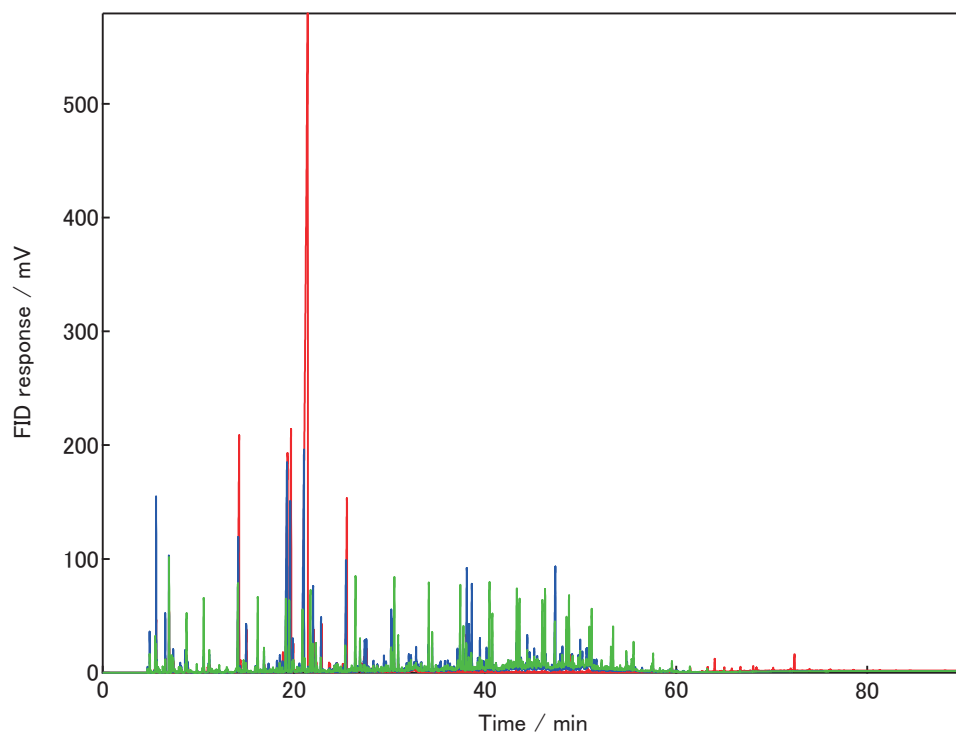
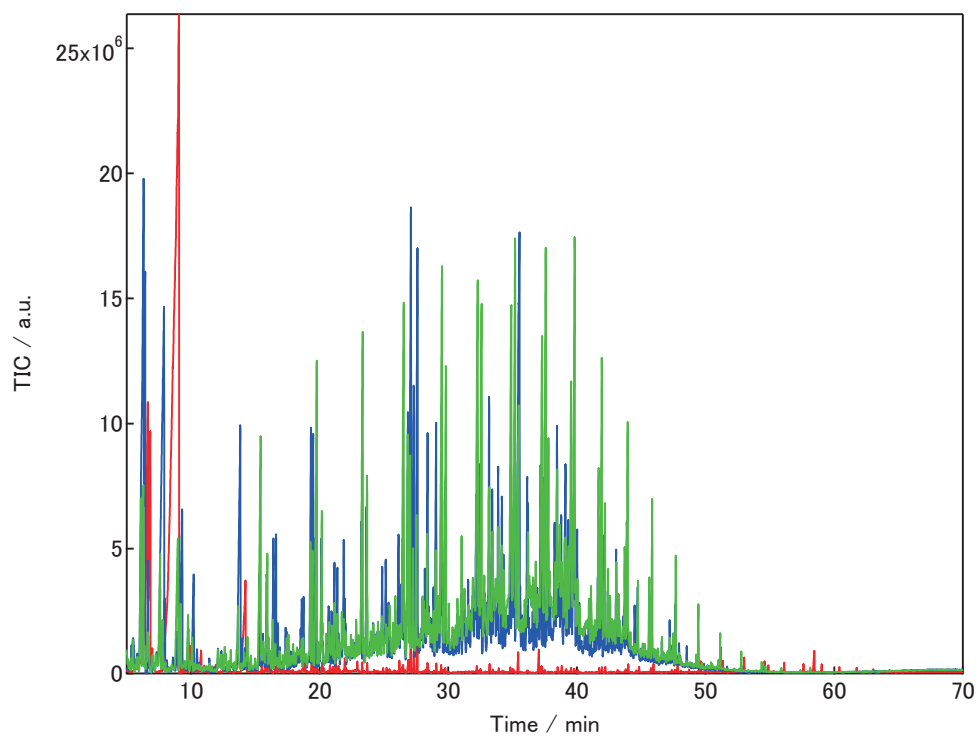


図2.13 試料⑤熱分解油のGC-MS、GC-FIDクロマトグラフ

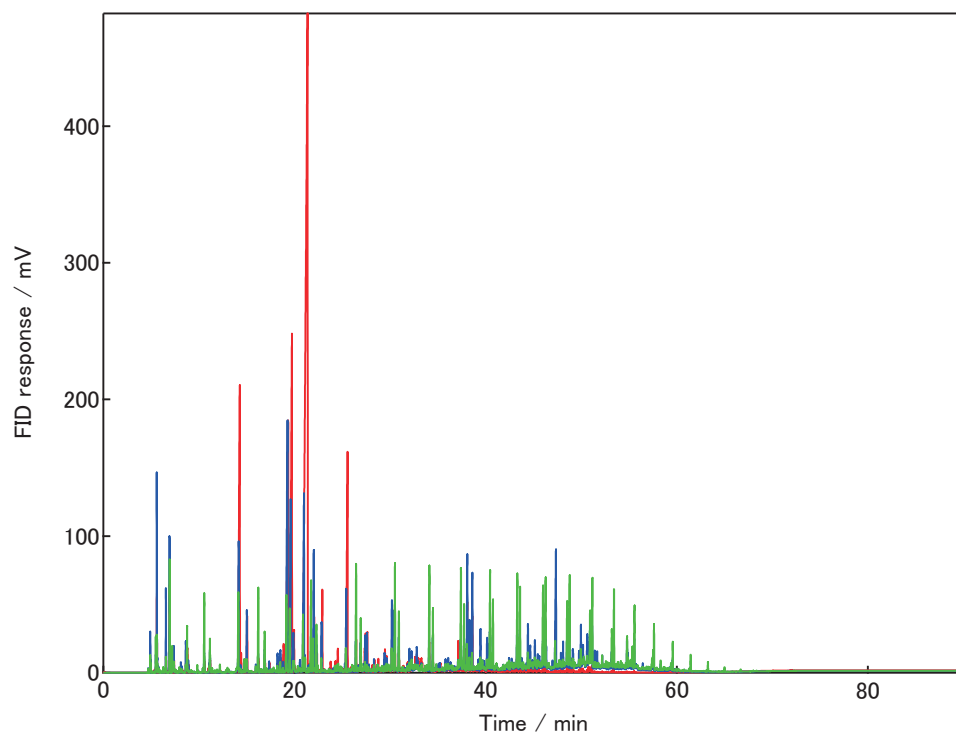
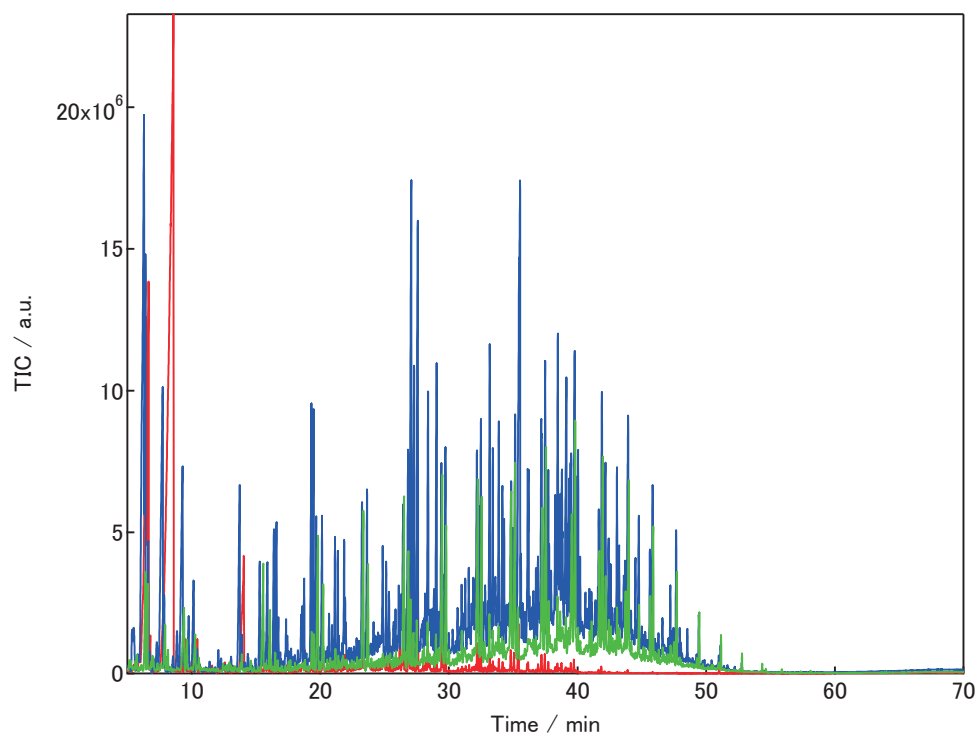


図2.14 試料⑥熱分解油のGC-MS、GC-FIDクロマトグラフ

図2.10から図2.14まで、PE/PP/PSに添加物を加えて熱分解した生成油のGC-MS、GC-FID分析結果を示す。

共存物質の効果については物質ごとに次の通り整理した。

- PET

試料②からの熱分解生成油（図2.10）において、PETの添加効果について検討した。試料①からの熱分解生成油（図2.8, 2.9）と同様の傾向を示し、初期過程ではポリスチレンからの芳香族炭化水素の生成が主となり、中期、後期過程では軽油、重質油成分が増加した。一方、PETの分解生成物である安息香酸、テレフタル酸が生成している。これらの化合物は酸性を有するため、本事業で使用しているGC-FIDカラム（100%ポリジメチルシロキサン）と強く吸着し、カラムのブリーディングを起こす（図2.8：GC-FIDの36-37minのピーク）。このピークは初期、中期、後期のいずれの留分においても生成が確認された。

試料②からの熱分解生成油のFTIRスペクトルより、C=O結合の強度が試料①からの生成油に比べて増大しており、PETの含有量が増えると有機カルボン酸類が増加することが確認された。

- ポリ塩化ビニル、ポリ塩化ビニリデン

試料③からの熱分解生成油（図2.11）において、塩素含有プラスチックの添加効果について検討した。初期過程、中期過程、後期過程での油成分の変化は試料①からの熱分解生成油と同様であった。

- ポリアミド（ナイロン）

試料④からの熱分解生成油（図2.12）において、ポリアミド系プラスチックの添加効果について検討した。初期過程、中期過程、後期過程での油成分の変化は試料①からの熱分解生成油と同様であった。

- NaCl

試料⑤からの熱分解生成油（図2.13）において、塩化ナトリウムの添加効果について検討した。初期過程、中期過程、後期過程での油成分の変化は試料①からの熱分解生成油と同様であった。

- アルミ蒸着フィルム

試料⑥からの熱分解生成油（図2.14）において、アルミ蒸着フィルムの添加効果について検討した。初期過程、中期過程、後期過程での油成分の変化は試料①からの熱分解生成油と同様であった。

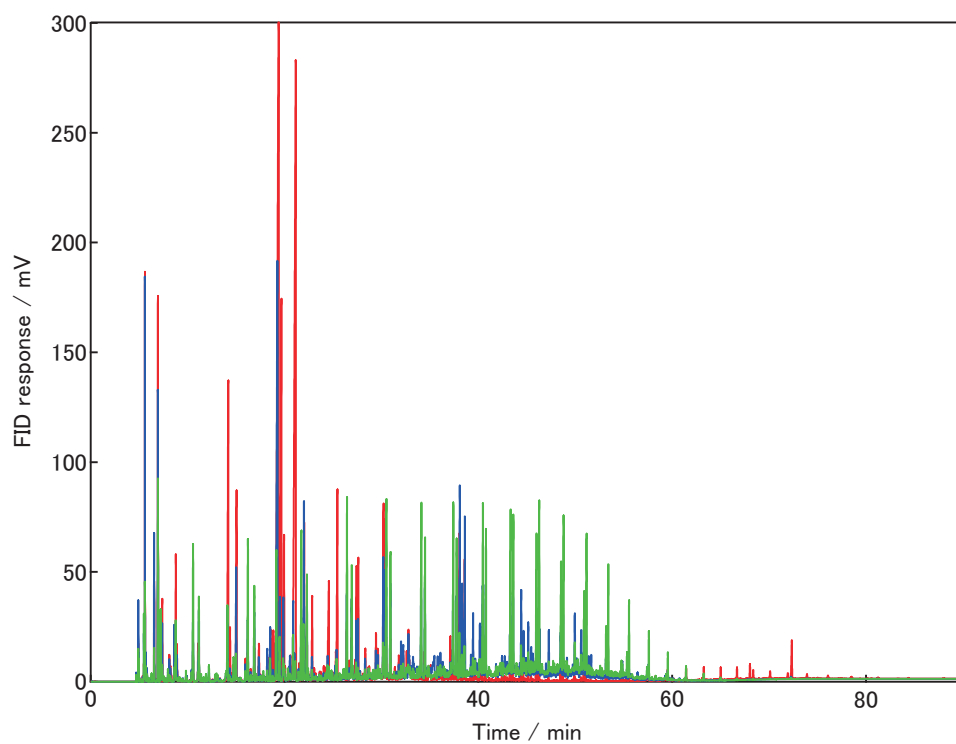
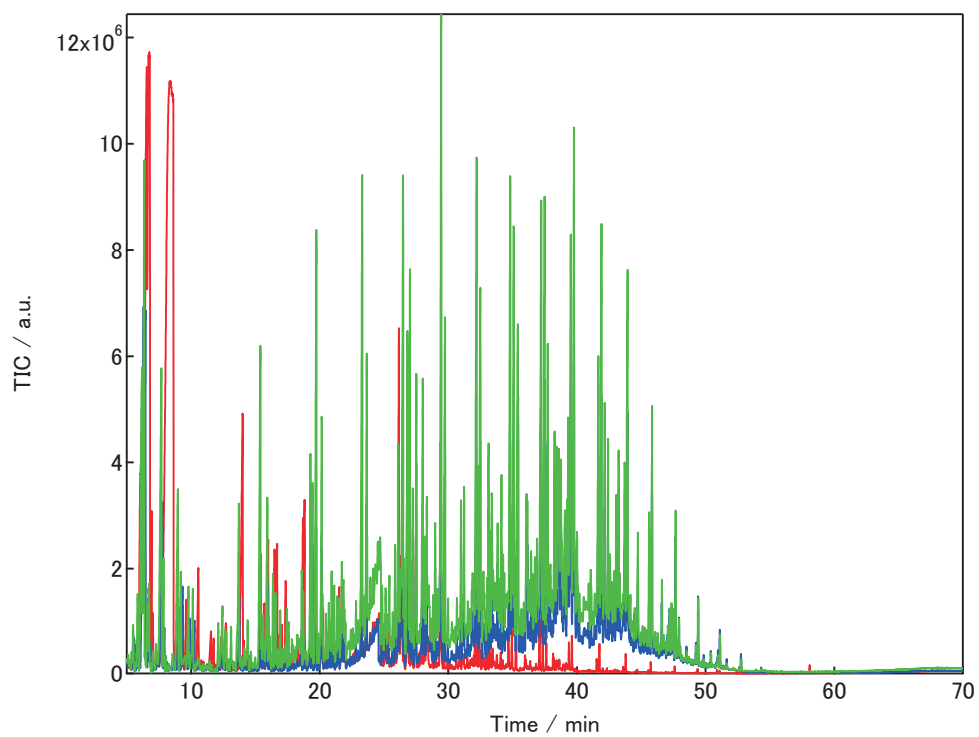


図2.15 試料⑦熱分解油のGC-MS、GC-FIDクロマトグラフ

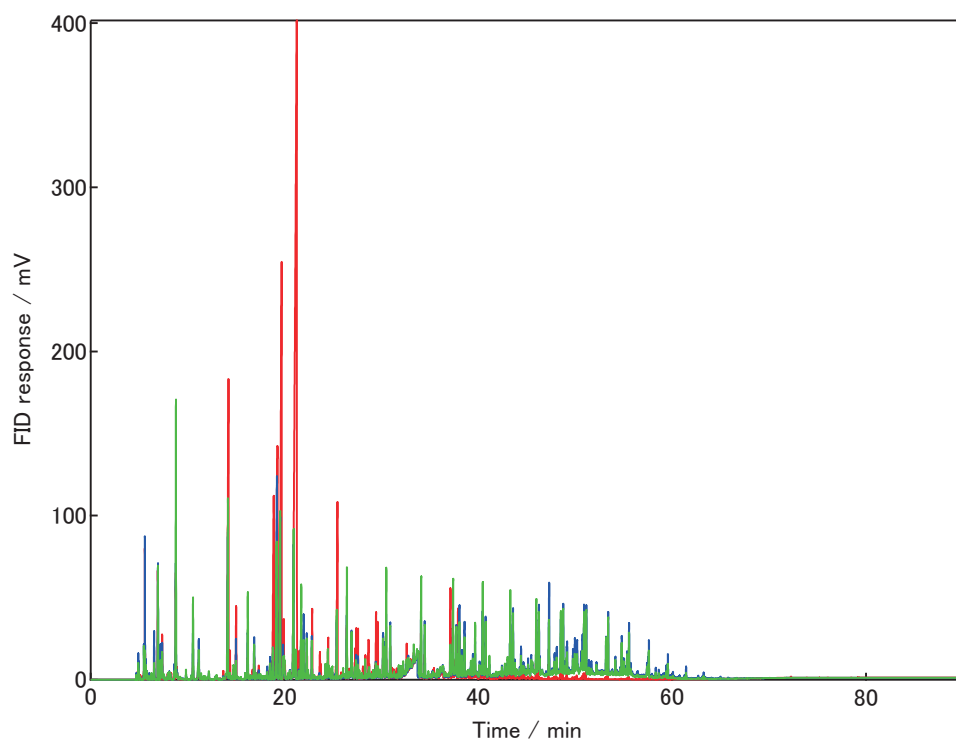
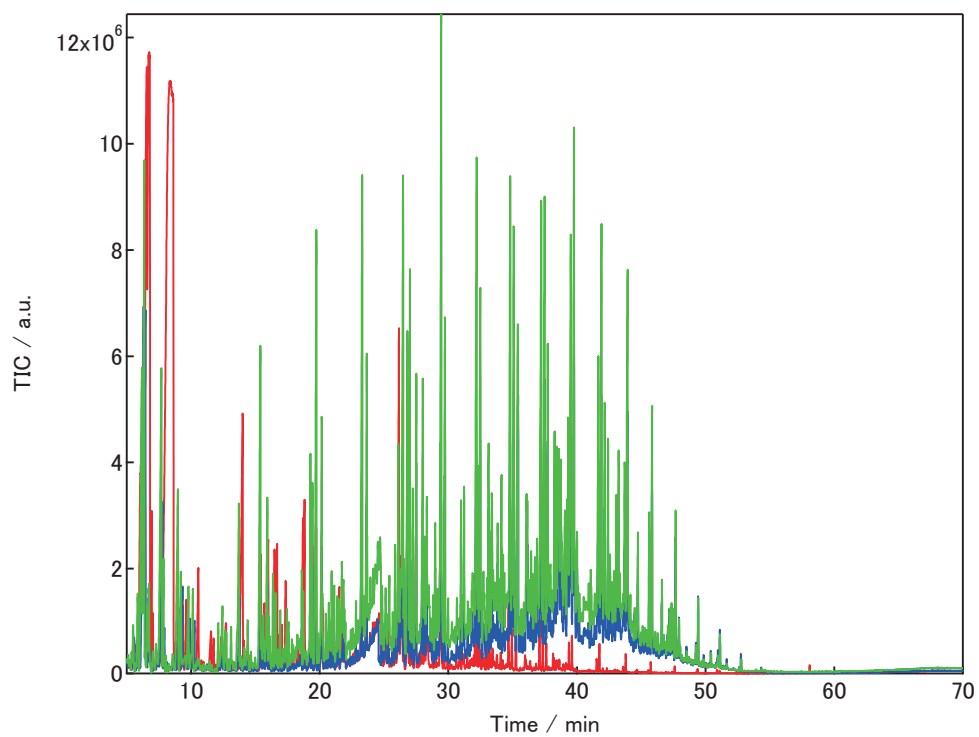


