

欧州 JRC はケミカルリサイクルの経済性を解析した報告書を公表

(一財) 化学研究評価機構
食品接触材料安全センター 石動正和

解説

- ・欧州は、関連業界の意向を踏まえ、2026 年 6 月 30 日 SUPD 施行決定 2026/1425 において、PET ボトルのリサイクルにケミカルリサイクルを認める決定を下した。
- ・こうした中、2026 年 7 月 22 日欧州共同研究センター (JRC) は、ケミカルリサイクルのプラス面、マイナス面を整理した本格的な報告書を公表した。
- ・この報告書は、ケミカルリサイクルの経済性を包括的に解析する。結論として、EU におけるケミカルリサイクルは、有意なコスト競争力を実現していないものの、PPWR などのリサイクル材最低含有率を遵守するため重要な役割を果たすとされる。

JRC「ケミカルリサイクルの経済的実現可能性 現在と将来の概観 現状と将来の概観」
2026 年 7 月 22 日

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC147061>

要旨：ケミカルリサイクルとは、プラスチックなどの廃棄物を化学的な構成単位（モノマー等）にまで分解し、それを新たなプラスチックの製造に利用する一連のプロセスを指す。本報告書は、欧州連合（EU）におけるプラスチックのケミカルリサイクルの経済的妥当性について、2025 年時点の現状を概観し、この分野における主な課題と機会を明らかにしている。報告書では、様々なケミカルリサイクル技術について論じるとともに、現在最も有力な手法であるソルボリシス（溶媒分解）とパイロリシス（熱分解）の経済性に焦点を当てている。また、これらの技術の成熟度や限界に加え、生産コストや投資コストについても検討する。結論として、EU におけるケミカルリサイクルはバージンプラスチックと同等のコスト競争力には至っていないものの、市場へのリサイクルプラスチック供給において重要な役割を果たす可能性がある」と指摘する。こうしたリサイクルプラスチックは、「包装及び包装

廃棄物規則」や「シングルユースプラスチック指令」におけるリサイクル材含有率要件、更には将来的に導入され得る同様の規制を遵守するため必要とされる。

謝辞（略）

エグゼクティブ・サマリー

政策的背景

本報告書は、プラスチック廃棄物の削減と循環型経済の推進に向けた EU の継続的な取組みに寄与するものである。EU の「シングルユースプラスチック指令 (SUPD)」及び「包装及び包装廃棄物規則 (PPWR)」は、プラスチック廃棄物のリサイクルに関する目標を定めている。これには、2030 年までにポリエチレンテレフタレート (PET) 製飲料ボトルに少なくとも 30%、PET 以外の食品等接触プラスチック包装に 10%のリサイクルプラスチックを使用することなどが含まれ、これによりリサイクル材への市場需要が喚起される。ケミカルリサイクルは、こうした材料の供給ルートの一つである。本報告書では、経済的観点から EU におけるプラスチックのケミカルリサイクルの現状を分析し、主要なプロセスにおける課題や機会について検討する。

主な結論

本報告書は、EU におけるケミカルリサイクルはバージンプラスチックと同等のコスト水準には達していないものの、PPWR や SUPD で求められるリサイクル材使用要件や、将来的に同様の規則が導入された場合に必要となるリサイクルプラスチックを市場に供給する上で、重要な役割を果たし得ると結論付ける。しかし、ケミカルリサイクルプロセスに構造上に伴う高コストや、特に EU 域内で生産されたケミカルリサイクル材に対する将来的な需要の不確実性など、対処すべき課題もいくつか存在する。

主な調査結果

本報告書では、まず、ソルボリシス（溶媒分解）、熱分解、ガス化など、様々な種類のケミカルリサイクル技術の概要を示す。続いて、現在最も有力な 2 つの技術（熱分解とソルボリシス）について、ステークホルダーからの情報や公表文献に基づき、コスト（設備投資費、運転費など）に焦点を当て、経済的実現可能性を検証する（ガス化などの他の技術も将来的に重要になる可能性があるが、稼働施設に関する情報、特にコストに関する情報が不十分であり、経済的実現可能性について結論を導き出せなかった）。

調査の結果、ケミカルリサイクルでは（バージンプラスチックに匹敵する）高品質なプラスチックが生産されるものの、そのコストは一般的にバージンプラスチックよりも大幅に高くなることは明らかである。

熱ケミカルリサイクルとソルボリシスは、ケミカルリサイクルプロセスの中で最も一般的な2つの手法であり、それぞれ異なるポリマーに適用される：

- 熱ケミカルリサイクル（熱分解及びスチームクラッキング）は、主にポリオレフィン（ポリエチレン PE、ポリプロピレン PP）やスチレン系樹脂（ポリスチレン PS）からなるプラスチック廃棄物を処理し、併産型ビジネスモデルを採用する。即ち、PE、PP、PS だけが生産されるわけではなく、その産業プロセスは、生産される多種多様な製品の総合的な価値を最大化するように最適化される。

- o ベースラインシナリオ[2]におけるコスト試算では、熱分解[3]由来のナフサのコストはバージンナフサの 1.5～3.5 倍[4]となる。その結果、ケミカルリサイクルされたポリマーのトン当たりコストは、バージンポリマーと比較し 1.4～3.7 倍（バージン化石燃料の価格変動による）となる。これは、ベースラインシナリオにおいてリサイクルポリマーの価格がトン当たり約 3,000 ユーロ（前提条件により 1,500～4,000 ユーロ超）になることを意味する。

- o 物理化学的な制約や、比較的低い再生材料の歩留まり（通常、プラスチック廃棄物原料に対して約 30～50%）が、バージンポリマーと比較した熱分解によるケミカルリサイクルのコスト高の一因となっている。漸進的な技術革新、規模の経済、効率化によるコスト削減が進んだとしても、近い将来においてこれらの根本的な状況が大きく変わることはないと思われる。

- ソルボリシス（溶媒分解）プロセスは、現在、繊維分野ではポリエステルとして知られる PET ポリマーを含むプラスチック廃棄物のリサイクルに重点を置いているが、ポリアミドやポリカーボネートにも適用可能である。

- o ソルボリシスプロセスでは、90%以上の材料リサイクル収率が報告されている。JRC が収集したデータによると、EU におけるケミカルリサイクル PET の生産コストは 1 トン当たり $2,150 \pm 500$ ユーロの範囲にある。これに対し、食品グレードのバージン PET 及びメカニカルリサイクル PET の EU 市場価格は、2021～22 年に 1,500～2,000 ユーロ、2023～24 年に 1,000～1,700 ユーロで推移している。

ケミカルリサイクルポリマーのコストは今後も高止まりすると見込まれる一方、プラスチックリサイクル材の使用に関する法規制の導入が予定されている。こうした状況は、より低コストで規制を遵守するための代替ソリューションが求められる市場機会を生み出している。

本報告書は、この分野には依然として大きな知識のギャップや不確実性が存在すると指摘する。具体的には、供給側では実際規模のケミカルリサイクル施設の操業コストに関するデータが不足していること、需要側ではプラスチックのリサイクル材使用義務化が将来的にリサイクル材への支払い意欲にどの程度影響を与えるかが不明確であることなどが挙げられる。

JRC による関連業務及び今後の取組み

JRC は、プラスチックのケミカルリサイクルに関するいくつかの調査（プラスチックリサイクルの環境負荷に関する調査：García-Gutiérrez ら、2023 年など）を実施してきた。今後も同分野の動向を注視し、ケミカルリサイクル技術の開発や関連する政策的取組みを支援していく。

1. はじめに

欧州連合（EU）は、プラスチック廃棄物の削減と循環型経済への移行を、環境政策の主要な柱に据えている。2019 年のシングルユースプラスチック指令（SUPD）や 2025 年の包装及び包装廃棄物規則（PPWR）では、リサイクル材の使用拡大に向けた法的拘束力ある目標が定められている。これには、2030 年までに PET 飲料ボトルに少なくとも 30%、PET 以外の食品接触用プラスチックに 10%のリサイクルプラスチックを使用することなどが含まれる。これらの政策は、リサイクル材の市場需要を喚起し、それによってバージンプラスチックへの依存を減らし、環境負荷を低減することを目指している。ケミカルリサイクル（溶媒分解、熱分解、ガス化などのプロセス）は、特にメカニカルリサイクルでは効率的に処理できない複雑な組成や汚染を含むプラスチック廃棄物において、メカニカルリサイクルを補完する手法として益々注目されている。しかし、ケミカルリサイクルの経済的実現可能性については依然不確実な点が多く、政策立案者や業界関係者に情報を提供するために本分析が行われた。

本報告書は、EU におけるケミカルリサイクルの経済的実現可能性を巡る知識のギャップを埋めるため作成された。本報告書では、ケミカルリサイクル技術の現状とコスト、そして EU の循環型経済の目標への貢献の可能性を評価する。本調査は、欧州委員会が構造的な課題（高い設備投資・運営コスト、大規模稼働に関するデータの不足、市場需要の不確実性など）を理解するのを支援するため実施された。

本調査の具体的な目的は以下のとおり：

1. 主要なケミカルリサイクル技術（熱分解及び溶媒分解）について、設備投資・運営コスト及び潜在的な収益源を分析し、その経済的実現可能性を評価すること。

2. コスト、技術的不確実性、市場リスク、規制上の制約など、ケミカルリサイクルの導入を阻害する課題について議論すること。

これらの目的は、EU がプラスチックリサイクル目標を達成しつつ、競争力があり持続可能な産業部門を育成することに直結している。更に、本報告書は循環型経済の技術に関する JRC のより広範な研究に貢献し、資源効率が高く気候中立な経済への移行に向けた欧州委員会の取組みを支援するものである。

クイックガイド

本報告書の構成は以下のとおり。第 1 章では、技術経済的及び政策的な背景と、EU がより循環型の経済へと移行する上でケミカルリサイクルが果たす重要性について概説する。第 2 章では、ソルボリシス、熱分解、ガス化といったケミカルリサイクル技術の現状について、各技術の技術的制約や物質収率に焦点を当てて概説する。第 3 章では、手法に関する側面と、現在の状況における経済的実現可能性の意義について論じる。第 4 章では、データ及びより広範なエビデンスを示す。第 5 章では、熱分解とソルボリシスを中心に、ケミカルリサイクルプロセスの経済的実現可能性を分析する。第 6 章では、ケミカルリサイクルの経済的実現可能性に影響を及ぼし得る市場及び規制上の課題について論じる。最後に、第 7 章で結論を述べるとともに、今後の研究の方向性を示す。

2. 背景と範囲

2.1. ケミカルリサイクルへの注目

過去数十年に亘り、プラスチックのリサイクルにおいてはメカニカルリサイクルが主流の技術であった。Plastics Europe (2024 年) によると、欧州 (EU27 カ国+3 カ国) で生産された 5,400 万トンのプラスチックのうち、約 710 万トンがポストコンシューマープラスチックのメカニカルリサイクルに、310 万トンがプレコンシューマープラスチックのメカニカルリサイクルに由来するものであった。これに対し、ケミカルリサイクルされたポストコンシューマープラスチックは 0.1 万トン未満に留まっている。

それにも係らず、いくつかの理由からケミカルリサイクルへの関心が高まっている。その理由としては、プラスチック廃棄物 (リサイクルが困難なものを含む) を高付加価値な用途へリサイクルしようとする意欲の高まり、プラスチック廃棄物の輸出規制、プラスチック廃棄物の焼却や埋立てを削減する動きの加速、リサイクルプラスチックに対する新たな品質要件、そして様々なプラスチック製品に対するリサイクル材使用率の義務化などが挙げられる。更に、表 1 に示すように、現在のリサイクル率はポリマーの種類によって、或いは同じポリマーグループ内であっても大きく異なっており、多くのポリマーストリーム (及びサブストリーム) においてリサイクル率を向上させる余地があることを示唆している。

Table 1. Overview of recycling rates by polymer and polymer sub-stream.

Polymer/sub-stream	Recycling rate (%)
HDPE	32
PP	30
PVC	24
PET overall	20
PET packaging	41
PET beverage bottle	53
PET non-beverage bottle	32
PET trays	19
PET polyester fibre	<1
LDPE films and flexibles	15
PS, XPS, EPS	4

Source: Systemiq (2023) and Plastics Recyclers Europe personal communication; 2023 data for EU27+UK, Norway & Switzerland; figures include post-consumer and pre-consumer waste; recycling rate is calculated as the ratio of amount sent to recycling divided by generated waste amount.

メカニカルリサイクルでは、プラスチックに含まれるポリマーは、リサイクル工程を経てもその構造が殆ど変化しない。プラスチックリサイクルの分野における比較的新しい手法として、溶剤ベースのリサイクル（溶解リサイクルや溶剤ベースの精製とも呼ばれる）[6]がある。この手法では、ポリマーの主鎖を添加剤や充填剤（フィラー）といった他のプラスチック構成成分から分離するが[Ragaert et al. 2023]、モノマーやそれより小さな分子形態にまで分解することはない。従って、これらのプロセスは、ポリマーや場合によっては他のプラスチック構成成分をより小さな分子断片にまで分解するケミカルリサイクルプロセス（ソルボリシスなど）とは異なる。分解された断片は、更に処理を施すことで、新たなポリマーを含む新しい分子の再合成に利用できる。EU の法規制の文脈においては、「リサイクル」という用語は、投入された材料のうち、エネルギーや燃料に変換されなかった部分にのみ適用されるという点に留意することが重要である。

メカニカルリサイクルと比較したケミカルリサイクルの典型的な利点の一つは、処理可能な投入物（原料）の多様性である。特定の種類のプラスチック混合物や、プラスチック以外の素材を含むプラスチック（例：繊維製品におけるポリエステルと綿の混紡）などを一括して処理することが可能だからである。ケミカルリサイクルは、欧州のプラスチック加工業者による需要の約 16%を占め（Plastics Europe 2022）、かつメカニカルリサイクルでは新たなポリマーへと再生できない熱硬化性ポリマー（特にポリウレタン）の処理も可能である（Plastics Europe 2022a）。更に、ケミカルリサイクルによって得られる再生品の品質も大きな利点であり、多くのプロセスにおいて、バージン材や食品グレードに匹敵する品質の製

品を製造できる。

表 2 は、ケミカルリサイクルとメカニカルリサイクルにおけるリサイクル経路とリサイクル材の用途を示したものであり、投入物及び産出物の品質について、食品接触用途向けか否かで区別している。この表から、原則としてメカニカルリサイクルとケミカルリサイクルは多くの同じポリマーを処理対象とできるものの、ケミカルリサイクルは一貫してバージン材や食品グレードの品質を実現できるという点で、多くのメカニカルリサイクル経路とは対照的であることが分かる。

ICIS Recycling Supply Tracker – Mechanical[7]によると、世界の PET（メカニカル）リサイクル処理能力のうち 28%が食品グレード向けであるのに対し、ポリオレフィン（PE 及び PP）ではその割合は約 3%と、遥かに低くなっている[8]。食品接触用途向けリサイクルポリマーの需給の不均衡が価格上昇を招いており、食品接触用途向けリサイクル PET の価格は 2016 年以降、一貫して同等のバージン材の価格を上回っている（ICIS 2026）。

更に、ケミカルリサイクルは焼却処理に比べて温室効果ガスの排出量が少ないため（García-Gutiérrez et al. 2023）、メカニカルリサイクルができず、さもないと廃棄されることになる（多くの場合、焼却や埋立てに多額の費用を要する）プラスチックにとって、有力な選択肢となる。

メカニカルリサイクルと比較した場合、ケミカルリサイクルの典型的な欠点は、技術的な複雑さが高く、それに伴いコストも高くなることである。メカニカルリサイクルとケミカルリサイクルの間にあるこうした技術的・経済的な違いこそが、両技術が一般的に互いに補完し合うものとして提示される理由となっている（Plastics Europe 2022b）。ケミカルリサイクルが成功する可能性が最も高いのは、比較的高いコストを以下の要因で相殺できる場合である。即ち、原料がメカニカルリサイクルに適さないために原料コストを低く抑えられることや、生成されたりサイクル材がバージン材と同等の品質や食品接触用途への適合性を有することによる販売価格の上乗せである。

Table 2. Recyclability and food-contact potential of plastic waste streams. (FC= food contact, PET= polyethylene terephthalate, PP= polypropylene, PE= polyethylene, PS= polystyrene, PMMA= poly(methyl methacrylate), PA= polyamide, PC= polycarbonate, PU= polyurethane, PVC= polyvinyl chloride)

Resin identification code ⁹	Waste plastic polymer type	Mechanical Recycling		Chemical Recycling	
		Can be recycled ?	Recyclate widely suitable for food-contact ?	Can be recycled ?	Recyclate widely suitable for food-contact ?
1	PET-FC	✓	✓	✓	✓
1	PET-non FC	✓	✗	✓	✓
5	PP	✓	✗	✓	✓
2, 4	PE	✓	✗	✓	✓
6	PS	✓	✗	✓	✓
7	PMMA	✓	✗	✓	✓
7	PA	✓	✗	✓	✓
7	PC	✓	✗	✓	✓
7	PU	✗	□	✓	✓
3	PVC	✓	✗	✓*	✓

* PVC-containing waste streams pose additional technical challenges for pyrolysis-based recycling due to chlorine release and corrosion risks. While technically feasible, PVC is therefore often restricted or limited in current commercial pyrolysis plants for economic and operational reasons.

Source: own elaboration

2.2. 本研究の対象範囲

ケミカルリサイクルは主にプラスチックの文脈で議論されているが、そのプロセスが適用又は検討されている他の素材や産業も存在する。これには、非プラスチック系繊維（綿など）、金属、更には有機廃棄物などが含まれる。しかしながら、本研究では、繊維に使用されるものを含め、プラスチックに見られる合成ポリマーのケミカルリサイクルに全面的に焦点を当てている。これは、JRC がステークホルダーから受け取った意見（その大部分がプラスチックに関するものであった）とも整合している。

2.3. ケミカルリサイクル技術

2.3.1. 概要

ケミカルリサイクルは単一の技術やプロセスを指すものではなく、その範囲も明確に定義されているわけではないという点を理解することが重要である。とはいえ、関連する技術については広く合意が得られている。主要なケミカルリサイクル技術は、ポリマー分子をどの程度まで分解するかによって分類される（Liu, Q. et al. 2024, Martínez-Narro et al. 2024, Liu, Y. et al. 2024, Jiang et al. 2022, Solis and Silveira 2020, Biessey et al. 2023, Klotz et al. 2024）。これらは図 1 に示される。

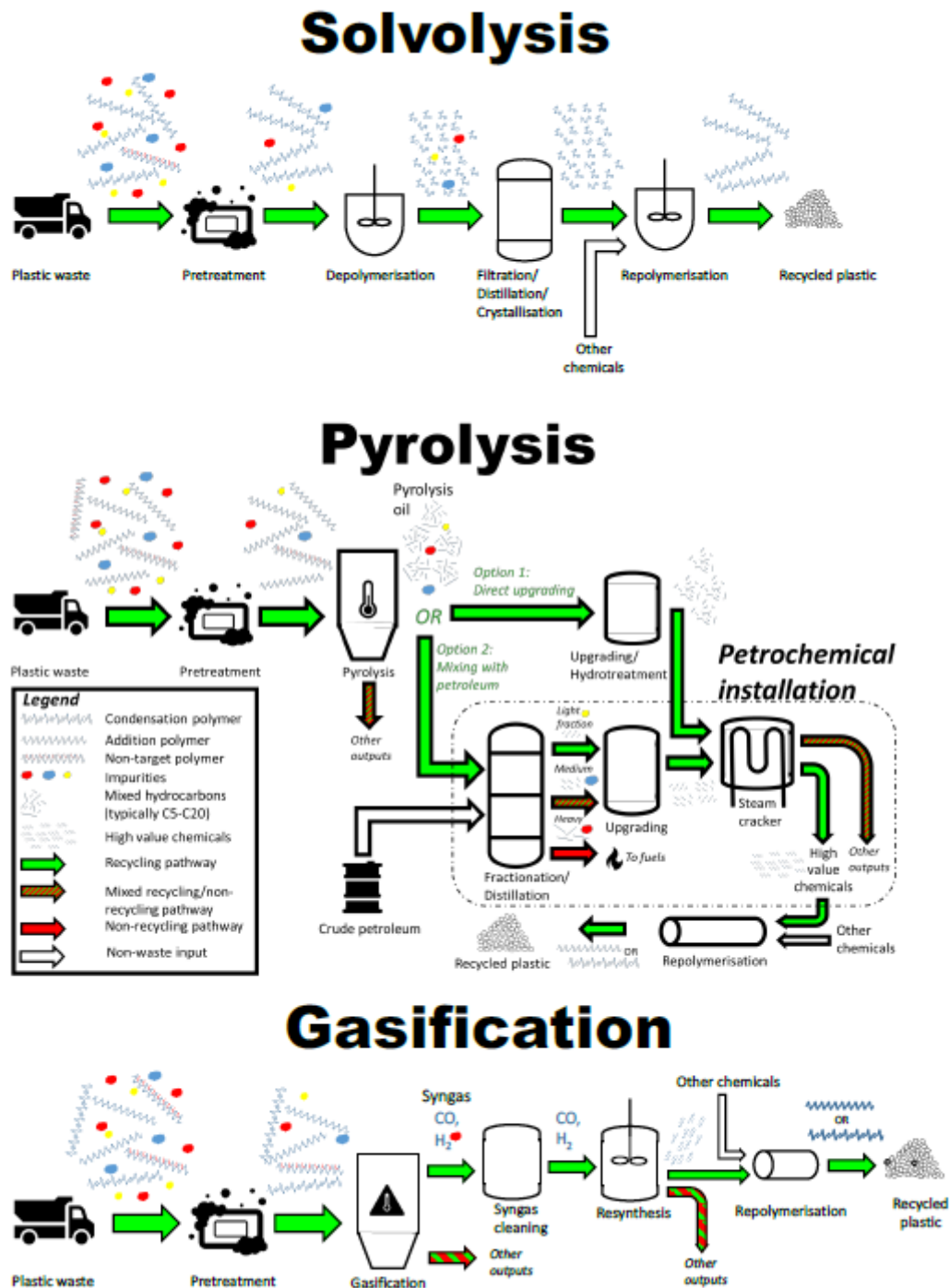
- 溶媒による解重合（ソルポリシス）：この分類は、典型的には 80～300℃という比較的穏やかな反応温度条件下で、溶媒を用いてポリマーをオリゴマーやモノマーといった構成単

位に分解する化学プロセスを指す。得られたオリゴマーやモノマーは精製された後、通常はバージンモノマーやその他の化学物質を添加した上で、新たなポリマーへと再合成することが可能である。解重合によって他の化学物質が生成されることもあり、それらは再重合や他の化学合成プロセスに利用できる。ソルボリシス（溶媒分解）に分類されるプロセスのうち、最も一般的なものには、加水分解、メタノリシス、グリコリシス、アミノリシスがあり、これらはポリマーの分解に使用する化学品の種類によって区別される。これらのプロセスを組み合わせた手法も報告されている（Umdagas et al. 2025）。なお、このプロセスは「溶解リサイクル」や「溶媒ベースの精製」と混同すべきではない。後者は、ポリマーの構造を破壊することなくプラスチックマトリックスからポリマーを回収するものであり、ケミカルリサイクルとは見なされないためである。

- 熱分解（Pyrolysis）：この分類は、酸素を遮断した状態で高温（通常 300～700℃）にさらし、ポリマーを分解する熱化学的分解プロセスを指す。多くのポリマーにおいて、その結果として得られるのは、主に液状の炭化水素、一部のガス、及び固形残渣（チャー）からなる不均一な混合物である。そのため、熱分解プロセスは熱化学的液化プロセスとも呼ばれる。生成された液状混合物は「熱分解油」と呼ばれ、更に化学物質や燃料へと加工することが可能である。一般的に、熱分解油はそのまま後続の工程に回すには品質が不十分である。これに対処する主な選択肢は 2 つある：i) 分留の前に熱分解油を原油で希釈する、或いは ii) 水素化処理によって熱分解油を改質し、スチームクラッカー（水蒸気分解装置）で直接使用できる品質にする、という方法である。スチームクラッカーから得られる高付加価値な化学物質は、新たなポリマー（熱分解油の原料となったポリマーとは異なる種類のものを含む）やその他の化学物質の合成に利用できる。PS（ポリスチレン）や PMMA（ポリメタクリル酸メチル）など、特定の種類のポリマーについては、熱分解によって非常に高い収率でモノマーを得ることも可能である（Godiya et al. 2019）。その場合、熱分解プロセスの生成物は各留分に分離され、目的のモノマーは（通常はバージンモノマーと混合された後）再重合工程へと送られる。

- ガス化：熱分解と同様に、ガス化も熱化学的プロセスの一種である。これは、酸素や水蒸気を制御された量だけ供給し、非常に高い温度（通常 700～1200℃）を加えることで、ポリマーを「合成ガス」と呼ばれる混合ガスに変換するものである。生成された合成ガスは、精製後に直接エネルギー生産に利用したり、新たなポリマーや燃料を含むその他の化学物質を合成するための原料として利用できる。

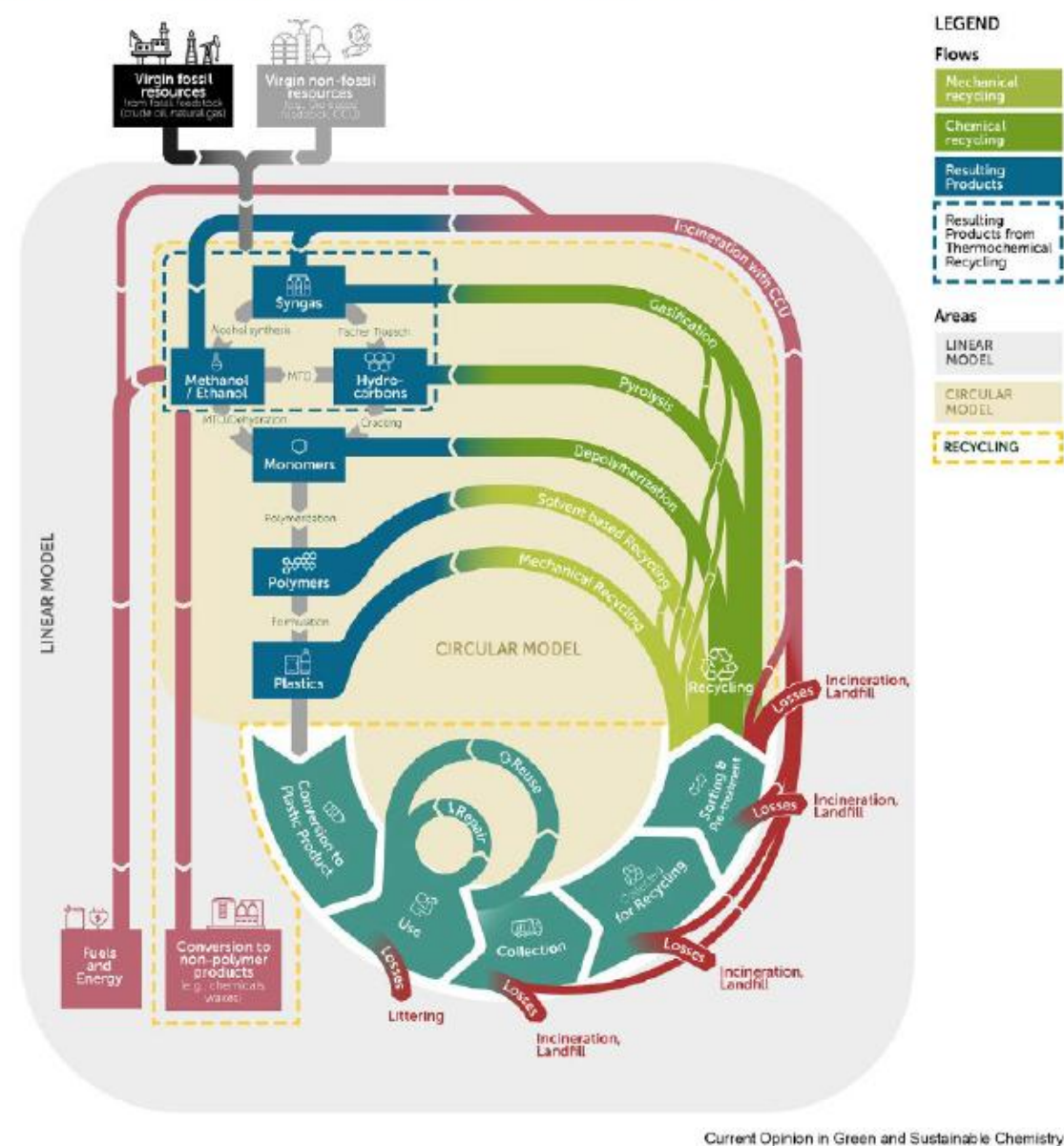
Figure 1. Schematic representation of typical solvolysis, pyrolysis and gasification recycling pathways for plastic waste (the legend applies to all technologies; for simplicity reasons not all detailed steps, inputs, outputs, emissions or losses are shown, nor any specific variations on the processes).