図2.16 試料⑧熱分解油のGC-MS、GC-FIDクロマトグラフ

図2.15から図2.16まで、株式会社エコポート九州で光学選別した試料（試料⑦）、未選別の容器包装用プラスチック（試料⑧）を熱分解した生成油のGC-MS、GC-FID分析結果を示す。いずれの試料においても、初期過程、中期過程、後期過程での熱分解過程は同様にPS、PP、PEの分解が主に進行すると考えられる。

（４）塩素の効果について

試料①から試料⑧までの熱分解生成油について、夾雑物質の効果について比較検討した。塩素含有量は試料①、②、⑤、⑥、⑦からの熱分解生成油で同程度であり、ポリ塩化ビニル、ポリ塩化ビニリデンを含む試料③、試料⑧で大幅に増加している。また、いずれの熱分解油においても、初期留分、中期留分、後期留分の順番に減少している。これらの傾向およびGC-MSの分析により、含塩素化合物の同定を行った。その結果検出された化合物は1-クロロエチルベンゼン、2-クロロメチルプロパン、2-クロロ-2-メチルペンタンなどの生成が確認された。特に、1-クロロエチルベンゼンの生成量は含塩素量の多い未選別試料（試料⑧）の初期留分で0.5%程度の濃度となるが、含塩素量の少ないPS/PP/PE熱分解油の初期留分では0.046%に低下した。

以上の結果より、含塩素化合物の影響について考察する。未選別の容器包装用プラスチック廃棄物からの熱分解生成油では3500 ppmの塩素が含まれており、株式会社エコポート九州で光学選別を施した後で熱分解を行うと含塩素量は270 ppmまで低下する。これらの熱分解過程において、ポリ塩化ビニル、ポリ塩化ビニリデンの熱分解過程がPS/PP/PEの熱分解よりも低温で進行する。

この際に塩化水素が生成する。実際、トスミックでの廃プラスチック熱分解において熱分解炉からのオフガス中に塩化水素が検出されている。熱分解炉の温度を上昇させるとポリスチレンが分解し、スチレンなどの芳香族炭化水素が生成する（図2.17）。この際、スチレンは高濃度で生成するため、塩化水素と反応し、1-クロロエチルベンゼンが生成すると考えられる。

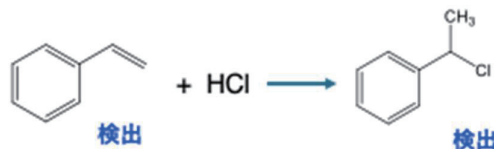


図2.17 スチレンの塩素化過程

また、比較的炭素数が少ない化合物として、2-メチル-5-ペンテンと2-クロロ-2-メチルペンタンが検出されており、これらも、前者の炭化水素の二重結合と塩化水素が反応して後者が生成したものと考えられる（図2.18）。

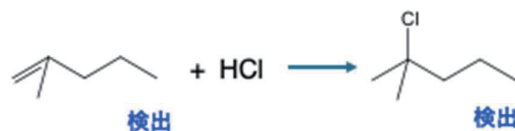


図2.18 アルケンの塩素化過程

令和6年度に、各熱分解油の塩素成分について、放射光を用いたXAFSスペクトル測定を行い、以下の成果を得ている。

- ・シンクロトロン放射光を用いたCl K吸収端XAFSスペクトルを用いた塩素の分析方法を確立し、廃プラスチック熱分解生成油中の塩素は有機分子に直接結合する塩素であることを明らかにした。
- ・熱分解残渣（固形物）中の塩素は塩化物イオンとして存在することがわかった。
- ・市販のナイロン系試料にも塩素が含有されていることを放射光測定により確認した。

廃プラスチック熱分解生成油中において存在する塩素は有機分子に直接結合する塩素であることは、上記の現象で説明できる。すなわち、塩素系プラスチックの分解で生成した塩化水素は熱分解で生成したC=C二重結合の官能基と反応し、有機塩素化合物を生成する。従って、油分中に数多く存在するオレフィンと反応して、多くの有機塩素化合物を生成することがわかった。

（5）塩素が油成分中の無機成分生成に与える影響

● 熱分解過程

気相のHClはオフガスとして排出（20-50 ppm程度）されていた。熱分解装置の配管部材と接触し、金属種(Fe, Crなど)が溶出していた。

廃プラスチックの熱分解処理において、ポリ塩化ビニル (PVC) や塩素系添加剤を含むプラスチックから発生する塩化水素は、ステンレス鋼製反応器に深刻な腐食問題を引き起こす。この腐食メカニズムと溶出現象は、プロセスの安全性と生成油の品質の両面から重要な技術的課題となっている。

● 腐食メカニズム

ステンレス鋼の耐食性は表面に形成される不動態皮膜（主にクロム酸化物）によって維持されているが、高温下で塩化水素が存在すると、この保護皮膜が破壊される。塩化水素は300℃以上の高温環境下で特に腐食性が強く、塩素イオンが不動態皮膜を局部的に破壊して孔食や応力腐食割れを引き起こす。さらに、熱分解温度域（400-600℃）では、塩化物応力腐食割れ（SCC）が加速され、反応器や配管の構造的健全性が脅かされる。

- 金属元素の溶出と影響

腐食により溶出する主要な金属元素には、Fe（鉄）、Cr（クロム）、Ni（ニッケル）、Mo（モリブデン）などがある。これらの金属イオンは複数の悪影響をもたらす。第1に、溶出した金属イオンは分解油中に混入し、触媒毒として作用して後続の精製プロセスに支障をきたす。特に鉄イオンは酸化触媒として働き、生成油の酸化劣化を促進させる。第2に、クロムやニッケルなどの重金属は環境規制物質であり、これらが製品油に混入することで環境基準を満たさなくなる可能性がある。

- 対策技術

この問題に対する技術的対策は多岐にわたる。材料面では、ハステロイやインコネルなどの高耐食性合金の使用、または反応器内面への耐食性コーティング（セラミックコーティング等）の適用が検討されている。プロセス面では、原料の前処理による塩素含有プラスチックの除去、アルカリ吸収剤（水酸化カルシウム等）の添加による塩化水素の中和、反応温度の最適化による腐食速度の低減などが実施されている。さらに、2段階処理システムの採用も有効である。第一段階で低温脱塩素処理を行い、塩化水素を除去した後、第2段階で本格的な熱分解を行うことで、腐食問題を大幅に軽減できる。また、生成油の後処理として、金属除去のための吸着処理や精製プロセスの導入も重要である。

（6）酸素の効果

試料①から試料⑧までの熱分解生成油について、含酸素化合物の影響について考察する。PS/PP/PEのみの試料（試料①）、光学選別後の試料（試料⑦）など、PETを削減した試料からの熱分解生成油中には微量の安息香酸が検出された。これらの熱分解油での酸素含有量は1.0%程度であり、PETを含有する試料（試料②、⑧）では酸素含有量が2.4%程度に増加する。この増加分はPETの熱分解により生成した安息香酸、テレフタル酸によるものと考えられる。一方、PETを削減した試料からの熱分解生成油中にはアセトフェノン、ベンズアルデヒドなどが検出された。これらの生成はPS/PP/PEの熱分解過程から説明できる。例えば、PPなどから生成した脂肪族系オレフィンが酸素酸化によりアルコールに転換される。PSの熱分解で生成したスチレンは容易に酸素酸化されてベンズアルデヒド、続いて安息香酸を生成する。エチルベンゼンからアセトフェノンを経て安息香酸が生成する。以上のように、反応系中の共存酸素がプラスチック分解生成物を酸化することで部分酸化生成物である多様な含酸素化合物（ケトン、カルボニル、アルデヒド、アルコール）が生成することがわかった。

含酸素化合物

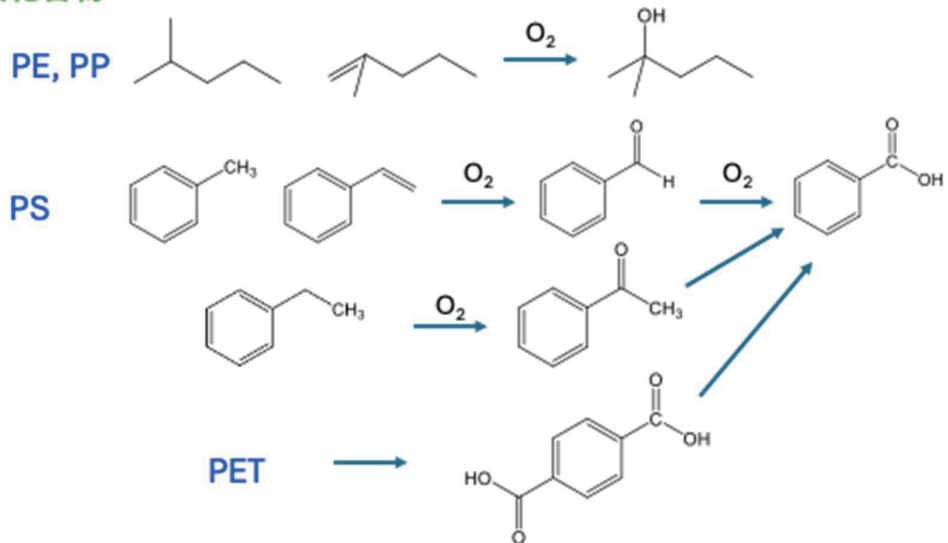


図2.19 含酸素化合物の生成過程

含窒素化合物

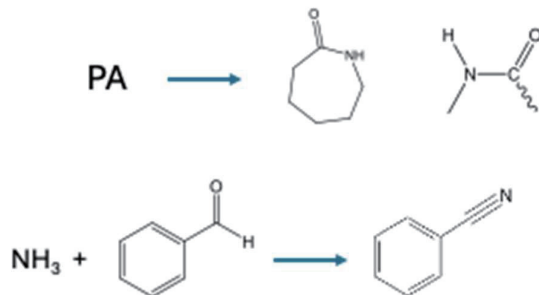


図2.20 含窒素化合物の生成過程

(7) 窒素の効果

含窒素化合物の生成は廃プラスチック中に含まれる窒素成分に由来する。ナイロン系プラスチック（ポリアミド系容器）が分解した生成物、および、その過程で生成したアンモニアが分解油成分と反応すると考えられる。

2.5.3 不適合物選別結果の詳細と忌避物質のリソースについてのまとめ

本事業における選別・分析の結果、以下の知見が得られた。

(1) 選別による塩素濃度低減効果

光学選別によりPVC/PVDCを除去することで、熱分解油中の塩素濃度は未選別時の3,500ppmから270ppmへと約13分の1に低減された。塩素系プラスチックの主要なリソースは食品用ラップであり、これを選別・除去することが塩素負荷

低減に最も効果的である。

(2) 含酸素化合物のリソース

含酸素化合物（酸素含有量：未選別2.4%、選別後1.1%）の主要リソースはPET樹脂である。PETの熱分解により安息香酸・テレフタル酸が生成され、配管閉塞の原因となる。PETの主な由来製品は卵パック、キムチパック等の容器類、焼肉のたれ・ドレッシングのボトルである。

(3) 含窒素化合物のリソース

含窒素化合物（濃度：約0.12%）の主要リソースはナイロン系プラスチック（PA）である。具体的な由来製品としては柔軟剤の詰め替え容器等の複合材が特定された。

(4) ケイ素（Si）のリソースと課題

ケイ素は前処理プロセスの触媒毒となるが、本事業では濃度の定量的な測定ができていない。推定されるリソースとしてタルク（充填剤）、エラストマー等が挙げられるが、混入経路の特定と濃度変動幅の把握が今後の課題である。

(5) 金属類の挙動

Ca、K、Fe、Ti等の無機金属成分は熱分解過程で残渣側に留まり、生成油への移行は極めて限定的であることが確認された。ただし、塩化水素による熱分解装置の腐食により、Fe、Cr、Ni等の遷移金属がppbレベルで溶出する現象が確認された。

2.5 本事業における不適合物前処理技術調査の概要（クラサスケミカル）

2.5.1 調査の目的と背景

本事業では、廃プラスチック熱分解油を精製し、エチレンプラントでナフサと混合して原料として使用可能な精製廃プラ熱分解油を生産することを目的に、各種選択肢を検討した。具体的には、年間30,000トンの廃プラスチックから得られる年間21,000トンの熱分解油を、石油化学原料として活用する可能性について評価した。

本項では、九州大学の分析結果をもとに、廃プラスチック分解油中の不純物（塩素、含酸素化合物、含窒素化合物、オレフィン、水銀、重金属、軽金属等）がクラッカー運転・設備に及ぼす影響について整理した。従来の廃プラスチックリサイクルでは、汚れや異素材の混入、複合素材による処理困難性が主要な課題だったが、ケミカルリサイクルでも多様な化学構造や不純物（含有元素・官能基等）が分解油に混入することがクラッカー原料としての適合性に影響を与える。これら不純物の分析・評価結果を踏まえ、今後必要となる前処理・除去技術の開発方針を明確化することが、本実証事業の重要な目的である。

2.6 エチレンプラントの設備構成概略

本事業ではクラサスケミカルのエチレンプラントに前処理プロセスを導入することを前提としているため、はじめに全体の概略プロセスについて説明する。

エチレンプラントはLPG、ナフサやコンデンセートからエチレン、プロピレン等のオレフィンを製造するプロセスである。ライセンサーにより詳細工程の違いはあるが、基本的なスキームは同一であり、下記の4つの工程から成る。

(1) 分解工程 → (2) 前蒸留工程 → (3) 圧縮工程 → (4) 精製工程

(1) 分解工程

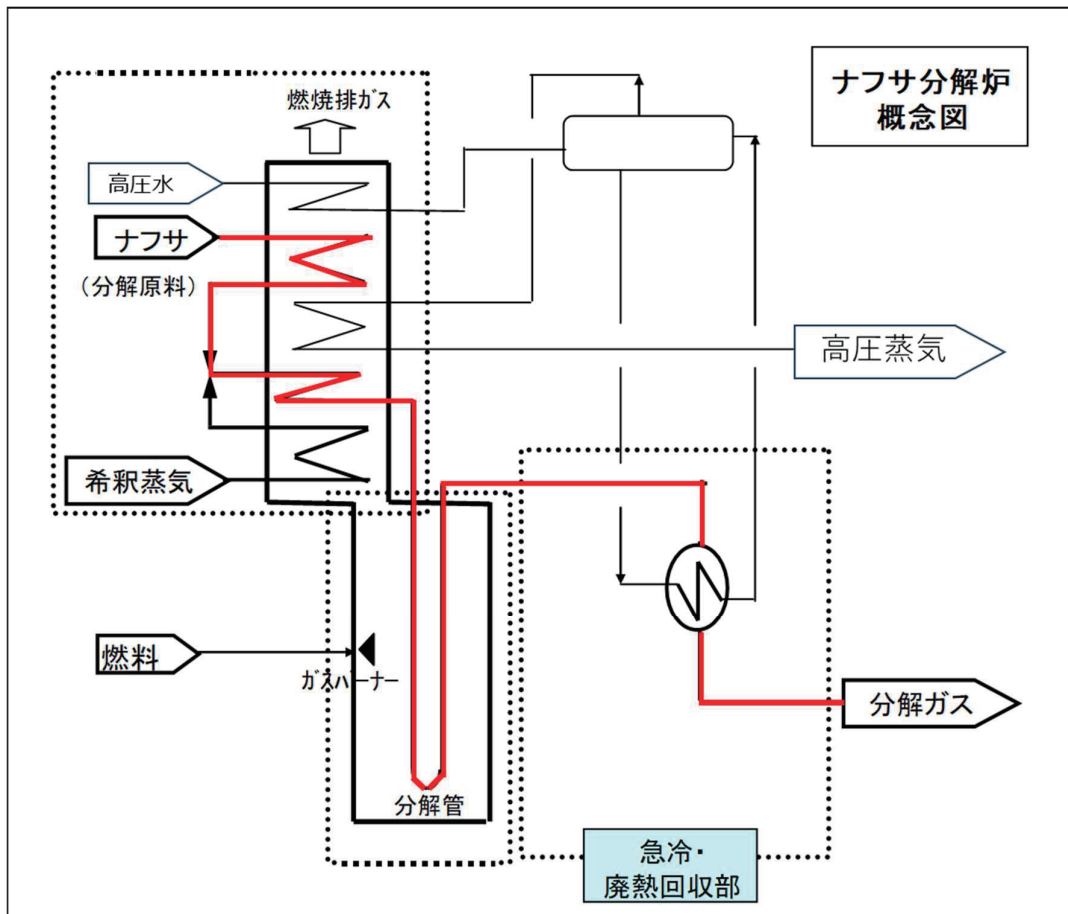


図 2.21 ナフサ分解炉の概念図

原料ナフサ（他にエタン、LPG、コンデンセート等）は予熱後、希釈蒸気とともに分解炉に供給される。クラサスケミカルでは計 13 炉の分解炉を有し、炉ごとに分解可能な原料が異なる。一部の分解炉では灯軽油・NGL（液化天然ガスのコンデンセート）などナフサよりも重質な原料に対する分解能を持ち、本事業で対象とする廃プラスチック熱分解油もこの重質な原料に該当する。

分解炉の中央部に原料とスチームが流れる分解管が配置され、炉壁や炉底からガスバーナーで分解管を加熱することで、分解管に熱を与え、熱分解反応が行なわれる。所望の分解収率を得るためにプロセス温度が、所定の温度になるようバーナーからエネルギーが供給される。

この時の分解温度は 800°C 近く、炭化水素の分解など、様々な反応が同時に起こる。そのため有機塩素が含まれている場合には、無機塩素まで分解され設備の腐食要因となるため原料中濃度を厳しく管理している。また、含窒素化合物は

NO_x まで分解され、後段の精製工程にて汚れ、あるいは反応性が極めて高い化合物生成の原因となり、安定運転の阻害要因となるため、原料中濃度を厳しく管理している。含酸素化合物はアルコール、アルデヒドなどの形態に分解され、後段の前蒸留工程・圧縮工程で重合することによる汚れの促進、製品へ混入することが知られているため原料中度を管理している。また、分解反応では、圧力は低いほど平衡的にエチレン等の低分子量炭化水素収率を高くできるため、希釈蒸気の存在下で分圧を下げた条件下で行われる。分解炉出口ではエチレン、プロピレン、ブタジエンなどのオレフィン、分解ガソリン、分解ケロシン、分解重油が生成する。

(2) 前蒸留工程

分解炉で生成した各留分を含んだ分解ガスは分解炉出口直後に急冷され、希釈蒸気や分解ガソリン、重油分が凝縮分離される。前蒸留工程は分解ガスを冷却して、重質分を液化分離し、分解重油を製品として回収する役割を持つ。分解炉よりフィードされた分解ガスは冷却され、この過程で凝縮した油の一部が分解重油精製塔へ導かれ、精製されて分解重油が製品として回収される。また、分解炉で投入された希釈蒸気も同様に凝縮し、セトラーへ供給されて油水分離される。この水分は再度加熱されて蒸気となり、分解炉へフィードされる。

(3) 圧縮工程

後段の精製工程では分解炉で生成した水素、エチレン等の低沸点成分を蒸留により分離・精製しており、分離を容易にするためには操作圧力を上げて、露点をより高くする必要がある。そのために圧縮工程は分解ガスを昇圧する役割を担う。ガス成分は圧縮工程で約 3.5MPaG 以上まで圧縮されたのち、精製工程に送給される。また、圧縮工程の途中にはアルカリ洗浄塔が設置されており、熱分解で生成した硫化水素や二酸化炭素などの酸性ガスを中和除去している。酸性ガスを抽出した液は後段で無害化处理される。

(4) 精製工程

図 2.22 にエチレンプラントの精製工程ブロックフローを示す。精製工程は水素～分解ケロシンまでの各製品を回収する工程である。蒸留操作が主たる分離手段であるため、多くの蒸留塔と付帯設備で構成されている。クラサケミカルの場合、ほぼ炭素数の小さい順に分離操作が行われる。精製工程では基本的に、ガスの冷却による液化、蒸留を繰り返すことで軽質な留分から順に分離される。

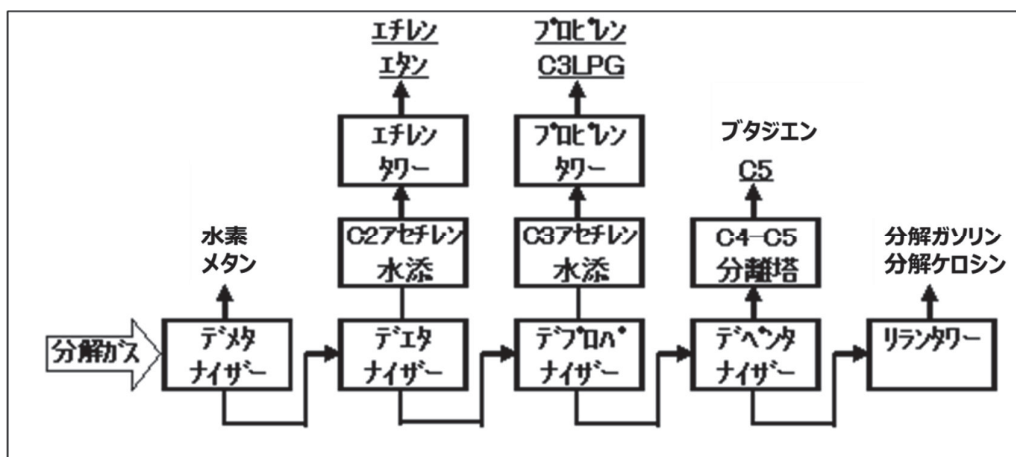


図 2.22 エチレンプラントの精製工程ブロックフロー

2.7 廃プラスチック熱分解油中不純物のクラッカーへの影響

本事業で検討する容器包装プラスチックからのケミカルリサイクルでは、2.6で記載したクラサケミカルのプロセスに対して、分解炉の前段に前処理設備を導入する想定である。

● 通常フロー

(1) 分解工程 → (2) 前蒸留工程 → (3) 圧縮工程 → (4) 精製工程



図 2.23 エチレンプラントの通常フロー

● 廃プラスチック熱分解油使用の想定

(0) 前処理設備 → (1) 分解工程 → (2) 前蒸留工程 → (3) 圧縮工程 → (4) 精製工程

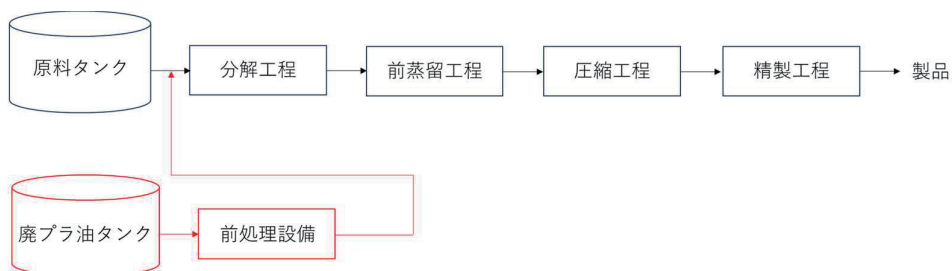


図 2.24 廃プラスチック熱分解油使用時のエチレンプラント想定フロー

九州大学での分析結果をもとに、対応方針をまとめるために上記クラサスケミカルのプロセスに影響を与える不純物の整理を行った。

表 2.10 に今回の分析結果と対応方針を示す。

表 2.10 分析結果及び対応方針

	分析結果	クラッカーへの影響	対策要否
塩素	100%有機塩素 1-フェニル-1-クロロエタン 2-クロロ-2-メチルペンタン 等	<ul style="list-style-type: none"> 配管の腐食 排水の管理pH不適合 	必要
含酸素化合物	アルデヒド、ケトン、アルコール等 (全種同定は不可)	<ul style="list-style-type: none"> 製品への混入 コンデンサの致命的な汚れ 蒸留塔の致命的な汚れ 	必要 化合物形態毎のクラッカーへの影響は十分に明らかではない
含窒素化合物	アミド、シアノ化合物 ジハベンゼン-ε-カプロラクタム 等 (全種同定は不可)	<ul style="list-style-type: none"> 蒸留塔の致命的な汚れ 機器の効率低下 触媒被毒 分解炉でNOx化合物に変換 	必要 化合物形態毎のクラッカーへの影響は十分に明らかではない
オレフィン	油中の約40wt%	<ul style="list-style-type: none"> 分解炉の汚れ、閉塞 主要製品収率の低下 	必要
水銀	< 8.1ppb	<ul style="list-style-type: none"> 熱交換器の腐食 触媒の被毒物質 	不要 クラッカーで対応可能な濃度
重金属 Ti, Cr, Fe, Cu, Zr	~数十ppb (トータル量)	<ul style="list-style-type: none"> 触媒の汚染 排水の管理値不適合 	不要 クラッカーで対応可能な濃度
軽金属 Na, Mg, Ca, Al	~数ppm (トータル量)	<ul style="list-style-type: none"> 触媒の汚染 排水の管理値不適合 	不要 クラッカーで対応可能な濃度

● 塩素

塩素の分析結果として 100%有機塩素であり主な化合物は 1-1-フェニル-1-クロロエタン、2-クロロ-2-メチルペンタン等であった。

濃度は数百～数千 ppm のオーダーであり、クラサスケミカルのクラッカーにおいて設定している受け入れ規格に対して大幅に超過している。これらの塩素系化合物は、クラッカーにおいて前述の分解炉で塩化水素等を生成することにより、設備の腐食促進のリスクが存在する。また、分解炉出口直後の前蒸留工程において凝縮した水分に伴伴することで排水の pH への影響を与える。

これらの塩素濃度および塩素がクラッカーに与える影響をもとにクラッカー運転を安定させるためには、特に有機塩素の確実な除去が必要であると判断した。

● 含酸素化合物

含酸素化合物の分析結果としてアルデヒド、ケトン、アルコール等が含まれることが判明したが、それらの全種同定は不可能であった。元素分析による濃度は数千 ppm のオーダーであり、クラサスケミカルのクラッカーにおいて設定している受け入れ規格に対して大幅に超過している。

これらの不適合物は分解炉で低級アルコールやアルデヒドを生成することが見解として分かっており、最終製品への混入や、クラッカーの精製工程において

機器の汚れや閉塞につながることを予想される。

これらは不適合物として対策が必要である。特に本実証で得られた廃プラスチック熱分解油はその形態や官能基が非常に多様であり、形態を問わずに除去できる方法を選択する必要があると判断した。

- 含窒素化合物

含窒素化合物の分析結果としてアミド、シアノ化合物、シアノベンゼン、 ϵ -プロラクタム等が含まれることが判明したが、それらの全種同定は不可能である。元素分析による濃度は数千 ppm のオーダーであり、クラサスケミカルのエチレンプラントにおいて設定している受け入れ規格に対して大幅に超過している。

含窒素化合物は分解炉で NO に分解された場合、クラッカーの深冷分離系においてジエン類と反応し、 -100°C で自己反応を起こし自然発火の可能性がある物質を生成する。そのため不適合物として対策が必要である。特に本実証で得られた廃プラスチック熱分解油中の含窒素化合物はその形態や官能基が非常に多様であり、形態を問わずに除去できる方法を選択する必要があると判断した。

- オレフィン（不飽和炭化水素）

オレフィンの分析結果として油中の約 40wt% が含まれることが判明した。オレフィンは、その割合が多い場合、分解炉での汚れや閉塞、エチレンやプロピレン等の主要製品の収率を低下させる原因となるため、この濃度を低減させる必要がある。

- 水銀 (Hg)

廃プラスチック熱分解油中の水銀濃度の分析として最も混入量が多いと思われる、未選別プラスチックを原料とした廃プラスチック熱分解油の分析を行った結果、8.1ppb 含まれることが判明した。エチレンプラントの受け入れ規格と比較すると、エチレンプラント内の対応設備で処理可能な濃度レベルである。

- 金属類

その他の金属類 (Ti, Cr, Fe, Cu, Zr, Na, Mg, Ca, Al) はクラサスケミカルのエチレンプラントのプロセスにおいて熱交換器の腐食や前述の触媒の被毒物質となる可能性があるが油中濃度は低く、ナフサでの希釈で対応可能であると判断した。

2.8 不適合物の処理方法の選定方針

不適合物の処理技術調査の目的は、石油化学プラントでケミカルリサイクルを実施する際、廃プラスチック由来分解油に含まれる多様な夾雑物がクラッカー設備および製品へ与える悪影響を防ぐことである。そのため、官能基や分子構造の多様性が高い不純物に幅広く対応し、形態を問わず確実な除去が可能な処理技術の選定をすることにした。

2.9 不適合物の処理方法

主要な夾雑物として、有機塩素化合物、含酸素化合物、含窒素化合物、水銀、不飽和炭化水素（オレフィン）が挙げられている。それぞれの処理方法を表 2.11 に記載する。

表 2.11 各夾雑物の処理方法

夾雑物	分析結果	除去方法	可否	可否理由
Cl 有機塩素	100%有機塩素 1-フェニル-1-クロロエタン 2-クロロ-2-メチルペンタン 等	洗浄	×	・無機塩素を対象とした処理技術。九州大学の分析結果より、すべて有機塩素であることが判明したため
		吸着	×	・吸着材の選定には化合物の同定が必要。 ・個別の同定は非常にハードルが高い。
		水素化	○	・有機塩素をHClに変換し、水で抽出・除去可能 ・操作条件が高温・高圧のため消費エネルギー大きい
O 含酸素化合物	アルデヒド、ケトン、アルコール等 (全種同定は不可)	吸着	×	・吸着材の選定には化合物の同定が必要。 ・多様な形態に対し効率面で課題
		水素化	○	・形態を問わずH ₂ Oに変換し、水で抽出・除去可能
N 含窒素化合物	アミド、シアノ化合物等 シアベンゼン、ε-カプロラクタム 等 (全種同定は不可)	蒸留	×	・多様な形態がボトルネックで完全な除去が困難
		水素化	○	・形態を問わずNH ₃ に変換し、水で抽出・除去可能
Hg 水銀	<8.1ppb	吸着	○	・既存技術で選択的に吸着除去が可能
オレフィン 不飽和炭化水素	40wt.%程度	水素化	○	・オレフィンは水素化によるパラフィンへの変換が確実に必要

● 有機塩素

九州大学の分析結果により、廃プラ油には無機塩素は含まれておらず、全て有機塩素であることが明らかとなった。従来の洗浄技術や吸着による処理は有効ではなく、化合物の個別同定が困難であるため、選択的な除去は困難である。水素化プロセスでは、有機塩素を塩化水素に変換したうえで水による抽出・除去が可能となる。ただし、高温高圧運転を要するため消費エネルギーが大きくなる。

● 含酸素化合物

九州大学の分析の結果、アルデヒド、ケトン、アルコールなど多種類・多形態が検出されている。吸着法による除去は、個々の化合物同定が困難なことおよび実効性に課題がある。水素化による一括処理が最適であり、全ての官能基を水に変換し水抽出による除去が可能である。含窒素化合物も同様に、形態の多様性から蒸留処理は十分でなく、完全な除去は困難である。水素化によるアンモニア変換と水抽出が最も有効な除去手段となる。

● 水銀

廃プラスチック熱分解油中の濃度が低いいため濃度の変動があっても想定する使用方法であるとしてナフサでの希釈により対応が可能であるため、追加の対策は不要と判断した。

- オレフィン

廃プラ油中に約 40wt%含有されており、クラッカーの適正運転・収率維持には水素化処理によるパラフィン化が必須である。

以上より、不純物の処理方法として最も有効かつ安全で汎用性の高い技術は水素化プロセスである。水素化によって有機塩素、含酸素化合物、含窒素化合物およびオレフィンをその形態に関わらず、クラッカー運転に適合する成分へ変換し、同時に水抽出により除去することができる。また、従来の水素化プロセスにおいては水素化分解の工程を有するプロセスであることが一般的である。これは、水素化により製造される精製油が灯油相当の重質な原料であり、通常のエチレンプラントでは使用に適さないためである。しかしながらクラサケミカルのエチレンプラントでは4重質原料に対応可能な分解炉を一部有する(4.2項で後述)。これは、他社との競争優位性確立のために過去に多様な原料受け入れを行ってきたためである。水素化分解の工程を省略できることは前処理プロセスで使用する水素量の削減につながり、変動費の削減が可能である。このようなクラサケミカルが受け入れ可能な原料の観点からも水素化プロセスを選択する優位性がある。特に、廃プラ油の性状安定化と主要製品収率の確保においても、この一工程による処理が事業化に向けた最善策であるとの結論が示された。水素化プロセスによる塩素、含酸素、含窒素化合物の除去、オレフィンのパラフィン化処理は石油精製においてすでに導入実績のある既存プロセスの組み合わせで対応が可能である。2章以降は、既存プロセスである水素化プロセスをクラサケミカルのエチレンプラントに導入するための検討を進め、性能・経済性を評価した結果を記載する。

2.10 第2章の実証結果と結論

第2章で作成した計8検体の油化後試料について蛍光X線、FTIR、NMRを駆使して塩素含有量の定量や不純物の特定を行い、以下の結果を得た。

(1) 微量無機成分の分析

未選別廃プラスチックの熱分解油(試料⑧)の蛍光X線分析では、塩素、硫黄の明瞭なピークとケイ素の微小ピークが検出されたが、原料中のカルシウム、カリウム、鉄、チタンなどの無機成分は検出されなかった(検出限界 1-10ppm)。これらの金属元素は熱分解過程で残渣側に留まり、生成油への移行は極めて限定的であった。

ICP-OES分析により、鉄、チタン、クロム、銅、ジルコニウムなどの遷移金属が検出されたが、いずれもppbレベルの極微量であった。これらは熱分解装置

のステンレス鋼配管と塩化水素との反応による溶出、またはコンタミネーションに由来すると考えられる。一方、カルシウム、ナトリウム、マグネシウム、アルミニウム、カリウムが比較的高濃度で検出されたが、これらはプラスチック成分由来または環境水からのコンタミネーションの可能性もある。本結果は、熱分解プロセスが無機成分の効果的な分離機能を有することを示している。

(2) 混合プラスチックの熱分解挙動

PE/PP/PS 混合物 (試料①) の熱分解では、段階的な分解挙動が観察された。初期段階では PS が優先的に分解し、トルエン、エチルベンゼン、スチレンなどの芳香族炭化水素が生成油中の約 50% を占めた。中期段階では PP の分解が活発化し、軽油・重質油成分が増加した。後期段階ではポリエチレンの分解が主体となり、直鎖状パラフィン/オレフィンが生成した。特筆すべき点として、炭素数が増加するとオレフィン/パラフィン比が低下する傾向が確認された。

(3) 共存物質の影響

各種添加物を含む試料の分析結果から、以下の知見が得られた。

- PET の影響

安息香酸やテレフタル酸などの有機カルボン酸が生成し、酸素含有量が 1.0% から 2.4% に増加した。これらの酸性化合物は GC カラムと強く吸着し、分析上の課題となった。

- 塩素系プラスチックの影響

ポリ塩化ビニル等を含む試料では、塩素含有量が大幅に増加した (未選別試料で 3500ppm、光学選別後で 270ppm)。1-クロロエチルベンゼン、2-クロロ-2-メチルペンタンなどの有機塩素化合物が生成し、これらは塩化水素と不飽和炭化水素の反応により形成されたと考えられる。

(4) 塩素による腐食問題

熱分解過程で生成した塩化水素 (オフガス中 20-50ppm) は、ステンレス鋼製反応器に深刻な腐食を引き起こした。300℃以上の高温下で塩素イオンが不動態皮膜を破壊し、Fe、Cr、Ni、Mo 等の金属が溶出した。これらの金属イオンは触媒毒として作用し、生成油の品質低下や環境基準への不適合をもたらす可能性がある。対策として、高耐食性合金の使用、セラミックコーティング、二段階処理システム (低温脱塩素→本格熱分解)、アルカリ吸収剤の添加などが検討されている。

(5) 酸素・窒素化合物の生成

反応系中の共存酸素により、スチレンからベンズアルデヒド、エチルベンゼンからアセトフェノンなどの部分酸化生成物が形成された。また、ナイロン系プラスチックの分解により含窒素化合物が生成することも確認された。

廃プラスチックの熱分解における生成油の品質は、原料組成と共存物質に大きく依存する。特に塩素系プラスチックの存在は、有機塩素化合物の生成と装置腐食という二重の問題を引き起こすため、前処理による除去が重要である。実用化に向けては、材料科学とプロセス工学の融合による総合的な対策が不可欠である。また、九州大学による分析結果をもとに、廃プラ分解油中には多種多様な含酸素・含窒素化合物が多く検出され、それらの一部がクラッカー設備、さらには最終製品へ影響を及ぼしうる潜在的リスクを持つことを確認した。とりわけこれら不純物は官能基や分子構造が著しく多様であり、特定の化合物にフォーカスした除去技術だけではカバーしきれないことが明らかになった。例えば、有機塩素による設備腐食や含酸素化合物によるコンデンサ・蒸留塔汚染、さらには含窒素化合物による NO_x 生成など、石油化学プラントにとって甚大な悪影響が想定される。一方で、廃プラスチック由来油に含まれる無数の化学種を網羅的に特定するのは困難であり、運転リスク低減のためには一括除去可能な処理技術の確立が不可欠である。そのため、クラッカー運転の安定性や最終製品の品質を維持するためには、「除去すべき不純物の形態に左右されず、確実に作用する汎用性の高い処理技術」が必要とされる。本報告での成果として、特に水素化+抽出（水を溶媒とする）が多様な不純物に対応しうることが示唆された。

水素化では、有機塩素は水素化処理により塩化水素へ変換され、水抽出で除去が可能である。含酸素化合物、含窒素化合物も同様に、それぞれ H₂O・NH₃ などに形態変換され、効率よく分離できる。また、オレフィンについても、水素化反応で飽和炭化水素（パラフィン）へ変換され、装置トラブル防止、主要製品収率の増加につながる。

以上より、本章の結論を以下の通りまとめる。

- ・ 九州大学での分析の結果、多種類の含酸素・含窒素化合物が不純物として検出されており、それらはエチレンプラントの設備や最終製品に悪影響を及ぼすリスクがある。
- ・ 本事業で得られる廃プラスチック熱分解油中の不純物は、官能基や分子構造の多様性が高く、その網羅的な分析は困難である。また、不純物形態のクラッカーへの影響については定量的に把握できていないのが現状である。そのため、クラッカー運転の安定性・最終製品の品質維持には「不純物形態を問わず、確実な除去処理が可能な技術の選択が必要であると判断した。

第 3 章

第3章 石油化学プラントでの前処理プロセスの概略設計（クラサケミカル）

本章では廃プラスチック熱分解油をクラサケミカルのクラッカーに投入するために必要な前処理プロセスの概略設計について述べる。令和6年度の実証事業において、油中の不純物濃度を低減するためにPP/PEのみを光学選別した廃プラスチックを原料として製造された廃プラスチック熱分解油をTypicalな性状として選択し、前処理設備として水素化プロセスの概略設計の検討を行った。