Source: own elaboration

様々なケミカルリサイクルプロセスと、メカニカルリサイクルやエネルギー回収との比較を概略的に示したものを図2に示す。

Figure 2. Schematic overview of different plastic recycling and recovery processes.



Source: Ragaert et al. (2023a).

本研究はケミカルリサイクル技術に関する詳細な技術的議論を行うことを目的としていないが、今後の議論のために以下の点に留意することが重要である：

• 他のあらゆるリサイクルプロセスと同様、ケミカルリサイクルにおいても、投入された全てのものがリサイクルされた製品（リサイクル材）として払出されるわけではない。図2に示される物質の流れは、様々なプラスチック廃棄物処理プロセスに関する重要な点を示唆している。最終的な生成物の用途や適用されるプロセスによっては、ケミカルリサイクル技術の一部が、実際にはリサイクル作業とエネルギー回収（燃料生産を含む）を組み合わせた

ものとなる場合がある。これは、処理の過程で材料の一部が直接エネルギーに変換される場合や、最終的に燃料生産に使用される場合に該当する。リサイクルと回収の区別は、廃棄物枠組み指令 2008/98/EC[10]によってなされる。同指令において「リサイクル」とは、廃棄物を本来の目的か否かを問わず、製品、材料、又は物質へと再処理するあらゆる回収作業と定義される。このリサイクルの定義には有機材料の再処理は含まれるが、エネルギー回収や、燃料として使用される材料又は埋戻し（バックフィル）作業に使用される材料への再処理は含まれない。この点は、特に熱分解やガス化のプロセスに関連する。より根本的な点として、ケミカルリサイクルプロセスを（エネルギー回収ではなく）主としてリサイクルと見なせるかどうかは、投入材のうち、エネルギーや燃料に変換されるのではなく、実際にリサイクル材として残るものの割合にかかっている。

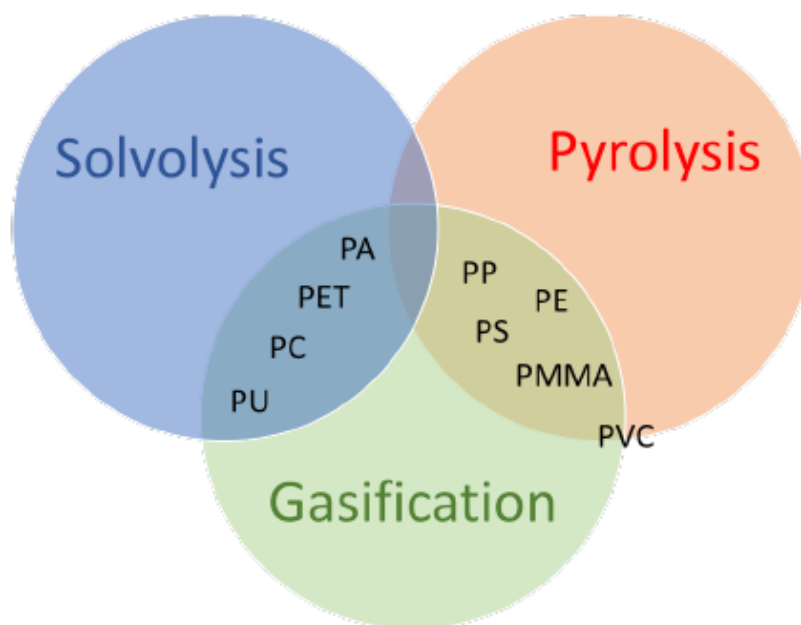
- 全ての技術が全てのポリマーに適用できるわけではない。ポリマー内の特定の化学結合が他の結合よりも反応性が高い場合、ポリマーを同一のモノマーへと分解することが可能である。いわゆる縮合系ポリマー[11]がこれに該当し、溶媒を用いた解重合によって特定の種類の結合を切断できる。これらには、エステル結合（例：PET、PC）、アミド結合（例：PA）、及びカルバメート結合（例：PU）が含まれる（Yeung et al. 2021, Cirujano et al. 2024, Vollmer et al. 2020）。特定の炭素-炭素結合（例：PS や PMMA）についてもモノマーへの分解が可能であり、その場合は、最適化された熱分解プロセスによって反応性の高い結合のみに作用させ、他の結合はそのまま残すことができる（Ragaert et al. 2017）。しかし、いわゆる付加重合体（付加ポリマー）の主要なカテゴリーであるポリオレフィン（例：PE、PP）の多くに見られるように、ポリマー全体で原子結合の反応性が同程度である場合には、通常、この手法は適用できない。一方で、熱分解などのプロセスでは、投入原料に含まれる特定のポリマー（炭素と水素以外の原子を含むもの、例：PET 中の酸素、PVC 中の塩素）を最小限に抑える必要がある。これは、それらのポリマーがプロセス自体やその後の用途に影響を及ぼす可能性があるためである。どの技術がどのポリマーに適しているかを示す概略図を図 3 に示す。

- 技術には多くのバリエーションが存在する。上述の広範な分類に加え、ケミカルリサイクル技術には一層細分化された種類が存在し、現在も発展途上の分野であることを反映して、新たな技術が登場し続けている。その一例として、酵素を用いて PET ポリエステルの解重合を促進する「酵素による解重合」（Arnal et al. 2023）が挙げられる。また別の例として、「水熱変換」（水熱アップグレードやスチームクラッキングとも呼ばれる）がある。これは、高温・高圧（350～500℃、230 bar）下で超臨界水を用いる熱分解のハイブリッド型の一種と単純に見なすこともできるが、より正確には、熱分解（高温）とソルボリシス（溶媒分解・溶解）の両方の特性を併せ持つ独自のプロセスと捉えられる（Ozoemena and Coles 2023）[13]。更に、上述のケミカルリサイクル技術の多くでは、反応時間、エネルギー消費、或い

は生成物の均一性といった観点からプロセス全体を改善するため、特定の触媒が使用される。従って、本研究の実務的な目的においては、各技術をいくつかの大まかなカテゴリーに分類しているが、ケミカルリサイクルを行う個々の産業施設は、コスト、収率、生成物の特性、既存プロセスへの組み込み可能性などの面でそれぞれ独自の利点と欠点を有しており、実質的には「唯一無二」の存在と言えるだろう。

- 文献全体で複数の呼称が用いられている。ケミカルリサイクルに適用される用語は多岐に亘り、プロセス間の技術的な差異に加え、用語の混在が混乱を招く可能性がある (Harasymchuk et al. 2024)。Ragaert et al. (2023a) は、こうした新たな用語の乱立状況についてのレビューを提案している。ケミカルリサイクル全般やその一部の分類を指すために、様々な非標準的な用語が使用されている。例えば、Closed Loop Partners (2021, 2021a) は、ケミカルリサイクルを指す用語として「分子リサイクル」を用いているほか、「精製」(ポリマーの構造を変えずに溶解させること) や、定義の境界が曖昧な「解重合」や「変換」(熱分解を「部分変換」、ガス化を「完全変換」と呼ぶなど) といった用語を使用している。これらは「熱ケミカルリサイクル」、即ち熱分解やガス化を包含する概念に対応している。

Figure 3. Schematic overview of suitability of polymer types for different chemical recycling technologies, based on existing industrial applications. Note that most chemical recycling technologies tolerate limited amounts of non-target polymers. Regarding PVC, see comment in Table 2.



Source: own elaboration

2.3.2. 供給側：EU におけるケミカルリサイクルの現状及び計画中の処理能力

表 3 及び表 4 は、欧州におけるケミカルリサイクルの現状及び計画中の処理能力の概要をそれぞれ示す。計画段階にあるものの未稼働のプラントや、既に操業を停止したプラントを含める情報源があるため、数値は情報源によって異なる傾向がある。それにも係らず、データからは主に 2 つの点が明らかになる：i) 現在のケミカルリサイクル処理能力は、欧州におけるメカニカルリサイクルの処理能力である 1,320 万トン[14]と比較し非常に低いこと、そして ii) 今後数年間でケミカルリサイクルの処理能力が大幅に拡大すると予想されることである。

世界的に見ると、特に稼働中のプラント数において、欧州は圧倒的役割を果たしている。Nova Institute によると、稼働中のケミカルリサイクル施設の半数以上が欧州に位置している[15]。しかし、処理能力の数値で見ると、欧州の施設が占める割合は現在の世界全体の処理能力の約 4 分の 1 に過ぎない。Roland Berger (2024) は、世界のケミカルリサイクル処理能力（投入量ベース）が 2030 年までに年間 2,000 万トン（20 Mt/y）、2050 年までに年間 7,000 万トン（70 Mt/y）に拡大すると予測している。

技術面に関しては、ソルボリシス（溶媒分解）と熱分解の現在の構成比は、概ね 20%対 80%の比率で安定的に推移すると見込まれる。この内訳は、各技術が対象とするポリマーの相対的な市場シェアを反映しているようである。Plastics Europe（2022 年）によると、2021 年における欧州のプラスチック加工業者[16]による PUR、PET、PA、PC（ソルボリシス法の対象原料）の合計需要は年間 980 万トン（9.8 Mt/y）であったのに対し、ポリオレフィン、PS、PMMA（熱分解法の対象原料）の合計需要は年間 2,810 万トン（28.1 Mt/y）であり、その比率は 26 対 74 であった[17]。

ICIS の報告によれば、2025 年に欧州で稼働するケミカルリサイクル設備の能力は、熱分解法が大部分（設備能力約 15 万トン）を占め、その他の技術（加水分解、グリコリシスなど）の合計は約 4 万トンに留まっており、前述の分布（80 対 20）と整合している。主な対象原料はポリオレフィンの含有率が高い混合プラスチック廃棄物ベールだが、PS や PMMA などの素材に特化したプロジェクトも一部存在する[18]。今後の見通しとして、建設中の設備能力を見ると、熱分解法が全体の約 90%（44 万トン）を占める一方、加水分解法は 10%（5 万トン）となっている[19]。

ガス化法はケミカルリサイクル技術の中で大きなシェアを占めているとは言えず、表 4 の予測数値や最近の市場動向を踏まえると、その相対的な存在感は将来更に低下する可能性がある[20],[21]。

Table 3. Overview of reported existing chemical recycling capacities in Europe

Reference year	Source	Total input capacity (ktonne/y)	Number of active plants	Geographical area	Breakdown by technology	References
2022	Plastics Europe	±100	N/A	EU27 +3	N/A	Plastics Europe (2024a)
2023	Plastics Recyclers Europe	150	N/A	EU27 +3	Pyrolysis dominant	Plastics Recyclers Europe (2023)
2023	Nova Institute	±100	N/A	EU27 +3	20% solvolysis 80% pyrolysis <0.1% gasification*	Nova ²²
2024 (April)	ICIS	160	N/A	Europe	22% solvolysis 71% pyrolysis 7% gasification	British Plastics Federation ²³
2024 (June)	SIA Partners	260	16	EU	10% solvolysis 90% pyrolysis	SIA Partners (2024)
2026 (March)	ICIS	190	N/A	Europe	20% solvolysis 80% pyrolysis	Personal communication March 2026

Sources: see individual references; sorted by reference year; data until 1Q 2026; * =breakdown based on installed and planned capacities

Table 4. Overview of projected chemical recycling capacities in Europe

Target year	Source	Total capacity (ktonne/y)	Number of planned plants	Geogr. area	Planned investment billion €	Breakdown by technology	Reference
2026	ICIS	680 (input)	N/A	Europe	N/A	13% solvolysis 87% pyrolysis	Personal communication March 2026 ²⁴
2026	SIA Partners	903 (input)	24	EU27 +UK	N/A	30% solvolysis 69% pyrolysis 1% gasification	SIA Partners (2024)

2027	Nova Institute	480 (output)	N/A	EU27+3	N/A	N/A	Nova ²⁵
2029	ICIS ²⁶	3300 (input)	N/A	Europe	N/A	15% solvolysis 85% pyrolysis	ICIS (2024)
2030	Plastics Europe	2800 (output)	44	13 EU countries	8	80% pyrolysis and gasification	Plastics Europe (2024a) Plastics Europe (2022c)
2030	SIA Partners	2400 (output)	N/A	EU27+UK	5	25% solvolysis 75% pyrolysis	SIA Partners (2024)
2040	SIA Partners	9300 (output)	N/A	EU27+UK	14	11% solvolysis 89% pyrolysis	SIA Partners (2024)

Sources: see individual references; sorted by reference year; data projections from 1Q 2026 onwards

2.3.3. 需要側：EU の法的要件に基づく需要予測

2.3.3.1. 規制の背景

現在の市場環境において、ケミカルリサイクル技術はバージンプラスチックの生産に対してコスト競争力がないと広く認識されている（この点については、本報告書の以降の箇所で詳述する）。しかし、ステークホルダーから寄せられた意見の多くは、EU 法規に基づくリサイクル材使用義務などの法的義務によって、ケミカルリサイクルプラスチックに対する一定の需要（ベースライン需要）が創出されると予測していた。

特に市場では、以下の規定から生じる義務を果たすためにリサイクル材を供給する必要性が予測される：

- シングルユースプラスチック指令 (EU) 2019/904 (SUPD[27])：同指令には、2025 年以降は PET 製飲料ボトルに 25%、2030 年以降は全てのプラスチック製飲料ボトル（PET 及び非 PET）に 30%のリサイクルプラスチックを配合する義務が含まれる。
- 包装及び包装廃棄物規則 (EU) 2025/40 (PPWR[28])：同規則第 7 条には、プラスチック包装におけるリサイクル材最低含有率基準に関する義務が含まれている。特に、PET 以外のプラスチック材から製造される「内容物と接触する包装（コンタクト・センシティブ包装）」（シングルユースプラスチック飲料ボトルを除く）については、2030 年までに 10%、2040 年までに 25%というリサイクルプラスチック含有率の要件が定められている。
- 食品接触用リサイクルプラスチック材料規則 (EU) 2022/1616[29]：ケミカルリサイクル材料[30]にも適用される（熱分解やガス化のプロセスはこの要件を満たす可能性が高い）

方、溶剤ベースのリサイクル技術の多くは満たさないため、同規則に完全に準拠して運用する必要がある)。

- 2026 年の車両設計の循環性要件及び廃車の管理に関する規則[31]：プラスチック部分のリサイクル材含有率について、6 年後に最低 15%、10 年後に 25%（それぞれ、うち少なくとも 20%は廃車由来であること）とする要件が含まれている。

なお、これらの法的義務の一部は未確定[32]であり、それが業界に不確実性をもたらすとともに、将来の需要や生産能力に関する見解の相違を生じさせている。

2.3.3.2. 需要の推定

Plastics Europe (2024a) によると、2022 年における欧州 (EU27+3) のプラスチック市場全体は、生産量が 5,880 万トン、消費量が 5,410 万トンであった（そのうち約 20%が循環型由来）。2022 年において、包装材は市場全体の 35~40% (2,110 万トン) を占めていた。同年回収された廃プラスチック包装材は 1,850 万トンであった。一方、ポリオレフィン系包装材の総量は約 1,500 万トンと推定されている。全プラスチック包装材のうち、ほぼ半数 (900 万トン) が、食品グレード (400 万トン) 又はその他の内容物との接触が懸念される用途 (500 万トン) のカテゴリーに該当すると推定される (SIA Partners 2024)。

概算として、他の条件が一定である（即ち、規制不適合を避けるための市場の大きな変動がない）と仮定すると、PPWR 単独でも、この約 900 万トンのうち 10%に相当する量の、食品グレード又は内容物との接触が懸念される用途向け再生包装材料への需要が創出される。この需要は、従来の PET リサイクルだけでは部分的にしか満たすことができない。従って、年間 50 万~100 万トンのケミカルリサイクルプラスチックが必要になると考えられる。PET 以外のプラスチック（ポリオレフィンや、熱化学的液化処理——例えば熱分解——が可能なスチレン系樹脂など）に焦点を当て、一般的なプロセス効率（収率 30~50%）を考慮すると、これはケミカルリサイクルに回される廃プラスチックの投入能力として、年間約 100 万~300 万トンに相当する。

この見通しは、業界筋が公表している試算とも整合しているようである：

- Plastics Europe (2024a, p.69) によれば、「Plastics Europe の加盟企業は、2030 年までに年間 280 万トンのリサイクルプラスチックを生産するため、EU 加盟 13 カ国における 44 件のケミカルリサイクルプロジェクトに対し、80 億ユーロを超える投資を行うと発表した」とされる。
- また、Plastics Europe (2023, p.53) は、大手企業であるライオンデルバセル

(LyondellBasell) 単独でも、2030 年までに年間 200 万トンの処理能力を確保すると発表したこと（その後、年間 80 万トンに修正[33]）に言及している。これには、リサイクル由来及びリさいくる可能資源由来のポリマーの双方が含まれる。

- CEFLEX（2025 年）も同様の数値を示している。同団体は、上市される軟質プラスチック包装の量を年間 330 万トンと仮定した場合、内容物と直接接触する用途（センシティブな接触用途）の軟質 PE 及び PP 包装について、2030 年までに「リサイクル材含有率 10%」という目標を達成するには、EU27 カ国+3 カ国において年間 0.7 万～110 万トンのケミカルリサイクル処理能力が必要になると試算している。また、内容物と直接接触する用途の硬質 PE 及び PP 包装については、更に年間 90 万～140 万トンのケミカルリサイクル処理能力が必要になると見込んでいる。

市場調査・コンサルティング会社（e-cube Strategy Consultants 2025 年、SIA Partners 2024 年）も、特に短期的（2030 年）な視点において、こうした規模感の妥当性を裏付けている。例えば eCube は、2030 年までに熱分解処理能力が年間約 100 万トン不足すると予測している。

上記の試算は、技術的、産業的、経済的な観点から市場の硬直性を前提とした現在の傾向に基づいている点に留意する必要がある。具体的には、短中期的（5～10 年）には適応の余地が殆ど、食品グレードや食品接触用途に適したリサイクル材を供給するという課題に対する主な「解決策」は、特に PET 以外のプラスチックにおいて、ケミカルリサイクル材を使用することであると仮定している。この前提条件とその限界については、後述する第 6 章で更に詳しく論じる。

2.3.4. ケミカルリサイクルの経済的実現可能性に影響を及ぼし得る技術的側面

プラスチックのケミカルリサイクルの経済的実現可能性は、収益とコストのバランスによって決まる。しかしながら、個々のケミカルリサイクル事業の経済的収支においては技術的側面も重要な役割を果たす。ここでは特に、以下の 2 つの側面について論じる：第一に収益を大きく左右する「材料歩留まり」、第二に（セクション 3.5 及び第 5 章で論じるように）運営コストの最も重要な項目の一つである原料コストに影響を与える「原料の品質要件」である。

- 原料の品質：原料の品質が低い場合、リサイクル施設にとっての原料調達価格は下がる可能性があるが、一方で、処理に適した状態にするための追加処理が必要となり、プロセスコストが増加することもある。即ち、原料品質に対する許容度が高い技術であれば、経済的実現可能性を向上できる。

- 材料歩留まり：技術的な材料歩留まりが高いプロセスでは、より多くの「リサイクル材として認定可能な材料」を生成でき（特に熱分解の場合、規制、とりわけマスバランス・ルールの詳細に依存するが）、その結果、全体的な収益も高まる可能性がある。

これらは相互に関連する側面であり、以下のサブセクションで論じる。

2.3.4.1. 原料の品質とプロセスの許容度

Eunomia (2022) によれば、メカニカルリサイクル（フィジカルリサイクル）業者とケミカルリサイクル業者の双方が、不純物の混入が最小限に抑えられた、安定した品質の原料供給を必要としている。著者らは、ケミカルリサイクルは異なる種類の材料に対するリサイクル経路と見なされるべきではあるものの、汚染された材料や未分別の材料の処理先と見なすべきではないと述べている（但し、メカニカルリサイクルでは処理が困難な材料を同等のグレードに再生できる可能性はある）。また、ケミカルリサイクルは、メカニカルリサイクルの選別工程から排出される未処理の残渣（リサイクル不適格物）の直接的な処理先と見なすべきものでもない。前述の通り、ケミカルリサイクルには様々なプロセスが存在し、それぞれ化学組成の異なるポリマーを処理することを意図している。これは、対象外のポリマーがケミカルリサイクルプロセスの性能に影響を及ぼす可能性があることを意味する。更に、無機物（充填剤やガラスなど）、金属、有機汚染物（食品残渣や紙など）、更には水分といったポリマー以外の成分も、プロセスに影響を及ぼしたり、追加の処理工程を必要としたりする場合がある。注：ケミカルリサイクルとメカニカルリサイクルの適用可能性や利点については、UBA (2024) の 179 ページ以降で詳述されている。

「コンタミネーション（汚染・混入物）」とは何を指すのか？

コンタミネーションは、以下の要素のいずれか、又は全てに関連し得る：

- リサイクル対象外の素材：金属、ガラス、紙
- 対象外のプラスチック：ポリオレフィンを主対象とするケミカルリサイクルプロセスを想定した場合、PVC（ポリ塩化ビニル）、ABS、PU（ポリウレタン）、PET などがコンタミネーションとなり得る。
- プラスチックの「付着物」：食品残渣、泥、砂粒、紙ラベル
- その他の対象外素材：電池、鋭利な物、衛生用品、硬質包装やソープディスペンサーなどに含まれるバネ・ナット・ボルトといった小さな部品

— マテリアルリサイクル施設で見られるその他の素材：木材、鉄筋など

これらの「カテゴリー」は、ケミカルリサイクルであれメカニカルリサイクルであれ、あらゆるリサイクル技術にとって課題となるが、各技術は異なる種類のコンタミネーションに対して独自の許容度を持っている。その許容度は、以下のような点に関わる：

— 素材をどのように処理できるか：例えば、ある種の技術では PVC が塩化水素を発生させ、プロセス内で腐食を引き起こす原因となる（後述）。

— 生成物の品質：化学的汚染物質の残留（キャリーオーバー）の程度、及び企業がそれらの汚染物質を排除すべきか、或いは生成物を後処理（例：熱分解油の水素化処理）すべきかをどう判断するか。

— 低濃度の汚染物質に対するプロセス自体の許容度：例えば、一部のガス化プロセスでは 5～10%の PVC、水熱処理では 5～7%の PET など。

— プロセス内で汚染物質を除去し、油分への混入を防げるかどうか：例えば、廃プラスチックの水熱処理において、水溶性汚染物質（N、S、Cl などのイオン）は廃水側に移行する。

— 炭化水素製品を処理するインフラ設備、及びケミカルリサイクル事業者が満たすべき取引規格。

ソルボリシス（溶媒分解）に関して、Arca ら（2025）が文献レビュー及び業界専門家へのインタビューを実施した。彼らは、この技術の投入原料として、個々の対象ポリマーの純度が 70%～85%を超える必要があると結論付けた。更に、同プロセスの特性として、対象外の熱硬化性樹脂、重金属、その他の有害物質に対して影響を受けやすいことが示された。全体として、どのプロセスがより汚染度の高い原料を処理できるかについては文献上必ずしも明確ではないが、様々なプロセスの検討からは、酵素加水分解法が対象外のプラスチックやその他の汚染物質に対してより高い許容度を持つことが示唆されている（Uekert ら 2022）。

熱分解に関しては、Eunomia（2022）が、メカニカルリサイクルと比較した際の原料面での主な利点として、(a) 熱分解の原料には PE と PP が様々な割合で含まれていても良いこと、及び (b) 特定のフィルム類を容易に受け入れ可能であることを挙げている。多種多様な複合材料フィルムを高濃度で熱分解原料として受け入れることはできないものの、PE と PP の混合物といった特定の種類の複合材料フィルムは受け入れ可能であり、複合材料原料と単一材料（モノマテリアル）を組み合わせることで原料仕様を満たすことも可能である。それにも

係らず、Arca ら（2025）は、投入原料（特に PE 及び PP）における個々の、或いは混合された対象ポリマーの純度として、少なくとも 60%～85%が必要と指摘している。熱分解プロセスは、無機物やヘテロ原子、特に PVC に含まれる塩素などのハロゲンに対して敏感であることが知られている[34]（例：UBA, 2024, p. 24[35]を参照）。これらのハロゲンや、硫黄[36]などのヘテロ原子は、触媒性能を損なったり、製品の品質を低下させたりする可能性がある（Huang et al. 2022; Franke et al. 2024）。また、ヘテロ原子は後続のプロセスにも影響を及ぼす可能性がある。例えば、プラスチック廃棄物から得られる熱分解油は、コークス生成が課題となるスチームクラッカー（水蒸気分解装置）での直接利用には適さないことが多く（Zero Waste Europe 2023）、流動接触分解（FCC）などの触媒プロセスへの利用にも適していない。一部の不純物については、熱分解油がスチームクラッカー内で他の石油由来原料と混合されるため、実際にはそれほど大きな問題にならない場合もある。しかし、Kusenberg ら（2022）は、追加処理を必要としない可能性が高い不純物は硫黄、ナトリウム、ケイ素のみであると述べている。これは、それらの希釈倍率が十分に小さいためである。著者らは、窒素、塩素、カルシウム、鉄、鉛といった他の全ての不純物が、スチームクラッカーの原料規格をそれぞれ最大で 16 倍、485 倍、34 倍、7000 倍、350 倍上回っていることを指摘している。このことは、蒸留や水素化処理といった追加の品質向上プロセスが必要であることを意味し、それによってコストが増加する。この点は、フランスに存在する熱分解油の「廃棄物でなくなる」基準にも反映されている。同基準では、石油化学プラントで更なる精製を行わない熱分解油に対し、精製を行う熱分解油よりも厳しい不純物要件が課されている。

熱分解の原料に PVC を混合する試みは、現在パイロット規模で実証が進められている。最近の産業界の事例[38]によると、ARCUS Greencycling 社が 2024 年に行った実証キャンペーンでは、混合ポリオレフィンに重量比で 10%の PVC を混合した原料を処理することに成功した。その際、転換効率の低下は見られず、塩素及び酸度に関して取引先の許容範囲内に収まる熱分解油が生産された[39]。更に、Pryme[40]、Synpet[41]、Lummus（New Hope Energy）といった他の高度な熱分解技術プロバイダーは、混合プラスチック廃棄物や夾雑物を処理可能な、原料に対する許容度の高いプロセスを提示している。業界との直接的な対話や学会での発表によれば、これらの技術は原料中に重量比で最大約 2%の PVC が含まれていても対応可能であるとされている。但し、これらの技術を大規模に運用した場合のエネルギー消費に関するトレードオフがどのようなものになるかについては、依然として不明である。

ガス化に関しては、Arcà ら（2025）が、様々なプラスチックの混合や、有機廃棄物のようなプラスチック以外の物質の混入に対しても高い許容性があることを示している。とは言え、無機物や PVC に含まれる塩素などのヘテロ原子は、プロセスに影響を及ぼす。原料に

数重量パーセントの PVC を混合する場合、或いは PVC 単独を原料とする場合でも対応可能なガス化プロセスについて、いくつかの研究が進められている[42]。更に、プラスチック以外の炭素含有廃棄物（都市廃棄物由来のバイオマスなど）を含む、より広範な原料を処理するためのガス化技術についても研究が行われている。

2.3.4.2. 物質収率

ケミカルリサイクルの経済的実現可能性を左右する主要な要素の一つは、プロセスから最終的に得られる物質の量、より具体的には「リサイクル」品として分類できる物質の量である[43]。プロセス中に生成されるエネルギーや燃料として利用される化学物質にも一定の経済的価値はあるが、生産された物質 1 トン当たりで最も高い収益をもたらすのは、通常、リサイクルされた化合物である。これは特に、メカニカルリサイクルと比較し、食品接触適合性などの付加価値の高い特性をそれらの物質が提供する場合に当てはまる。

ケミカルリサイクルにおける全体的な物質収率に影響を与えるパラメータには、以下のようなものがある（CE Delft 2022）：

- 原料の品質：投入される物質の純度が高く、前処理の段階で廃棄しなければならない不要な成分が少ない場合、相対的な物質収率は高くなる。
- 適用される技術：熱分解やガス化のような特定のプロセスでは、排出物、燃料として使用又は変換される炭化水素、（熱）エネルギー、固形残渣（ワックスやチャーなど）を含む、多岐に亘る生成物が生じる。一方、ソルボリシス（溶媒分解）のような他のプロセスでは、反応生成物が少なく、遥かに均質な生成物が得られる。
- 運転条件及び後続処理の選択：ケミカルリサイクルのプロセスは、運転条件を調整したり、追加の工程を組み込んだりすることで制御可能である。例えば、本来であれば燃料製造に回されるはずの熱分解油の重質留分を処理するため、水素化分解工程を追加するといったことが挙げられる。更に、触媒を用いることで、生成物の分布を段階的に微調整することが可能である（Ellis et al. 2021, Martín et al. 2021, Qin et al. 2025, Huang et al. 2022, Lopez et al. 2017）。

稼働している産業規模の施設は少なく、実験室規模を超えた段階で達成された収率に関するデータも限られている。表 5 に、産業規模の操業における収率の概要を示す。強調しておくべき点として、この表の数値は正確性を独自に検証できておらず、学術文献や専門家間で共有されている値と比較し、全体的に高い数値であるように見受けられる。

Table 5. Overview of reported yields for industrial chemical recycling operations.

Company	Subvariant	Input material	Yield (%)	Reference
SOLVOLYSIS				
Carbios, FR	Enzymatic hydrolysis	PET mechanical recycling re-jects, trays and fibre	90	Carbios ⁴⁴
Eastman, US/FR	Methanol-ysis	PET packaging and fibre	>90	Eastman ^{45, 46}
INEOS Aromat-ics, BE (Infinia)	Methanol-ysis and hy-drolysis	Difficult-to-recycle PET packag-ing (incl. multi-layer trays) and polyester textiles	>90	INEOS ⁴⁷
Ioniqa, NL	Glycolysis	PET bottles	93	Thiounn and Smith (2020)
Jeplan, JP	Glycolysis	PET bottles and fibre	98	Thiounn and Smith (2020)
Gr3n, CH	Hydrolysis	PET bottles, textiles, food packaging	98-99	Hann and Connock (2020)
Two companies (undisclosed)	N/A	PET bottles, textile	97-100	CE Delft (2022)
PYROLYSIS				
<i>Plastic to monomer</i>				
Regenyx, US	N/A	PS	81	Hann and Connock (2020)
Pyrowave, CA	Catalytic mi-crowave pyrolysis	PS	95	Hann and Connock (2020)
<i>Plastic to pyrolysis oil</i>				
Pryme One, NL	N/A	Mixed plastic waste	65	Pryme ⁴⁸
Quantafuel, NO	N/A	Mixed post-consumer plastic waste	68	Sustainable Plastics ⁴⁹
Plastic Energy, ES	N/A	Plastic waste	70	ResourceWise ⁵⁰
ReOil, AT	Non-cata-lytic pyroly-sis	Plastic packaging, mainly poly-olefins	82	OMV ^{51, 52}
<i>Plastic to plastic</i>				
Five companies (undisclosed)	N/A	Plastic films, mixed plastic waste	43-60	CE Delft (2022)
Six companies (average)	N/A	PE/PP/Mixed plastic waste/Foils	49	CE Delft (2022)
MoReTec, DE	Catalytic py-rolysis	Mixed plastic packaging and flexible polyolefins	80	ICIS ⁵³ and LyondellBa-sell ⁵⁴
Plastic Energy	N/A	Mixed plastic waste	68	Plastic Energy & Sphera (2025)
GASIFICATION				
Undisclosed company	N/A	Mixed plastic waste (mainly PO)	34	CE Delft (2022)

Note that the data have been included as reported by the indicated sources but could not be verified for accuracy.

表5が示すように、燃料生産には用いられない化学物質の収率に関して、全体として、ソルボリシス（溶媒分解）が熱分解（パイロリシス）を上回り、熱分解はガス化を上回る結果となっている[55]。

ソルボリシスでは、溶媒を用いてポリマーをオリゴマーやモノマーに分解する。これらのモノマーは、必要に応じて結晶化、ろ過、蒸留の工程を経た後、再びポリマーへと再合成することが可能である（Tullo 2023, Sia Partners 2024）。ポリマーからモノマーへの変換は損失の少ないプロセスであり、新たなポリマーへの再合成も容易である。こうした点が、このプロセスにおける全体的な収率の高さの理由となっている。

Kusenberg ら（2025）は、学術研究及び産業界の研究に関する文献レビューに基づき、産業データ、特許データ、実験室データを活用して、メタノリシス、グリコリシス、加水分解といった解重合プロセスにおける収率を報告した。それによると、収率の中央値は94%であり、第1四分位値は88%、第3四分位値は99%であった。同研究によれば、精製効率の中央値は96%で、第1四分位値は94%、第3四分位値は97%であった。これらの結果に基づき、著者らは、ポリマーから精製モノマーに至るソルボリシスプロセスの全体的な変換効率を83%から96%の範囲と推定した。一方、CE Delft（2022）は、4つの産業プラントからの企業データに基づき、やや高い変換率を報告している。それによると、様々な種類のPET 廃棄物について、プラスチックからプラスチックへの変換収率は97%から100%に達した。

熱分解において、廃プラスチックは熱分解油、ガス、及びチャー（炭化物）に変換される。ガスやチャーは、燃料や残渣として処理されるのが一般的だが、一部では材料としての利用も報告されており（Wijesekara et al. 2021）、チャーについて「廃棄物からの脱却（End of Waste）」認定の取得を目指すリサイクル業者も存在する。その後、熱分解油は通常、大規模な石油化学プラントへ送られ、石油由来の原料流と混合されて分留工程に回される。続いて品質向上処理やスチームクラッキングが行われるか、或いは（事前の品質向上処理等により）十分な品質があれば直接水蒸気分解工程へ送られる。水蒸気分解によって得られる基礎化学品は、新たなポリマーの製造に使用可能である。しかしながら、このプロセスは、エネルギーや燃料製造用化学品への部分的な変換、及びプロセスチェーン全体を通じた損失（排出など）を伴うという特徴がある。こうした要因が、最終的に得られる材料の全体的な収率に影響を及ぼす。

Kusenberg ら（2025）は、熱分解を用いてポリマー製造用の基礎化学品を含む高付加価値化学品を生産するプロセスにおいて、各段階での変換率を分析した。彼らの分析によれば、廃

プラスチックから熱分解油への変換率は約 85%~92%であった。その後の分留工程では、ナフサへの変換率が 24%~39%、軽質・中質軽油留分への変換率が 41%~52%となった。ナフサ留分は一般的にその全量が水蒸気分解に回される傾向があるのに対し、軽質・中質軽油留分については、水蒸気分解に適しているのはその約 70%~85%に留まる可能性がある。ナフサ留分及び軽質・中質軽油留分のアップグレーディング工程における変換率は 90%~95%であった。最後に、スチームクラッキング装置におけるエチレン、プロピレン、ブタジエン、BTX（ベンゼン・トルエン・キシレン）の生産に係る変換率は 66%~71%と推定された[56]。燃料としての利用分を除外したマスバランス方式を前提とすると、これは廃プラスチック全体の約 27%~52%が、ポリマー製造に割り当て可能な新しい化学的構成単位に変換されることを意味する[57]。著者らによれば、重質熱分解油留分の処理に流動接触分解装置や水素化分解装置を追加導入することで、廃プラスチックから高付加価値化学品への全体的な収率を、それぞれ 31~63%及び 35~77%にまで高めることが可能である。

表 5 に示す 11 の異なる産業プラントのデータに基づき、CE Delft (2022) は、様々な熱分解プロセスにおける「プラスチックからプラスチックへ」の収率が 43~60%の範囲にあると報告した。一方で、これより高い収率を主張する他の資料も存在する。セクション 5.2.3.6 で詳述するように、こうした高い材料収率については、プロセスのエネルギー投入量が増加すればコストや二酸化炭素排出量も増大するというトレードオフの関係を考慮に入れる必要がある。

ガス化プロセスでは、高温処理によってポリマーが分解され、生成されたガス留分を新たな化学品の合成に利用できる。しかし、熱分解の場合と同様に、投入された原料の相当部分がエネルギーや燃料製造用化学品へと変換されたり、損失（排出など）として失われる。Voss ら (2022) は、軽量プラスチック包装から選別された残渣をガス化する場合、高付加価値化学品（ブタジエン、ブテン、エチレン、プロピレン）の収率が 25.6%になると算出した。表 5 にある通り、CE Delft (2022) は、主にポリオレフィンで構成される混合廃プラスチックの産業的ガス化における「プラスチックからプラスチックへ」の収率を 34%と報告しているが、Lange ら (2024) は、この収率が 54%に達する可能性にも言及している。

2.3.5. 経済的実現可能性分析の対象範囲

本報告書では、現在、プラスチック廃棄物のケミカルリサイクルにおいて最大のシェアを占める 2 つの主要なプロセスタイプに焦点を当てる。即ち、主に炭化水素系廃棄物（ポリオレフィンやスチレン系樹脂）を対象とする熱化学的液化（熱分解及びスチームクラッキング）と、PET／ポリエステルを対象とするソルボリシス（加水分解、グリコリシスなど）である。なお、ガス化など、将来的に重要となる可能性があり、現在調査が進められている他のプロセスも存在するが、経済データや稼働施設からの実績データが不足しているため、本報告書

の枠組みにおいてそれらの経済的実現可能性を検討することは困難である。従って、本報告書の内容は、例えばガス化（Lange et al. (2024) など）で肯定的に評価されている）の潜在性を評価したものと見なすべきではなく、現段階における代表的な技術経済データの不足を反映したものと理解されるべきである。

3. 方法論的アプローチ

3.1. 経済的実現可能性

経済的実現可能性やその測定方法について、標準的な定義は存在しない。特定のビジネスモデルや技術的生産プロセスにおいて、それは、最低限の収益性、或いは少なくとも損益分岐点以上の水準を維持し、市場に存続できる能力という概念を指す。これは、コストを賄い事業を継続するために十分な収益を生み出す能力を必要条件として含意している。収益はリサイクルプラスチックやその他の産出物の販売から得られる一方、コストは資本支出及び運営費（後者にはプラスチック原料、人件費、エネルギー、原材料、その他の項目が含まれる）として発生する。より包括的な視点に立てば、経済的実現可能性とは、ある経済活動が、プラスであると同時に当該セクターで一般的に達成される水準に見合った内部収益率（IRR）を生み出せるかどうか、という点に関連付けられるかもしれない。

本報告書では実用的アプローチを採用し、経済的実現可能性の主要な判断基準として、単位生産コストと予想販売価格を比較する。このアプローチは単純だが、頻繁に用いられる「最低販売価格（MSP）」の考え方に近く、また、IRRのようなより包括的な指標を体系的に推定することが困難な程データ状況が不十分であるという現実的な制約によるものでもある。

ケミカルリサイクルは特定の市場環境下で実施されるものであり、その経済的実現可能性をどのように捉えるべきかについて、いくつかの補足的な説明が必要である。実際、ケミカルリサイクルの経済的実現可能性という概念には、3つの異なる視点が存在すると私たちは考える（後述）。技術的に見れば、ケミカルリサイクルの払出物はバージンプラスチックの完全な代替品と見なすことができ、その逆もまた同様である。このことは、狭義の視点に立てば、ケミカルリサイクルされたプラスチックはバージンプラスチックと同じ価格であるべきことを意味する。従って、経済的採算性を確保するには、ケミカルリサイクルの単位生産コストがバージンプラスチックの市場価格を十分に下回る必要がある（ケミカルリサイクルの払出量はプラスチック市場全体に占める割合が小さいため、価格受容者となる）。これが第一の視点であり、「厳格な市場」の視点と呼ぶことができるだろう。

しかし、ケミカルリサイクルされたプラスチックには環境への配慮（「グリーン」であること）という特性があり、一部のプラスチック生産者や消費者は、そのために「グリーンプレミアム」と呼ばれる上乗せ価格を支払う用意がある。リサイクルプラスチックは、経済学者

が「信頼財」と呼ぶものに該当する。特にケミカルリサイクルの場合（メカニカルリサイクル品は追跡可能な場合もあるが）、その特性は購入者がプラスチックを見たり使用したりするだけでは検証できないためである。即ち、環境に配慮しているというクレームは、文書による証拠に基づいて信じるしかない。このことは、当該分野において明確なルールや第三者認証が重要である理由（例：代替原料の使用に関する一般的な民間認証制度である ISCC PLUS[58]や、同様に利用されている規格である RSB[59]など）や、環境配慮を偽る不正なクレームが行われやすい理由を説明している。

同一製品の「グリーン」なグレードと「非グリーン」なグレードが共存するこうした市場環境において、ケミカルリサイクル製品への需要は、プラスチック全体の需給と、「グリーン」という特性に対する追加的な支払意欲（WTP）の組合せによって決定される。つい最近まで、リサイクルプラスチック（メカニカルリサイクル品を含む）への需要は、主に消費財メーカーによるサステナビリティ（持続可能性）への公約と結びついていた。しかし、これらはあくまで自主的取組みであり、景気後退や、消費者からの関心や信頼の低下などによって、突然変更されたり、或いは消滅したりする可能性がある。経済的実現可能性に関する 2 つ目の視点として、これを「ソフトマーケット」の視点と呼ぶことができる。

最後の視点は「規制主導型市場」というものであり、実際、現在 EU ではこの視点が中心的な役割を果たしつつある。この枠組みの下では、いくつかの重要な分野において、規制によりリサイクルプラスチックの使用が義務付けられている。具体的には、PPWR や SUPD（次節参照）などを通じて行われ、将来的には他の分野にも拡大する可能性がある（現時点では、繊維製品中のプラスチックが注目すべき例外となっている）。その結果、メカニカルリサイクル及びケミカルリサイクルの双方によるリサイクルプラスチックの需要は、数倍に拡大すると見込まれている。

更に、EU 規制で義務付けられているリサイクル材含有率目標の性質上、法規制を遵守するため EU 市場へ供給しなければならないリサイクルプラスチックの総量（上市されるプラスチック総量に対する一定の割合）が原則として決まることになる。そのため、リサイクルプラスチックの需要は価格変動に対して非弾力的（価格変化の影響を受けにくい）ものとなる。しかし、地元で供給されるリサイクルプラスチックの価格が許容可能な「グリーンプレミアム」の水準を大幅に上回る場合（或いは供給量が不足する場合）、川下ユーザー（包装材メーカーなど）は、短期・中長期の各段階に応じた様々な緩和策を講じることが考えられる。例えば、セクション 7 で詳述するように、他の素材（非プラスチック製の包装材料など）への切替え、輸入への依存、或いは（製品保護機能や必須ではない機能の妥協を伴う）低品質グレードへの変更といった選択肢がある。極端なケースとして、リサイクルプラスチックの価格が予期せず高騰し、これらの緩和策がいずれも実施できない場合、規制そのもの

が実効性を失う（例えば、不遵守に対する罰金が遵守コストを下回るなど）可能性があり、規制の見直しが必要になるかもしれない。

しかし、短期的には、リサイクル材の使用が義務付けられることで、経済的妥当性のあり方が根本的に変化する。なぜなら、規制遵守が求められる市場においては、リサイクルプラスチックはもはやバージンプラスチックと競合する関係ではなく、グリーンプレミアムの額は、主にリサイクル業者が必要量を供給するため必要とする価格の「上乗せ分」によって決定されるからである。従って、「規制市場」で許容されるグリーンプレミアムは、自主的取組みによる「ソフトな」市場の場合よりも、大幅に高くなると予想される。

規制遵守のためにリサイクルプラスチックの使用が義務付けられることは、市場競争の構図が変化することを意味する。即ち、バージン材メーカーとリサイクル材メーカーとの間の競争から、主にリサイクル業界内での競争へと移行する。具体的には、特定の品質（食品グレードなど）のリサイクルプラスチックをいかに低いコストで生産できるかという点が重要となり、バージン材メーカーのコストと（絶対値として）比較してどうかという点は、それ程重要ではなくなる。もちろん、他の競争圧力（製品や素材の代替、輸入など）は依然として存在し、メカニカルリサイクル業者とケミカルリサイクル業者の間の競争も続く（両者のビジネスモデルはある程度補完的な関係にあるが）。

重要な点として、リサイクル業者が求める価格の「上乗せ分」は、何をもって「リサイクルプラスチック」と見なすかを定める規制上の技術的ルールに左右される可能性がある。特に重要なのが「マスバランス割当て」のルールである（本報告書では詳細に論じないが、§ 3.4を参照）。このルールは、併産プロセス（主に熱分解）においてリサイクル材の含有量をどの程度認めるかという厳格さを規定するものであり、それを通じて、リサイクル材 1 トンあたりに求められる価格の上乗せ幅に大きな影響を及ぼす。

要約すると、経済的実現可能性については、以下の3つの見方が考えられる。即ち、バージン製品に対して実現可能かつ競争力がある（純粋な価格競争）、自主的な市場における妥当な「環境価値への上乗せ価格」を前提として実現可能かつ競争力がある（「環境への配慮」とコストの組合せによる競争）、そして、規制によってリサイクルプラスチックの最低需要量が義務付けられる規制環境下で実現可能かつ競争力がある（自主的な市場よりも高い環境価値への上乗せ価格の水準を伴う）、という3点である。

本研究の目的は、ケミカルリサイクルの経済的実現可能性を評価することにある。前述の通り、「規制主導型市場」の環境下では、経済的実現可能性の概念は根本的に変化し、規制を定める法に盛り込まれたいくつかのパラメータに依存することになる。EUにおけるケミカ

ルリサイクルプラスチック市場の大部分は実際このタイプのものになると予想されるが、それ以外の市場規模については、依然として自主的な環境価値への上乗せ価格（特にリサイクル繊維や衣料品など）に依存することになる。従って、本研究では、生産コスト及び想定される最低販売価格が、妥当な環境価値への上乗せ価格と両立し得る範囲に収まっているかどうかという観点から、経済的実現可能性を論じる。

3.2. 経済的実現可能性を高めるための政策支援の例

望ましい行動を促す方向に既存の市場動向を「是正」するため、一つ又は複数の政策手段を導入できる。政策設計には価格ベースのものと数量ベースのものがあり、それらが組合せることで複合的な市場シグナルが形成される。ここでは、一部の管轄区域（地域、国、又は EU レベルの規則の結果として）で既に確認されている、いくつかの特徴的なアプローチを取り上げる：

- 受入料金（廃棄物処理段階での）：これは、廃プラスチックの処理ルートとして（ケミカル）リサイクル以外の選択肢（典型的には焼却や埋立て）をとる場合に生じうる制約に関連するものである。他の条件が同じであれば、廃棄物排出者がプラスチック廃棄物を埋立てや焼却に回す際に「マイナスの価格」（即ち、処分費用の支払い）を負担しなければならない場合、プラスチックリサイクル業者には競争上の優位性が生まれる。リサイクル業者は、排出者から廃棄物を引き取る際に料金を徴収できる市場で事業を行えるからである。廃棄物処理に伴うこの「受入料金」は、ケミカルリサイクル工程における原料（投入材）の調達コストを実質的にマイナスにし、リサイクルに有利な経済的条件を作り出す可能性がある。実際には、こうした状況は、廃棄物の高い発熱量（廃プラスチックは通常 25 MJ/kg 超であり、一般廃棄物の約 10 MJ/kg より高い）を活かした焼却利用を妨げる強力な障壁が存在する場合にのみ成立し得る。例えば、Tomić ら（2024）の研究によれば、受入れ料金なしでは、小規模な産業用プラスチック廃棄物の熱化学的転換は経済的に採算が取れないことが示されている。

- 環境価値への上乗せ価格（プラスチック転換段階での）：前述の通り、これは自主的な持続可能性目標や法的義務（リサイクル材の配合など）を遵守するため、下流工程の事業者がリサイクルプラスチックに対して支払う意思（WTP）を指す。例え、法的義務がある状況であっても、このプレミアムには上限が生じる可能性がある。その上限は、不遵守に対する罰金や、代替素材（紙製包装など）への切り替え（「規制の回避」）にかかるコストによって決まる。それにも係らず、プラスチック製造業者やその顧客（消費財メーカーなど）にとって、環境価値への上乗せ価格を支払うことが最も現実的な戦略となり得る市場環境も存在する。環境価値への上乗せ価格は、リサイクル材の配合義務化といった間接的な義務から直接生じる結果である場合もある。

- 貿易政策手段：これには通常、輸入関税や輸出補助金に加え、現地調達（ローカル・コン

テンツ）要件などの非関税措置が含まれる。なお、これらは世界貿易機関（WTO）の下で負っている義務に抵触する可能性があることに留意が必要である。

- リサイクル材への補助金：例えば、EPR 制度における「環境配慮型調整」を通じ、使用済み製品由来のリサイクル材を組込んだ重量に応じてインセンティブを付与する手法などがある[60]。

- リサイクル活動への補助金：バージン材との競争条件を公平にするため、リサイクル活動そのものに対する直接的な補助金（リサイクル施設の処理能力や、実際の処理量などの指標に基づくもの）など、他の手段も考案可能である。

実際には、バリューチェーンの異なる段階で市場価格メカニズムに介入するこれらの手段が併存し、ケミカルリサイクルによるプラスチックの経済的実現可能性を高める方向に寄与する可能性がある。

3.3. 複数の産出プロセスにおけるコスト配分

第2章で述べたように、ケミカルリサイクル手法の中には、（石油）化学産業において従来から行われているプロセス、特に熱分解やガス化といった熱化学的プロセスを応用・転用したものがあある。こうした生産プロセスからは、通常、高付加価値化学品（ポリマーやポリマー前駆体を含む）、燃料（気体又は液体）、或いは固形残渣（チャー、ワックスなど）といった複数の産出物が得られる。

これらの併産品や副産物は全てプロセスの全体的な経済性評価に含まれるが、単一のプロセスから同時に複数の産出物が生成されるため、各産出物に特定のコストを明確かつ一意に割り当てることは本質的に不可能である。従って、産出物ごとのコストを算出する必要がある場合には、コスト配分に関する産出ルールを選択しなければならない。そのルールの選択肢としては、最終製品の重量や容積（或いは発熱量などの物理的特性）に基づく配分、特定の産出物のみに価値を割り当てて他を副産物や併産品と見なす手法、或いは各製品から得られると予想される市場価値や売上高に基づく配分などが挙げられる。

会計や実務の分野では、古くから（例えば食肉加工業や精製業において）こうした構造的な課題に対処してきた。特定の会計上の制約により別の方針が求められない限り、最も一般的な慣行は「相対販売価値法」、別名「正味実現可能価額法」に従うことである。この場合、一部の製品に負の値（例：廃棄コストを伴う有害な副産物）が割り当てられる可能性があることに留意されたい。これは、物理的配分法では不可能なことである。

業界の慣行を反映し、特に指定がない限り、相対販売額法を最も適切な配分方法と見なし、これを採用する。ここで重要なのは、これが「相対的」手法であるという点である。即ち、製品間のコスト配分には相対的な市場価格が比例的に用いられるが、この手法は、算出されたコストと同等以上の価格で製品が市場に受け入れられるかどうかという市場の受容性を反映するものではない（即ち、この方法で導き出された最低販売価格が、市場の均衡価格を上回る可能性がある）。

この議論は、マスバランス方式が提起する問題と関連はしているが、同一ではない。マスバランス方式も特定の産出物に関する帰属指標を扱うが、その視点は、相対的な量に応じて各画分に帰属する物理的特性（例：リサイクル材含有率）にある。

コスト配分は、法的義務の有無に係らず市場の文脈で行われる。事業者は投入物と産出物から生じる価値を最大化し、それに応じて収益を最適化しようとするからである。対照的に、マスバランス配分は、コンプライアンス（法令遵守）を目的として価値を公正に決定するために、投入物や産出物の一部の特性に対する外部からの制約に対応するものである。以下では、マスバランスに関連する主要な論点について検討する。

3.4. マスバランス方式による割当てと経済的実現可能性

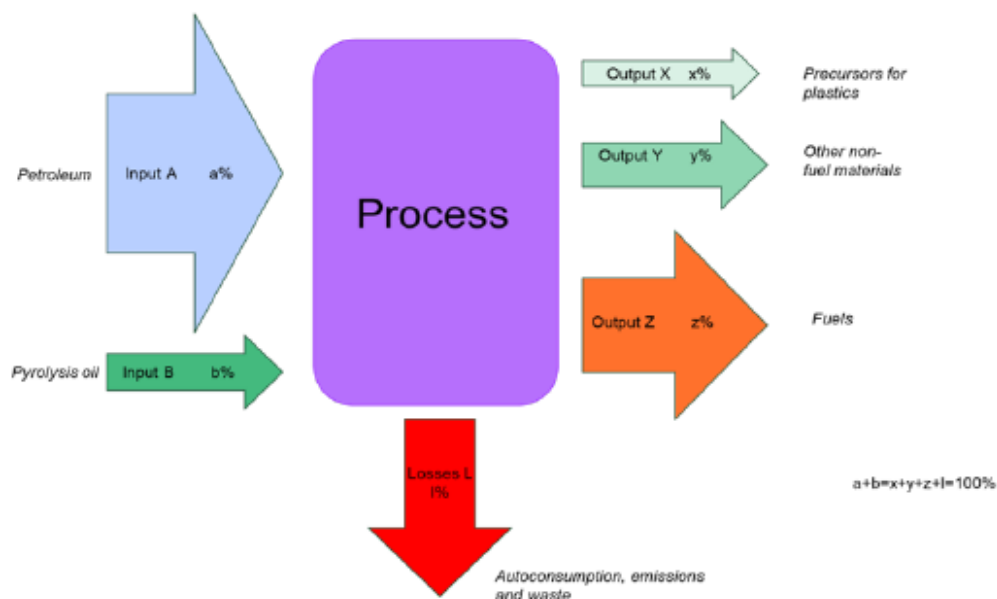
3.4.1. マスバランス方式による割当ての概要

マスバランス方式による割当てとは、製品に含まれる特定の「測定不可能な」特性（ここでは、バージン材と物理的に区別できないと仮定した場合のリサイクル材の量）を算定処理（算定・帰属）する手法を指す。これは一般的に、複数の投入物と複数の産出物を伴うプロセスにおいて生じるものである。前述の通り、典型的な例としては、石油化学プラントにおいてプラスチック廃棄物由来の熱分解油を石油と混合し、様々な製品を製造するケースが挙げられる。この手法では、製造業者の主張の正確性や信頼性を担保することを目的として、生産プロセスにおける物質の流れを追跡又はシミュレーションし、最終的な産出物に対して特定の特性（この場合はリサイクル材の含有量）を特定又は割当てる。また、産出物に付与された特定の特性には市場価値がある（即ち、その特性に対してプレミアムを支払う意思のある顧客が存在する）ことも前提とされている。特にリサイクル材の含有量に大きな上乗せ額が付加される場合、ケミカルリサイクルなどの複雑なリサイクルプロセスにおいて、これは経済的実現可能性を左右する重要な要素となり得る。