選別後PP/PE由来の廃プラスチック熱分解油を選択した理由としては、その他のサンプルに比較して塩素濃度が最も低いためである。第2章で記述した通り、有機塩素は分解炉で塩化水素まで分解され、設備の腐食や応力腐食割れの原因となる。また、プロセスの最上流に位置する分解工程に影響を与えることから、ナフサによる希釈以外のプロセス側での対応ができないため、この濃度が低いほど処理コストを低減できる。これらの理由より、令和6年度に得られた全サンプルの分析結果から、最も塩素濃度が低い選別後PP/PEを原料とした廃プラスチック熱分解油を選択した。

処理量は21,000t/年とした。これは仕様書に記載の通り、廃プラスチックの想定回収量30,000t/年を油化した際に得られる熱分解油量から決定した。

3.1 設計に使用した廃プラスチック熱分解油の性状とその検討方法

はじめに設計に使用した廃プラスチック熱分解油の性状を示す。この廃プラスチック熱分解油は選別後PP/PEを原料として製造されたものである。各分析はクラサケミカルが通常ナフサに行っている内容と同等の項目に対して行った。この廃プラスチック熱分解油の各分析値についてそれぞれの特徴を示す。

● トータル硫黄分 (S)

硫黄分は通常ナフサに含まれる量と比較して少ない。原料中の硫黄は分解炉の反応管表面でコーキングやCOを発生させる触媒作用を被毒し、これらを低減する役割を持つ。この対策としてS（硫黄分）を含んだ薬液を意図的に添加している。

本原料を使用する場合、硫黄分が少ないことによりCOの発生量が多くコーキングの進行が速いことが懸念されるためエチレンプラント側の対策として薬液の注入が必要である。

また、水素化処理において一般的に使用されるCo-Mo、Ni-Mo水素化処理触媒は反応の前に活性状態にするために硫化する必要がある。これは硫黄含有原料そのものを触媒と接触させる、あるいはH₂S（硫化水素）をリサイクル水素中に添加することによって行われる。廃プラスチック熱分解油の少ないS（硫黄分）

が、これらの活性に影響を与える可能性については、機器の詳細設計時に検討が必要である。

- トータル窒素分 (N)

窒素分の含有量が多い場合には分解炉で NO_x を生成する。これは精製工程の深冷分離系において NO_x ガムと呼ばれるポリマーに成長し、バルブや熱交換器で蓄積し、閉塞の可能性がある。

窒素分の含有量はナフサに含まれる量と比較して異常に多い。しかしながら、影響箇所がプロセス後段であるため原料ナフサでの希釈に加え、プロセス流体での希釈が可能となり受け入れ数値目標を緩和できる。

- 塩素分 (Cl)

塩素分は分解炉で分解され、塩化水素を発生させる。これは分解炉の配管の腐食や応力腐食割れの原因となる。塩素分の含有量はナフサに含まれる量と比較して異常に多い。

- ケイ素 (Si)

エチレンプラントでは監視項目としていないため含有量の判断基準を有していないが、前処理プロセスにおける反応器の触媒毒となることが分かった。前処理プロセスのうち工業的に用いられている水素化触媒は、基本的にはアルミナを担体とし担持金属は Mo、Co、Ni を組み合わせたものが選択される。この触媒に大きな触媒劣化が認められるケースがあり、この原因は触媒上に Si (ケイ素) が蓄積するためであることが知られている。

触媒は運転コスト (変動費) に大きな影響を与えるため、費用を低減するためには再生工程による触媒活性回復が行われる。一方で永久被毒により失活の場合には触媒交換をするほかに活性を回復させる方法がないため、その原因となりうる Si (ケイ素) の含有量は確認が必要である。また、使用済み触媒を有価金属として回収される際にも Si による被毒を受けている場合には、価値が低減し運転コストの増加要因となる。したがって、次ステップで機器の詳細検討に進む場合には、Si (ケイ素) 含有量の把握が必要である。

- ヒ素、総金属

それぞれエチレンプラント内に有する水添反応を行う反応器の触媒毒となるが、今回の含有量は受け入れ基準以下であるため問題ない。

- 水銀 (Hg)

エチレンプラント内に有する水添反応を行う反応器の触媒毒となるが、今回の含有量は受け入れ基準以下であるため問題ない。

- 臭素価、ジエン価、オレフィン濃度

通常ナフサでのオレフィン濃度はナフサと比較して異常に高く、分解炉でのファウリングの懸念がある。

表 3.1 想定原料の特性

項目	単位*1	値
比重		0.7935
トータル硫黄分 (S)	wtppm	23
トータル窒素分 (N)	wtppm	3,300
含酸素化合物 (O)	wt%	1.1
塩素分 (Cl)	wtppm	270
ケイ素 (Si)	wtppm	<10
ヒ素 (As)	wtppb	<100
総金属/アルカリ/アルカリ土類 /リン (Si, As, Hg 除く)	wtppm	<5
水銀 (Hg)	wtppb	8.1
臭素価	g/100g	50
ジエン価	g I ₂ /100g	3.0
酸価	mg KOH/g	8.48
パラフィン	wt%	19.7
オレフィン	wt%	40.1
ナフテン	wt%	5.3
アロマ	wt%	17.9
蒸留曲線 (初留点)	°C	52.5
蒸留曲線 (5 wt%)	°C	93.5
蒸留曲線 (10 wt%)	°C	111.5
蒸留曲線 (30 wt%)	°C	150.5
蒸留曲線 (50 wt%)	°C	200.0
蒸留曲線 (70 wt%)	°C	244.5
蒸留曲線 (90 wt%)	°C	294.0
蒸留曲線 (95 wt%)	°C	319.5
蒸留曲線 (終留点)	°C	333.5

*1 未記載の単位は無次元数

3.2 受け入れ数値目標の設定

第2章にて本事業で対象とする廃プラスチック熱分解油の Typical な性状から水素化による前処理が有効であると判断した。そこでまずは、使用方法を想定し、3.1項で示すような廃プラスチック熱分解油を前処理プロセスで精製する際に、精製油がクリアすべき数値目標の設定を行った。精製油スペックの数値目

標を表 3.2 に示す。

表 3.2 精製油スペックの数値目標

項目	単位	数値
比重	—	0.788
Reid 蒸気圧	kPa	< 89.6
トータル硫黄分 (S)	wtpm	< 600
トータル窒素分 (N)	wtpm	< 180
含酸素化合物 (O)	wtpm	< 300
臭素価	g/100g	< 2
塩素分	wtpm	< 6
シリコン (Si)	wtpm	< 1
リン (P)	wtpm	< 1
水銀 (Hg)	wtppb	< 3
その他金属 (Ca, K, Na, Mg, Cu, 各成分)	wtpm	< 1
蒸留曲線 (初留点)	°C	52.5
蒸留曲線 (終留点)	°C	333.5

本実証事業で製造される廃プラスチック熱分解油は第 1 章に記述の通り、オレフィン濃度が高く、通常ナフサに比べて重質であるため分解炉のコーキングを促進する懸念がある。また、各種不純物濃度も高いため、前処理設備による処理を行った後に通常ナフサでの希釈を行い、分解炉に投入することを想定した。

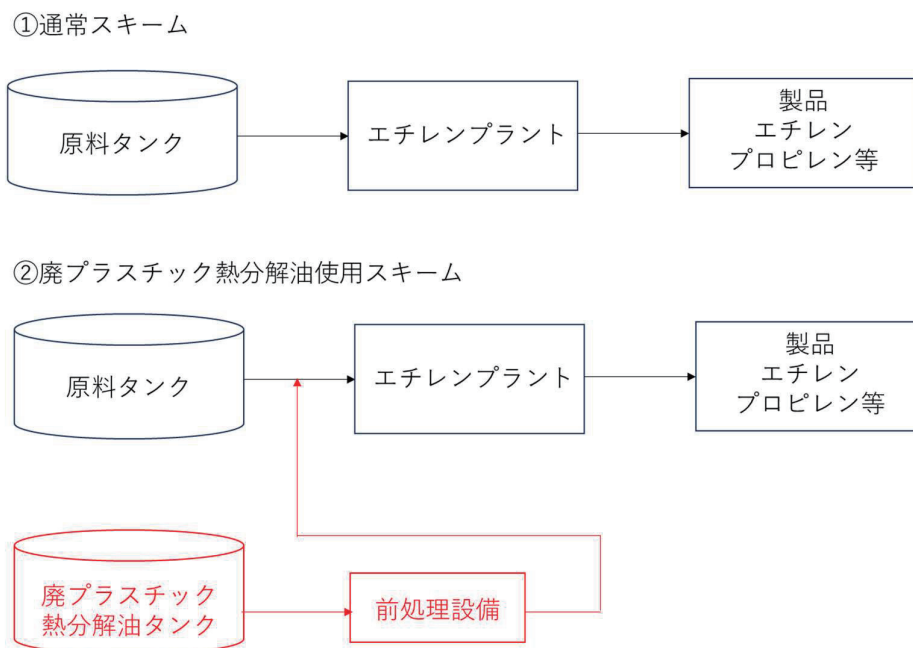


図 3.1 エチレンプラントへの送給スキーム

この時の投入量は分解炉に対して一定以下の濃度となる量を想定して希釈倍率を設定した。

各成分については、廃プラスチック熱分解油受入れ時の濃度から規格値までの工程ごとの希釈や濃縮も考慮したうえで、前処理設備出口で必要な除去率を導出している。

3.3 前処理プロセスの設計条件の検討

2.1 項で示した性状の廃プラスチック熱分解油を原料として使用するために、満たすべき精製油スペックの数値目標を 2.2 項で示した。

この性状の条件をもとに、前処理プロセスとして 21,000t/年を処理するための稼働時間等の設計条件を決定した。表 3.3 に示す。

表 3.3 前処理プロセスの設計条件サマリー

項目	単位	値
稼働時間	h/年	8,000
フィード量	t/年	21,000
精製油量(SOR/EOR)*1	t/年	20,800/20,700

*1 Start of Run/End of Run の略。稼働時間 8,000h のうちスタート付近の期間とエンド付近の期間を示す。

3.4 概略ブロックフロー

図 3.2 に本事業で概略設計を行ったプロセスのブロックフローを示す。本ブロックフローはライセンスから受領した PFD をもとに作成した。

概要としては水素化により不純物の形態を変換し、水で抽出するプロセスである。廃プラスチック熱分解油は不純物として、窒素化合物、含酸素化合物を多く含むが、これらをアンモニア、水の形態にそれぞれ変換し後段の水洗設備によって水で抽出・除去する。

水素化では不純物の形態変換と同時にオレフィンの二重結合にも水素が結合し、飽和炭化水素に変換する。この反応は発熱反応であるため、リサイクル量で温度をコントロールする。また、不飽和分が多いためそれらが意図せず重合したガム成分によるファウリング、反応低下、圧損増加の懸念がある。このリスクを低減するためにも、リサイクルによってフィード中の不飽和炭化水素濃度を低減させた上で反応器にフィードする。また、廃プラスチック熱分解油および精製油の貯蔵タンクの 신설が必要である。廃プラスチック熱分解油の高い不飽和炭化水素濃度によってそのため、温度および窒素雰囲気下での保管が可能なタンクの 신설が必要である。

必要な用役はクラサケミカル内の既存設備から供給する。

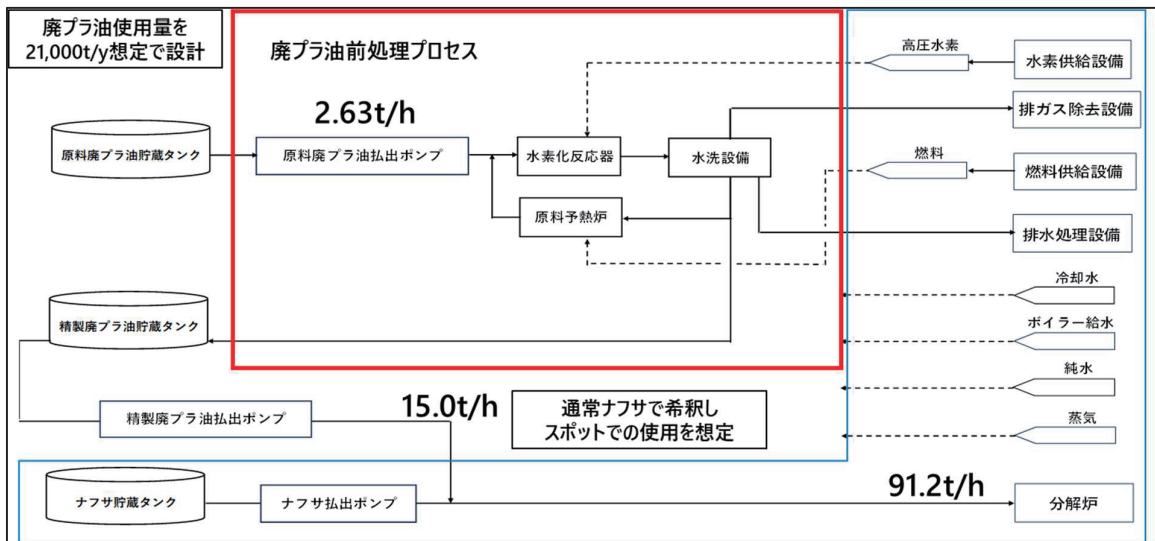


図 3.2 クラサケミカルにおける廃プラスチック熱分解油の精製処理プロセスブロックフロー

各プロセスの役割

(1) 水素化反応器

供給された廃プラスチック熱分解油は加熱炉で所定の温度まで予熱された後、

昇圧されて反応器に入る。その後、循環水素と混合され、原料油・水素の混合物は触媒の存在下でオレフィン・ジエン類の飽和、窒素化合物、含酸素化合物をそれぞれ NH_3 、 H_2O に変換される。

このときに減圧軽油のような残油との間の切れが悪い油では、残油中の金属化合物が混入する。実装置の運転では、細孔径の大きな触媒を反応器入り口にガード触媒として配置し、能動的に金属化合物を吸着させて下流の触媒を保護する。今回対象とする廃プラスチック熱分解油も常圧の蒸留性状において、残油量が 1vol.% と多いため、同様の設計思想による触媒の充填が必要であると考えられる。

反応器を出た生成物は高温高压分離槽に入り、一部がリサイクルフィードとして原料油を希釈する役割を持つ。反応は気液混相反応、トリクル相反応で行われる。未反応水素、軽質の炭化水素を含んだガス成分はそのまま燃料ガスとして使用されるか、リサイクルして再び水素化反応器で使用される。

これら原料の性状や製品のスペック、運転操作条件の制約などによって最適な組み合わせや操作条件をシステムとして提供しているのが、各ライセンスによるプロセスである。

(2) 水洗設備

反応器を出た生成物は苛性ソーダによってアルカリに調製された水で洗浄する。この時に H_2S 、 NH_3 、塩化物、微量炭化水素を含んだ洗浄水は排水処理設備に送られる。

(3) 原料加熱炉

水洗設備に送られて不純物を除去されたあとは油水分離槽に送られる。この油分は一部燃料を使用して加熱され、フィードと混合することで原料中のジエン濃度を低下、発熱量をコントロールする。

3.5 第3章の実証結果と結論

本章では、令和6年度事業で得られた廃プラスチック熱分解油のうち、塩素濃度が最も低い光学選別後 PP/PE を原料とした熱分解油を Typical な性状として選択し、前処理設備の検討を行った。処理量は 21,000t/年とし、クラサスケミカルのエチレンプラントに投入可能なレベルまで精製するための数値目標を設定した。水素化反応器、水洗設備、原料加熱炉から構成される前処理プロセスの概略ブロックフローを作成し、精製油スペックが数値目標を満たすことを確認した。

以上より、本章の結論を以下のとおりまとめる。

- ・ クラサスケミカルのエチレンプラントに投入するために必要な精製油の数値目標（塩素分<6wtppm、含酸素化合物<300wtppm等）を設定した。
- ・ 水素化+水洗プロセスによる前処理プロセスの概略ブロックフローを作成した。
- ・ 本前処理プロセスにより、廃プラスチック熱分解油を処理した精製油は、設定した数値目標を100%満たすことを確認した。

第 4 章

第4章 クラッカーで分解した際の製品収率評価（クラサスケミカル）

本章では、前処理を施した廃プラスチック熱分解油を既設クラッカーで熱分解した場合の製品収率評価について述べる。廃プラスチック熱分解油の PIONA 組成および蒸留性状の分析を行い、クラサスケミカル（株）のシミュレーション・モデルを用いて主要製品の収率を評価した。

廃プラスチックのケミカルリサイクルでは、廃プラから得た油（廃プラスチック熱分解油）を石油化学プラントのクラッカー（分解炉）に原料として投入し、エチレンなどの化成品原料へ転換することが期待されている。しかしながら、本事業で対象とするような熱分解によって得られる廃プラ油は一般的に不飽和炭化水素であるオレフィンの割合が多く、40%程度含まれることが知られている。通常のナフサではオレフィンの質量割合は 1%以下であるため、ナフサとは異なる製品収率となることが予測された。

そこで本事業では、廃プラ油中の炭化水素組成の分析を行い、選別・前処理を施した廃プラ油を既設クラッカーで熱分解させた場合、主要製品の収率がどの程度になるかを評価した。収率評価には廃プラスチック熱分解油の PIONA 組成、蒸留性状のデータが必要であるため、クラサスケミカルが通常のナフサに対して行っているものと同等の分析を行った。収率評価の方法にはクラサスケミカルで実際の生産計画に用いられるシミュレーション・モデルを使用し、廃プラスチック熱分解油を原料として使用する際のクラッカーへの投入時の製品収率を推察した。

4.1 製品収率の計算に使用した廃プラスチック熱分解油の組成

ナフサや NGL（Natural Gas Liquid）をはじめとして、廃プラスチック熱分解油も含む、炭化水素の原料組成を表す指標に PIONA がある。これは「Normal-Paraffins（ノルマルパラフィン）」「Iso-Paraffins（イソパラフィン）」「Olefins（オレフィン）」「Naphthenes（ナフテン）」「Aromatics（アロマティック）」の 5 つの大きなカテゴリーに分類して表現する分析・評価手法であり、石油化学分野や燃料品質評価、リサイクル油の組成分析などに広く使用される。各成分の特徴について示す。

- Normal-Paraffins（ノルマルパラフィン、n-パラフィン）、Iso-paraffins（イソパラフィン、iso-パラフィン）

直鎖状、または単純分岐した飽和炭化水素（アルカン）である。n-パラフィンは直鎖、iso-パラフィンは分岐鎖（Branch Paraffins とも呼ばれる）である。比較的安定で、主に燃焼用や石油化学原料（エチレンなど）の前駆体である。原料としては、パラフィン中の n-パラフィンの割合が高いほど主要製品であるエ

チレンの収率が高い。また、パラフィン中のイソパラフィンの割合が高いほど主要製品であるプロピレンの収率が高い。

- Olefins (オレフィン)

オレフィンとは炭素間に二重結合を有する不飽和炭化水素であり、代表例としてエチレンやプロピレンが挙げられる。廃プラスチック熱分解油中に含まれるオレフィンではC5以上が主成分である。反応性が高く、化学品原料として重要な成分である。エチレンプラントの原料として使用する場合には、分解炉の汚れや主要製品収率の低下に影響するため配慮が必要である。

- Naphthenes (ナフテン)

ナフテン類は炭素原子が環状に連なった飽和炭化水素(シクロアルカン)であり、一般にシクロパラフィンとも呼ばれる。二重結合を持たず安定した構造をしているため、ガソリン成分として重要である。代表例にはシクロペンタンやシクロヘキサンがある

- Aromatics (アロマティックス)

アロマ類はベンゼン環などの芳香族炭化水素で構成される。分子構造が極めて安定している。熱分解反応によって開環しにくいいため、エチレンプラントの原料として使用する場合には、含有量が増えると製品として有益性が低い分解ガソリンの収率が高くなることが懸念されるため、使用量には規制が設けられている。

本実証事業で分析した廃プラスチック熱分解油の PIONA 組成および蒸留性状を表 4.1 に示す。これらの分析は日本海事検定協会に依頼し、ナフサの分析で一般的に使われる手法である JIS K 2536-2、GC-MS を組み合わせた方法によって行った。この際、JIS K 2536-2 の適用範囲は End Point $\leq 250^{\circ}\text{C}$ であるが、今回対象とした廃プラ油は End Point = 333.5°C であった。そのため分析の適用範囲となるように End Point が $\leq 250^{\circ}\text{C}$ になるサンプルをクラサスケミカルで調製し分析を依頼した。分析結果を表 4.1 に示す。