3.4.2. マスバランス：計算の原則

プラスチックのケミカルリサイクルにおけるマスバランス方式による割当ての概念を簡潔に説明するため、図 4 に示すような、複数の投入物と複数の産出物を伴うプロセスを考える。このプロセスには投入フローA 及び B が入り、産出フローX、Y、Z 及び L が出ていく。

Figure 4. Mass balance principle (elements in italic are examples)



Source: own elaboration

マスバランス計算は通常、次のような問いに答えることを目的としている。「2 つの投入流 A と B を組み合わせた場合、産出物 X (又は Y、Z、L) のうち、どれだけの量が B に由来すると見なされるか」。例えば、投入物 A が 1,000 トンあり、X が 100 トン (10%)、Y が 200 トン (20%)、Z が 400 トン (40%) 生産され、損失 L が 300 トン (30%) 生じると仮定する。この場合、新たに追加で投入物 B を 200 トン投入したとき、その B の由来分を、その結果生じる各産出物 X、Y、Z、L に対してどのように割り当てるべきか、という点が問題となる。前述の通り、この問いに対する唯一かつ明白な答えは存在しない。そのため、妥当性があり、かつ内部整合性が取れているものの、ある程度恣意的要素を含む配分方法を決定する必要がある。

具体的にケミカルリサイクルの議論に当てはめると、「A」は化石由来の投入物 (石油など)、「B」はプラスチック廃棄物から得られる熱分解油などの回収物となる。また、「X」は高付加価値な材料 (プラスチック又はその前駆体)、「Y」は低付加価値な材料を指し、X と Y のいずれについても、B に由来する部分は理論上リサイクルとして算入される。「Z」は燃料であり、損失「L」の場合と同様、これらには「リサイクル材」が含まれているとは見なされず、あくまで「回収材」が含まれているとしか主張できない[62]。ここでは、投入物 A と B の材料特性は同一であり、プロセス内では同様の変換経路をたどるものと仮定する。例として、いくつかの考え方 (論理の展開) が挙げられる：

- 比例配分 (物理的に最も直感的な方法) : B に由来する回収成分の割合が、全ての産出画

分において同一となるように配分する。即ち、X、Y、Z、L の全てが $b\%$ の回収成分を含むことになる。今回の例では、1,000 トンの投入物 A に 200 トンの B を加えると、回収成分率 16.7% ($200/1200$) の高付加価値材料 X が 120 トン、同じく 16.7% の低付加価値材料 Y が 240 トン、燃料 Z が 480 トン、そして損失 L が 360 トン生成される。材料 X と Y の場合に限り、この回収成分を「リサイクル成分」と見なすことができる。X のあらゆる部分が等しく $b\%$ のリサイクル成分を含むとする最も厳格な「移転平均」的アプローチに加え、それよりはやや緩やかで、同一の石油化学プラント内で生成された産出画分間での限定的なクレジット移転を認めるアプローチも存在する。後者の場合、リサイクル・クレジットを「分子から分子へ」移転させることが可能である。この移転の結果、X の総生産量の $b\%$ についてはリサイクル成分 100% であると主張できる一方、残りの部分についてはリサイクル成分を含まないと見なされることになる。今回の例に当てはめると、産出物 X のうち 20 トンはリサイクル成分 100% と主張できるものの、残りの 100 トンについてはリサイクル成分 0% となる。但し、(後述する) 燃料用途を除外する方法とは異なり、異なる産出画分間でのクレジット移転は認められない。即ち、今回の例では、産出物 X と産出物 Y の間でクレジットを移転することはできない。

- 自由配分 (クレジット移転を伴う場合) : この手法では、投入物 B の一部を損失分へ比例配分することが義務付けられるが、残りの B については自由に配分することが可能である。但し、各産出画分の生産量を超える配分を行うことはできない。損失への義務的な割当て分を除いた B の全量は、生産された X の量を上限として、X に割当てられたものと見なすことができる (即ち、 $b \times (1-l) > x$ の場合、X は 100% リサイクル品と見なされ、 $b \times (1-l) < x$ の場合、X のうち $b \times (1-l) / x$ の割合が 100% リサイクル品であると宣言できる)。この例では、1,000 トンの投入物 A に 200 トンの B を加えると、投入物 B の 30% (即ち 60 トン) が損失へ義務的に割当てられるため、完全に自由に割当て可能な B は 140 トンとなる。生産される X は 120 トンのみであるため、投入物 B のうち 120 トンを産出物 X に割り当てることができ、その結果、X は 100% のリサイクル含有率となる。一方、残りの投入物 B (20 トン) は産出物 Y に割当てることができ、その場合、Y のリサイクル含有率は 8.3% ($20/240$) となる。後者のケースでは、Y のうち 20 トンを 100% リサイクル含有、220 トンをリサイクル含有率ゼロと宣言することも可能である。この場合、画分 Z (燃料) には回収材が含まれないことになる。

- 燃料用途の除外 (クレジット移転を伴う場合) : この手法では、投入物 B を損失及び燃料へ比例的に割り当てることが義務付けられる一方、残りの量は材料としての産出物へ自由に割り当てることができる (但し、各産出画分の生産量を超える割当てはできない)。損失及び燃料への義務的な割当て分を除いた B の全量は、生産された X の量を上限として、X に割当てられたものと見なすことができる (即ち、 $b \times (1-l-z) > x$ の場合、X は 100% リ

サイクル品と見なされ、 $b \times (1-l-z) < x$ の場合、X のうち $b \times (1-l-z) / x$ の割合が 100% リサイクル品であると宣言できる)。この例では、1,000 トンの投入物 A に 200 トンの B を添加する際、投入物 B の 30% (即ち、60 トン) は損失に、40% (即ち、80 トン) は燃料に割り当てることが義務付けられる。その結果、完全に自由に割り当て可能な量として 60 トン ($200 - 60 - 80$) が残る。生成される X は 120 トンであるため、投入物 B から残った 60 トンを生成物 X に割り当てることが可能である。これにより、X のうち 60 トンはリサイクル材含有率が 100% となり、残りの 60 トンはリサイクル材含有率が 0% となる。この場合、画分 Y や Z には、リサイクル材や回収材は一切含まれないことになる。

- より複雑なプロセス(例:燃料と材料の双方に利用され得る「デュアルユース(二重用途)」の産出物など)については、他の配分方法を採用することも可能である。[63]

3.4.3. ケミカルリサイクルプラスチックにおける意義

プラスチックのケミカルリサイクルの文脈において、これらの検討事項は、特に既存の石油化学インフラを活用し、大規模かつ(多くの場合)償却が進んだ処理施設の利点を享受しようとするプロセスにおいて重要となる (Systemiq 2022)。しかし、この場合、「b」(回収された投入物の割合)と「x」(高付加価値材料の割合)はいずれも小さくなる傾向がある。実際、今日の石油化学産業では、一般的に $b <$ 投入量の約 1%、 x (プラスチックの割合) $\approx$ 産出量の約 10% となっている (Plastics Europe 2024a, Plastics Europe 2023)。そのような状況下で、厳格なマスマンズルルールを適用すると、リサイクル材として主張できるプラスチックの割合は極めて低くなる。持続可能な(プラスチック廃棄物由来の)投入物にかかる追加コストを、ごく少量の産出物に配分しなければならない場合、リサイクル産出物の単位販売価格に上乗せすべき金額が大幅に増大する可能性がある。

一例として(配分の「経験則」を示すため)、1 トン当たり 100 ユーロ高い回収投入物をプロセスに投入したとする。しかし、マスマンズル計算ルールにより、各投入単位の質量のうち 10% しか産出段階でリサイクル材として認定されない場合、認定対象となるリサイクル産出物に移転される潜在的な追加コストは、 $100 \text{ ユーロ} \div 10\% = 1000 \text{ ユーロ/トン}$ という規模になる。これは、生産コストの上昇を反映させるために、化石燃料由来の製品と比較してリサイクル製品に必要とされる価格の上乗せの規模を示すものである。

従って、プラスチックリサイクル、特に熱分解やガス化の経済的実現可能性は、マスマンズル配分ルールと密接に関係している可能性がある。なお、上記で提示した議論は極めて単純化されたものであり、実際の導入時に重要となり得る製品、市場、プロセスのその他の制約や特性は考慮されていない。シングルユースプラスチック指令(EU)2019/904 に関しては、2026 年 6 月にマスマンズル計算ルールが公表された[64]。しかしながら、包装及び包装廃

棄物規則（EU）2025/40 については、そのようなルールは未だ策定されていない。

そのため、第5章におけるコストのモデリングと評価では、熱分解のような複数の投入物・産出物を伴うプロセスではなく、概ね独立したプロセスに焦点を当てることで、マスバランスルール[65]をめぐる現在進行中の議論の影響を可能な限り回避することを目指す。このアプローチの利点は、廃プラスチックから新規プラスチックへの転換における各段階の収率を確実に追跡できることにあり、それによって、全体的な物理的転換効率とコストの波及状況を現実的に示すことが可能になる。このようにすることで、石油化学プラントにおける熱分解油とバージン原料の混合使用に関し、計算結果を左右し得る、相反する2つの基本的な仮定を回避できる。第一の仮定は、現実の石油化学プラントの操業において、商業的又はその他の理由により、高付加価値材料の生産に回され得る高品質な原料が燃料生産に移転される可能性があり、その場合、厳格なマスバランスルールの下ではリサイクル産出量が大幅に減少するというものである。熱分解に反対する一部の立場からは、実際には常に移転効率が著しく低下するだろうと主張されるかもしれない。第二の仮定は、バージン原料を燃料により多く、高付加価値材料により少なく割り当てることで、熱分解油を高付加価値産出物により多く、燃料により少なく割り当てるということが可能になるというものである。熱分解を支持する一部の立場からはそうした解釈が主張される可能性があり、自由な割当てを認めるマスバランスアプローチの下では、リサイクル品として計上できる産出量が大幅に増加することになる。従って、我々のアプローチは可能な限り中立的なシナリオを表していると言える。本報告書の目的は、石油化学プラントにおける操業上の判断に起因する更なるコスト増加の可能性や、異なるマスバランス割当てルールがもたらすそれぞれの影響について議論することではない。

3.5. 設備投資と運転費

第5章では、ケミカルリサイクルの主要な2つの手法である熱分解と溶媒分解について、そのコスト構造とコスト要因を詳細に検討する。その際、これらのプロセス産業に特有の手法、特に生産に関連するコスト区分に基づいたアプローチを採用する。産業界、とりわけプロセス産業において一般的に用いられる区分のひとつに、設備投資（Capex）と運転費（Opex）の区別がある。

Capex（設備投資）と Opex（運転費）

設備投資（Capex：Capital Expenditure）と運転費（Opex：Operational Expenditure）は経済分析における概念であり、化学、石油・ガス、医薬品などの分野を含むプロセス産業において特に重要である。「Capex」とは、土地、機械、プラント、インフラ、技術といった長期的な有形資産の取得、改良、又は維持に充てられる資金を指す。こうした投資は通常、単発的或いは半恒久的なものであり、生産能力の確立や拡大に不可欠である。

対照的に、「Opex」は人件費、光熱費、保守費、原材料費、管理費など、事業運営に伴う経常的なコストを指す。これらは、事業を継続するために必要な、より短期的かつ日常的な費用である。Capex と Opex の区別は財務計画において極めて重要である。Capex は多額の初期投資を必要とし、その費用は時間の経過とともに償却されるのに対し、Opex は継続的にキャッシュフローや収益性に直接的な影響を及ぼすからである。

大規模かつ資本集約的なプロジェクトが一般的であるプロセス産業において、Capex と Opex はそれぞれ異なる役割を果たしつつも、相互に関連し合っている。Capex は、化学反応器、パイプライン、精製所といった施設の初期設計や建設において中心的役割を担う。これらの施設は、安全性、効率性、規制基準を満たすため多額の投資を必要とする。Capex は、事業の拡張性、エネルギー効率、環境規制への適合性を決定づけるため、長期的な競争力を左右する重要な要素となる。例えば、化学プラントにおける Capex には、高度な分離装置や排出ガス制御システムなどが含まれる場合があり、これらは操業パフォーマンスと規制対応コストの双方に影響を与える。一方、Opex は日々の操業コストの大部分を占める。特に連続生産プロセスを行う産業ではその傾向が顕著である。エネルギー消費、原料費、保守作業の人件費、廃棄物処理費などは、利益率に直接影響を及ぼす経常的な Opex の費目である。Capex と Opex の境界領域（例えば、特定の保守・修理作業や機器の更新など、両者に分類され得る費目）においては、多少の不整合が生じる可能性がある。しかし、それらは通常、一次近似の段階では無視できるほど軽微なものであり、本稿では検討の対象としない。

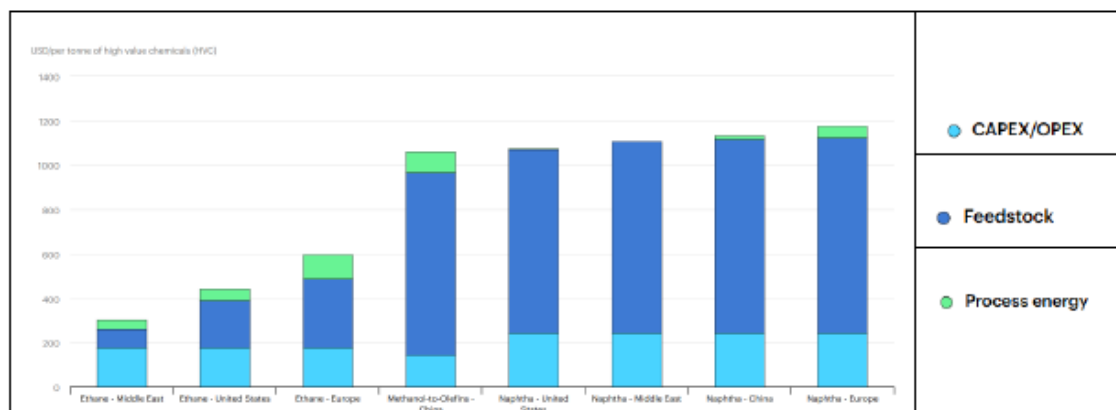
また、設備投資費は通常、数年に亘って「償却」される形で単位生産コストに算入される。即ち、(初期)投資額を、その資産の「耐用年数」と見なされる期間（プロセス産業における多くの産業設備であれば、例えば 15 年や 20 年）に亘り配分する。本稿の極めて単純なモデルでは、経時的な減価償却（資本コストの考慮）は行わず、単に初期投資額を耐用年数で配分（除算）する手法をとっている。コスト試算には、より高度な手法も数多く存在し、Voss ら（2023）などの文献で検討されている。

成熟した化学産業、とりわけ石油化学分野における現在の産業構造は、確立され最適化されたプロセスを有する、統合された超大規模施設を基盤としている。そこでは、標準化されたフローを大規模に処理することによって収益が創出される。

精製プラントやスチームクラッカーなどの処理設備では、初期設備投資費（CAPEX）が非常に高額（通常、数十億ユーロ規模）になる可能性がある。しかし、石油精製部門全体のスループット（日量 1 億バレル）を反映し、これらの施設が処理するスループットの規模（日量数十万バレル規模）を考慮すれば、こうした設備投資は早期に回収される。

国際エネルギー機関 (IEA) の図 5 (注: 原油価格が比較的高い 2017 年のデータだが、CAPEX と OPEX の比率は現在も妥当な指標) に示されているように、既存の石油化学施設における主要なコスト項目は OPEX (運転費) であり、その大部分は原料費 (原油、天然ガスなど) が占めている。

Figure 5. Simplified levelised cost of petrochemicals for selected feedstocks and regions, year 2017.



NB: 'Capex+Opex' category here interpreted to mean Opex other than feedstock and process energy + Capex.⁶⁶
Source: IEA (IEA Licence: CC BY 4.0), using feedstock prices from ArgusMedia (2018), Key Prices, www2.argusmedia.com/en/methodology/key-prices.

4. データソース及びエビデンスの根拠

4.1. 公表された研究、報告書、その他の資料

分析を行うに当たり、学術論文、専門家による報告書、市場調査、報道記事、プレスリリース、業界関連資料など、100 件以上の文書を参照した。急速に技術が進化している分野であるため、最新のデータを確保する観点から、その殆ど (特にコスト関連情報) は過去 5 年以内に出されたものである。

文献から得られたデータは精査され、分析に統合された。なお、一部のデータポイント (特定のプロセス収率、物理的特性、市場データなど) は、報告書の該当箇所の本文には直接反映されていない場合がある。しかし、前提条件や (該当する場合) モデリングの根拠となる背景データや分析については、付録 A に詳細を示している。

4.2. ステークホルダーからの直接的な意見・情報提供

欧州委員会域内市場・産業・起業・中小企業総局 (DG GROW) の支援を受けて 2024 年秋に開始した非公式な協議の結果、合計 24 のステークホルダーから意見や情報の提供を受けた (貢献された方々は「謝辞」のセクションに記載している)。内訳は以下のとおり:

- 直接的な事業者 17 社、業界団体 5 団体、NGO 1 団体、政府機関 1 機関

- 熱分解（パイロリシス）に特化した 13 社
- ソルボリシス（溶媒分解）に注力する 6 社（メタノリシス 2 社、グリコリシス 2 社、加水分解 2 社）

なお、意見・情報を提供した組織のうち 5 社は、ケミカルリサイクル分野において EU イノベーション基金の支援を受けている組織である。機密として提供された情報は、本報告書において個別に開示・公表されることはない。提供されたデータは、必要に応じて、より広範な公開データや匿名化されたデータセットと統合・集計されており、個別の回答内容を特定することは不可能である。個別の事例に関するデータが特定されすぎる（当該分野の事業者が少なすぎる）場合、それらのデータはより広範なデータセットと統合された。例えば、データの機密性を保護するため、グリコリシス、加水分解、メタノリシスの各プロセスについて、ステークホルダーのデータを個別に分析・提示することは行っていない。

4.3. 追加の業界ヒアリング

上記の直接的な情報提供に加え、プロジェクトチームは、新たなプロセスの詳細調査や、ニッチな市場或いは新興製品市場に関するデータ収集を目的とした重点的な調査の一環として、業界代表者及び市場分析の専門家からも直接ヒアリングを行った。

5. 主要なケミカルリサイクルプロセスのコスト分析と経済的実現可能性

5.1. メカニカルリサイクルの経済的実現可能性：概要

メカニカルリサイクルは、プラスチックリサイクルにおける既存の主要技術である。プラスチックのメカニカルリサイクルを支える経済性については、既に多くの研究（Van Camp et al. 2024、Garcia-Gutierrez et al. 2023 など）で取り上げられているため、ここでは詳細な分析を行わないが、プラスチックリサイクル全般の文脈において重要となるいくつかの要点を以下に示す：

- メカニカルリサイクル技術は、低温プロセス（選別、洗浄、破碎、押出など）に基づいており、その設備投資費は一般的な軽工業施設と同等の水準で確立されている。世界中で約 2,500 のプラスチック・メカニカルリサイクル工場が稼働している（ICIS 2024）。EU27+3 地域では、合計 850 社が事業を展開しており、その投入処理能力の合計は 1,320 万トン（13.2 Mt）に上る（Plastics Recyclers Europe, 2023）。
- 主なコスト要因としては、原料価格（特に価格変動の激しい選別済み廃プラスチック）、調達や物流上の制約、バージンポリマーとの競合、世界的な競争（リサイクル材の交易）、そして程度は低いものの規制や燃料用途との競合などが挙げられる。

- 近年、メカニカルリサイクル用原料の価格はバージンプラスチック価格の周辺で変動している[67]。リサイクル業者のコストは比較的安定しており、バージンプラスチック価格を左右する原油価格への依存度が低いため、この価格変動が当該セクターの収益性を大きく左右する要因となっている。

- 高品質なリサイクルポリマーは通常、プレミアム価格で取引されるが (ICIS 2024)、バージン原料との競争が激しく、リサイクル材に対する支払意欲も変動しやすい傾向にある。

- メカニカルリサイクルされたプラスチックの市場シェアは、樹脂の種類や地域によって異なるが、一般的にポリマー市場全体の 5～15%程度を占めている (アジアに比べ、欧州や北米で需要が高い)。欧州では、PET の 17%、PE の 12%、PP の 6%がリサイクル由来となっている (ICIS 2024、2023 年の数値)。

- 新たに登場した「高度メカニカルリサイクル」技術[68]は、メカニカルリサイクルが可能なプラスチックの範囲を拡大しつつ、より高品質な (食品接触用途などに対応可能な) 材料を供給できる可能性を秘めている。PS については実証プロジェクトが存在するが (Welle, 2023 や Ineos69 を参照)、ポリオレフィンについては依然課題が残っている。

5.2. 熱化学的液化 (熱分解及び関連プロセス) の経済的実現可能性

セクション 2.3.1 で述べたように、熱化学的液化とは、廃プラスチック原料を空気の非存在下で高温分解するプロセス (熱分解) であり、場合によっては触媒 (触媒熱分解) や、追加の試薬・熱媒体 (スチームクラッキングなど) の存在下で行われることもある。

5.2.1. プロセスの概要と範囲

5.2.1.1. 廃プラスチック処理における熱分解プロセスの背景

熱分解プロセスは石油化学産業に端を発している。同産業では炭化水素の処理技術が確立されており、規模の経済を活かすため大規模プラントでの操業体制が整えられている。廃棄物からのプラスチックリサイクルを主目的とする熱分解とは異なり、石油精製や水蒸気分解といった大規模プロセスは、通常、特定の原料を対象としている。これらのプロセスは、燃料、潤滑油、化学品原料 (固体、液体、気体など) といった多岐に亘る製品を製造することで (原油や中間体から) 最大の価値を引き出すことを目指しており、特定の製品の収率を高めるため処理工程を調整することもある。

石油精製由来のプロセスを (主に) より限定的な目的に合わせて最適化することは比較的新しい取組みであり、まだ完全な最適化には至っていない。ポリマー (モノマー) の収率向上

を目的として、ポリマーに特化した技術を開発している専門企業はごく僅かである。実際、米国 NREL の研究者 (Uekert et al. 2023) は、熱分解やガス化について、収率の低さや高いエネルギー消費を理由に、バージンポリマーと比較して経済的・環境的パフォーマンスが低い「オープンループ (開放型)」技術であると見なしている。彼らは、これらの技術の役割はプラスチック生産よりも、燃料やその他の化学品の製造にあると考えている (Fivga and Dimitriou 2018 も参照)。

なお、本分析における「熱分解」には、熱水液化のように、マテリアル回収率を高めるための特定の改良が組み込まれた、密接に関連するプロセスも含まれている。

5.2.1.2. 分析対象プロセスの境界と範囲

参照したほぼ全ての資料が指摘しているように、商業化が想定されている熱化学プロセスは、現時点では、最初から最後まで単独で完結する「プラスチックからプラスチックへ」の事業として設計されているわけではない。むしろ、既存のバリューチェーンに組み込み可能なプロセス中間体を供給することで、より広範な石油化学産業と統合することを目指すべきものである。これにより、通常は巨額の投資を要する既存インフラを有効活用し、製品の販路を確保することが可能になる。更に、後述する「将来的な最適化の方向性」で論じるように、(熱流の節約や併製品の再利用などによって) プロセスの効率をさらに高めるための統合も想定される。

- 産出物のフロー：ここでは、スチームクラッキング工程において、既存のナフサの代替品 (ドロップイン代替品) としてそのまま使用可能な仕様を満たす中間生成物を産出物として製造できるプロセスに焦点を当てる (以下、「ナフサ相当品」製造工程と呼ぶ)。熱分解の生成物とバージンナフサとの間には組成上の差異 (時に大きな差異) があることが複数の文献 (Li et al. 2022, Li et al. 2023, Kusenberget al. 2022b, UBA 2024) で指摘されているが、仕様上は、産業的に実現可能な割合[70]まで代替利用することが認められている。

- 投入物のフロー：文献 (表 4 参照) に記載されているプロセスの多くは、混合ポリオレフィン (MPO)、即ち、異なるグレードの PE : HDPE や LDPE などと PP の混合物を投入原料として受け入れるように設計されている。それ以外のプラスチックは、プロセスに対する不純物と見なされる。現在、様々な産業用グレードの開発・提案が進められている (例：市場分析会社 Platts が提示する「プロセス対応型混合廃プラスチックベール」の規格[71]。これらは通常、約 84~90% の MPO を含む)。

しかし、廃プラスチックは当初、せいぜい「混合廃プラスチック (MPW)」として回収されるのが一般的であるため、以下のプロセス分析で詳述するように、これを初期投入原料と見

なす。MPW 規格の一例として、ドイツのプラスチックリサイクルシステムにおける規格 (DKR-350) が挙げられる。

熱分解プロセスは、より広範な種類のプラスチックを受け入れられるように適応させたり (Stallkamp 2023, Stallkamp et al. 2023, Stallkamp et al. 2024 参照)、原料仕様に対する許容度を高めたり [72] することも可能だが、本稿ではこれについては検討しない。そうした対応は、各プロセスにおいて均質な投入原料を (より小規模な単位で) 確保することに依存するためである。

これに抛り、以下で構築するモデルでは、比較可能性を確保するため、MPW の投入を起点とし、ナフサ相当の中間生成物の払出しを終点とする熱化学プロセスを対象とする。詳細やバリエーション、及びリサイクル産物の最終的な用途 (水蒸気分解以降の工程など) については、各工程の項目で論じる。

5.2.2. 熱化学プロセス：段階的なプロセス・コスト・モデリングと分析

5.2.2.1. コストモデリングのアプローチ

今回分析対象とするプロセスは、化学工学的な手法や分析に基づくコスト分析に適している。しかし、簡潔さを期すため、プロセス全体及びその経済的実現可能性について有意義なコスト情報を導き出す上で重要な要素にのみ焦点を当てる。従って、コスト計算機能を備えた既存の商用化学工学ソフトウェアパッケージは使用せず、プロセスの本質的な側面を捉えた、高度に簡略化されたモデルを独自に構築する。

詳細情報 (正確な工程の細分化など) が不足している点は、収集されたデータの不確実性やばらつきの大きさとも整合している。これらの技術は、未だ大規模な商業運転の段階には至っておらず、長期に亘る正確かつ信頼性の高いデータが不足しているためである。

5.2.2.2. モデル及びプロセスの概要

本プロセスは、既存の文献 (Franke et al. 2024、CE Delft 2022、ステークホルダーからの意見など) で一般的に認められている手順に沿って区分する。特定の技術革新によって前後の工程が不要になる場合など、具体的な逸脱や代替ルートの可能性については、該当する各セクションで言及する。

本モデル (簡略化モデル) では、9 つの単位操作 (Unit Operations: U.O.) を特定し、それらを 4 つのブロックにグループ化してモデル化する。これら 9 つの工程の概要を「表 6」に示す。

Table 6. Overview of thermochemical liquefaction process steps and unit operations.

Block		Unit Operation	Comment	Step input	Step output
PREPROCESSING	1	Collection and transport	Logistical sourcing	MPW	MPW
	2	Sorting	Isolation steps of desired waste plastic fractions	MPW	Mixed POs
	3	Pretreatment	Including sorting and preparation for pyrolysis, e.g. shredding or extrusion	Mixed POs	Pyro-ready plastics
PYROLYSIS	4	Pyrolysis (/ thermochemical process)	Core thermochemical decomposition process including pyrolysis or variants thereof yielding comparable outputs	Pyro-ready plastics	Raw (non-upgraded) pyro oil
POSTPROCESSING	5	Purification	To remove unwanted (non-hydrocarbon) elements (typically through hydrotreatment)	Raw pyro oil	Upgraded pyro oil
	6	Fractionation	To isolate the hydrocarbon components most suited for further processing	Upgraded pyro oil	Naphtha equivalent (light hydrocarbon fraction)
PETROCHEM	7	Transport	Towards established petrochem facility	Naphtha equivalent	Naphtha equivalent
	8	Steam cracking	Conventional petrochemical process step	Naphtha equivalent	Chemicals (+ fuels, etc.)
	9	Final post-processing incl. polymerisation	Conventional plastic processing	Chemicals (precursors)	Plastics

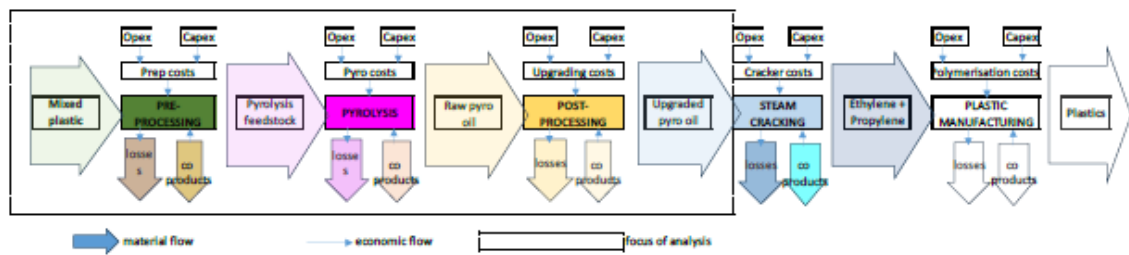
Note: MW=municipal waste, MPW=mixed plastic waste, MPO=mixed polyolefins.

Source: own elaboration

「付録 A」では、プラスチックリサイクルの観点から、歩留まりや生産コストなどの有意義なデータを導き出すため、各工程をより詳細に分析する。詳細やデータについては、当該付録を参照されたい。

以下の簡略化されたフロー図（図 6）は、工程を統合した形でのプロセス全体の概要を示している（個々の単位操作は表示しない）。図 8 では、主要なコスト及び物量データを加えて、この図を再提示している。

Figure 6. Overview of pyrolysis-based chemical recycling process.



N.B. the term "co-product" as used above is without prejudice to the "waste" status of the material but refers to streams that have potential market value, and are accounted for with a positive economic contribution in the model

Source: own elaboration.

以下に、各工程の主な特徴と課題をまとめる（詳細は「付録 A」に記載されている）：

- 回収：

- 廃プラスチックは発生源が分散しているため、その回収には困難が伴う。また、熱分解処理を行う前に、洗浄や規格化（品質の均一化）が必要となる。

- 廃棄物原料は様々なルートで調達可能であり、廃棄規制やエネルギー価格の状況によっては、コストゼロ、或いはマイナス（処理費を受け取れる状態）で入手できる場合もある。

- 輸送：

- 廃棄物の輸送コストは約 50 ユーロ/トンと推定される。特に短距離輸送の場合、荷役費や管理費が大きな割合を占める。

- 選別：

- 混合廃プラスチックは、不純物を除去し、熱分解に適したポリオレフィン（PE、PP）を分離するために選別が必要である。この際の歩留まりは 55～75%となる。

- 選別コストは 20～50 ユーロ/トンの範囲にある。選別で除外された残渣については、更なるリサイクルの可能性に応じて、プラスの価値を持つこともあれば、マイナスの価値（処理コストがかかる状態）となることもある。

- 前処理（その他の前処理）：

- 混合ポリオレフィンについては、反応器への投入に適した形状や状態にするため、洗浄や物理的な加工が必要となる場合がある。そのコストは、メカニカルリサイクルと同等である。
- 前処理コストは 1 トン当たり約 80～150 ユーロだが、廃棄物受入料によってコストがマイナスになる（収益が出る）ケースもあり得る。一方、生成物の価値は 1 トン当たり 350～

650 ユーロの範囲にある。

- 熱化学的プロセス（主に熱分解）：

- 熱分解は、酸素を遮断した状態で原料を加熱するプロセスである。収率やエネルギー効率を向上させるための手法として、触媒熱分解やスチームクラッキングなどのバリエーションがある。

- 熱分解設備の設備投資費（Capex）は、設備容量（ktpa：年間千トン）当たり 1,000 ユーロから 10,000 ユーロ超の範囲にあり[73]、現時点では明確な規模の経済性は確認されていない。また、原料費を除く運転額（Opex）は、1 トン当たり約 300 ユーロが中心となっている。

- 原料から粗熱分解油への実質的な収率は約 69%であり、粗熱分解油の生産コストは 1 トン当たり 600 ユーロから 2,000 ユーロ超の範囲にある。

- 後処理（精製及び分留）：

- 精製工程では、非炭化水素成分の除去やオレフィンからパラフィンへの転換が行われる。一方、分留工程では、スチームクラッキングに適した炭化水素が選別される。

- これらの工程における Capex は比較的低く、Opex は比較的高くなっている。その結果、高度化処理された熱分解油の価値は 1 トン当たり 800～2,900 ユーロの範囲にある。

- 石油化学プロセス：

- これらの工程では、ナフサ相当品を高付加価値化学品（HVC）や燃料へと加工する下流工程が行われる。熱分解由来ナフサへの適応に関するデータが不足しているため、コストへの影響に関する具体的分析は行われていない。

- バージンナフサと比較した熱分解由来ナフサのコスト上乗せ幅は 1 トン当たり 500～1,500 ユーロ、或いは相対的価格差として 1.5～3 倍の範囲にある。

5.2.2.3. シナリオモデリングと前提条件

付録で詳細に示されている本モデルは、ステークホルダーから直接得られた情報と、文献（学術資料、業界事業者、その他のグレー文献など）から得られた数値を組合せたものである。これにより、熱分解由来製品の最低販売価格を最終的に決定づけるコストについて、エビデンスに基づいた全体像を示す。

分析対象のプロセスに伴う不確実性、使用技術の多様性、そして変化し続ける市場状況を反映させるため、モデルの各段階に適用する 3 つのシナリオ（「現状」、「ベースライン」、「ベストケース」）を設定した。

- 「現状」の前提条件は、現時点で現実的であり、稼働中の施設（主にパイロット規模又は初期段階のフルスケール施設）で達成可能な数値を反映している。収率は、現在の最先端技術ですでに達成可能な性能に基づいている。

- 「ベースライン」の前提条件は、既存のプロセスや技術の短期的なスケールアップにおいて想定される数値を反映している。ここでは画期的なブレークスルーは想定せず、むしろ産業規模の操業に向け、現在の性能が予測可能な範囲で進化・改善していくことを前提としている。

- 「ベストケース」は、現在の知見に基づき、各段階で達成可能な性能の限界を追求したものである。ここでは、好ましい市場条件、高度に最適化されたプロセス、そして段階的な技術進歩を前提としている。「ベストケース」は実現可能性が極めて低いシナリオだが、達成可能なコストの理論的な下限値を示すものとして含めている。

各段階のモデル化に当たっては、関連する全ての変数について収集されたデータの範囲を反映した数値を採用し、3 つのシナリオそれぞれに沿った計算を行っている。

異なるプロセス段階の間には、特に純度や仕様に関して、トレードオフが存在し、それらのバランスを調整することが可能である（第 2 章の「原料品質」に関する議論を参照）。例えば、一部の熱分解プロセスでは、より高いレベルの不純物混入が許容される場合がある。しかし、その場合、後続のプロセスでそれに対応する措置（追加の不純物除去など）を講じる必要が生じる。これはコスト面にも影響を及ぼす。事業者はプロセスチェーンのどの段階で不純物除去を行うかを選択でき、それによって発生するコストも異なる（通常は最適解が模索される）。いずれにせよ、これらのコストは最終的にどこかの段階で負担されなければならない、そうでなければプロセスとして成立しない。

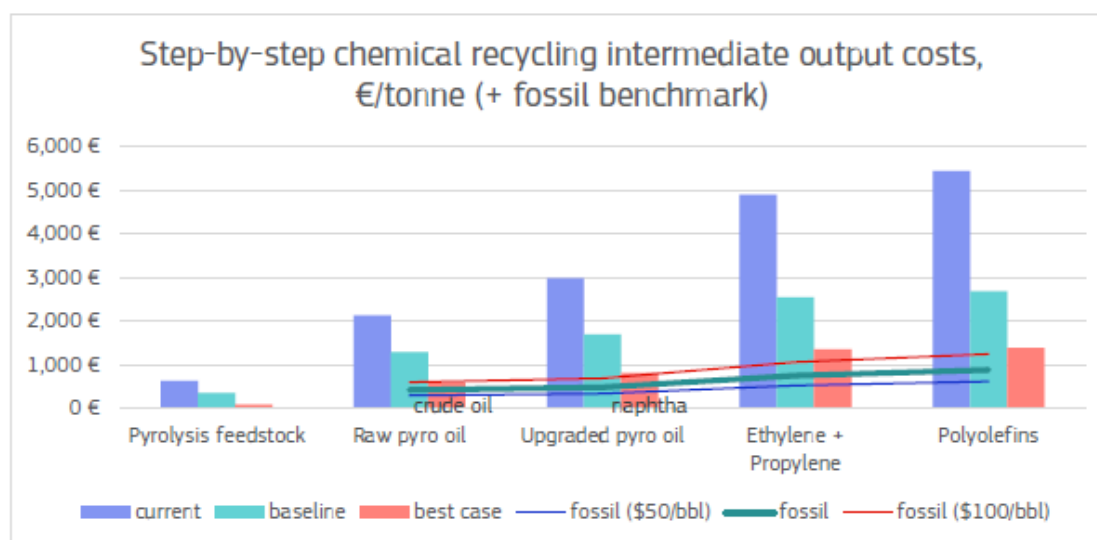
5.2.3. コストモデル：結果と結論

5.2.3.1. プロセス効率（収率）及び中間製品コストの概要

上記の段階的な検討に加え、追加のデータ源や文献データを踏まえ、図 7 に示すような中間製品コストのプロセスチェーン（バージン由来の同等製品との比較を含む）を作成した。簡潔にするため、マスバランスのルールやその影響に関する議論は行わない点に留意されたい。本モデルは、物理的なフローやプロセス収率を可能な限り反映させるべく、単独操業

(化石燃料由来原料との混合を行わない、廃プラスチック原料のみを使用するケース[74])を前提としている (このアプローチに関する詳細はセクション 3.4.3 を参照)。

Figure 7. Unit costs per tonne of output throughout the pyrolysis process, €/t output (functional units vary).



Source: own elaboration based on own modelling.

図からわかるように、極めて楽観的な（ベストケース）仮定を置き、かつ原油価格が比較的高いシナリオ[75]であっても、熱分解由来の製品はバージン由来の製品と辛うじて競争力を持てるかどうかのレベルに留まっている。

原油価格の影響

本モデルは、主に原油価格の変動に起因する外部市場環境の変化がもたらす影響までは考慮していない（図 7 では原油価格の高低に対する影響度を示しているが、実際には、各ケースの数値自体も多少修正する必要があるだろう）。

ケミカルリサイクルの経済的実現可能性に対する原油価格の影響については、文献であまり詳細に論じられていないが、一部の資料（Closed Loop Partners 2021）では、原油価格の上昇がケミカルリサイクルの経済的実現可能性を高める方向へ作用すると指摘されている。これは主にメカニカルリサイクルの事例からの類推に基づいていると考えられる。実際、メカニカルリサイクルに関しては、原油価格が高いシナリオにおいてリサイクル原料がバージン原料に対して競争力を持ち得ることが過去のデータで示されているためである。

しかし、ケミカルリサイクル製品の競争環境には、（少なくとも）2 つの相反する要因が影響を及ぼしている。原油価格（ひいてはエネルギー価格）が低いシナリオでは、ケミカルリ

サイクルの原料コストは低く抑えられる可能性があるが、設備投資費（CAPEX）や運転費（OPEX）への影響は限定的であり、何よりも競合するバージン製品の価格も低くなるため、ケミカルリサイクルの採算性が損なわれる。一方、原油価格が高いシナリオでは、バージンナフサや関連製品の価格が高くなるため、ケミカルリサイクル製品の市場価格も高く維持される。しかし、プラスチック廃棄物という原料の市場価格も高くなる可能性が高いだろう。ケミカルリサイクル事業者が原油高の恩恵を明確に享受できるのは、（前述のとおり）廃棄処理の代替手段として原料を調達できる場合、即ち、理想的にはマイナス価格（ゲートフィーの受取り）で調達できる場合に限られる。

5.2.3.2. プロセス全体の歩留まりと原料要件の評価

表 7 に、プロセス歩留まりの連鎖を示す。各処理工程における相対的な歩留まりが示されており、例えば「処理済み混合オレフィン」を「熱分解油（未精製）」に加工する工程では、歩留まりは現在、ベースライン、ベストケースの各シナリオにおいて、それぞれ 65%、71%、85%となっている。「逆」の数値は、各シナリオにおいて最終的なリサイクルプラスチックを 1 トン生産するために必要な中間体の量を示している。例えば、ベースラインシナリオでは、プラスチックからプラスチックへの歩留まりは約 30%に過ぎず[76]、これはリサイクルプラスチックを 1 トン得るために約 3.7 トンの混合廃プラスチックが必要であることを意味する。

Table 7. Yields and quantities needed by process step, pyrolysis, different scenarios.

	Process step	PREPROCESSING	PYROLYSIS	POSTPROCESSING	STEAM CRACKING	PLASTIC PROD	TOTAL
input name		Mixed plastic waste	Process-ready mixed polyolefins	Raw pyrolysis oil	Naphtha equivalent	Ethylene + Propylene	Plastic
step yield	current	60%	65%	85%	66%	90%	19.7%
	baseline	65%	71%	90%	69%	95%	29.3%
	best-case	100%*	85%	95%	71%	98%	56.2%
reverse tonnes**	current	5.08	3.05	1.98	1.68	1.11	1.00
	baseline	3.67	2.39	1.70	1.53	1.05	1.00
	best-case	1.78	1.78	1.51	1.44	1.02	1.00

*assuming MPO as input

**tonnes of material needed at each step in the process to obtain 1 tonne of final plastic at the end of the process chain

Source: multiple sources, see Annex A for details

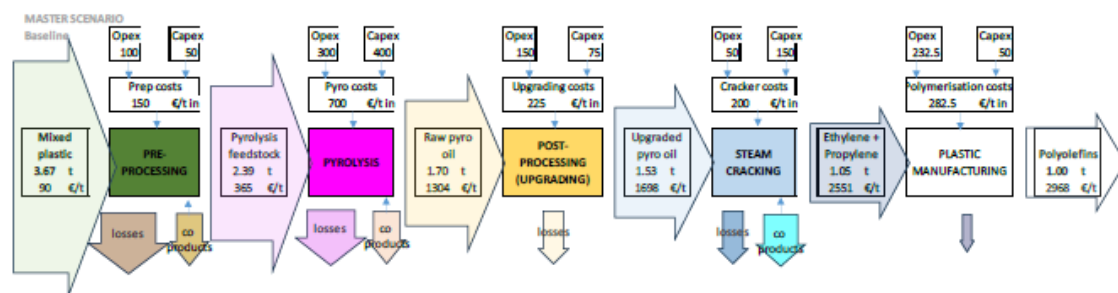
この分析から明らかになるのは、（極めて楽観的な）ベストケースのシナリオであっても、プラスチックとして回収されるのは全体の半分強（56.2%）に過ぎず、ベースラインケースでは僅か 29.3%であるという点である。

前述の通り、理論上の「ベストケース」シナリオは、プロセスの各段階における最良の結果を組み合わせたものであり、現実の環境下で実際に起こる可能性は事実上ない（即ち、全ての条件が一度に好転することはないからである。例えば、ある段階で高い歩留まりを想定すると、その後の工程でより多くの廃棄物（ロス）が発生することを示唆することになる）。

また、留意点として、一般的ケースでは廃棄物の一部が他の手段でリサイクルされる可能性もある。例えば、ポリオレフィン以外の廃棄物（PET など）が不適格として選別（前処理段階で除外）され、実際に回収されて別のリサイクル工程に回される場合などが挙げられる。その場合、当該画分に適用可能なリサイクルルートの有無やその品質次第で、全体的な材料回収率が向上する可能性がある。もう一つの留意点として、本検討では混合プラスチック廃棄物と前処理を最初のステップとして設定した。混合廃棄物の前処理は、あらゆるプラスチックリサイクル工程に影響を及ぼすものであり、熱分解法やその技術的な収率特性に固有の要素ではないとも言える。しかし、これは現実的な制約条件であり、エネルギー回収を伴う焼却処理などの代替案と比較する上で重要なポイントとなる。

最後に、以下の図8は、簡略化したプロセスの全体像と主要なフローにおける収率・コストを示したものである。この図は、プロセス全体を通じた基本原理と材料価格の推移を概観するものであり、標準シナリオ（ベースライン）及び（マスバランス調整を行わない）物理的な物質収支に基づいている。

Figure 8. General overview of the pyrolysis process: flows, yields and costs (baseline scenario).



Source: own elaboration based on own modelling; multiple data sources, see Annex A for details.

5.2.3.3. コスト要因、感度分析、及びコスト低減の可能性

A) 現在のコスト感応度の分析

プロセス分析から明らかになる主な感応度の要因は以下のとおり：

- 原料コスト：投入材の純度及び価格。初期の原料（フィードストック）については、コストがゼロ又はマイナスであることが望ましいものの、広範な処理が必要となる。
- 副産物の価値化：目的外の生成物（副産物）から得られる収益の市場変動。これらは化石燃料由来の同等品（典型的には燃料[77]）とも競合する。
- エネルギーコスト：プロセスへの外部エネルギー投入（原油価格の影響を受ける）における裁定取引や、エネルギー源の多様化によってコスト削減が可能である。

- プラント規模：多くの化学プロセスと同様に、ケミカルリサイクルにおいても規模の経済が働き、プラントを大型化することで単位コストを低減できる可能性がある。但し、既存の操業から得られたデータでは、この可能性の程度はまだ不明確である。

B) 将来的なコスト削減の方向性

中期的には、プロセスコストを構造的に削減するために、以下の手法が検討されている：

- 技術的改善：現在のプロセスは主流の石油化学プロセスをベースとしているが、プラスチック材料の収率向上を特に目指して最適化することが可能である（例：Cao et al., 2024 を参照）。確立された熱分解技術の改善として、以下のような検討が可能である：

- 触媒やプラズマを用いた反応速度論の改善 (Li et al. (2022), § 5.2.1 以降、Mandviwala et al. 2024 を参照)；

- 試薬を用いた反応速度論の改善（例：超臨界水を用いたスチームクラッキング。Li et al. 2022, § 6.1.2、Ozoemena and Coles 2023、Peplow 2025 を参照）；

- 複数の工程を統合することによる高温プロセスの最適化（例：スチームクラッキング (HTL) との統合や、Strien et al. (2024)で検討されているような熱分解段階での水素供給など）。

本調査の執筆時点では、廃プラスチックからプラスチックへの熱分解におけるプロセスの制約（効率面など）に特化した新規プロセスや技術革新の開発に、積極的又は公表して取組んでいる事業者はごく僅かで見受けられる（但し、公表されている事例は存在する。Peplow 2025、Mandviwala et al. 2024 を参照）。しかし、本調査に協力した複数のステークホルダーは、熱化学プロセスにおける効率性の課題解決や材料回収の最適化を目指した独自の取組み（社内プロジェクト等）に言及した：

- プロセスの併設（プロセス統合）の最適化：ケミカルリサイクルされたポリオレフィンへの需要増に対応するための熱分解設備の導入において、業界はトレードオフに直面している：

- 一方で、熱分解油（未精製又はアップグレード済み）の生産に特化した単独型の熱分解設備は、廃プラスチックの発生源（人口密集地や、安定した原料供給が確保できる既存の廃棄物選別施設など）の比較的近くに設置することが可能である。これにより原料調達の物流コストは抑えられるが、設備の規模は利用可能な原料供給量によって制限される。Deloitte (2022) や、より最近の Cao et al. (2024) による既存のプラスチック熱分解稼働施設の調査では、商業生産能力が年間約 3 万トン (30ktpa) を超える施設は見当たらなかった（それ以降、より大規模な施設が実際に建設・稼働しているかどうかは不明）。

o 他方で、より大規模な設備を既存の石油精製所や石油化学プラント（分解装置や水素化処理装置を含む）に併設することも可能である。これにより、大規模な設備（年間 10 万トン超など）の導入が可能になるだけでなく、既に確立され償却済みのインフラを活用したり、施設内の既存プロセスフローを最大限に利用できる。例えば、熱分解プロセスの熱源として廃熱を回収・利用することや、逆に、副産物（軽質ガス成分）を最も価値の高い用途（販売用の圧縮・貯蔵、或いはクラッカーなどのプロセスへの統合）を持つ後続の石油化学プロセスに供給することなどが挙げられる。

主要な熱分解関連企業が公表している現在の計画を見ると、近い将来に計画されている標準的な設備の規模は年間約 12 万トン（120ktpa）に向かっているように見受けられる。これらは大手石油化学企業の支援や直接的な所有の下で進められており、多くの場合、石油化学プラントへの併設を伴っている（例：OMV は、オーストリアのシュヴェーハートにおける「ReOil」プロセスの拡張で最大年間 20 万トンの処理能力を確保すると発表した。これには、ドイツの選別施設との合併事業に基づく、年間最大 26 万トンの混合プラスチック廃棄物（MPW）の調達契約も含まれている[78]）。コスト削減のもう一つの手段として、原料供給網の最適化が考えられる。これについては、各リサイクル工程への投入に適した形で特定の原料を準備できるよう、回収・選別施設の最適化を図る上で、公的な介入が有益となる可能性もある。

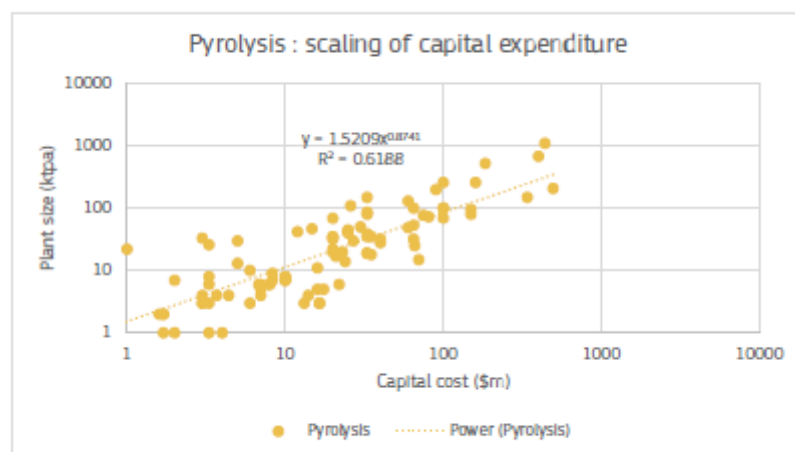
・スケールアップと規模の経済：プラント規模の影響

o Arca ら（2025）は専門家へのインタビューに基づき、費用対効果の高いプラントの最小容量は、様々なケミカルリサイクル技術によって異なると指摘している。熱分解の場合、著者らは最小プラント規模を 20 kt/年としている。（ガス化の場合、実行可能な最小プラント規模は更に高く 100 kt/年だが、このようなプラントはバイオマスなどの他の原料も受け入れることができる）。Larrain ら（2020）は、ナフサとワックス生産を伴う混合プラスチック廃棄物の熱分解では 70 kt/年で損益分岐点に達するが、ナフサ生産の最大化に重点を置くとこの閾値は 115 kt/年に上昇すると指摘している（但し、我々の知る限り、この規模はまだ実用化されていない）。Roland Berger（2024a）は、特定の技術を指定せずに、ケミカルリサイクルの経済的実行可能性に必要な規模を約 50 kt/年としている。EU では、他の技術を用いた大規模プラントの計画も発表されている。例えば、フランスの 220kt/年ソルボリスプラント[79]や、スペインの 400kt/年ガス化プラント[80]などが挙げられる。

デ・トマソら（2024）は、オンラインで入手可能な様々なケミカルリサイクルプラント（熱分解プラント 105 基、ガス化プラント 32 基を含む）の総設備投資費を分析した。図 9 に示すように、少なくとも投資コストの面では、明確な規模の経済は認められず、設備投資コス

トはプラント容量の増加に伴って上昇しているように見える（回帰分析によると、べき乗則の指数は 0.87 と低く、規模が 2 倍になるごとにコストが 83%増加する）。しかし、現在存在する、或いは発表されているケミカルリサイクルプロジェクトの多くは、経済的収益の最大化を目的とするのではなく、技術的・経済的な実現可能性を評価又は実証するために設計された規模であることに留意する必要がある。

Figure 9. Scaling of Pyrolysis plant capital costs



Source: Elaborated based on data from De Tommaso et al. (2024) using year 2023 USD to EUR conversion rates). Capital costs (\$m) vs plant size (ktpa)

しかしながら、JRC に利害関係者から提供された機密データによると、将来的にプラントの生産能力が増加すると、設備投資費（CAPEX）と運転費（OPEX）を含む単位コストは低下する見込みである。

5.2.3.4. プラスチックリサイクルにおける熱分解法の本質的なコスト制約

本セクションで提示した分析に基づく、プラスチックリサイクルにおける熱分解法の効率、ひいては単位生産コストには本質的な制約があり、段階的な改良では克服できない可能性があることが明らかになる。以下にその点を挙げる：

- 原料コスト：収集、選別、前処理の物流に関連するコスト。廃プラスチックの発生源は本質的に分散的で変動が大きく、一方、熱分解プロセスは原料の仕様に関して厳しい要求を伴う。分別収集及び自動選別システムの改良によって一定の改善が見込まれるものの、原料調達と投入要件の整合は今後も課題となるだろう。

- 物理的制約：熱分解プロセスの効率は、物理化学的な制約によって制限される。本質的に、このプロセスは3つ（最良の場合には2つ）の高温プロセス（熱分解、改質、水蒸気分解）に依存しており、これらのプロセスでは材料を高温に加熱する必要がある（加えて、溶融や押出成形などの低温プロセスも必要）。これらのプロセスのエネルギー消費量は、各段階に

におけるプラスチックの発熱量の約 10%と概算されるため、理論上、プロセスの効率は約 70% (約 0.9⁴³) を超えることはできない。実際には、この値は、有用な副産物が殆ど得られない場合、50%に近い値になる[81]。また、(廃) プラスチックからプラスチックへの変換効率は、副産物として有用な燃料が生産されるものの、現状では約 30%である。プロセスの最適化(上記、例えばプロセス統合など)を行ったとしても、得られる節約効果には物理的な上限がある。更に、水素化などのエネルギー集約的な工程も必要となるが、水素はエネルギー集約的であるか、高価であるか、或いはその両方である。

・エネルギー投入と物質損失：前述の通り、プロセスチェーン全体を通して物質を保持することと、エネルギー供給のために物質を燃焼させることの間には、ある程度のトレードオフが存在する。しかし、どちらの場合も無料ではない。外部エネルギーをプロセスに利用しても、根本的なエネルギー要件を満たすことはできず、コストが増加する可能性が非常に高い。プロセスからの排ガスの代わりに、天然ガス(恐らく、最も一般的な商品オプション)や石炭(恐らく、実行可能な場合で最も安価)又は電力(温室効果ガス排出量を削減できる可能性あり)を使用することは可能だが、このような外部エネルギー源は、一般的に、自己回収されたプロセス熱やプロセス副産物燃料(特に EU の状況下)よりもコストが高くなる。潜在的には、非常に低コストで安価なプロセス熱を生成できる可能性がある(例えば、施設内の太陽熱設備から)が、そうしたプロジェクトは今のところ想定されていない。従って、トレードオフは、効率の低下又は購入エネルギーコストへのリスクにさらされることになる。