表 4.1 分析サンプルの PIONA 分析結果

C - 3	0.00	**** ^{*1}	0.02	****	****	0.02
C - 4	0.10	0.01	0.33	****	****	0.44
C - 5	2.39	0.03	0.78	0.02	****	3.22
C - 6	0.56	0.85	4.93	0.14	0.68	7.17
C - 7	0.92	0.18	3.09	0.37	2.03	6.59
C - 8	1.04	1.98	3.21	0.77	7.73	14.73
C - 9	0.93	1.21	16.86	3.58	2.02	24.60
C - 10	1.10	0.50	3.27	0.34	2.66	7.87
C - 11	1.11	1.52	3.45	0.05	1.14	7.26
C - 12	1.02	1.08	1.75	0.00	1.33	5.18
C - 13	2.73	0.45	2.38	0.00	0.35	5.91
TOTAL	11.90	7.81	40.07	5.27	17.94	82.98

*1 **** は分析の結果未検出であることを示す。

今回の分析において定量できたのは分析した試料全体の 83wt%であり、C-13 までの範囲であった。表 4.2 に示す全成分を含む試料の蒸留性状と比較すると、C-20 までの成分が含まれていることが予想されるが、適用範囲とするために重質分をカットしたため、この範囲成分は定量的に分析できていない。また、廃プラスチック熱分解油をガスクロマトグラフィーで分析したときに得られるクロマトグラムには無数のピークが見られ、それらを一つ一つ同定・定量分析することは現実的ではない。しかしながら使用するシミュレーションの入力制約として、C10 以上の重質分は一定の炭素数範囲を同一成分とみなすため、C13 以降の成分に関しては蒸留性状から仮定をおくことにした。

分析結果として得られた蒸留性状および仮定した組成を表 4.2 に示す。

表 4.2 全留分サンプルの蒸留性状

相当炭素数	留出%	単位	蒸留性状	
-	初留点	°C	52.5	-
-	5%	°C	93.5	-
-	10%	°C	111.5	-
-	20%	°C	133.0	-
-	30%	°C	150.5	-
-	40%	°C	174.0	-
-	50%	°C	200.0	-
-	60%	°C	225.0	-
-	70%	°C	244.5	-
分析サンプル End→	80%	°C	266.0	-
-	90%	°C	294.0	-
-	95%	°C	319.5	-
全留分サンプル End→	終点	°C	333.5	→C20 相当

表 4.3 廃プラスチック熱分解油（選別後 PP/PE）の仮定組成

C-No	単位	N-パラフィン	I-パラフィン	オレフィン	ナフテン	アロマ	トータル
C-3	wt%	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02
C-4	wt%	0.10	0.01	0.33	0.00	0.00	0.44
C-5	wt%	2.39	0.03	0.78	0.02	0.00	3.22
C-6	wt%	0.56	0.85	4.93	0.14	0.68	7.17
C-7	wt%	0.92	0.18	3.09	0.37	2.03	6.59
C-8	wt%	1.04	1.98	3.21	0.77	7.73	14.73
C-9	wt%	0.93	1.21	16.86	3.58	2.02	24.60
C-10	wt%	1.10	0.50	3.27	0.34	2.66	7.87
C-11	wt%	1.11	1.52	3.45	0.05	1.14	7.26
C-12	wt%	1.02	1.08	1.75	0.00	1.33	5.18
C-13	wt%	2.73	0.45	2.38	0.00	0.35	5.91
Total	wt%	11.90	7.81	40.07	5.27	17.94	82.98
以下、仮定した組成							
C-14	wt%	0.47	0.31	1.58	0.21	0.71	3.27
C-15	wt%	0.54	0.35	1.80	0.24	0.81	3.73
C-16	wt%	0.80	0.52	2.69	0.35	1.20	5.56
C-17	wt%						
C-18	wt%	0.64	0.42	2.15	0.28	0.96	4.45
C-19	wt%						
C-20	wt%						
Total	wt%	14.34	9.41	48.28	6.35	21.62	100.00

この時にカットした $\geq 250^{\circ}\text{C}$ の重質分の収率への影響について事前検討を行った。分析結果として得られた～C13までの組成および～C20までの組成を仮定してシミュレーションを行い、比較した結果を示す。

結果に示すように、重質組成の仮定有無にかかわらず、シミュレーション上での収率評価結果には大きな影響を与えないことが分かった。重質組成を仮定したケースの方が、エチレン収率が高くなっているがこれは、実運転に合わせて分解炉の温度が一定となるように収束条件を決定したためである。これによって入熱量が増加したため、分解反応が進む方向に計算された結果であると考えられる。

表 4.4 重質組成の仮定有無による収率評価

油種		単位	重質仮定無し	重質仮定有り
C13 以上の割合		wt. %	0	17
n-P		wt. %	14.34	14.34
i-P		wt. %	9.41	9.41
O		wt. %	48.28	48.28
N		wt. %	6.35	6.35
A		wt. %	21.62	21.62
n-P/P		-	0.604	0.604
製品	C2H4—エチレン	wt. %	15.70	17.05
	C3H6—プロピレン	wt. %	10.44	11.15
	NBB—ブタン、ブタジエン	wt. %	8.36	8.95
	C5	wt. %	4.34	4.87
	CGL—分解ガソリン	wt. %	21.09	20.22
	CKR—分解ケロシン	wt. %	15.87	13.89
	CFO—分解重油	wt. %	15.00	14.13
P/E 比 ^{*1}		-	0.67	0.65

*1) Propylene/Ethylene 比 製品プロピレン収率とエチレン収率の比。エチレン収率は分解炉温度が高く、希釈蒸気量が多いほうが良いが、これらは分解炉でよりエネルギーを使用する方向であるため、どの程度シビアな運転条件であるかの指標。

次に、この廃プラスチック熱分解油が前処理設備で水素化処理を受けて、オレフィン分を除去した精製油の組成を決定した。組成はオレフィンがすべて同一の炭素数でパラフィンに変換されるとおいて決定した。

収率評価を実施するためにシミュレーションに入力した組成を表 4.5 に示す。今回の収率評価では、この表の組成をもとに行った。

表 4.5 水添処理後の廃プラスチック熱分解油（選別後 PP/PE）の仮定組成

C-No	単位	n-パラフィン	iso-パラフィン	オレフィン	ナフテン	アロマ	トータル
C-3	wt%	0.012	0.008	0.00	0.00	0.00	0.02
C-4	wt%	0.30	0.141	0.00	0.00	0.00	0.44
C-5	wt%	2.86	0.339	0.00	0.02	0.00	3.22
C-6	wt%	3.54	2.803	0.00	0.14	0.68	7.16
C-7	wt%	2.79	1.404	0.00	0.37	2.03	6.59
C-8	wt%	2.98	3.252	0.00	0.77	7.73	14.73
C-9	wt%	11.11	7.891	0.00	3.58	2.02	24.60
C-10	wt%	3.07	1.796	0.00	0.34	2.66	7.87
C-11	wt%	3.19	2.887	0.00	0.05	1.14	7.27
C-12	wt%	2.08	1.77	0.00	0.00	1.33	5.18
C-13	wt%	4.17	1.39	0.00	0.00	0.35	5.91
以下、仮定した組成							
C-14	wt%	1.42	0.93	0.00	0.21	0.71	3.27
C-15	wt%	1.62	1.07	0.00	0.24	0.81	3.73
C-16	wt%	2.42	1.587	0.00	0.35	1.20	5.56
C-17	wt%						
C-18	wt%	1.93	1.270	0.00	0.28	0.96	4.45
C-19	wt%						
C-20	wt%						
Total	wt%	43.49	28.54	0.00	6.35	21.62	100.00

4.2 シミュレーション内容の詳細

シミュレーションはクラサスケミカルが通常の生産計画に使用しているソフトを使用した。

計算のモデルとして使用分解炉はクラサスケミカルが有する重質原料に対応可能な炉を選択した。原料の投入量は分解炉が有する能力 100%分とした。組成は安全サイドのために全量が廃プラスチック熱分解油原料として計算した。

分解炉に原料を投入する際には蒸気で原料を希釈することが一般的であり、その炭化水素との割合を S/H (Steam/Hydrocarbon 重量比) と呼ぶ。この S/H および分解温度は原料種類によって最適値が異なるため、今回は性状が似ているガスオイル (C10~C20 の液体炭化水素混合物) を原料として使用する際的设计条件で計算を行った。

4.3 製品収率の評価結果

シミュレーションの結果を表 4.6 に示す。

表 4.6 シミュレーションによる収率評価

ケース	単位	ベース		廃プラスチック熱分解油			
		ガスオイル	ナフサ	仮定 無し	重質 仮定	水添後	
n-P	wt. %	-	41.65	14.34	14.34	43.49	
i-P	wt. %	-	36.27	9.41	9.41	28.54	
O	wt. %	-	0.21	48.28	48.28	0.00	
N	wt. %	-	14.16	6.35	6.35	6.35	
A	wt. %	-	7.70	21.62	21.62	21.62	
n-P/P	-	-	0.534	0.604	0.604	0.604	
製品 収率	C2H4 -エチレン	wt. %	20.56	26.50	15.70	17.05	27.40
	C3H6 -プロピレン	wt. %	13.36	17.23	10.44	11.15	16.04
	NBB -ブタン、ブタ ジエン	wt. %	5.39	4.51	8.36	8.95	10.95
	C5	wt. %	6.27	5.91	4.34	4.87	4.85
	CGL -分解ガソリ ン	wt. %	11.22	14.37	21.09	20.22	15.87
	CKR -分解ケロシ ン	wt. %	5.62	1.98	15.87	13.89	3.79
	CFO -分解重油	wt. %	18.51	2.74	15.00	14.13	8.20

廃プラスチック熱分解油を水素化した後の精製油をエチレンプラントに投入した際の収率はナフサに比べて同等のエチレン収率が得られることが分かった。主要製品収率である、プロピレン、ブタジエン等の収率にも変化はない。

また、分解ケロシン、分解ガソリン、分解重油等の重質製品収率がナフサに比べて高いことが判明した。

エチレン、プロピレン等の主要オレフィン収率が維持された理由としては、廃プラスチック熱分解油の n-P (ノルマルパラフィン含有量が一般的なナフサと同等であるためであることが理由の一つであると考えられる。ナフサの収率評価

において、エチレン収率は n-P 含有量との相関があり、n-P 含有量比の増加に伴って高くなるため、この値がナフサ同等の廃プラスチック熱分解油では、主要オレフィン収率が大きく変化しなかったと考えられる。

また、今回はシミュレーションの収束条件を、実運転をトレースして目的分解温度になるように入熱量を変化させる、としている。これによって、ナフサと比べて重質分が多い廃プラスチック熱分解油では、計算上の入熱量が増加し、分解反応が進む方向に計算されたと考えられる。

4.4 第4章の実証結果と結論

廃プラスチック熱分解油中の不純物除去方法として水素化分解を想定している。廃プラ油はその製造法上オレフィン・ジエン分を多く含むが、それらも水素化によって除去される。(ライセンサーヒアリングによると反応性はジエン>オレフィン>含酸素・含窒素化合物のため)

今回の計算結果より油中のオレフィン分をパラフィンに水素化した廃プラスチック熱分解油をエチレンプラントに投入した際の製品収率は、ガスオイルと同等の条件下で主要製品収率を維持できることが判明した。

以上より、本章の結論を以下の通りまとめる。

- ・ 廃プラスチック熱分解油の分析結果として、重質分の組成が分析できていないが、シミュレーション上ではその組成仮定有無で製品収率に変化がないことが分かった。
- ・ 廃プラスチック熱分解油を、前処理設備を通してオレフィンを除去した精製油をクラッカーで処理した場合の収率をシミュレーション上で評価した結果、NGL 分解条件において、主要製品収率はナフサと同等であることを確認した。
- ・ 一方で、分解ガソリン、ケロシンなどクラサケミカルにとって主要製品ではない製品収率が増加することが分かった。
- ・

第 5 章

第5章 概略設備設置コストの検討（クラサスケミカル（株））

本章では、廃プラスチック熱分解油の前処理プロセスに必要な概略設備費および用役費を算出し、エチレン価格への影響を評価した結果について述べる。水素化＋水洗プロセスを採用した場合の設備費、変動費を算出し、通常スキーム（ナフサ原料）との比較を行った。

不適合物を分別除去するための装置の開発検討については、既存設備の導入検討を行った。これは分析結果よりクラサスケミカルの保有するエチレンプラントの原料受け入れ規格から除去すべき不純物を判断した結果、前述の水素化＋水洗プロセスを採用することが最も効果的と判断した。本章では、想定プロセスのコストインパクトを評価する。

5.1 概略設備費および前処理設備の用役費の概算

● 設備費

設備費は公開できないため、コストインパクトとして後述の 5.3 項に記載する。

● 前処理設備の変動費

ライセンサーからの用役使用量の受領情報をもとに算出した前処理設備の変動費を表 5.1 に示す。

表 5.1 前処理設備の変動費

Input	単位	コスト
H2	[¥/h]	
苛性ソーダ	[¥/h]	
Input 合計・・・ (1)	[¥/h]	9,031
用役		
電力	[¥/h]	
燃料 (C4)	[¥/h]	
高圧蒸気使用	[¥/h]	
高圧蒸気製造	[¥/h]	
中圧蒸気使用	[¥/h]	
低圧蒸気使用	[¥/h]	
洗浄用水	[¥/h]	
冷却水	[¥/h]	
高圧水	[¥/h]	
用役合計・・・ (2)	[¥/h]	17,801
(1) + (2) 変動費 Total	[¥/h]	26,832

5.2 通常スキームと廃プラスチック熱分解油使用スキーム

本実証事業において得られた設備費および前処理設備で使用する UTT による変動費を製品価格に反映した場合のインパクトについて評価を行った。今回の評価ではクラサケミカルで想定する各用役の単価をもとに経済性を判断した。

本実証事業において得られた廃プラ油の石油化学プラントへの導入では、クラサケミカルが取得している ISCC PLUS 認証によるマスバランス方式の採用を想定している。

マスバランス方式とは、廃プラスチック由来原料を他の原料と混合して利用し、その投入量に応じて製品へ環境価値を割り当てるトレーサビリティである。これにより、廃プラスチック熱分解油をナフサで希釈して使用する場合にも、ケミカルリサイクル原料による製品であることを社会的に証明しつつ製造・流通させることが可能である。マスバランス方式では使用した原料量に応じて、特定の製品にその価値を付与することが可能である。今回は②廃プラ油スキームのように、前処理プロセスでかかるコストをすべてエチレン価格に反映したケースとして評価を行った。

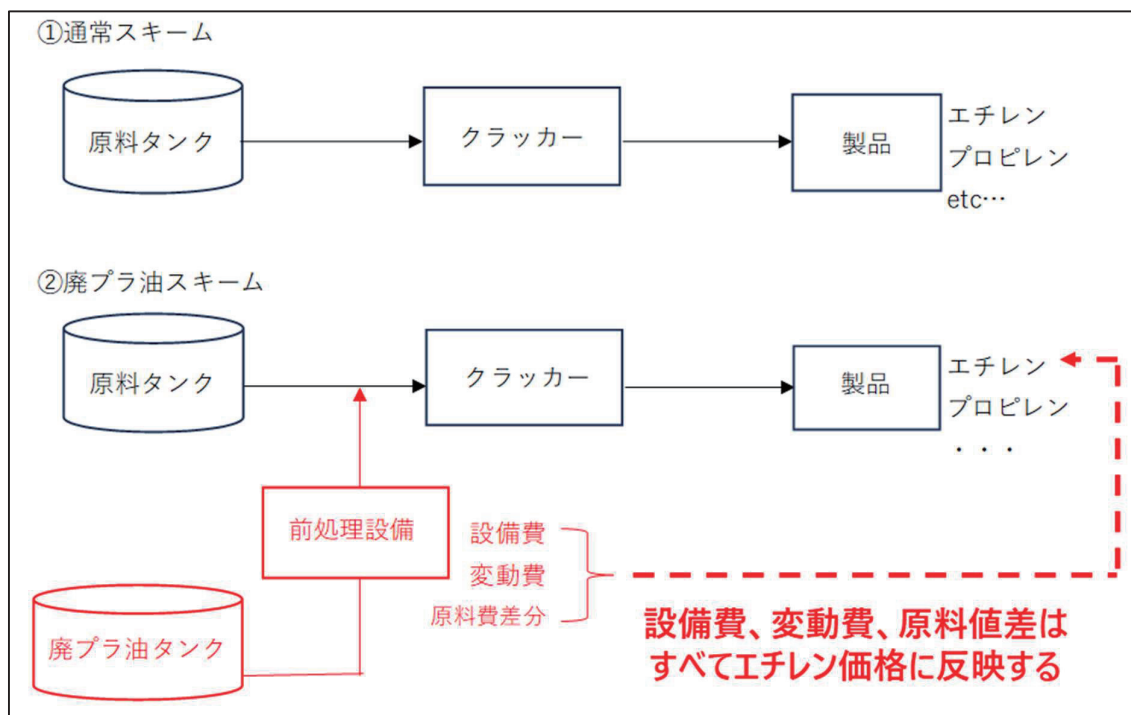


図 5.1 通常スキームと廃プラスチック熱分解油使用スキームの概略

5.3 概略設備費のエチレン価格への影響評価

本事業で算出された概略設備費がエチレン価格に与える影響を評価した。表 5.1 の結果をもとに、変動費、原料費差分がエチレン価格に与える影響を算出して評価を行った。

光学選別された PP/PE を原料とした廃プラ油について、石油化学プラントでの前処理プロセスを新たに導入した場合の設置コストとエチレン価格への影響を調査した。これらコストの差異は、設備費・変動費・原料値差がすべてエチレン価格に直接反映されることによる。

成果として、前処理設備を新設し廃プラ油原料を活用する場合、経済的に持続可能な操業を維持するには、エチレンの販売価格が通常約 3 倍の環境価値プレミアム価格となることが判明した。課題としては、この価格差を市場で吸収するためには環境価値の評価や行政支援が不可欠であり、前処理設備費用・原料値差を補完する仕組みが求められる。今後は継続的なコスト評価と同時に、持続可能なリサイクルを支える制度設計が重要である。

5.4 第5章の実証結果と結論

廃プラスチック熱分解油の前処理プロセスに必要な概略設備費および用役費を算出し、エチレン価格への影響を評価した。その結果、コストへのインパクトとしてはエチレン価格として、通常ナフサを使用する場合に比較して約3倍の環境価値プレミアム価格となることが判明した。コスト増の大きな要因としては設備費と廃プラスチック熱分解油とナフサとの価格差である。設備費に関しては、本事業において選別後PP/PEの分析結果1点のみによる設計を行っている。そのため、油化実験と分析を引き続き継続することで濃度の振れ幅データを蓄積し、導入設備や運転コストの最適化を検討することでエチレン価格の低下余地が生まれると考えられる。併せて、設備導入時の設備費の補助によってコスト低減の可能性がある。廃プラスチック熱分解油とナフサとの価格差に関しては、廃プラスチック熱分解油の価格構成要素を再確認し、各工程の最適化によるコスト低減の可能性がある。

これらに合わせて価格差を市場で吸収するためには環境価値の評価や行政支援が不可欠であり、前処理設備費用・原料値差を補完する仕組みが求められる。以上より、本章の結論を以下の通りまとめる。

- ・ 光学選別後PP/PEを原料とした廃プラ油の前処理プロセス概略設備の設置コストについて調査した。
- ・ 前処理設備を設置した場合、経済的に持続可能な操業にはエチレン販売価格として通常価格の3倍程度となる。
- ・ 持続可能な事業の実現には、環境価値プレミアム価格での販売や値差への支援が必要。
- ・ 経済性の成立のためには、設備導入時の補助が必要である。今回の結論としてエチレン価格が通常ナフサを使用する場合に比べて3倍程度になるため経済性が成立しないことが分かった。この大きな要因は、設備費と廃プラスチック熱分解油とナフサとの価格差である。そのため設備導入時の設備費の補助、およびナフサとの原料値差に対する支援が経済性成立のために必要である。また、廃プラスチック熱分解油の価格の構成要素を再確認し、各工程の最適化によるコスト低減が必要である。