以上の結果として、熱分解によって得られるプラスチックは、自己燃料供給型であれ外部燃料供給型であれ、低温・低エネルギーのプロセス(選別、熔融など)に基づくメカニカルリサイクルと比較して、常にコスト面で不利になる。これは環境面での利点、例えば様々な LCA 研究に示される熱分解由来の温室効果ガス排出量にも反映されている(Garcia-Gutierrez et al. 2023、CE Delft 2020、Arena et al. 2023 を参照)。Oko-Institut (2022) は、メカニカルリサイクルによる温室効果ガス排出量が、ケミカルリサイクルによる排出量の 9 分の 1 であることを明らかにしている[82]。この点は業界でも広く認識されており(例：Roland Berger 2024a、Oko-Institut[83]、Neste 2024)、熱分解はメカニカルリサイクルを補完する役割を担うべきだと考えられている。具体的には、リサイクルが困難なプラスチック(フィルムやメカニカルリサイクル工程で排出される残渣など)の処理や、最高品質のプラスチック(特に食品接触材料)の生産に重点を置くべきとされている。

5.2.3.5. プロセス及び生成物の全体コスト：文献データとの比較

本節では、熱分解による生成物のコストに関する全体的な推定値を示している公開資料を概観し、我々の調査結果に照らして考察する。

廃プラスチックから熱分解油への転換について、北米市場の状況（一般的にエネルギーや原料価格が安価である一方[84]、リサイクルに関する規制上の義務も少ない）に特に注目した Lux Research (2020) の研究では、生産コストを処理廃プラスチック 1 トン当たり 375 ユーロ、又は生成された熱分解油 1 トン当たり 640 ユーロと推定しており、そのコストの 80% 近くをエネルギー費が占めている。その後の研究（Lux Research, 2022）でも、これらの数値が裏付けられている。我々の分析において、これらの数値は楽観的な部類に入る。Wood Mackenzie (2022) も同様に、電力や天然ガスを含むユーティリティが熱分解の操業コストの大部分（約 47%）を占めることを示している。とはいえ、これらのコスト内訳は熱分解油の製造に関するものに過ぎず、それ以降の工程（ダウンストリーム）の費用は含まれていない。

しかし、上述の試算（業界関係者から JRC に提供された機密情報などに基づくもの）によれば、CAPEX（設備投資）、OPEX（運営費）、及び原料費を合わせた熱分解油のコストは、例えば Lux Research 社の試算値の 2 倍以上、或いは保守的な前提条件を用いた場合には最大で 4 倍に達するとされている。この総コストの数値は、SIA Partners (2024) や Plastics Europe (2023) の試算とより整合的なものである。両者は、プラスチックのケミカルリサイクルにおける製造コストが、現時点ではバージン材（化石燃料由来プラスチック。Plastics Europe の調査では、バージン材のコストを 1,395 ユーロ/トン、リサイクル材を 2,460 ユーロ/トンと想定）の約 2〜3 倍であると結論付けている。

廃プラスチックやケミカルリサイクルといった新興市場の分析を専門とする市場インテリジェンス企業である ICIS は、熱分解油に関する定期的な市場データを報告している数少ない情報源の一つである。ICIS は、未処理及び精製された熱分解油に加え、タイヤ由来の油についても 2023 年以降のデータを報告している。当初は原料価格に大きな変動が見られたが（ICIS 2024[85]）、ここ数年で原料価格は安定している[86]。熱分解製品に関しては、バージンナフサに対する熱分解油の価格差は経時的に変化しており、熱分解油の価格はバージン品（化石由来品）の価格動向から次第に独立して動くようになっている。即ち、契約形態は「ナフサ価格 + α 」から「原料コスト + α 」へと大きく移行した。ICIS のデータによると、バージンナフサとナフサ代替品（精製熱分解油）との間の年間平均価格差は、2025 年を通じて 2024 年の水準に近い値（ナフサ価格 + 約 1400 ユーロ/トン、又は約 2000 ユーロ/トン）で推移し、2023 年の水準（価格差 + 1200 ユーロ/トン、又は約 1800 ユーロ/トン）を大幅に上回った。こうした高水準の価格差は、ナフサ代替熱分解油の供給逼迫と、ブランド企業からの根強い需要を反映したものである。2026 年初頭には価格差が再び縮小したが、これは主にナフサ代替熱分解油の価格下落によるものである。その背景には、化学セクター全体の低迷、マクロ経済の悪化（ブランド企業のコスト感応度を高める要因）、そして規制上の義務への算入可否をめぐる不確実性（セクション 2.3.3.1 で詳述したとおり、現在は部

分的に明確化されている）がある。

プラスチックの熱分解における将来的な採算分岐点や経済的実現可能性への道筋について、中長期的な視点に立った2つの調査(Plastics Europe 2023[87]、Bain & Company 2025[88])の見解は一致している。現在及び近い将来の見通しに関する結果は我々のデータ[89]と整合しているが、将来予測については比較的楽観的である。両調査とも、市場環境が好転すれば、今後数十年以内に熱分解がバージン品に対してコスト競争力を持ち得る可能性があると予測している。

5.2.3.6.収率とコストに関する更なる考察と結論

これまでのセクションにおいて、熱分解プロセスの収率に関するいくつかの数値や範囲を特定・引用し、それに伴うコスト構造への影響について述べてきた。あらゆる情報源を検討すると、熱化学プロセスによる「プラスチックからプラスチックへ」の収率は、20%という低い値から80%近くに達するものまで、非常に幅広い範囲に亘っている。これらの収率の値と、それが経済的実現性に及ぼす影響については、更なる明確化が必要である：

- 確立された技術を用いる現在のプロセスでは、通常、収率はその範囲の下限(25~40%)に留まる。しかし、これらのプロセスでは一般的に、原料の一部を燃焼させてプロセスに必要な熱を賄うため、原料以外に外部から供給すべきエネルギーコストを抑えることができ、既存のプロセスへの統合も容易になる。

- 短期的には、プロセスの最適化、統合、及びスケールアップによって、これらの確立されたプロセスの収率が理論上の限界値(例えば40~50%の範囲)に近づく可能性がある。

- 更なる材料収率の向上は、例えばスチームクラッキングに直接適さない留分から目的の材料を更に抽出することによって達成可能である。Kusenbergr(2025)で述べられているように、より重質な留分を後処理(同例では流動接触分解やディレドコーカーを使用)することで、これが実現できる。理論上、これにより収率は50~60%の範囲、或いはそれ以上(同文献では77%)にまで向上する可能性があり、我々の「ベストケース」シナリオでもこの数値を採用している。しかし、こうした後処理にはコストがかかるほか、エネルギー(ひいてはコストや、場合によっては炭素排出量)の追加投入(外部からの供給)や、追加のプロセスユニット、触媒などが必要となり、設備投資費(Capex)と運転費(Opex)の双方を押し上げることになる。Langeら(2024年、補足資料参照)は、このような収率向上(約50%から78%へ)には50%多くのエネルギーが必要になると述べている。このエネルギーは、基準となる炭素系燃料(天然ガスなど)から供給される可能性が高いため、リサイクル対象のポリマーに含まれる炭素を回収するために燃料として消費される炭素との関係において、収益性低下を招くことになる。更なる改善策として、外部からのエネルギー投入に脱

炭素エネルギー（再生可能エネルギーなど）を使用し、増加するカーボンフットプリントを緩和することも考えられ、これによってコストが更に上昇する可能性が高いだろう。

- 理論上は、この論理を突き詰めれば、炭化水素原料に含まれる炭素の 100%近くを材料として回収することも考えられる[90]（熱分解やガス化を行い、その後、精製、アップグレーディング、改質といった既知の有機化学プロセスを経ることで）。しかし、そのために必要なエネルギー使用量（及び関連コストや全体的な炭素排出量）は、極めて大きくなると考えられる。化石燃料の採掘と同様に、「投入炭素量に対する回収炭素量」には限界があり、経済的に採算が取れない水準に達することになる。従って、物理的に達成可能な収率の範囲ではなく、現在のバリューチェーンにおいて経済的に現実的であり、かつ環境影響も妥当な範囲の収率に注目することが重要である。こうした考えに基づき、我々は分析対象とするシナリオを決定した。

- また、本報告書で検討した収率は、ポリマー成分の割合が高い（非ポリマー成分は数%程度）プラスチック（廃棄プラスチック）の組成を前提としている点に留意されたい。これは多くの包装材料には当てはまるが、対象をより広範なプラスチック（例えば、車両設計における循環性要件に関する新たな規則への適合を見据えた自動車用プラスチックなど）に広げる場合、プラスチックとしての収率とポリマーとしての収率の区別を再検討する必要がある。なぜなら、自動車用プラスチックなどでは、非ポリマー成分（充填剤、可塑剤、染料など）がプラスチック原料の大きな割合（最大 30%）を占める可能性がある。

5.2.4. プラスチックリサイクルにおける熱分解の経済的実現可能性に関する結論

上記の分析に基づき、廃棄プラスチックの熱分解の経済性に関する主なポイントを以下に示す：

- 最良のケースでは、理論上、プラスチックリサイクル収率が 50%を超える可能性がある。しかし、現状のプロセスでは、プラスチックの約 3 分の 1 のみがプラスチックやその他の高付加価値化学品に転換され、3 分の 1 は熱や材料の損失として失われ、残りの 3 分の 1 は燃料生産に回される（Li et al. (2023)、Kusenberg et al. (2022a)、Ma et al. (2023)などを参照）[91]。この現状をベースラインとしてプロセスを更に最適化することで、材料収率の向上、損失の低減、そして通常であれば燃料として処理される生成物の再処理などが可能になるだろう。しかし、こうした収率の向上には、エネルギー及び操業面でのコストが伴う。

- 材料のリサイクルにおける収率が比較的低いことに加え、原料費やエネルギーコストが高いことから、熱分解によるケミカルリサイクルは、メカニカルリサイクルやバージンプラスチックの生産と同等のコスト競争力を実現できていない。こうした超過コストを回収するには、食品グレードの製品といった品質面での付加価値や、法規制への適合といった要素を

根拠とした価格の引き上げが必要となる。

- 我々の分析によれば、現在の技術及び産業プロセスの状況下では、ケミカルリサイクルされた廃プラスチックをポリマー生産の原料として使用する場合（ナフサ相当品を基準とする）、その中間体（ナフサ相当品）の生産コストはバージン原料由来のものに比べて 1.5～3.5 倍に達す。また、このコスト差は予見可能な将来に亘り依然大きいままであると予想される。なお、これはリサイクルプラスチックの市場価格にも同程度の差が生じることを意味する。

- 技術面での抜本的なブレークスルーがない限り、上述のコスト構造は今後も変わらないと考えられる。プロセスへの段階的な改良、規模の経済、或いは効率化によるコスト削減といった取組みだけでは、少なくとも短中期的には、熱化学的液化プロセスの経済的実現可能性を根本的に変えることはできないと予想される。

- しかし、長期的には状況が変わる可能性も排除できない。廃プラスチックの熱化学的分解による材料回収において、高付加価値炭化水素の生産を目的とした技術改良（触媒、プロセス条件、その他プロセス効率向上のためのブレークスルー）への集中的な研究開発投資が行われれば、コスト削減が実現し、熱分解由来の材料がコスト競争力を備えるようになる可能性がある。スチームクラッキングや触媒開発、その他のプロセス改良といった手法は、効率面で求められるこうした飛躍的な改善をもたらす可能性のある選択肢として、現在検討が進められている。

5.3. ソルボリシス（溶媒分解）の経済的実現可能性

ここで検討する技術は、溶媒を用いてポリマーをオリゴマーやモノマーといった構成単位に分解する化学プロセスである。代表的なものとしては、グリコリシス、メタノリシス、加水分解などが挙げられ、これらには部分的なソルボリシスや酵素を用いたソルボリシスなどの派生技術も含まれる。これらの技術の原料となるのは、廃 PET ボトル、ポリエステルを多く含む繊維廃棄物（衣類、家庭用繊維製品など）、ポリウレタン（PU）廃プラスチック（フォーム材、自動車用シートなど）といった縮合系ポリマーである。ソルボリシスによるケミカルリサイクルを行えば、これらの廃プラスチックを、食品グレードのボトル容器向け rPET（再生 PET）や再生ポリエステルなど、バージン材と同等の品質を持つ新たなプラスチック原料へと再生することが可能である。

生産プロセスは、大まかに以下の 5 つの段階に分類できる：

- 1 - 原料の回収又は調達
- 2 - 原料の前処理

3 - 解重合

4 - 精製（ろ過、蒸留、晶析）

5 - 再重合

一部の研究や業界の資料では、ステップ 1 と 2 が統合される場合や、ステップ 4 がより広義のステップ 3「解重合」の一部として分類される場合もある。

ソルボリシスには様々な派生技術が存在するが、それら全てについて個別に経済的実現可能性を体系的に論じることとはしない。その理由は、分析の分量を適切に保つためであると同時に、データの制約（データの欠落や機密保持上の問題）が生じるためでもある。但し、グリコリシスやメタノリシスといった主要な派生技術間の特徴的な違いについては、適宜言及する。

最後に、ケミカルリサイクル技術は依然発展途上にあり、絶えず進化を続けている。マイクロ波や酵素の利用、部分的な解重合など、新たな派生技術やハイブリッド型の手法が次々と登場している。例えばグリコリシスという特定の技術であっても、個々の施設が独自の特長を備えている場合があり、必ずしも同種の技術（グリコリシス同士）であれば容易に比較できるとは限らない。むしろ、加水分解などの異なる技術との比較と比べて、必ずしも比較が容易とは言えないケースもある。特定の技術が成熟・定着し、ライセンス供与や標準化が進んでより広く採用されるようになれば、将来的に状況が変わる可能性がある。

前述の通り、ソルボリシス（溶媒分解）技術では、材料のリサイクルの歩留まりを比較的高くすることが可能である。実際、前処理済みの原料に対して 90%以上の回収率を報告しているプロセスも存在する[92]。そのため、こうした施設の投入能力は、概算として、産出能力と同等になる。ソルボリシス施設のビジネスモデルは、一般的に、再生 PET やポリエステル（或いは PTA、BHET、DMT といった直接的な化学的前駆体）の生産を中核事業とする。これは、市場性のある多様な製品を生産し、それらの複合的な価値の最大化を目指す「併産」型のビジネスモデルを採ることが多い変換技術（熱分解やガス化など）とは対照的である。後者と比較すると、ソルボリシスは商業的な確立がまだ十分ではなく、本稿執筆時点で稼働している施設はごく僅かであり、完全な産業規模で稼働しているものは存在しない（例：Moreno-Marrodan et al. 2024, Parida et al. 2024）。稼働中の施設の大半は包装材のリサイクルに注力しており、繊維のリサイクルに取り組む施設は少数に留まっている（EU における総処理能力は 30kt のみ：Systemiq 2025）。

単位当たり生産コストを考える際、通常、運転費（OpEx）と設備投資費（CapEx）は別々に扱われる。ステークホルダーからの情報や既存の研究に基づく、ソルボリシス（溶媒分

解)における主な OpEx 項目は以下のとおり：

- 原料（廃プラスチック：例：MRF（材料回収施設）やメカニカルリサイクル工程からの選別残渣、繊維廃棄物など）
- 化学剤（溶媒、触媒、酵素など）
- 人件費
- ユーティリティ
 - エネルギー：電力及び／又は天然ガス
 - 水、蒸気
- 維持費
- 廃棄物処理費（例：製品として販売できない副産物や有害な副産物の処分）
- 輸送費
- 間接費／その他

詳細な数値は後述するが、一般的に、各 OpEx 費目の絶対額や構成比は、採用するソルボリシス技術や施設によって大きく異なる。例えば、比較的高価な酵素や化学剤を使用する技術であっても、それらを使用することで低温・短時間での運転が可能になり、結果としてエネルギーコストを削減できる場合がある。

全体として、原料費は最も重要、或いは極めて重要なコスト項目の一つである。例えば、Uekert ら（2023）は、算出されたリサイクル製品の最低販売価格（MSP）のうち、28%から 53%を PET フレーク原料のコストが占めていると指摘している。これは、ソルボリシスに適した原料にはポリエステル含有率の高さ（通常 90%以上）が求められ、純度が高い原料ほど価格が高くなるという事情を反映している。一方で、施設によっては、自社で原料フレークを製造するため、敷地内での選別や前処理を行うビジネスモデルを採用している場合もある。その場合、低品質な PET 廃棄物原料（メカニカルリサイクルの選別残渣など）の購入にかかる名目上のコストはゼロ、或いはマイナス（原料の引き取り料を受け取る形）になることさえある。

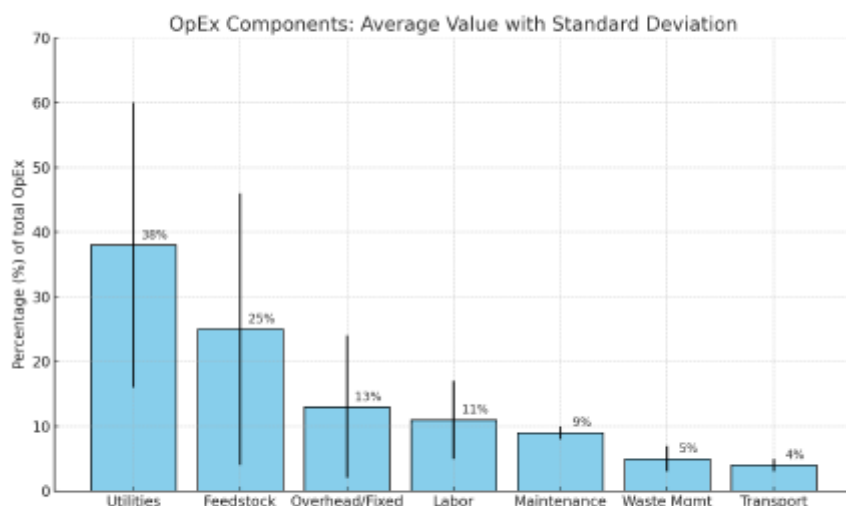
次に、特定のソルボリシス技術においては、溶媒にかかるコストが非常に高額になる場合がある。Lux Research（2020）によれば、溶媒コストは総コストの 60%以上（処理プラスチック 1 トン当たり 800 米ドル超）を占める。また、Wood Mackenzie（2022）は、触媒や化学剤が総操業費の 73%を占めると報告している（なお、両資料とも北米市場の状況に基づいています）。技術によって大きく異なり、かつ極めて重要な要因となり得るのがエネルギーコストである。特に EU においては、世界の他の多くの地域と比べてエネルギー単価（天然ガス、電力）が相対的に高くなる傾向があるため、この点は重要である。

一方、ソルボリシス（溶媒分解）における主要な設備投資費（CapEx）の費目は、建設費と機械設備費である。一般的に、ライフサイクル単位コストに占める設備投資の割合は、運転費（OpEx）よりも低く、本調査で検討したデータでは通常 10% から 20% の範囲に収まっている。とはいえ、プラントの規模は依然として経済的採算性を左右する重要な最適化パラメータと見なされている。これは、他のコスト項目の方が比重は大きいものの、制御の難易度が高いという事情を反映している。

5.3.1. 運転費（OpEx）の詳細分析

図 10 は、総 OpEx（運転費）に対する各 OpEx 費目の相対的な寄与度を、平均値及び標準偏差とともに示している。分散は著しく大きいものの、ユーティリティ費、そしてそれよりは寄与度が低いものの原料費が、明らかに最も重要な費目となっている。

Figure 10. OpEx cost components for solvolysis. The thin bars denote the standard deviation.



Note: numbers do not sum up to 100% because not all facilities provided data for all cost types.

Source: own elaboration based on confidential data received by JRC from 4 EU facilities under construction. Feedstock is waste of PET packaging and, to lesser extent, polyester rich textiles. Utilities include process reagents e.g. solvents.

ここで留意すべき点は、示された分析がステークホルダーからのデータや文献など、複数の情報源に基づいていることである。そのため、コスト費目の定義が必ずしも完全に統一されているとは限らない。例えば同じ費目名が使われていても、特定のコスト要素をどのように分類すべきかについては曖昧さが残る可能性がある。従って、ここで示された各費目の内訳については、あくまで主要な費目を浮き彫りにすることが主目的であることを踏まえ、ある程度の幅を持って解釈する必要がある。

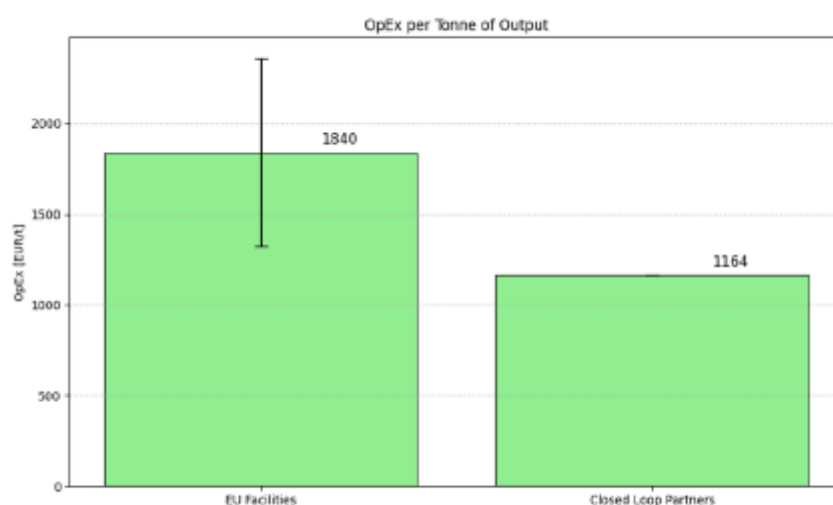
機密保持のため、ステークホルダーから提供されたデータは集計され、平均値と標準偏差のみが報告されている。しかし、このデータから観察された一つの傾向として、原料費とユー

ティリティ費の間に相補的な関係（一方が OpEx 全体に占める割合が低い場合、もう一方は高くなる傾向があること）が見られた。ユーティリティ費の内訳（電力、天然ガス、化学薬剤など）における各費目のウエイトは技術ごとに異なり、その差は非常に大きくなる可能性がある。実際、酵素のような高価な化学物質を使用する技術では、これが単一の OpEx 項目として最大となる場合もある。こうした変動の大きさは Uekert ら（2023）の研究でも指摘されており、そこでは、グリコリシス（糖分解）の総コストに占めるエチレングリコールの割合が約 21%であるのに対し、メタノリシス（メタノール分解）におけるメタノールの割合は僅か 6.5%、酵素加水分解における水酸化ナトリウムの割合は約 17%であると示されている。

全体として、図 11 に示された数値は、Closed Loop Partners（2021）が米国・カナダ地域について公表したデータ（総 OpEx の内訳：ユーティリティ費 58%、原料費 23%、人件費 8%、保守費 8%、廃棄物処理費 3%）とも整合している。但し、絶対的なコスト水準については、特にユーティリティ費の項目において、当該地域の方が低く報告されている。

この点は、続く図 11 にも反映されている。同図では、異なる情報源に基づく、製品 1 トン当たりの総 OpEx の推定値が比較されている。EU の施設から得られたデータでは、平均値は 1840 ユーロとなっているが、施設間には大きなばらつきが見られる。Closed Loop Partners（2021）が報告した米国・カナダにおける同様の数値は、これよりもかなり低くなっている（例：原料費やエネルギーコストが低いことなどが要因）。総運転費（OpEx）の変動は、特定の投入コスト、特に総 OpEx に占める割合が高い項目への感応度によって左右される。特筆すべき点として、ソルボリシス（溶媒分解）の OpEx は、原料のコストや品質に大きく左右されることが挙げられる（Uekert et al. 2023, DesVeaux et al. 2024）。また、単位エネルギーコストも EU 内の地域によって異なる可能性があり、それが総 OpEx に影響を与えることもある。例えば、ユーティリティコストの約 50%がエネルギー関連費用であると仮定すると、それは総 OpEx の平均 19%に相当する（前述の図を参照）。この場合、単位エネルギーコストが 2 倍になれば、OpEx は 19%増加することになる。

Figure 11. OpEx per tonne of output for solvolysis. The thin bars denote the standard deviation or range.



Sources: own elaboration; EU Facilities' is based on confidential data received by JRC from 4 EU facilities under construction, while the right bar is data from Closed Loop Partners (2021) and refers to a US / Canada market context (numbers are converted from USD figures with 1.18 USD/EUR, the exchange rate at that time).

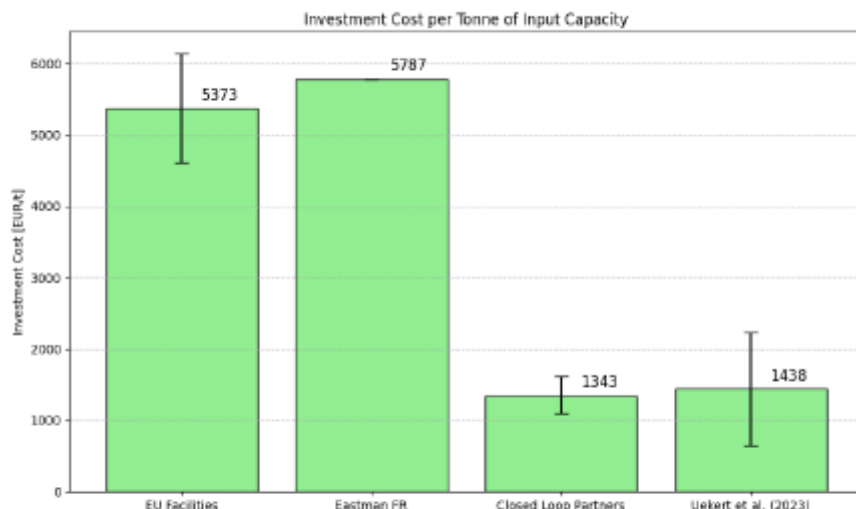
ソルボリシス技術間の違いについて言えば、学術研究やその他の文献は、一般的にメタノリシスの方がグリコリシスよりもエネルギー集約的であることを示唆している。一方でメタノリシスは、ポリ乳酸（PLA）やポリブチレン・アジペート・テレフタレート（PBAT）といった（対象外の）バイオ由来プラスチックが混入している場合など、原料中の不純物に対する許容度が高いという利点もある（Tullo 2023, Uekert et al. 2023, DesVeaux et al. 2024, Babaei et al. 2024）。

5.3.2. 設備投資費（CapEx）の詳細分析

一般的に、CapEx はソルボリシスの経済性において重要な要素となり得る。例えば、DesVeaux et al. (2024) は、高度な混合ポリエステル・メタノリシス・プロセスにおいて、設備投資費が総コストに占める割合は 28%であり、原料費に次いで 2 番目に大きな要因であることを示している。とはいえ、全体として見れば、総 CapEx は総 OpEx よりも大幅に低くなる傾向がある。

公表されている数値は、ソルボリシスに関連する設備投資費をそれぞれ異なる定義で示している可能性がある。例えば、一つの方法として、初期投資コストを、投入処理量又は生産能力（ソルボリシスの場合、これら二つに大きな差はない）1 トン当たりの値に換算して定量化することが挙げられる。また別の方法として、生涯の生産量当たりの値に換算した、生涯に亘る設備投資費を考慮することも考えられる。

Figure 12. Investment costs for solvolysis. The thin bars denote the standard deviation or indicated range.