第 6 章

第6章 前処理プロセスの廃プラスチックリサイクルコストへの影響評価

本章では、廃プラスチックの選別レベル（選別強度）が前処理プロセスの経済性に与える影響について評価した結果を述べる。光学選別後 PP/PE、手選別後 PP/PE/PS 混合品、未選別混合プラスチックの3ケースについて、前処理設備の運転コストへの影響を比較評価した。

廃プラスチックのケミカルリサイクル促進に向けて、前処理プロセスの導入可否を判断するためにはプロセスの技術・経済両面からの成立性が重要な検討事項となっている。本章では、「石油化学プラントでの前処理プロセスの概略設計」の一環として、前処理工程が廃プラスチックリサイクルコストに与える影響について、その評価結果と考察を述べる。特に、廃プラスチックの選別レベル、すなわち素材混合度合による「選別強度」が、前処理プロセスの経済性ひいては事業性へどのようなインパクトを及ぼすかを明らかにする。

本実証事業の展開として、以下の図に示すようなサーキュラーエコノミーシステムが想定されており、九州地域において、産業界や自治体から排出される様々な廃棄物や未利用資源を活用する九州地区初の地産地消型プロセス確立を目指している。このためには、雑多な廃プラスチックを適切に分別する技術が不可欠であり、適切に分別することが可能になれば、ケミカルリサイクルとマテリアルリサイクルのベストミックスにより、リサイクルを最適化することが可能になる。

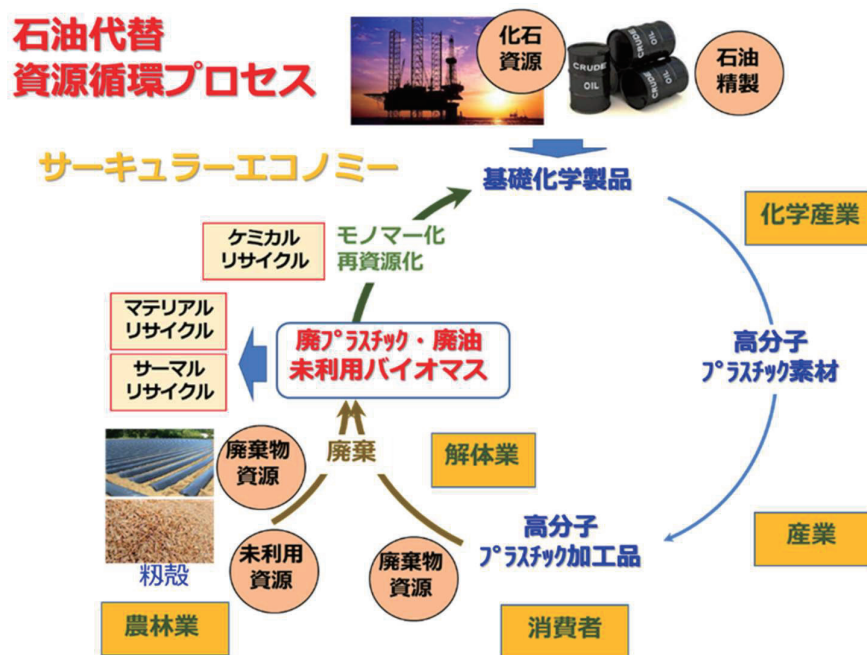


図 6.1 本実証事業の展開として目指すリサイクルプロセス

本実証事業で対象とする一般廃棄物系プラスチックすなわち PCR (Post Consumers Recycle) プラスチックには、エチレンプラントに対する忌避物質として塩素系化合物、含窒素化合物、含酸素化合物、及び金属種などが混在しており、これらの夾雑物を適切に除去し、対象となる油化可能成分を熱分解することが強く求められる。このため、本実証事業では、廃プラスチック及びその熱分解生成油に含まれる不純物の特定を行った。

そこで、本章ではこの選別強度が前処理設備の運転コストに与える影響について、評価を行った結果を報告する。

評価には以下の3ケースを比較した。

- ① 光学選別（自動判別選別機による高純度分別）による PP・PE
- ② 人手による簡易選別を経た PP/PE/PS 混合品、
- ③ 未選別の混合プラスチック

6.1 リサイクルコストへの影響評価の計算方法

ケースごとの廃プラ油フィード量を 2.6t/h で統一し、廃プラスチック中の塩素濃度とそれに伴う前処理プロセスのエネルギー使用量等を整理した。図に想定する概略フローを示す。

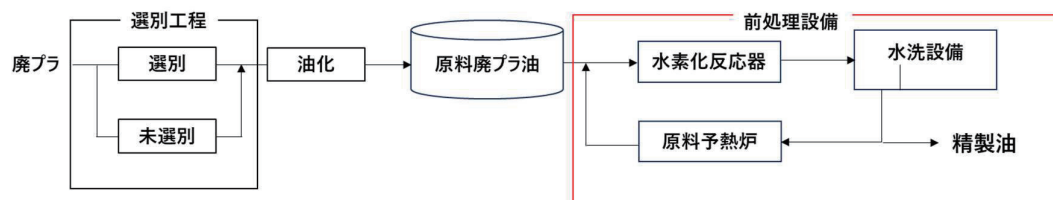


図 6.2 想定概略フロー

今回、廃プラスチック熱分解油中の不純物を除去するプロセスとして、水素化＋水洗を選択した。油中のオレフィン濃度が 40wt.%程度に対して、各種不純物濃度は数百～数千 ppm のオーダーのため水素化による発熱量はオレフィン濃度に依存する。そのため、フィード中のオレフィン濃度は反応器出口で水素化された原料によって、希釈することで温度コントロールを行う設計思想である。

一方で、水素化反応器の入り口で許容できる各不純物濃度が設計条件によって決まっているため、廃プラの選別が十分でなく、原料中不純物濃度が設計条件を超える場合には、その濃度を許容濃度以下に低減するための希釈がボトルネックになる。

6.2 リサイクルコストへの影響評価結果

未選別プラスチックにおいては塩素の不純物濃度が突出して高く、前処理プロセス全体のエネルギー消費、変動費が大幅に増加することが明らかとなった。前処理技術として水素化処理を採用している。水素化はオレフィン等の不飽和炭化水素をパラフィンに変換し、同時に不純物（有機塩素化合物、含窒素・含酸素化合物等）を抽出可能な形態に変換するものであるが、その処理条件・必要エネルギーはフィード中の不純物濃度と反応する分解油性状に大きく影響される。特にオレフィン等不飽和成分や塩素濃度が高い場合、反応系温度制御や希釈（リサイクル量増加）が必須となり、その分エネルギー消費が増加する。未選別状態の廃プラスチック油では、前処理プロセス単体のエネルギー原単位が悪化し、これは光学選別や手選別と比較し約7倍のエネルギー負荷となっている。

コスト面では、未選別時の前処理コストは選別後廃プラスチックの5倍以上に達し、事業経済性への課題となる。

評価の結果、廃プラスチックの選別強度（選別の精度・深度）が前処理コストの重要因子であることを確認した。光学あるいは手選別によってPP・PEなど主要リサイクル適合素材への分別ができていれば、技術的には効率的な前処理（低エネルギー・低コスト）が成立する。一方、未選別で投入した場合は、前処理装置側では不純物希釈のためのエネルギー投入が増加し、また前処理コストの上昇を招く。最悪ケースでは、そもそも装置の能力を超過するため安定運転・操業が困難となるリスクを内包している。

今回は前処理設備の導入可否を検討する段階のプレFSであったため、TypicalなPP/PE性状のみで検討を行った。今後は実際の運用現場で得られる素材組成ごとの不純物濃度の振れ幅や、選別強度による分解油物性のさらなるデータ収集が必要である。得られた知見は、前処理装置の最適仕様設計や運転管理方策の策定へ反映し、経済性・環境性の両立した廃プラスチックリサイクル体制の実現を目指す。

6.3 第6章の実証結果と結論

本章では、廃プラスチックの選別強度が前処理プロセスのリサイクルコストに与える影響を評価した。選別強度の異なる3ケース（光学選別後PP/PE、手選別後PP/PE/PS混合品、未選別混合プラスチック）について、塩素濃度と前処理プロセスのエネルギー使用量を比較した結果、選別強度が高いほど塩素濃度が低減され、前処理コストの削減につながることを確認された。一方で、本検討ではTypicalなPP/PE性状のみで検討を行っており、実際の運用現場で得られる素材組成ごとの不純物濃度の振れ幅については、さらなるデータ収集が必要である。

以上より、本章の結論を以下の通りまとめる。

- 廃プラスチックの選別強度が高いほど、熱分解油中の塩素濃度が低減され、前処理プロセスの運転コストを削減できることを確認した。
- 光学選別による PP/PE 分別が、前処理コストの観点から最も有利であることを示した。
- 今後は素材組成ごとの不純物濃度の振れ幅データを蓄積し、前処理装置の最適仕様設計に反映することが必要である。

第 7 章

第7章 LCAの検証・評価

本章では、一般廃棄プラスチックのケミカルリサイクルシステムのライフサイクルアセスメント（LCA）について述べる。本事業で想定するリサイクルシナリオと、現状の焼却処理を前提としたベースラインシナリオについてCO₂排出量を算定し、エネルギー起源排出量を削減するための対策を検討した。

7.1 本事業におけるLCAの概要

本事業のLCAは九州地区に散在する一般廃棄プラスチックを2030年頃目途に石油化学プラントで原料として利用することを前提に算定した。一般廃棄プラスチック排出元からの効率的な運搬を行うための手段として排出元近郊に小型油化装置を導入するシステムを想定し、一般廃棄プラスチックの排出・収集から石油化学プラント（ナフサクラッカー）投入前の前処理までをシステム境界（バウンダリ）としてLCAを実施した。

今回のLCAでは図7.1に示す以下の3工程を対象にインベントリデータを収集した。

- ▶ 小型油化装置投入前の前処理工程（図7.1 [2]）
- ▶ 小型油化装置での熱分解工程（図7.1 [3]）
- ▶ 石油化学プラント投入前の前処理工程（図7.1 [4]）

小型油化装置への投入前の前処理（分別・破碎・その他）（図7.1 [2]）のインベントリデータの収集にあたっては（株）エコポート九州へヒアリングを実施した。また、小型油化装置での熱分解工程（図7.1[3]）についてはトスミック（株）、石油化学プラント投入前の前処理工程（図7.1 [4]）についてはクラサスケミカル（株）へのヒアリングを通じてインベントリデータを収集している。

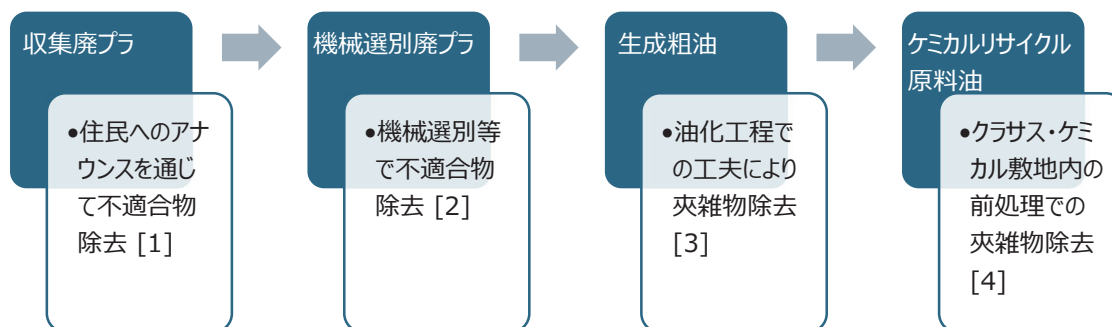


図7.1 一般廃棄プラスチックがケミカルリサイクル原料油になるまでの分別・処理イメージ

出典：

丸紅経済研究所作成 ※断りのない限り、本章の図表は丸紅経済研究所作成

7.2 本事業における LCA の前提条件

- **機能単位**：ナフサクラッカーに投入可能なケミカルリサイクル原料油ないしはナフサ 2 万 t/年
- **システムバウンダリ**：次ページの図 7.2 参照。本事業は国内における排出削減を企図しているため、原油の採掘や輸送などの国外における排出は算定対象外としている。
- **対象とするプロセス**：
リサイクルシナリオ → 一般廃棄プラスチック収集、油化前処理（破碎・選別）、油化、輸送、クラッカー投入前処理（、ケミカルリサイクル原料油に対する控除として原油由来ナフサ製造工程、熱分解不適合物の焼却時熱回収に対する控除として九州における一般的な発電工程）
ベースラインシナリオ → 一般廃棄プラスチック収集、焼却・熱回収、石油精製によるナフサ製造（、プラスチック焼却時熱回収に対する控除として九州における一般的な発電工程）
※原油採掘、原油輸送は国外における排出であるため本事業における算定対象外とした。
- **算定対象**：装置の製造・設置等に由来する排出量は影響軽微と想定されるため算定対象外、装置に投入する物質やエネルギー、そこから生成する物質やエネルギーは算定対象。

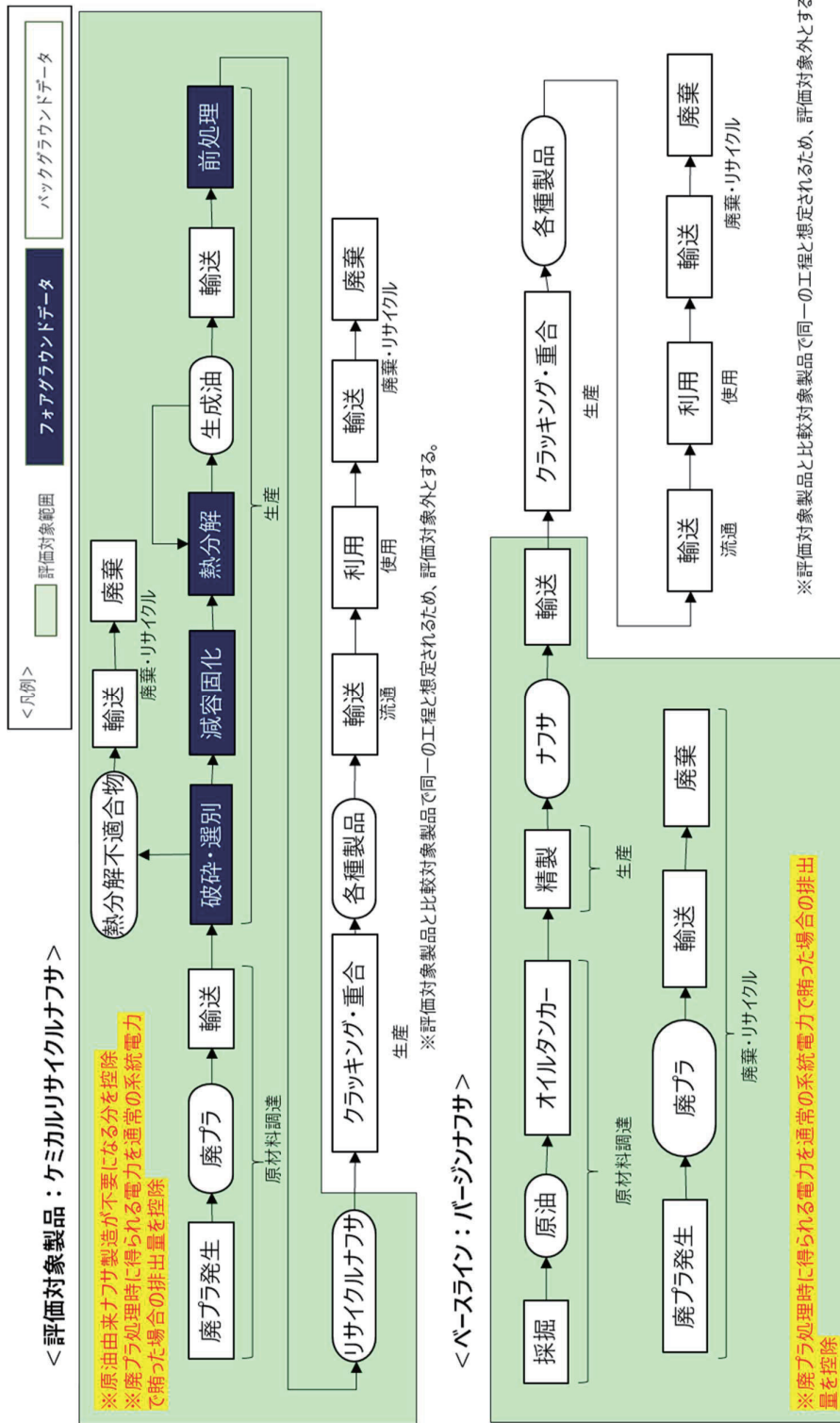


図 7.2 システムバウンダリ

7.3 インベントリ分析

7.3.1 廃プラスチック必要収集量及び各工程での歩留の検討

本事業では、ケミカルリサイクル原料油 2 万 t を生成可能な前処理プラントを想定している。このプラントを安定稼働させるためには、高稼働率の実現が不可欠であり、そのために必要な一般廃棄プラスチック量を、本事業提案段階では、年間で 3 万トン前後（熱分解不適合物の混合比率により上下する）と想定していた。本実証事業（仕様書 2.（1）、（2）、（4））の結果を受けて、各工程で実際に想定される歩留まりを明らかにし、算定に反映したところ、一般廃棄プラスチックの収集必要量は 52,608 t/年であることが明らかになった。検討結果概要を以下に示す。

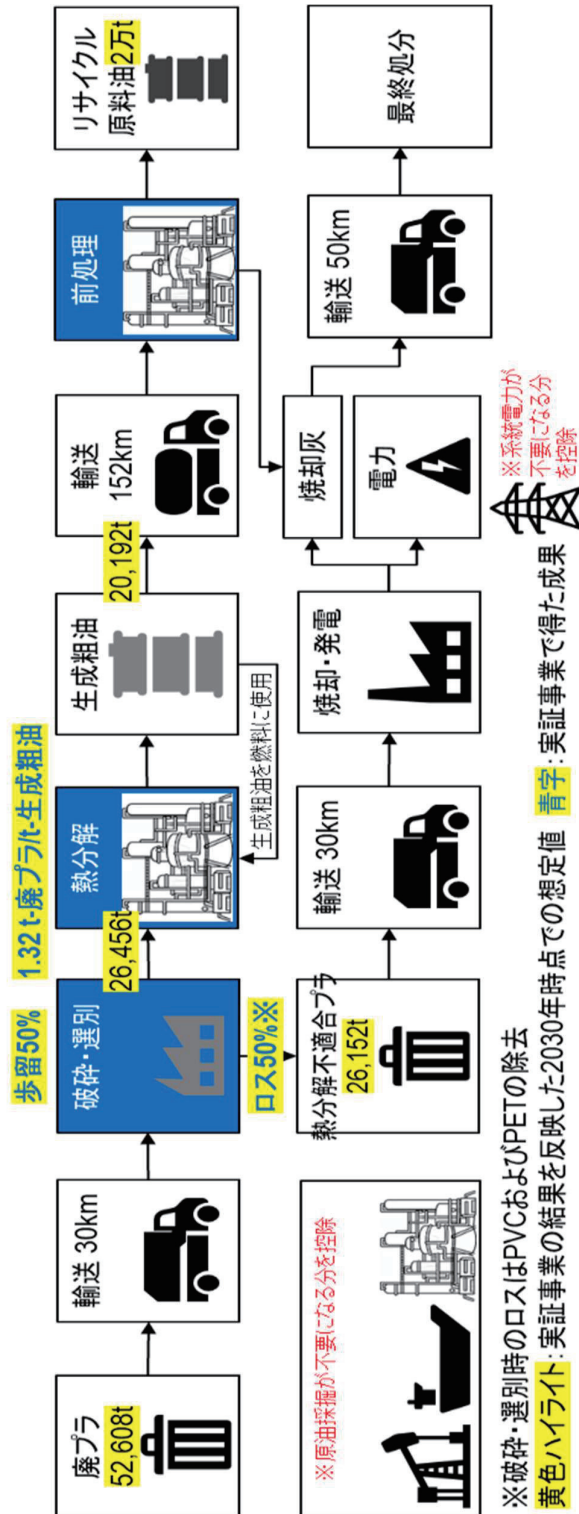


図 7.3 実証事業の結果を踏まえた歩留やロス率などの前提条件 (ケミカルリサイクルケース)

収集必要量である 52,608 t/年を算定する際の前提の一つが、破碎・選別工程に関する（株）エコポート九州へのヒアリングである。同社では、家庭ごみからプラスチック系包装容器類を集め、紙屑や金属くずなどの不適合物を除去している。同社では選別・除去にあたり光学選別機を複数台使用して高度な選別処理を実施しているが、今回のシナリオでは地元住民による手選別（プラスチック以外の廃棄物の除去）の後に、2 台の光学選別機で簡易的な選別を実施する前提で歩留まりを想定した。

また、収集必要量である 52,608 t/年を算定する際のその他の前提として、令和 6 年度に実施した不適合物低減対策（小型油化装置での塩素、テレフタル酸除去実証）にて得られたサンプル油のデータを活用した。ただし、本事業では、PET と PVC のみを除去した試料を作成していない。このため、8 種類の試料の油化試験結果を踏まえ、PET 及び PVC を含まない試料 5 つ（①、④、⑤、⑥、⑦）のうち最も生成粗油収率の低い試料である、試料①の収率等（生成粗油収率 76%、残渣発生率 5%）を算定に使用した。

表 7.1 各試料（塩素・テレフタル酸対策前）の結果概要と平均的な収率

	試料①	試料②	試料③	試料④	試料⑤	試料⑥	試料⑦	試料⑧	
素材	PE	PE	PE	PE	PE	PE	選別・洗浄後 PE	混合プラ	
実測値 (kg)	3.3	2.5	3.2	3.25	3.15	3.12	5	100%	
素材	PP	PP	PP	PP	PP	PP	選別・洗浄後 PP		
実測値 (kg)	4	3.05	3.91	3.96	3.84	3.81	5		
素材	PS	PS	PS	PS	PS	PS			
実測値 (kg)	2.6	2	2.56	2.59	2.51	2.49			
素材		PET	PVC/PVDC	PA	調味料	アルミ蒸着フィルム			
実測値 (kg)		2.49	0.3	0.2		0.6			
総重量 (kg)	9.9	10.04	9.97	10	9.5	10.02	10	1	
投入量 (kg)	9.6	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	9.8	9.6	
採油量 (L)	8.8	6.3	8.2	10.7	9.1	9.5	9.2	6.5	
採油量 (kg)	7.3	5.3	6.9	9.0	7.6	8.0	7.7	5.4	
残渣量 (g)	519	781	451	365	257	850	498	861	平均
生成粗油収率	76%	53%	69%	90%	76%	80%	79%	56%	72%
残渣発生率	5%	8%	5%	4%	3%	9%	5%	9%	6%

また、収集必要量である 52,608 t/年を算定する際のその他の前提として、石油化学プラントでの前処理プロセスの概略設計のデータを活用した。リサイクルナフサ 20,000t の生産にあたり、生成粗油 20,192t を使用する前提で歩留まりを想定した。

7.3.2 一般廃棄プラスチック輸送のインベントリデータの検討

本事業では、一般廃棄プラスチックを排出元（自治体等）の近傍で熱分解油化をしたのち、大分コンビナートまで運ぶことをメインシナリオとして想定している。たとえば、現在、各自治体が所有する廃棄物処理施設の近傍に設置するのが有力な考え方である。したがって、一般廃棄プラスチックを熱分解油化装置ま

で輸送する際には、通常の一般廃棄プラスチックの収集ルートと大きく変わらないことが予想される。自治体ごとに実測するのは現実的ではないため、ここではシナリオとして平均的に 30km 程度の距離を周回して 4t クラスのごみ収集車が一般廃棄プラスチックを収集することとした。

7.3.3 破砕・選別工程のインベントリデータの検討

破砕・選別工程は実証テストの直接の対象とはなっていない。このため、本事業では(株)エコポート九州へのヒアリングを通じて得た同社の高度選別工程の情報を参考値として用いてインベントリデータを想定した。今回はエネルギー起源排出量(エネルギー起源 CO₂e)を削減し、選別機導入の初期投資を抑える観点から、最初の工程として地元住民による手選別(プラスチック以外の廃棄物の除去)を想定している。その後、簡易的な光学選別機での処理工程を経て、熱分解不適合物を一定除去する想定とした。通常、(株)エコポート九州では複数台の光学選別機を通過させてごみの高度選別を実施しているが、2台の光学選別機を通過させる想定でインベントリデータを作成した。

なお、破砕後の熱分解適合プラスチックは隣接する熱分解装置に投入するため輸送無としている。一方の熱分解不適合物は同敷地内に廃棄物焼却場が無い場合もあると考え、30kmの輸送が必要と仮定した。さらに、焼却後の残渣は最終処分場まで50kmの輸送をすると仮定した。

7.3.4 熱分解工程のインベントリデータの検討

令和6年度に実施した油化試験の結果を用いて、熱分解工程のインベントリデータを整理した。取得に当たっては、トスミック(株)の福山工場にて、実際の装置を見ながら数値を設定した。ただし、熱分解用の熱源を得るのに必要な燃料は、テスト用の装置(日量(1バッチ)10kg程度)では軽油を用いており、実際の商用化の際に使用する燃料とは異なる。実用化(2030年)の際には、生成粗油の一部とA重油を半量ずつ用いる想定であるため、LCAの算定に当たっても、軽油ではなく生成粗油とA重油を前提とした。

また、熱分解用の熱源を得るのに必要な燃料の使用量については、プラントサイズが異なることを踏まえると、そのまま用いることが難しい。このため、同じ熱分解技術を用いて実用化(2030年)時点に導入予定の熱分解装置と同程度の規模、かつ同じ技術を用いてすでに長期間(2006年～)稼働をしている(株)細川洋行に設置された装置の事例を参考にした。同社の装置では生成される粗油の20%-重量を燃料として使用しているとのヒアリング結果を得ており、本実証事業のLCAではこの値をベースに算定している。

表 7.2 熱分解工程のインベントリデータ

投入物			排出物		
破碎選別後廃プラスチック	9.6	kg / バッチ	生成粗油	7.33	kg/バッチ
生成油	0.73	kg / バッチ	残渣	0.52	kg/バッチ
A 重油	0.73	kg / バッチ	オフガス	2.27	kg/バッチ
水	3.125	kg / バッチ	-	-	-
窒素	2,333	L / バッチ	-	-	-
電力	8.00	kWh / バッチ	-	-	-

7.3.5 生成粗油輸送距離の検討

本事業が九州地域において実用化した際に参画いただける可能性のある自治体や組織の現在の一般廃棄プラスチックの処理量や処理状況、熱分解後の大分コンビナートまでの輸送距離などを整理した。整理に当たっては、各自治体や容器包装リサイクル協会のウェブサイト、Google map などを活用した。整理した結果、加重平均した生成粗油の輸送距離は 152km となり、提案時の 180km よりも短くなることが明らかとなった。本報告書では前提条件を 152km として算定している（10t ローリーでの輸送を想定）。

現在協議が進んでいる自治体や組織でのプラスチック処理量の合計をケミカルリサイクル用のプラスチック収集可能量と定義すると、7.3.1 で整理した廃プラスチック収集必要量にはまだ及ばない数値となっているが、まずはこれらの自治体・組織との協議を円滑に進めることが重要となる。ただし、エコポート九州などではメカニカルリサイクルも実施している実情や、各自治体・組織で発生するプラスチックの組成が不明であることを踏まえると、九州圏内でさらなる自治体と連携を深める必要があろう。その際は、エネルギー起源排出量削減の観点でも、またおそらくはコストの観点でもより大分近傍の自治体と連携することができればなお望ましいと考えられる。

表 7.3 大分コンビナートまでの距離と廃棄物処理量

自治体・組織名		距離 (km)	一般廃棄物 処理量 (t/年)	プラスチック 処理量 (t/年)	プラスチ ック比率 *	出典
佐賀県 唐津市	唐津市清掃 センター	204	35,128	8,079	23.00%	1)
福岡県 糸島市	糸島市クリ ーンセンタ ーごみ処理 場	199	31,096	2,253	-	2)
熊本県エ コポート 九州	エコポート 九州熊本工 場	146	-	20,826	-	3)
大分県 別府市	別杵速見地 域広域市町 村圏事務組 合「藤ヶ谷 清掃センタ ー」	38	21,613	3,389	15.68%	4)
平均距離（加重平均）		152	プラスチック 収集可能量	34,547	-	-

※プラスチック処理量を算定するのに比率を用いた自治体のみ記載

主な参考文献・出典

1. 唐津市（2022）「一般廃棄物処理基本計画」
<https://www.city.karatsu.lg.jp/page/2028.html>
2. 糸島市（2022）「容器包装廃棄物分別収集計画書」
<https://www.city.itoshima.lg.jp/s052/010/020/050/youkihousou.html>
3. 株式会社エコポート九州（2023）環境報告書
<https://eco-port.jp/files/2023kankyohoukoku.pdf>
4. 別府市（2022）「別府市一般廃棄物（ごみ）処理基本計画」
https://www.city.beppu.oita.jp/seikatu/kankyou_gomi/kanren/haiki_kihon_keikaku.html

7.3.6 石油化学プラント投入前処理のインベントリデータの検討

令和7年度に実施した石油化学プラントでの前処理プロセスの概略設計のデータを活用した。稼働に用いるエネルギーは原油換算での数値だが、本事業の段階では全量LNGを使用する前提とした。

表 7.4 石油化学プラント投入前処理のインベントリデータ

投入物			排出物		
エネルギー*	776.6	t / 年	リサイクルナフサ	20,800	t / 年
生成粗油	21,000	t / 年	その他	—	t / 年
その他(水素など)	—	t / 年	—	—	—

*原油換算

7.3.7 原油由来の石油精製が不要になる分の控除

本事業を実施することで、日本国内での石油精製によるナフサ製造が不要となる。したがって、輸入した石油からナフサを得るまでに発生する排出量が無くなることを考慮し、7.3.1～7.3.6までの算定結果から控除（マイナス）した。控除量については7.4.3で後述する考え方・数値を用いた。

7.4 ベースラインのインベントリデータの検討

7.4.1 一般廃棄プラスチック輸送のインベントリデータの検討

7.3.2で述べたものと同様の条件とした。

7.4.2 一般廃棄プラスチック処理のインベントリデータの検討

一般的な廃棄プラスチック処理方法として、廃棄物焼却施設での熱回収（蒸気を用いた発電）を想定した。日本の平均的な廃棄物焼却時の発電効率は14.05%であるため、それに基づき発電量を算定した。

廃棄物由来の発電を行うことで、旧一般送配電事業者による発電が不要になるという考え方に基づき、平均的な系統電力の発電係数に一般廃棄プラスチック由来の発電量をかけた分を算定結果から控除（マイナス）した。なお、廃棄プラスチック焼却に伴う温室効果排出は非エネルギー起源とカウントしている。

7.4.3 石油精製のインベントリデータの検討

本事業は、国内における排出量の削減を目指すものである。したがって、原油の採掘と日本への輸送は対象外となる。本事業で算定対象となるのは石油精製のGate to Gateの排出量のみである。

石油精製のGate to Gate排出のためのインベントリデータは、一般社団法人

プラスチック循環利用協会（2009）「石油化学製品の LCI データ調査報告書」などの公開文献を元に整理した。

7.5 LCA の算定結果

ここまでの検討結果を踏まえて、本実証事業とベースラインシナリオそれぞれのCO₂排出量と削減量を算定した。現時点の想定では、排出量の合計値（エネルギー起源と非エネルギー起源）と非エネルギー起源の削減が可能との結果が示されたが、エネルギー起源の削減には至らなかった。エネルギー起源排出量の削減にあたり、考えられる今後の下げ代については7.6で後述する。なお、排出係数はecoinventv3.11の他、温暖化対策基本法に基づく算定・報告・開示制度のマニュアルや資源エネルギー庁の公表する標準炭素排出量、標準発熱量、その他各種文献に基づき設定している。

表 7.5 算定結果概要

単位：t- CO ₂		原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計
本事業	エネルギー起源	966	11,434	0	0	428	12,828
	非エネルギー起源	0	6,343	0	0	7,742	14,085
	合計	966	17,777	0	0	8,170	26,913
ベースライン	エネルギー起源	0	5,921	0	0	1,515	7,435
	非エネルギー起源	0	0	0	0	160,670	160,670
	合計	0	5,921	0	0	162,184	168,105
削減量	エネルギー起源	-966	-5,513	0	0	1,087	-5,393
	非エネルギー起源	0	-6,343	0	0	152,928	146,585
	合計	-966	-11,856	0	0	154,015	141,192

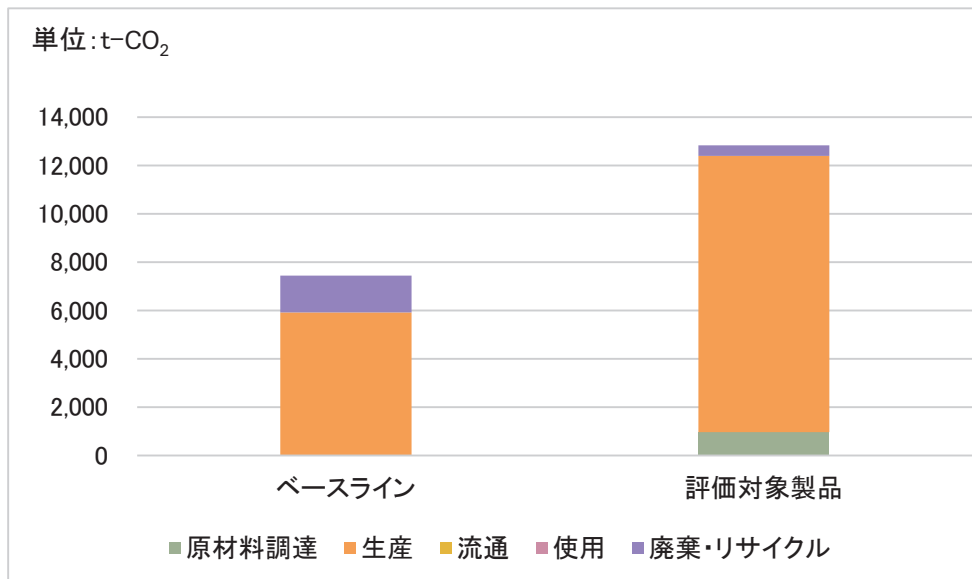


図 7.4 エネルギー起源排出量の比較

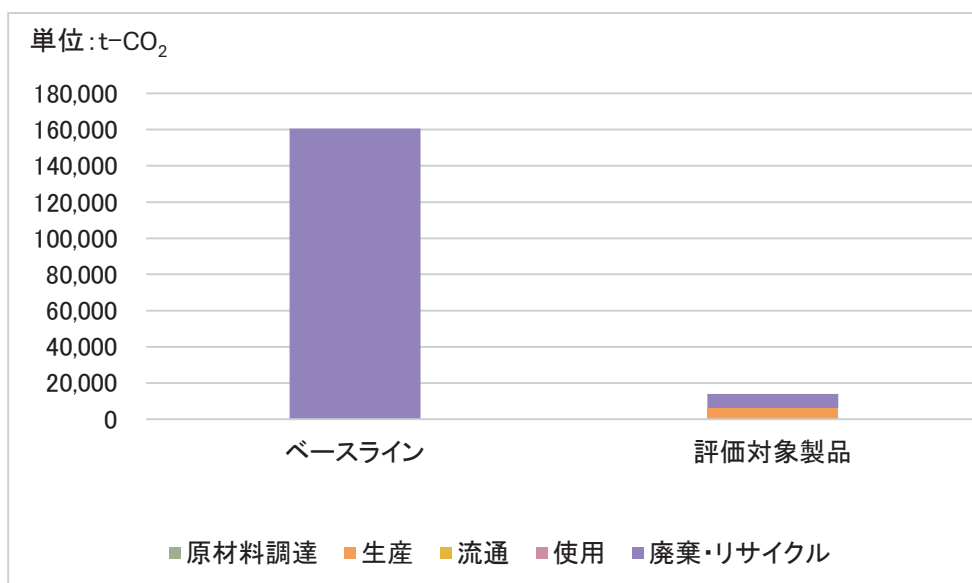


図 7.5 非エネルギー起源排出量の比較

7.6 エネルギー起源排出量を削減するのに必要な更なる対策の検討

算定結果を踏まえ、エネルギー起源排出量の削減に向けた対策として、以下を検討した。

- ▶ 熱分解工程で発生するオフガスのエネルギー利用
- ▶ 各工程で調達する電力に関して、再生可能エネルギー由来の電力を導入
- ▶ 石油化学プラント投入前処理工程で使用する水素を低炭素水素に変更
- ▶ 石油化学プラント投入前処理工程の投入エネルギーの排出係数低減

7.6.1 熱分解工程で発生するオフガスのエネルギー利用

本事業では、熱分解工程で発生するオフガスのエネルギー利用について具体的なエンジニアリング上の検討は実施しないため、熱分解工程で発生するオフガスは全量を大気放出する前提とした。熱分解工程で発生するオフガスの組成はトスミック（株）へのヒアリング及び、サンプル採取したオフガスの組成データを通じて想定した。

エネルギー起源 CO₂ の削減に向けては、将来的に熱分解工程で発生するオフガスを熱分解工程のエネルギーとして再利用することが望ましい。オフガスの再利用を想定するにあたり、①オフガスを燃焼することによる CO₂ 排出量の増加分、②それにより熱分解工程で使用する A 重油を削減できることによる CO₂ 排出量の減少分をそれぞれ算定し、差し引きの効果を評価した。オフガスの燃焼由来の排出量は、想定するオフガスの組成を元に IPCC 2006 ガイドライン（固定燃焼）に基づき、燃料中炭素量×酸化率×(44/12)で算定した。また、オフガスの総発熱量からの有効熱回収については、産業用小型ボイラの実運用効率を参考に 80%の効率値を想定し、A 重油の削減量を想定した。

7.6.2 石油化学プラント投入前処理工程の投入水素を低炭素水素に変更

現状では、石油化学プラント投入前処理工程で使用する水素について、Ecoinvent v3.11 「hydrogen production, steam methane reforming (RoW)」の原単位 (10.7kg-CO₂e/kg-H₂) を使用している。エネルギー起源由来の排出量の削減に向けては、本事業を実装する 2030 年段階においてはいわゆる「低炭素水素」の調達を想定することが望ましい。低排出水素の定義は再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議「水素基本戦略」における低排出量水素の定義とし、原料生産から水素製造装置の出口までの過程に至る CO₂ 排出係数を 3.4kg-CO₂e/kg-H₂ として算定した。

7.6.3 再生可能エネルギー由来の電力の導入

現状では、破碎・選別工程、熱分解工程で使用する電力について、九州電力の

CO₂ 排出係数（2024）を前提に算定しているが、エネルギー起源由来の排出量の削減に向けては、再生可能エネルギーなどの非化石電力特性を付帯させた電力を調達することで、電力の排出係数を低減させることが望ましい。

7.6.1、7.6.2 の排出削減案を導入した前提で、電力の排出係数を用いたエネルギー起源由来の排出量の感度分析を実施すると、電力の排出係数が 0.344 kg-CO₂/kWh 以下となれば評価対象製品のエネルギー起源由来の排出量が、ベースラインのエネルギー起源排出量よりも少なくなる結果となった。