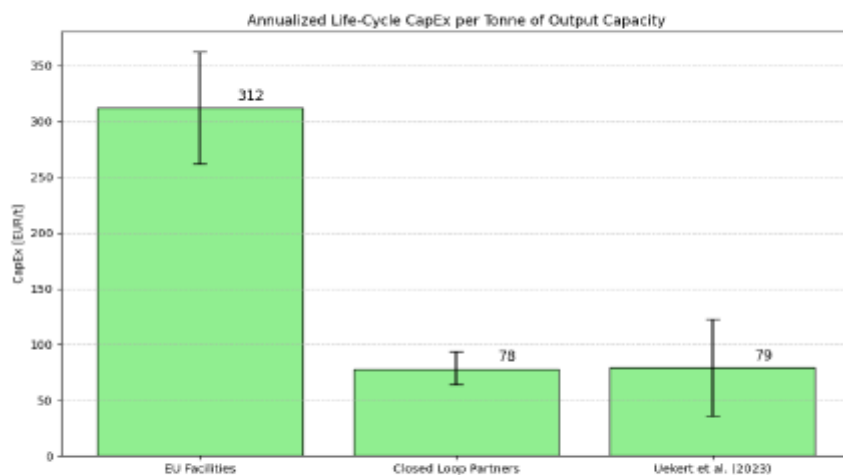
Note that the report of Closed Loop Partners (2021) and article of Uekert et al. (2023) refer to a US / Canada market context (shown numbers are converted from USD figures). The former also reports an outlier value that would have increased the average to almost 2000 EUR/t if it had been included.

Sources: own elaboration; 'EU Facilities' is based on confidential data received by JRC from 4 EU facilities under construction. 'Eastman FR' refers to public reporting for the envisaged plant in Port-Jérôme-sur-Seine, France (Tullo 2023).

図 12 では、既存の研究及び本研究のためにステークホルダーから得られた情報に基づく数値を示している。これらは投入能力当たりの設備投資費（CapEx）を示すものであり、資本コストを表す一般的指標である。欧州について報告されている値は、通常、処理能力 1 トン当たり 5,000 ユーロを超えており、e-cube Strategy Consultants (2025) が示唆するように 6,000 ユーロを超える可能性もある。一方、米国・カナダの状況に言及した 2 つの研究では、1,500～2,000 ユーロというかなり低い数値が示されている（但し、米ドルからユーロへの換算に伴う不確実性が含まれる点に留意が必要）。全体として、これらの数値は De Tommaso et al. (2024) で収集されたデータから示唆される世界平均の約 3,000 ユーロと整合している。

経済的実現可能性を評価する上では、生涯生産量 1 トン当たりの資本コストを分析することも有益である。これは、プラントの想定耐用年数（約 20 年）に亘る総設備投資費を、主製品（ここではリサイクル PET、ポリエステル、又はその直接的な前駆体）の年間生産量で割ったものである。この数値は概算値ではあるものの、総単位コストの推定値を導き出し、最終的に市場価格と比較するために利用できる。

Figure 13. Capital expenditure per tonne of output capacity for solvolysis. The thin bars denote the standard deviation or indicated range.



Note that the report of Closed Loop Partners (2021) and article of Uekert et al. (2023) refer to a US / Canada market context (numbers are converted from USD figures). The former also mentions an outlier value that would have increased the average to 114 EUR/t if it had been included.

Source: own elaboration ; EU Facilities* is based on confidential data received by JRC from 4 EU facilities under construction.

図 13 によると、EU における単位当たりの設備投資費は生産量 1 トン当たり 300 ユーロを僅かに上回り、一般的変動幅は±50 ユーロとなっている。これまでの数値と同様に、米国・カナダ市場におけるコストは著しく低い傾向にあり、2 つの研究では一般的な値が 100 ユーロ未満と示唆されている。

5.3.3. 総単位コスト

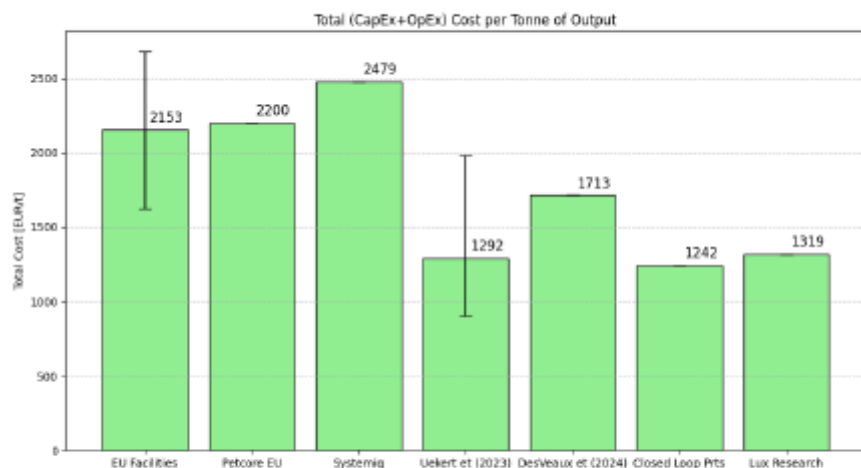
OpEx（運転費）と CapEx（設備投資費）を合算することで、図 14 に示す総単位コストを算出できる。ここには、詳細な内訳を示さずに総単位コストのみを提示している研究からのデータポイントも含まれている。左側の 3 つの列のみが EU の状況に関するものである。これらは、1 トン当たり 2,000 ユーロを大きく上回る平均値（EU の施設に関する 2,150 ユーロ/トンを実用的な平均値として採用）を示唆しており、一般的に変動幅は約±500 ユーロである。これは、米国・カナダ市場の状況に基づく数値とは対照的である。それらの数値は全て 2,000 ユーロ未満であり、1,000 ユーロに近い水準にある。これら 2 つの地域のもう一つの違いは、設備投資費 (CapEx) が総コストに占める割合である。EU では平均して約 15% であるのに対し、北米では 10% を大幅に下回っている。

なお、米国・カナダの数値の中で最も高いもの（DesVeaux ら、2024 年の研究による）は、リサイクルポリエステル生産の特殊なシナリオを指している。このシナリオでは、原料にバイオプラスチックが相当な割合で含まれており、その両方の要因がコストを押し上げている。同様に、Petcore（2024 年）の推定値は、繊維から繊維へのポリエステルリサイクル・

シナリオに基づいている。この場合、再重合及び紡糸の工程だけで 300 ユーロを占める（その他の内訳は、回収・選別：500 ユーロ、前処理：600 ユーロ、解重合：800 ユーロ）。一般に、繊維から繊維へのリサイクルはコストが高くなるため、ソルボリシス（溶媒分解）の単位コスト推定値の中でも高めの範囲に位置付けられる（Systemiq 2025）。

これは、メカニカルリサイクル等で不適格とされプラスチックから rPET を生産する場合の数値とは対照的である。後者のケースでは、バイオプラスチックは含まれず、プロセスの終点が PTA、DMT、BHET、或いはスチレンモノマーといった前駆体製品の段階で完結することもある。

Figure 14. Total costs per tonne of output for solvolysis. The thin bars denote the standard deviation or indicated range.



Note that the reports of Closed Loop Partners (2021) and Lux Research (2020), as well as the articles of Uekert et al (2023) and DesVeaux et al (2024) refer to a US / Canada market context (shown numbers are converted from USD figures).

Source: own elaboration; 'EU Facilities' is based on confidential data received by JRC from 4 EU facilities under construction, Petcore EU from Petcore (2024) and next Systemiq (2025).

5.3.4. 市場価格との比較

ソルボリシスの総単位コストは、バージン品相当の製品の市場価格と比べてどうか。規制による支援や環境価値に対する上乗せ価格がない場合、事業者がこの活動に取り組むために十分な利益を確保するには、ソルボリシスのコストが市場価格よりも低いことが経済的成立性の必要条件となる。

比較的最近、米国及びカナダの市場環境において、この条件を満たすことが可能であるとの見方が示されている。Uekert ら（2023）のモデル分析によれば、PET の解重合技術であるグリコリシス（糖分解）と気相メタノリシスの双方が、バージンプラスチックの製造コストを下回る結果となった。同研究チームは再生ポリエステルの製造コストについてもモデル分析を行い、メタノリシスとグリコリシスはバージンポリエステルの製造よりも低コスト

であることを明らかにした (DesVeaux ら 2024)。但し、これらの結果は技術的なコストに関する理論的モデルに基づいたものであり、長期的な原料の調達可能性といった現場のビジネス上の要件は考慮されていないため、解釈には注意が必要である。

こうした状況を反映し、調査・コンサルティング会社 Lux Research (2022) による研究でも、PET のソルボリシス (溶媒分解) による製造コストはバージン品の市場価格を下回ると示唆されている。しかし、予想される粗利益は 1 トン当たり約 100 米ドルに留まり、極めて低い水準にあると見なされている。事業見通しの改善は中期的には期待できるものの、更なる事業集約が進んで初めて、処理プラスチック 1 トン当たりの利益が約 270 米ドルまで増加すると見込まれている。

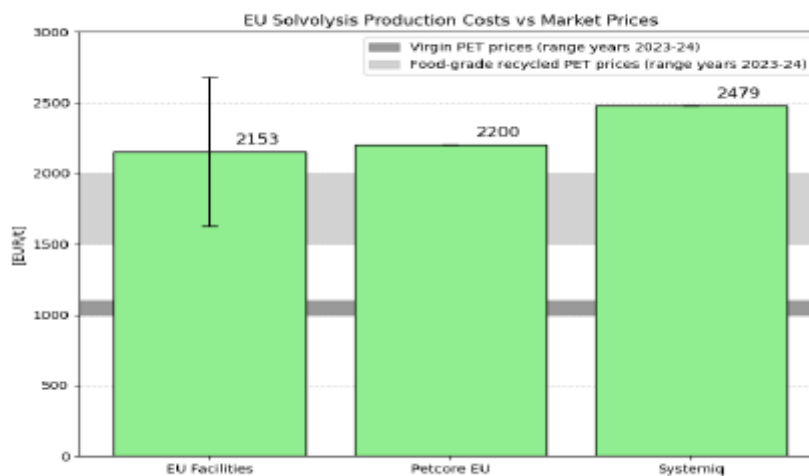
米国の投資会社である Closed Loop Partners (2021) は、異なるソルボリシス技術を採用する 4 社のケミカルリサイクル事業者を対象に分析を行った[93]。ここでも米国・カナダの市場環境 (特定の価格設定やグリーンプレミアム、例えば rPET 価格 1,900~2,260 米ドル/トンなど) が前提とされている。分析対象となった 4 つのケースのうち、2 つの技術は内部収益率 (IRR) が 20%を超え、経済的に実現可能であると判断されたが、残る 2 つは IRR が不十分な低水準、或いはマイナスとなる結果であった。同研究は、ソルボリシスが経済的に成立するためには、十分に高い環境価値への上乗せ価格 (10~15%が推奨される) が不可欠であることを強調している。

従って、北米の市場環境に言及した近年の学術研究や企業調査からは、例えリサイクルプラスチックの使用を義務付ける法規制が存在しない場合であっても、少なくとも一部のソルボリシス技術は経済的に成立し得ることが示唆されている[94]。しかし、2 つの重要な留意点がある。これらは、一見すると好条件が揃っているにも係らず北米でケミカルリサイクル施設がそれほど増えていない理由や、これらの知見を現在の EU の状況に直接適用することには限界がある理由を説明するものと言えるだろう。第一に、これらの研究の多くは、2021 年から 2022 年 (或いはそれ以前) に観測された市場状況に基づいている。過去の基準に照らすと、この期間はバージンプラスチックの価格が非常に高騰していた時期であり、その後、近年になって市場は著しい低迷を見せた。実際、イーストマン (Eastman) 社は価格高騰期に米国で世界最大級のメタノリシス (メタノール分解) 法によるプラスチックリサイクル工場を建設したが、米国での追加工場の計画は保留された[95]。第二に、低コストや経済的実現可能性に関する肯定的な見解については、引用された研究がいずれもモデル予測 (Uekert et al. 2023, DesVeaux et al. 2024) や、パイロット規模又は初期の商業段階にある設備 (Closed Loop Partners 2021) に基づいているという事実と照らし合わせて検討する必要がある。

EU の状況に関して得られたより新しい分析やデータは、一般的に、ケミカルリサイクルの単位コストが（メカニカルリサイクルとは対照的に）、同等のバージン製品の価格よりも高いことを示唆している。例えば、Sia Partners (2024) は、「ケミカルリサイクル樹脂の購入価格は、大きな市場に対応するには依然として高すぎる（バージン材価格の 2～3 倍）」と主張している。同様に、Systemiq (2025) は、ケミカルリサイクルされたポリエステル繊維がバージン製品よりも 2.6 倍高価であると主張している。従って、EU におけるビジネスモデルは、一部の市場参加者が、バージン製品の価格に上乗せして相当な「環境配慮への上乗せ価格」を支払う意思があるという前提に基づいている。

こうした状況を反映し、本調査でヒアリングを行った EU のソルボリシス（溶媒分解）企業は、経済的採算性の確保と更なる設備投資のためには、リサイクル PET（食品グレード）の価格が 1 トン当たり 2,000 ユーロ超、場合によっては 3,000 ユーロに達する必要があると考えている。これは、1 トン当たり約 500 ユーロから最大 1,500 ユーロの「環境配慮への上乗せ価格」に相当する。概して、ICIS による市場価格分析でも同程度の価格差が確認されており、同社の報告によれば、リサイクルプラスチックとバージンプラスチックの価格差は主に 1 トン当たり 400 ユーロから 1,200 ユーロの範囲にある（ICIS 2024）。しかし、図 15 が示すように、ソルボリシスの主要な対象製品である食品グレードのリサイクル PET の最近の EU 域内価格は 1,500～2,000 ユーロの範囲に留まっていた。即ち、その価格水準は一般的なソルボリシスの単位当たりコストよりも低いことが多く、経済的採算性に必要とされる「2,000 ユーロ超」の範囲には達していない。現在の価格は、主にアジアからの輸入品や、EU 域内でメカニカルリサイクルによって製造された rPET（リサイクル PET）によって決定されている。SUPD や PPWR に起因するリサイクルプラスチック需要の拡大が、ソルボリシス事業者にとってより有利な市場価格への転換をもたらすかどうかは、今後の推移を見守る必要がある。

Figure 15. Total costs per tonne of output for solvolysis (as reported in the previous figure) and typical price ranges for virgin PET and food-grade recycled PET over last two years 2023-24



Source: Businessanalytiq

経済的採算性を評価するもう一つの指標として、ソルボリシス・リサイクル事業によって達成される内部収益率（IRR）が挙げられる。ヒアリングに応じたある EU のソルボリシス企業によれば、IRR が 9%に近い水準は採算性の面で「ギリギリのライン」と見なされる一方、10%であれば「十分」と判断されるとのことである（なお、Closed Loop Partners (2021) も、採算性の最低基準として IRR 10%を用いている）。しかし、あるステークホルダーの指摘によれば、この後者の水準（10%）を達成できるのは、現時点では公的資金による支援がある場合に限られる。なぜなら、このプロセスは単独では採算が取れないからである。

5.3.5. 将来的なコスト削減（規模の経済によるものを含む）

ステークホルダーや各種調査は、ソルボリシス分野の更なる集約化と成熟が進むことで、単位当たりの生産コストが低下するであろうという点で意見が一致している。現在、この分野は主に、実証・パイロット・初期の商業用プラントの段階から、処理能力 30～50kt（キロトン）規模の産業用施設へと移行する段階にある。例外的な事例として、イーストマン（Eastman）社はフランスに処理能力 110kt のソルボリシス（溶媒分解）プラントを建設する計画を立てており、更なる拡張計画も発表している。全体として、技術の向上、規模の経済、そして「学習効果」による操業効率の改善を通じて、コストの削減が見込まれている。

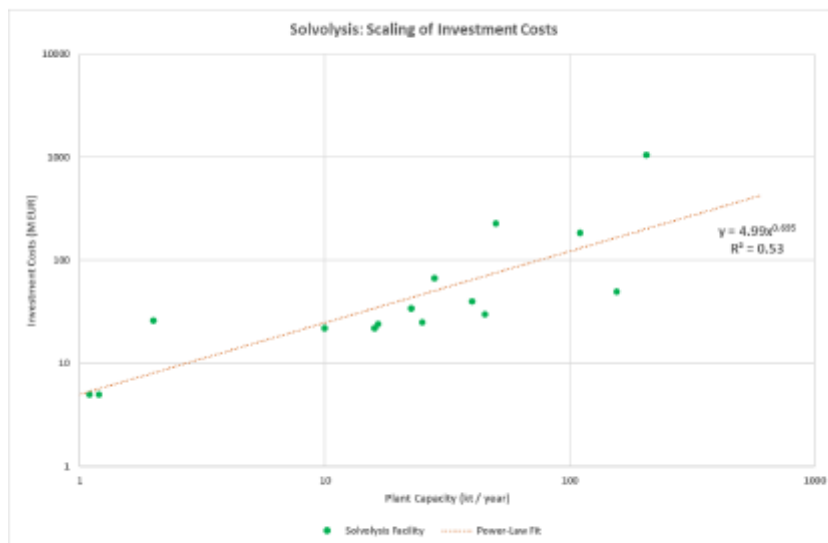
業界団体の Plastics Europe（2023 年）は、熱分解及び解重合技術全般の平均として、今後 20 年間で運転費（OpEx）が約 33%低下する可能性があると予測している。同様に、Lux Research（2022 年）も、米国・カナダにおけるソルボリシスについて単位コストの低下を予測しているが、その幅は 1 トン当たり約 50 米ドルに留まっている。最後に、Systemiq（2025 年）は、規模の経済と学習効果によって 15%のコスト削減が見込まれることを妥当

な前提としている。

処理能力、即ちプラントの規模は、コスト削減に寄与する要因として最も頻繁に挙げられるものの一つである。Uekert ら(2023 年)による学術研究では、基本シナリオ(処理能力 55kt)よりも小規模(18kt)又は大規模(110kt)なプラントを使用した場合のコストへの影響がシミュレーションされている。その結果、「プラントの規模は MSP(最低販売価格)に大きな影響を与える(酵素加水分解では+23%/-5%、グリコリシスでは+21%/-4%、メタノリシスでは+16%/-5%)」ことが明らかになった。これらの数値から判断すると、処理能力 55kt という規模は極めて効率的であると言える。なぜなら、この規模を倍増させても、最低販売価格の更なる改善効果はマイナス 5%程度に留まるからである。同様に、Sia Partners(2024 年)も、収益性を確保するための必要条件として、最低 40kt の処理能力を挙げている。

最後に、De Tommaso ら(2024)は、ソルボリシス(溶媒分解)を含む、既存及び計画中の様々なケミカルリサイクルプラントについて、オンラインで入手可能な全ての設備投資(CapEx)に関する公表データを収集・分析した。ソルボリシスプラントのデータのみを抽出した結果、その処理能力は平均 50kt(キロトン)、中央値 24kt であることが示された。図 16 に示す通り、単純な回帰分析からは 0.695 というスケーリング指数(規模の経済性を示す係数)が導き出され、無視できない程度の正の規模の経済性が存在することが示唆される。即ち、処理能力を 2 倍に拡大する場合、設備投資費は 100%増加するのではなく、平均して 62%($2^{0.695}$)の増加に留まることになる。但し、このデータは依然限られており(データ点数 15、うち処理能力 100kt 超は 3 件のみ)、一部は発表や予測に基づいている点に留意が必要である。更に、現在存在する、或いは発表されているケミカルリサイクルプロジェクトの多くは、経済的収益の最大化を主目的とするのではなく、技術的・経済的な実現可能性を評価・実証するため、敢えて小規模な設計がなされている。

Figure 16. Total capital investment costs announced by companies worldwide for solvolysis recycling plants of varying capacity



Source: own elaboration based on data from De Tommaso et al. (2024) using 2023 USD to EUR conversion rates). Best-fit Regression line based on power-law function, yielding exponent 0.695.

本調査の対象となった EU 域内の施設において、既存のプロジェクトを単に複製するという単純な戦略であっても、10%のコスト削減を達成できると考えられている。このコスト削減は、設備投資費（CapEx）の低減（エンジニアリング作業における「経験による学習」など）と、運転費（OpEx）の低減（熱の統合やプロセス最適化など）の両面から同程度にもたらされるものである。

5.3.6. ビジネスモデルに関する考察

経済的な実現可能性は、単なるプロセス上のコストだけでなく、長期的な製品引取契約や原料供給契約の締結可能性、更には需要や価格設定といったより広範な市場動向によっても左右される。あるケミカルリサイクル事業者は、「経済的に採算の取れる条件での、再生 PET の長期購入契約が不可欠である」と強調した。予測される収益源は、一般的に製品販売に基づくが、廃棄物受入手数料や技術ライセンス供与による収入が含まれる場合もある。また、短期・長期的な「環境価値に対する上乗せ価格」や補助金への依存度も、ビジネスモデルによって異なる。

Closed Loop Partners (2021) は、最終製品としてのポリマー（プラスチック樹脂など）やスペシャリティケミカル（機能性化学品）を生産するプロセスにおいて、最も高い利益率を達成できると示唆している。こうした製品は、包装材、自動車部品、その他プラスチック製品といった、最終消費者に近い市場への参入を可能にするためである。これらのモデルから得られる製品は、バージンポリマーと比較し、平均で約 30%のプレミアム価格で取引され

る可能性があり、一般的に原油価格の変動による影響を受けにくい傾向がある。

Sia Partners（2024 年）によると、ケミカルリサイクルプロジェクトへの投資に伴うリスクを低減するための戦略として、バリューチェーン全体に亘るパートナーシップの構築がしばしば行われている。これには、原料サプライヤー、廃プラスチック処理業者、技術プロバイダー、石油化学メーカー、そしてリサイクルプラスチックの最終ユーザーとの連携が含まれる。こうしたパートナーシップは通常、覚書（MOU）、共同投資、又は意向表明書（LOI）を通じて正式なものとなり、原料の供給確保や、生産された材料の引き取り契約（オフテイク契約）の締結に寄与する。一方、廃棄物管理会社や製油所との上流段階での契約は、ソルボリシス（溶媒分解）の分野ではあまり一般的ではない。こうした契約は、より大規模な転換技術（熱分解やガス化など）において特徴的なものである。民間投資のリスクを低減するもう一つの選択肢として、公的資金による支援の獲得があり、これは重要な前提条件と見なされている。

5.3.7. ソルボリシスの経済的実現可能性に関する結論

- EU において、ソルボリシスによるリサイクルの単位コストは、バージン PET やポリエステルの価格よりも大幅に高くなっている。JRC が把握したコスト試算では、1 トン当たり $2,150 \pm 500$ ユーロという範囲が示されている。これは、2023～2024 年時点の一般的なバージン PET 価格（約 1,000～1,100 ユーロ/トン）の 1.5～2.7 倍に相当する。現在の需要は、主に「環境価値に対する上乗せ価格」の自発的な支払いと、PPWR や SUPD といった規制に伴う将来の市場拡大への期待によって牽引されている。

- 利用可能なコスト数値には相当なばらつきや不確実性がある。その理由としては、本調査の執筆時点で EU 域内に産業規模のソルボリシス施設が存在しなかったことに加え、ビジネスモデル（例：MRF（材料選別施設）からの選別残渣を包装材向けにリサイクルする場合の方が、繊維から繊維へのリサイクルよりも低コストである）や技術の違いによって実際のコストが異なることが挙げられる。その結果、ここに示されたデータは主に事業計画、パイロットプラントからの推定、及び理論的モデリングに基づいたものであり、成熟した事業の実態を完全に反映しているわけではない。

- ユーティリティと原料費は、コストの大部分を占める要因だが、その変動幅は非常に大きくなっている。原料費は、場合によってはマイナスになることさえある。回収・選別システムの改善や、国境を越えた原料調達の円滑化が進めば、これらのコストは更に低下する可能性がある。

- 規模の経済は無視できないものの限定的であると見られる。EU で計画中又は建設中の産

業規模のソルボリシス（溶媒分解）プラントの多くは、年間処理能力 3 万～5 万トン (ktpa) で設計されており、10 万トン (ktpa) を目指すものは 1 件のみである。

- ソルボリシス・プロジェクトの経済的実現可能性を確保するには、原料へのアクセス確保と、生成物の取引契約の締結が極めて重要である。場合によっては、合併事業などを通じて、取引企業がプロジェクトの体制に直接組み込まれることもある。

- 公的資金による支援の有無は、新たなソルボリシス投資の経済的実現可能性を許容可能な水準（例えば、内部収益率 10%未満から 10%以上へ）に引き上げる上で、決定的な違いをもたらす可能性がある。

5.4. 主要なケミカルリサイクルプロセスの経済的実現可能性に関する結論

本章では、ポリオレフィン及びスチレン系樹脂を対象とする熱分解（パイロリシス）と、縮合系ポリマー（特に PET／ポリエステル）を対象とするソルボリシスについて、その基本的なコスト構造とコスト変動要因を分析した。全体として、これら 2 つの手法に関して以下の重要な結論が導き出される：

- 技術の成熟度：熱分解もソルボリシスも、メカニカルリサイクルと同等の産業的成熟度には達しておらず、持続的に利益を生む経済的な操業実績も示されていない。

- コスト：いずれのプロセス群においても、生産される製品はバージン材やメカニカルリサイクル材との価格同等性を達成できておらず、その生産コストはバージン材相当品の少なくとも 1.5 倍、典型的には 2～3.5 倍に達す。

- PET 向けソルボリシスは、同ポリマーのメカニカルリサイクルと直接競合するが、混合素材（例：ポリコットン混紡繊維）やメカニカルリサイクル工程での選別除外品といった低品質な原料を処理できる可能性があり、それによって新たな市場を開拓できる可能性がある。

- ポリオレフィン及びスチレン系樹脂向けの熱分解は、食品接触用途など厳しい品質基準が求められる用途向けのポリマーを生産できる可能性がある。こうした用途は、これらのポリマー群の従来のメカニカルリサイクルでは実現が極めて困難なものである。従って、ここでの分析対象となった 2 つの技術群に基づけば、ケミカルリサイクルによる材料は、少なくとも短中期的には、バージンポリマーよりも 1.5 倍から 3.5 倍高い価格に留まるとするのが重要な結論である。これは、セクション 3.1 で論じた「厳しい市場」の観点から見ると、バージン材の生産やメカニカルリサイクルに対して競争力がないことを意味する。現在の生産規模は極めて限定的であり、「緩やかな市場」の環境下で、相当な「環境価値に対する上乗せ価格」（100～200%）を支払う意欲があることに依存する。そのため、PPWR や SUPD

によって生み出される規制主導の需要がなければ、ケミカルリサイクルの大規模な拡大は起こりそうにない。

次章では、特定の規制環境下において、ケミカルリサイクル技術の市場がどの程度形成され得るかについて検討する。

6. 市場及び規制に関する側面

本章では、規制やその他の制約を受ける市場において、ケミカルリサイクル技術がどのような条件下で役割を果たし得るかについて論じる。

6.1. 規制の枠組みに関する予備的考察

セクション 2.3.3 で述べたように、EU における規制要件は、リサイクルプラスチック材料（特に食品グレードや食品接触用途のプラスチック）への需要を生み出しているが、既存のメカニカルリサイクル技術ではその需要を部分的にしか満たすことができない。食品接触用包装材向けの再生ポリオレフィンなど、特に高度な品質が求められる用途向けのリサイクルポリマーは、現時点では事実上存在しておらず、ケミカルリサイクルはこのギャップを埋める手段となり得る。しかし、だからといって直ちにケミカルリサイクルの製品に対して顧客がどのような価格でも支払うような、事実上の「囲い込み市場」が形成されるわけではない。