2030 年段階の電力の排出係数の見通しについては不透明な部分もあるが、政府としては「2030 年度におけるエネルギー需給の見通し」に基づく国全体の排出係数を 0.25kg-CO₂/kWh 程度としており、仮にこの排出係数が実現すれば、評価対象製品の導入によって、ベースライン対比エネルギー起源排出量を 684t-CO₂

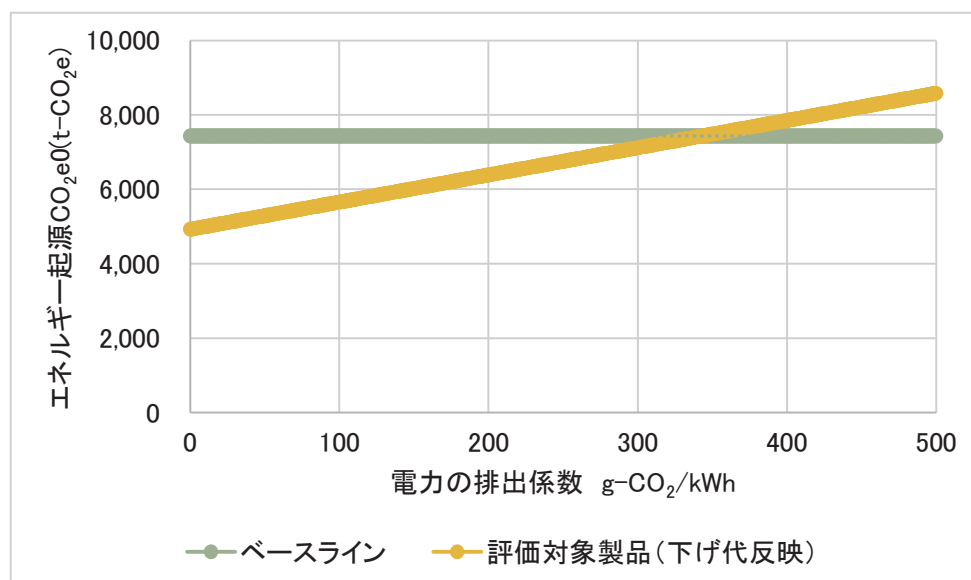


図 7.6 電力の排出係数によるエネルギー起源由来排出量の感度分析

7.6.4 更なる対策を導入した場合の LCA の算定結果

7.6.1 から 7.6.3 に記載した更なる削減対策を実施した場合の LCA の算定結果は以下の通り。

表 7.6 算定結果概要

単位：t-CO ₂ e		原材料調達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイクル	合計
本事業	エネルギー起源	966	5,357	0	0	428	6,752
	非エネルギー起源	0	6,343	0	0	11,093	17,436
	合計	966	11,701	0	0	11,521	24,188
ベースライン	エネルギー起源	0	5,921	0	0	1,515	7,435
	非エネルギー起源	0	0	0	0	144,879	144,879
	合計	0	5,921	0	0	146,393	152,314
削減量	エネルギー起源	-966	563	0	0	1,087	684
	非エネルギー起源	0	-6,343	0	0	133,786	127,443
	合計	-966	-5,780	0	0	134,872	128,126

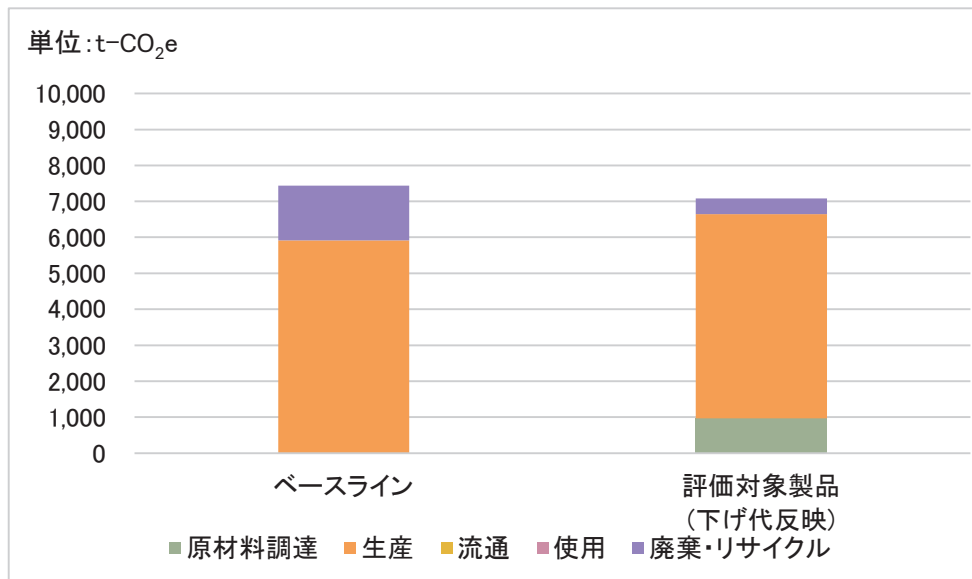


図 7.7 エネルギー起源排出量の比較

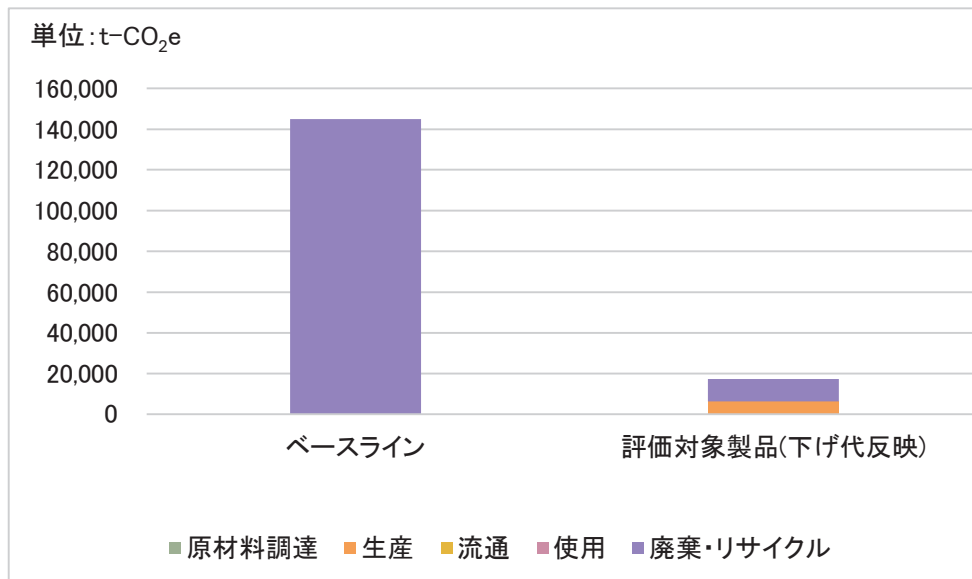


図 7.8 非エネルギー起源排出量の比較

なお、現状では削減量の定量化が難しいものの、2030 年に向けては 7.6.1 から 7.6.3 で想定した対策の他に、以下のような対策も考えられる。

- 想定される対策
 - 熱分解生成油の輸送距離のさらなる短縮

現在の自治体との交渉を継続し、実装に向けて協力していくとともに、より大分コンビナート近傍の自治体との連携が重要になると考えられる。
 - 熱分解不適合物の混入率の低減

熱分解不適合物が混入することで、熱分解の収率が悪化するだけでなく、不適合物の輸送と処理などに伴う排出量が増えるという問題が生じる。熱分解装置や石油化学プラント投入前の前処理を通じて不適合物への許容度を高める工夫や、住民への周知によって熱分解不適合物の混入率を低減する努力が必要となろう。
 - 熱分解油化工程のエネルギー効率および収率の向上

熱分解油化工程のエネルギー効率は、現在稼働する実機を前提としているが、実際の設備を導入する際の熱源やエンジニアリング上の工夫を通じてさらなる低減を図ることが望ましい。また、収率向上のために最適な稼働条件（温度帯や時間）を検討することも有用と考える。

- 石油化学プラント投入前処理工程の投入エネルギーの排出係数低下
石油化学プラント投入前処理工程で投入するエネルギーは、現在全量LNGを使用する想定としている。クラサスケミカル（株）では、CO₂の直接/間接排出量の削減目標として、2035年に2020年比30%削減を目指しており、その手段として省エネルギー施策や低炭素燃焼転換を掲げている。この目標・施策に合わせて、石油化学プラント投入前処理工程の投入エネルギー由来の排出量についても更なる削減を検討することも有用と考える。

7.7 LCA の検証・評価結果のまとめ

第 7 章では、一般廃棄プラスチックのケミカルリサイクルによる石油化学プラントに投入可能な原料油の製造と、それが実施されていない現状（ベースケース）それぞれのライフサイクルアセスメントを実施した。

現時点の 2 パターンの算定結果によれば、2030 年に実際の設備が稼働する際に、エネルギー起源の排出量の削減は困難だった。ただし、2030 年段階で想定される更なる下げ代を反映すると、684t- CO₂e 削減することが可能となる。

ただし、低炭素水素の調達やオフガスの再利用には追加コストが発生するため、本事業の採算との兼ね合いにおいては、簡単に採用できる選択肢ではないことも留意するべきと考える。本事業においてエネルギー由来の排出量をより引き下げていくには、今回更なる削減策として削減量の定量化に至らなかった取組についても検討することが必要である。

7.8 第 7 章の実証結果と結論

本章では、一般廃棄プラスチックのケミカルリサイクルによる石油化学プラントに投入可能な原料油の製造（リサイクルシナリオ）と、現状の焼却処理（ベースラインシナリオ）のライフサイクルアセスメントを実施した。現時点の算定結果では、リサイクルシナリオにおいてエネルギー起源排出量の削減は困難であったが、非エネルギー起源排出量については大幅な削減が可能であることが確認された。また、熱分解工程で発生するオフガスのエネルギー利用、低炭素水素への変更、再生可能エネルギー由来電力の導入等の対策を講じることで、エネルギー起源排出量についても 684t- CO₂e の削減が可能となることを示した。ただし、これらの対策には追加コストが発生するため、事業採算との兼ね合いを考慮する必要がある。

以上より、本章の結論を以下の通りまとめる。

- ・ 現時点の算定では、リサイクルシナリオにおいてエネルギー起源排出量の削減は困難であるが、非エネルギー起源排出量については 127,443t- CO₂e の削減が可能である。
- ・ 更なる対策（オフガス利用、低炭素水素、再エネ電力）を導入することで、エネルギー起源排出量についても 684t- CO₂e の削減が可能となる。
- ・ これらの対策には追加コストが発生するため、事業採算性との両立が今後の課題である。

第 8 章

第 8 章 事業化に向けての今後の課題と今後の取り組み

表 8.1 石油化学プラントでの受入技術検討及び実証で得られた事業化に向けた課題とその対応策

事業化に向けての課題	今後の取り組み
①廃プラ油中に含まれる Si (ケイ素) が前処理プロセスの忌避物質となる。	濃度の振れ幅データを蓄積し、処理設備の設計条件に反映する。
②本実証事業で作成した概略フローの各機についての仕様を決定するために詳細検討が必要。	不適合物調査で判明した各不純物について濃度の振れ幅 (性状安定性) データを蓄積し、機器の詳細検討に反映する。
③経済的に持続可能な操業にはエチレン販売価格に通常価格の 3 倍の反映が必要。	環境価値プレミアム価格での販売や値差に対する支援が必要
④PP、PE 以外の PET や PVC 等を受け入れる方策について、次の段階の課題と展望	混合プラスチックの不純物濃度・振れ幅のデータ整備と各装置条件最適化。新たな忌避物質と混入経路特定を行い、PP/PE 高選別と設備増強可否判断を行う。

課題①「廃プラスチック熱分解油中に含まれる Si (ケイ素) の定量」

廃プラスチック熱分解油中には Si (ケイ素) が含まれていることが一般的に知られている。Si は水素化反応器の触媒活性点に吸着し、これを永久的に失活させるため、前処理プロセスでは忌避物質とされる。しかし、本事業ではその濃度や変動幅を定量的に測定できていない。処理設備の設計条件にこれをどのように反映させるかは技術的な重要課題であり、処理安定性を確保するためにも Si 濃度の変動幅データの蓄積が不可欠である。廃プラ油の実際の性状を反映したデータの取得・管理の徹底が、高品質で安全な運用につながる。

どのような廃プラスチック原料から、廃プラスチック熱分解油中に Si がどの程度含まれるかを明らかにすることで、触媒の交換サイクルやリサイクル量の決定指標を確立できる。また、混入源を特定し、油中の Si 濃度を低減することで、プロセスコストの削減にも寄与する。

- 課題に対する今後の取り組み

上記の理由により、今後の取り組みとして、Si（ケイ素）の油中への混入経路の特定、および油中のSi（ケイ素）濃度振れ幅の定量的な評価を行い、詳細検討時の設計条件に反映する。

課題②「本実証事業で作成した概略フローの各機についての仕様を決定するための詳細検討」

令和7年度事業で作成した概略フローの各機器仕様の決定には、さらなる詳細検討が必要である。特に、不適合物調査で判明した各種不純物について、その濃度の変動幅（性状安定性）のデータを継続的に蓄積し、具体的な設計へ反映することで、処理設備の適正規模・機能を設定することが求められる。このデータベース化・フィードバック機能を確立することが、将来的な設備投資リスク・コストの低減につながる。

- 課題に対する今後の取り組み

不適合物調査で判明した各不純物について、油化実験と分析を継続することで濃度の振れ幅（性状安定性）データを蓄積し、機器の詳細検討に反映する。

課題③「経済的に持続可能な操業にはエチレン販売価格に通常価格の3倍の反映が必要」

令和7年度事業による検討の結果、経済面での持続可能性についても大きな課題が存在することが明らかになった。今回の検討結果をもとに算出した設備費、変動費をベースとして経済的に持続可能な操業を実現するためには、エチレン販売価格に通常価格の約3倍の反映が必要と試算されている。廃プラ油の前処理コスト・原料費・設備費等、複数の費用項目がエチレン価格に上乘せされ、現行の市況では十分な利益確保が困難である可能性が高い。したがって、事業化には環境価値プレミアム価格による販売促進や、公的支援としてナフサと廃プラスチック熱分解油値差に対する補助・インセンティブの導入が不可欠となる。

さらに、現状の価格（比較対象素材とリサイクル素材の比較）と事業化に向けた目標価格についても重要なポイントがある。廃プラ油化等のケミカルリサイクルの取組み拡大、及び市場への浸透には、行政による支援が不可欠である。

- 課題に対する今後の取り組み

経済面では、環境価値プレミアム価格による製品販売方法の確立を目指す。具体的には、サステナビリティ目標を掲げる企業、カーボンニュートラル原料の調達を重視する顧客に対して、本事業によって生産される環境価値プレミアを付

加した製品を積極的に提案し、市場における差別化をはかる。これによる設備費の応分負担を交渉することで設備費を縮小できる可能性がある。

また、課題②に対する取り組みにも記載した通り、油化実験と分析を引き続き継続することで濃度の振れ幅データを蓄積し、導入設備や運転コストの最適化を検討することでエチレン価格の低下余地が生まれると考えられる。一方で、それら取り組みによる価格低減にも限界があることから、市場価格との差額については行政支援等を活用してカバーすることで、本事業の実現可能性の確度を高めることを目指す。

課題④「PP、PE 以外の PET や PVC 等を受け入れる方策について、次の段階の課題と展望」

令和 7 年度の事業では光学選別後の PP/PE を原料とした廃プラスチック熱分解油を Typical な性状として、既存の前処理設備導入に向けた検討を行った。PP、PE 以外の PET や PVC 等を受け入れる方策について、次の段階の課題と展望を整理した。

まず、現状の石油化学プラントにおける廃プラスチック熱分解油の前処理プロセス設計は、主として PP および PE に限定したものである。これは、PP/PE 系廃プラスチックが他素材（PET、PVC 等）に比べて塩素や酸素などの不純物含有量が圧倒的に低いためであり、選別強度が高ければ、比較的低コスト・省エネルギーで前処理・精製が可能となる。一方、PET や PVC を含む場合、特に塩素濃度および含酸素化合物濃度が著しく上昇し、通常ナフサ受け入れ規格と比較して数百倍～数千倍のオーダーに達する事例が分析されている。このため、PET や PVC 等を原料とした廃プラスチック熱分解油の適用に際しては、主に以下の課題が顕在化する。

第 1 に、前処理負荷増加である。未選別の混合プラスチックを対象とした場合、塩素濃度は 3,500ppm に達し、前処理プロセス全体のエネルギー原単位は PP/PE 系の 7 倍に増加する。これは、塩素や酸素等高濃度不純物の処理に対応するため、既存設備能力では不足し、装置規模・運転条件の抜本的見直しを迫られることを意味する。また、PVC による塩素負荷増大は分解炉・設備の腐食や排水処理負荷を増し、設備寿命や維持管理コストを大幅に押し上げる要素となる。

第 2 に、除去技術面の壁である。既存の水素化プロセスは、多様な有機塩素化合物、含酸素・含窒素化合物等を一括して HCl や H₂O、NH₃ 等に変換し、水抽出や蒸留によって分離する方式だが、不純物の絶対量増大により触媒劣化リスクや反応温度・圧力領域の拡張が必要となる。選別後 PP/PE のみを原料とした場合に比べて Si（ケイ素）や金属等、さらに多様な触媒毒物質の管理が課題となる。

また、触媒被毒の進行が早い場合、交換・再生コスト増加によって経済性が成立しない要因となる。

第3に、操業安定性・製品品質の確保に向けた運転管理の難易度が高まる。原料中の廃プラスチック種類が増加することで、不純物濃度の振れ幅や分解油性状の安定性は悪化する。これにより運転条件の制御、各装置投入時の調整・調和が困難となり、安定稼働率や収率低下リスクも増加する。さらに、こうした技術・操業上の制約が経済性にも極めて大きく影響することがコストシミュレーションから明らかである。

今後の展望として、まず PET や PVC 等新規素材を含む混合プラスチックを対象とした不純物濃度・振れ幅のデータ体系化、及びそれを反映した各装置設計条件の最適化が必要である。また、今回対象とした選別後 PP/PE では対策の必要性がないと判断した金属類等の新たな忌避物質の特定と、その混入経路、リソースの特定が必要となる。短期的には PP/PE の高選別化により前処理設備での不純物除去を対応方針としつつ、中長期的には体系的なデータの蓄積によって、前処理設備、エチレンプラント両方の視点から設備増強の可否及び是非を判断し、PET や PVC を含んだ混合素材多様化へと推移することが現実的であると考えられる。

● 課題に対する今後の取り組み

まず PET や PVC 等新規素材を含む混合プラスチックを対象とした不純物濃度・振れ幅のデータ体系化、及びそれを反映した各装置設計条件の最適化が必要。また、今回対象とした選別後 PP/PE では対策の必要性がないと判断した金属類等の新たな忌避物質の特定と、その混入経路、リソースの特定が必要となる。短期的には PP/PE の高選別化により前処理設備での不純物除去を対応方針としつつ、中長期的には体系的なデータの蓄積によって、前処理設備、エチレンプラント両方の視点から設備増強の可否及び是非を判断し、PET や PVC を含んだ混合素材多様化へと推移することが現実的である。

会議

(1) 「一般廃棄プラスチックを石油化学プラントにおいてケミカルリサイクルするために必要な前処理装置開発検討実証事業」の現地視察会及び検討会の開催

・現地視察会

日時 : 2025年8月29日(金) 13:30~15:45

場所 : クラサケミカル大分コンビナート大会議室

1. 事業の進捗状況の共有
2. クラサケミカル株式会社 会社説明・施設紹介
3. 施設見学
4. 質疑応答・ディスカッション

(2) 共同実施者との打合せ

日時と場所

- ・4月8日(火) 17:00~18:00 オンライン
- ・5月7日(水) 10:00~11:00 オンライン
- ・5月29日(木) 9:00~12:00 丸紅本社(東京)
- ・6月5日(木) 14:00~16:00 オンライン
- ・6月20日(木) 13:00~14:00 オンライン
- ・7月17日(木) 13:00~14:00 オンライン
- ・8月29日(金) 10:00~12:00 クラサケミカル(大分)