実際、ケミカルリサイクルは、この市場への供給を巡って競合する潜在的な解決策の一つに過ぎない。

更に、第 5 章の結果に基づけば、少なくとも中期的には価格がバージンポリマーの 1.5～3.5 倍超に留まると予想されるため、他の素材が市場に参入する機会が生まれることになる（後述の 6.3 参照）。

従って、以下のセクションでは、今後数年間の市場環境に影響を及ぼす不確実な要因を検討し、ケミカルリサイクルにとっての競争環境を決定づける可能性のある市場の進展シナリオを分析する。

6.2. EU のケミカルリサイクル部門における懸念事項

本調査の一環としてヒアリングを行った業界関係者は、ケミカルリサイクルの経済的実現可能性に影響を及ぼし得るいくつかの市場的・規制的課題を指摘した。以下では、これらの課題について、概ね指摘の多かった順に報告する。これらの課題のいくつかは、Systemiq (2025) によるポリエステルリサイクルの規模拡大の障壁に関する最近の調査でも取り上

げられている。EU のケミカルリサイクル市場の状況に対するこれらの課題の関連性や経済的影響をより深く理解するには、更なる分析が必要である。但し、これらの課題に関する完全な評価は、本調査の範囲外となる。

1) 「シングルユースプラスチック指令」[98]の文脈において、リサイクル材含有率の計算ルールに関する欧州委員会施行決定で最近採用された、マスバランス方式。こうしたマスバランスに関するルールは、二次原料(廃プラスチックなど)と一次原料(原油やナフサなど)を混合し、材料と燃料を併産するケミカルリサイクル技術にとって、極めて重要な経済的要因となる。これは特に、熱分解や、製油所と統合されたケミカルリサイクルの手法において顕著である。

2) 「廃棄物でなくなる」規則。ケミカルリサイクルに関わるステークホルダーは、法的リスクを低減するため、中間生成物が「廃棄物としての法的ステータスを失う」ことの明確化と、EU 全域での基準の統一を求めている。例えば、解重合によって得られるモノマーや熱分解油が「廃棄物でなくなる」と認められれば、それらを利用する後続工程の事業者は、特定の許可を必要とする「廃棄物処理事業者」とは法的に見なされなくなる。また、ステークホルダーは、前処理・圧縮された廃プラスチックや繊維廃棄物などの特定の原料についても「廃棄物でなくなる」と認められれば、国境を越えた自由な調達が可能になり、現在最大のコスト要因の一つとなっている原料費を低減できると指摘している。EU 全域での基準統一は、単一市場における公正な競争のためにも必要と考えられている。[99]

3) リサイクル材使用義務への不適合が具体的にどのように監視され、どのような罰則が科されるかに関する規制の明確性。例えば、PPWR では、加盟国に対し「実効性があり、均衡がとれ、かつ抑止力のある」罰則を設けるよう規定しているが、具体的な規則は未定のままである。もし想定される罰則が軽すぎれば、一部の生産者は、不適合のままにすることが最も経済的に有利な戦略だと判断する恐れがある。そうなれば、リサイクル処理能力の増強に向けた現在の投資が経済的リスクにさらされることになる。

4) EU の下位法(施行規則等)の策定が遅れていること(例:「包装及び包装廃棄物規則」に基づくマスバランス算定ルール、モニタリング・検証、輸入に関する適用範囲など)。下位法の内容が重要であることは言うまでもないが、策定の遅れによってリサイクル材含有率の目標達成までの期間が短縮される一方で、業界における設備能力の増強には数年(あるステークホルダーによれば最大 5 年)の準備期間を要するという事実があり、この両者の間で緊張関係が生じている。

5) 公的資金による支援の利用可能性。技術の成熟度が依然として低く、市場の不確実性が

続いている現状では、新たなケミカルリサイクル・インフラへの民間投資に伴うリスクを低減するため、公的な資金支援を得ることが必要だと考えられている。リスク・リターン比率は、(現時点では) 資本市場の投資基準に見合う水準にない。Systemiq (2025, p.30) によれば、リスク低減を行うことで、ソルボリシス(溶媒分解)プロジェクトの平均資本コストを現在の 17.5%から 12%に低減できる可能性がある。

6) 廃棄物焼却施設を EU 排出量取引制度 (EU ETS) の対象に含めることは、EU 域内のプラスチック廃棄物原料を巡る競合他社との間で公平な競争条件を確保する合理的措置と見なされている。即ち、焼却施設でのエネルギー回収を目的としたプラスチック焼却において、事業者が温室効果ガス排出量に応じた費用を負担しなければならないとすれば、その経済的魅力は低下し、プラスチック廃棄物市場における購買力も低下する。その結果、市場価格を押し下げる圧力がかかり、ケミカルリサイクル事業者が処理能力を有していれば、原料の調達が容易になる可能性がある。

7) リサイクルプラスチックの含有率としての信頼性を担保するために、「包装及び包装廃棄物規則」などにおいて、単にリサイクルされているということ以外に、新たな追加的な持続可能性要件が課される可能性について、不確実性や懸念が存在する。

8) 異なる規制が(自動車や包装といった)異なるセクターに同時に影響を及ぼす一方で、コンプライアンスの選択肢(及びリサイクルプラスチックの供給量)が限られているため、同一のポリマーをめぐるセクター間競争が生じ、供給のボトルネックや価格への影響を招く恐れがある。

9) 輸入されたリサイクルプラスチックが無条件に受け入れられるかどうかについて不確実性がある。特に、低品質な輸入リサイクルプラスチックや、ポストコンシューマー廃棄物としての由来が疑わしい、或いは検証されていない輸入リサイクルプラスチックによるダンピングへの懸念がある。

10) ケミカルリサイクル施設に関する許認可手続きの簡素化。これは、ケミカルリサイクル・インフラのより迅速かつ経済的な開発(資産が稼働を開始するまでの期間の短縮)を促進するものと見なされる[101]。

11) バイオベースプラスチックの利用及び規制に関する不確実性。多種多様なバイオベースプラスチックは、ケミカルリサイクルされたプラスチックの代替品となり得る一方で、競合相手ともなり得る存在である。更に、ポリ乳酸 (PLA) などの新規バイオベースポリマーがプラスチック廃棄物(原料)に含まれている場合、それらはケミカルリサイクル工程を複

雑化させ、コストを増大させる要因となる。

12) より広範に見ると、EU のプラスチック部門（プラスチック生産者である石油化学産業やプラスチックリサイクル業者を含む）は現在、深刻かつ差し迫ったキャッシュフローの課題に直面しており、中長期的な検討を行う余裕が殆どない状況にある。EU 域内のエネルギー価格の高騰やアジアからの輸入品との競争激化などが重なり、今後数ヶ月間で事業継続が困難になる企業が増加し、スチームクラッカーのような大規模な生産設備（エチレンプラント）が操業停止に追い込まれる事態も生じている。こうした状況下では、2030 年に施行される目標への適合に向けた投資を検討する余地は殆どない。

6.3. 対象市場における適合戦略の可能性

前述の通り、ケミカルリサイクルは、リサイクル材の需給ギャップを埋める重要な役割を担うと位置づけられている。特に、食品グレードのポリオレフィンやスチレン系樹脂においてその役割が期待される（ポリエステルなどの縮合重合体については、メカニカルリサイクル技術で需要の大部分を賄えるため、ケミカルリサイクルの重要性は相対的に低くなる）。

「PPWR」や「SUPD」の義務対象となる包装材料メーカーの視点から、これらの義務に対応する選択肢（理想的にはコストを最小限に抑える道筋）を予測する。

なお、留意点として、本稿執筆時点では、リサイクル材使用義務の実施を決定づける一部のパラメータが未定であり、それらが以下の分析に影響を及ぼす可能性がある。これには、PPWR の下でリサイクル材として算入可能なケミカルリサイクル製品の量の正確な計算ルール（特に 3.4.2 で論じた「マスバランス方式による割り当て」）や、法規制の一部（包装・包装廃棄物規則、車両設計の循環性要件に関する新たな規則）において代替手段として認められるもの（バイオベース製品、輸入リサイクル材の適格性など）が含まれる。より広い視点では、競争環境や技術動向が変化し、新たなアプローチが登場する可能性もある。

従って、食品接触用途など（特にポリオレフィン）におけるプラスチックのリサイクル材使用義務を満たすための適合戦略としては、以下のようなものが考えられる（コストや複雑さの順ではなく、ビジネスモデルへの変革の度合いが低いものから高いものへと大まかに並べる）：

- リサイクル材として算入可能な「ドロップイン（既存設備でそのまま使用できる）」型プラスチック素材の採用。これには以下が含まれる：

- o メカニカルリサイクルされたプラスチック（食品グレード要件などを満たせることを前提とする）。例えば、高度なメカニカルリサイクル[102]、管理されたバリューチェーンや小規模な循環（スモールループ）から得られる追跡可能なリサイクル材、或いはその他の革新的なプロセスなど。

o バイオベースプラスチック（リサイクル材含有率の義務要件[103]に対し、法的に認められた代替手段となる場合）。

o ケミカルリサイクルされたプラスチック。

o 上記はいずれも、現地調達要件や輸入時の原産地証明に関する追加要件に応じて、現地で調達することも、輸入することも可能。

- 包装設計をある種類のプラスチックから別の種類のプラスチックへ変更すること（変更後のプラスチックもリサイクル材含有義務の対象となるが、調達がより容易又は安価である場合）。例えば、HDPE をメカニカルリサイクル又はケミカルリサイクルされた PET に置き換えることなど；

- 包装設計をある種類のプラスチックから、リサイクル材含有義務の対象外である別の種類のプラスチック（例：堆肥化可能プラスチック）へ変更する。

- 包装設計をプラスチックから、プラスチックの使用量が少ない、或いは全く含まない代替包装材料（液体用板紙、ガラス、紙、金属、（非プラスチック）繊維など）へ変更すること。

- 包装やプラスチック部品を削減又は排除するための再設計。これには、製品設計や製品機能の変更（例：機能の簡素化や製品性能の抑制 [強度は劣るが軽量なボトルにするなど]）が含まれる可能性がある。また、耐久性を確保するために単体重量は増えるものの、複数回の使用サイクルによってバージン及びリサイクルプラスチックの総必要量を削減できる、リユース可能なプラスチック包装の導入も含まれる可能性がある（例：デポジット返還システム付きのリユース可能プラスチックボトル）。

- リサイクル材含有率の目標を達成するために、機能に直接寄与しないリサイクル材の配合量を増やすような再設計。これには、重量の増加や、リサイクル材で作られた外装用装飾品などの非必須部品の追加などが含まれる可能性がある。

- 非遵守。遵守にかかるコストが非遵守によるコスト（罰金など）を上回る場合、一部の生産者にとっては、単に非遵守のペナルティを支払う方が合理的である可能性がある[104]。

現在の不確実性を踏まえると、どのような市場動向が、前述の（或いは今後出現する可能性のある）導入経路に影響を与えるかを予測することは不可能である。ましてや、ケミカルリ

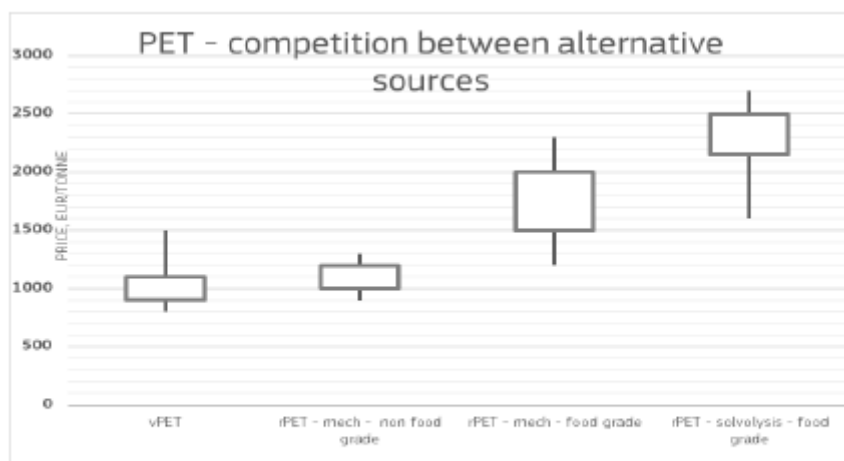
サイクルといった特定の技術に関する市場成長をモデル化したり予測したりすることはなおさら困難である。しかし、導入の主な推進要因（及び不確実性の要因）は、今後も以下のとおりであると考えられる：

- 原油価格、及びその他の原材料・エネルギー価格
- 貿易協定、特にリサイクル材の貿易に対する障壁
- 規制の枠組み、その適用範囲、及び規制が設定される時期
- 新興技術及び技術革新の進展速度

6.4. 主要なリサイクルポリマーをめぐる競争環境

上記（図 15 などを参照）を踏まえ、第 5 章で分析した 2 つの主要な材料タイプ（PET 及びポリオレフィン）について、ケミカルリサイクル材の価格帯と競合し得る技術の推定値を以下に示す。なお、以下に示す数値は、現在のデータと将来のコスト推定値を組み合わせたものであり、不確実性の幅が広いこと留意されたい。これらはあくまで目安として解釈すべきものであり、各技術の将来的な実現可能性に関する確定的な推定値として捉えるべきではない。

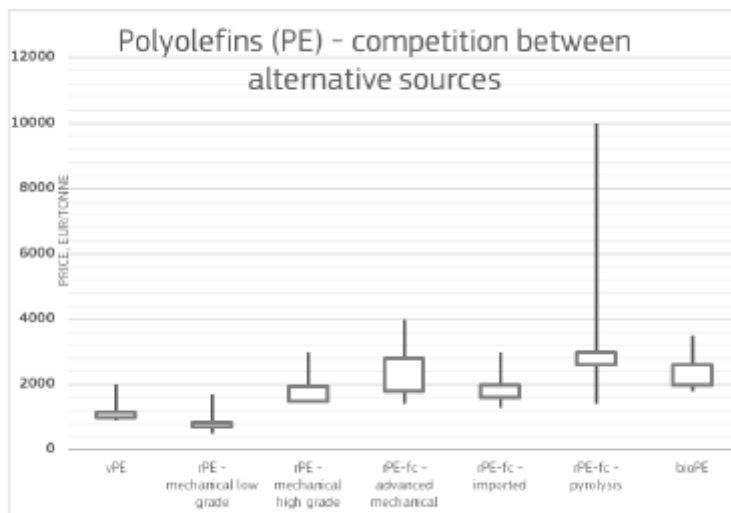
Figure 17. PET competitive landscape. vPET: virgin PET. rPET: recycled PET.



N.B.: estimated price ranges. Central box: current (2020-2025) price range. Max value: maximum observed or theoretical value. Min value: potential future (2030) price point in optimistic scenario

Sources: own compilation of data from industry sources, historical market prices (Businessanalytiq), own modelling²⁰⁵

Figure 18. HDPE: competitive landscape. vPE: virgin HDPE. rPE: recycled HDPE. fc: food contact.



NB: top of range for pyrolysis is premised on hypothetical, unfavourable mass-balance allocation rules (cf. §5.2.4)
 Sources: own compilation of data from industry sources, historical market prices, own modelling presented in this report¹⁰⁶

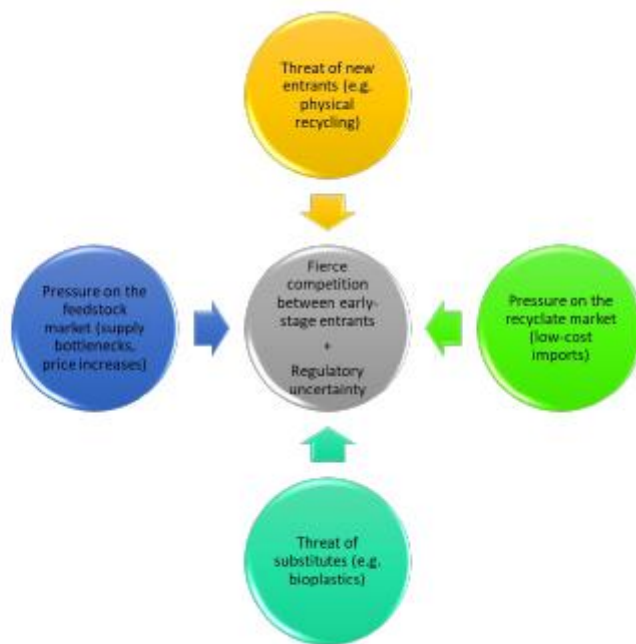
上の図が示すように、ケミカルリサイクルポリマーの価格が高止まりすると見込まれることは、他の技術が市場に参入し、例えば食品接触用途向けリサイクル材の要件によって生み出される需要機会に対して代替ソリューションを提供するという、大きな競争の余地を生み出す。即ち、その需要を満たす、或いはそれに対応できるポリマーのカテゴリー（又はソリューション全般）として、ケミカルリサイクル材だけを想定するのは不正確であるということである。特定の技術が互いに競合し、それぞれ異なる市場ニーズ（ニッチ）を満たすことに貢献する可能性が高いと言える。例えば、高度なメカニカルリサイクルは、硬質ポリオレフィンのリサイクル材を一部提供できるかもしれないが、軟質には対応できない可能性がある。一方で、バイオベースポリマーは別の用途に使用されることになるだろう（§ 6.3を参照）。

従って、ケミカルリサイクルされたプラスチック材料に対する需要は、その生産コストがいかなるものであっても、「確実なもの」とは見なすべきではない。

6.5.ケミカルリサイクルの競争上の位置づけ

以上の点を踏まえ、M.ポーターが提唱した「ファイブフォース（5つの力）」モデル（Porter, 1979）に基づき、ケミカルリサイクルの位置づけを以下にまとめる。

Figure 19. Competitive environment of chemical recycling



Source: own elaboration – adapted from Porter's five forces model

メカニカルリサイクルとケミカルリサイクルの相対的な役割について前述した内容（セクション 1、2.1、2.3.4.1 を参照）を再考すると、市場の動向次第では、これら二つの技術は互いに補完し合う関係にも、競合する関係にもなり得ると考えられる。PET やポリオレフィンを対象として、メカニカルリサイクルとケミカルリサイクルを補完的に統合する取り組みは既に発表されているが[107]、原料をめぐっては、ある程度の重複や競合が生じる可能性がある。ケミカルリサイクルは、メカニカルリサイクルの選別工程で生じる一部の「不適格品」を受け入れられる可能性がある。しかし、こうした不適格品はケミカルリサイクル事業者が低価格或いはマイナス価格（処理費を受け取る形）で調達できるというコスト上の利点があるものの、その利点は、追加のエネルギーコストや、更なる選別・前処理にかかる費用によって部分的に相殺されてしまう。現在処理している原料については、特に直接食品接触を伴わない用途向けのリサイクル材を製造する場合、メカニカルリサイクルが引き続きコスト面での優位性を保つだろう。一方で、高度なメカニカルリサイクル技術が、食品接触用途の再生ポリオレフィン材といった市場の一部をどの程度獲得できるかについては、依然として不透明である。

7. 結論と考察

7.1. 主な知見

ケミカルリサイクルは、多岐に亘るプロセスや技術を包含している。これらは、処理可能なポリマーの種類（投入物及び産出物）、達成可能な収率、経済性といった基本的なパラメー

タにおいてそれぞれ異なる。本分析で取り上げた主なプロセス群は、付加重合系ポリマー（ポリオレフィン／ポリスチレン）を対象とする熱分解（熱的液化）と、縮合重合系ポリマー（特にポリエチレンテレフタレート：PET）を対象とするソルボリシス（溶媒分解）の2つである。

既存の（メカニカル）リサイクルプロセスと比較したケミカルリサイクル技術の潜在的な利点は、メカニカルリサイクルが困難又は不可能な特定の種類のポリマーや混合ポリマーを受け入れ、食品包装のような衛生管理が厳格に求められる用途を含め、高品質（バージン材と同等）な産出物を製造できる点にある。しかし、熱ケミカルリサイクル技術（熱分解、ガス化）は併産プロセスであり、一般的にマテリアルリサイクルとしての収率は比較的低くなる。そのため、これらは純粋なリサイクルプロセスというよりは、リサイクルとエネルギー回収を組み合わせたプロセスと見なすことができる。

具体的には、熱分解プロセス（ポリオレフィン／スチレン系樹脂）について、以下の主な特徴が確認された：

- これらの高温併産プロセスは、マテリアルリサイクルによる産出を主目的として最適化されているわけではない。物理化学的な制約により、プラスチックからプラスチックへのマテリアルリサイクル率は50%以下に留まる傾向がある。最も基本的な製油所統合型熱分解プロセスの場合、収率の内訳はおおよそ、マテリアルリサイクルが3分の1、燃料への転換又はエネルギー回収が3分の1、熱及び物質の損失が3分の1となっている。
- 理論上はマテリアル収率を向上させること（50%超、理論的には70%超）は可能だが、そのためには資源（エネルギー）消費の増大やプロセスの複雑化を伴い、単位コストへの影響も不透明である。
- マテリアル収率が比較的低く、エネルギー需要が高く、更に品質向上処理などの追加コストがかかるため、熱分解によって製造されるリサイクルプラスチックは、バージン材と同等の製品に比べ、依然大幅に高いコスト（1.4倍から3.7倍以上）がかかる見通しである。

ソルボリシスプロセス（PET／ポリエステル生産）については、以下の点が主な結論となる：

- 本稿執筆時点で、ソルボリシスにはいくつかの異なる手法が存在し、パイロット規模又は商業規模での確立が進められている。これらは、異なるビジネスモデル（例：包装リサイクル対繊維リサイクル）の下で競合している。コスト効率の面で他よりも有望視される手法があるものの、コスト試算は情報源によって異なり、全体として依然として不確実性が残っている。

- ソルボリシス（溶媒分解）プロセスは高い収率を実現しており、プラスチックからプラスチックへのリサイクル率は 90%前後、或いはそれ以上となっている。

- しかし、特にエネルギー価格の高騰や原料調達（メカニカルリサイクルとの競合）といった要因により、EU 市場における経済的採算性の確保は依然として困難な状況にあり、バージン PET と比較してコストが 1.5 倍から 2.7 倍に上昇する。

加えて、特定の技術に依存しない一般的な指摘事項もいくつか挙げられる。これらは供給側と需要側の要因に分類できる。供給側の要因については、以下の点が挙げられる：

- 技術の成熟度：熱分解（パイロリシス）も溶媒分解（ソルボリシス）も、メカニカルリサイクルと同等の産業的成熟度には未だ達していない。EU 域内では、公称能力（設計上の処理能力）で稼働し、かつ採算が取れている大規模事業は依然存在しない。

- コスト：どちらのプロセス群から得られる製品も、バージン材やメカニカルリサイクル材との同等のコスト水準を達成できていない。

- 経済的実現可能性は、市場がこのコスト差を吸収できるかどうかにかかっている。具体的には、バージン材と同等の品質（特に、食品や医薬品などとの接触が想定される用途に適した品質）を持つリサイクルプラスチックに対し、コストの割増分を支払う意欲（自主的又は義務的なもの）が市場にあるかどうか鍵となる。

- 短期から中期的には、特に熱化学的プロセスにおいて、コスト競争力を飛躍的に向上させる可能性は限られていると見られる。

需要側については、以下の点が認められる：

- EU の規制上の義務により、接触用途に適した材料を含む再生ポリマーに対し、年間約 100 万トン規模の市場需要が創出されている。

- ケミカルリサイクルは、法的義務を遵守するための一つの技術的選択肢である。しかし、その大幅なコスト増は、他の解決策がこの規制主導の市場に参入する機会も生み出している：

- そうした解決策には、あるポリマー種から別のポリマー種への転換、プラスチック使用量の削減や非プラスチック材料（紙複合材、ガラス、金属など）への移行、製品設計や機能の変更（リサイクル材の配合要件を満たすための重量増加など）、或いは不遵守に伴う罰金の受容などが含まれる可能性がある。

o 厳格な代替モデル（既存材料を同等のリサイクル材に置き換えるモデル）の枠内であっても、市場の一部においては、他の技術が同等のポリマーを競争力のある価格で提供できる可能性がある。例えば、高度なメカニカルリサイクル、バイオベースポリマーの生産、或いは新興の溶媒ベースの物理的リサイクル技術などが挙げられる。

• 従って、ケミカルリサイクルされたプラスチック材料への需要は、その生産コストがいかようであっても「確実なもの」と見なすべきではない。

最後に、中長期的な見通しについては、以下の点が認められる：

• 現在の EU 市場環境（エネルギーや原料価格の高騰、規制の不確実性、輸入ポリマーとの競争）は短期的な課題を生み出しており、将来の規制義務に向けた長期的な計画策定を妨げている。

• 規制上の制約が発効する時点で、ケミカルリサイクルが市場において最終的にどのような役割を果たすことになるのかは、現時点では不明確である。

7.2.政策への示唆

政策面での示唆や、バージンポリマー及びリサイクルポリマーの現在の市場状況に関し、複数のリサイクル事業者や石油化学加工業者が次のように指摘している。即ち、現在は短期的な事業存続に手一杯であり、リサイクル材の含有義務化（ケミカルリサイクル設備への投資の可能性を含む）に関連する長期的な計画策定といった課題に、実質的に取り組む余裕がないという点である。

ステークホルダーからの意見に基づくと、同セクターで見られる現在の事業破綻の根本的な原因には、以下のようなものがある：

- エネルギー及び原料コストの高騰
- EU 域外からの輸入品との競争激化（これには、トレーサビリティへの懸念や、国家補助に起因するコスト上の優位性が伴う場合がある）；及び
- EU 規則の実施をめぐる規制の不確実性；

その結果、PPWR や SUPD の義務によって生じるリサイクル材の需要を、地元（EU 域内）の生産能力で満たせるかどうかという議論は、もしその間に EU 域内でのプラスチック生産が採算の取れないものとなり、かつ何らかの保護措置も講じられない場合、実質的に無意味なものとなる可能性がある。

進行中の政策動向に関しては、ケミカルリサイクル由来のリサイクルプラスチック含有量の算出を明確にするため、SUPD 向けのマスバランス配分ルールが策定済みであり、PPWR 向けについても現在議論が行われている。しかし、ステークホルダーからは、リサイクル材として算入可能な材料比率の算出における厳格さがリサイクル材の高コスト化を招き、バージン材やメカニカルリサイクル材とケミカルリサイクル材との間のコスト格差を拡大させているとの指摘がなされている[108]。更に、リサイクルプラスチック含有量の法的な代替物としてバイオベースプラスチックを使用することに関するルールも、当面は不明確なままである。

最後に、より広範な政策及び市場の観点から言えば、規制上の制約によって、従来の（ケミカルリサイクルに拠らない）代替品よりも著しく高価な材料の市場導入が強制される状況を想定した場合、影響を受けるバリューチェーン全体への波及効果、即ち、コスト増が市場の各主体間でどのように分担されるか、更には当該措置がもたらす社会全体の便益についても検討する必要があるだろう。

7.3. 今後の研究の方向性

我々の調査結果及び前節で概説した潜在的な影響を踏まえ、今後の研究では以下の点について検討が可能である：

- より高コストな材料の市場導入を強制することによる社会的コスト及び分配への影響の調査：誰がその費用を負担するのか？ コストはバリューチェーン全体（例：リサイクル事業者、石油化学産業、日用消費財メーカー、小売業者、最終消費者など）でどのように分配されるのか？ ステークホルダーは、短期的・中期的・長期的なコンプライアンス戦略や回避戦略をどのように決定・策定するのか？
- （長期的かつシステムレベルにおいて）地球規模の炭素会計に基づき、一次燃料生産、一次材料生産、及び二次材料・燃料生産の間で、化石資源の利用をどのように最適化できるかの調査。例えば、EU における化石資源利用の大幅な削減が見込まれる長期シナリオにおいて、リサイクルとエネルギー回収はそれぞれどのような役割を担い得るのか？

（以下、略）

参考資料

付録

付録 A－熱分解プロセスのコストモデル

