

1. 装置の詳細説明

本装置は、リサイクルされずに産業廃棄物となっていた廃プラスチックをケミカルリサイクルする装置である。図表1に本装置の外観写真を示す。全体構成図は図表2のとおり。

- ①破砕機・・・塊やフィルムなどあらゆるものを破砕
- ②空気搬送・・・破砕したプラスチックを自動搬送
- ③搬送ルーダ・・・溶かしながら反応釜まで搬送
- ④反応釜・・・400～500℃で分解
- ⑤生成油蒸留塔・・・重質成分を反応釜に戻す（特許取得）
- ⑥分留装置・・・分解ガスを設定した温度に冷却し、必要な成分の油を得る
- ⑦オフガスライン・・・油にならないガスを燃料として使用（特許申請中）
- ⑧一次受けタンク・・・生成油の一次受けタンク
- ⑨静置槽・・・生成油の成分チェックを行う
- ⑩残渣（炭化物）抜出装置・・・生産を止めることなく、残渣を抜き出す（特許申請中）

上記①、②は市場から高性能な装置を探した。③は押出機メーカーに油化装置専用の仕様を依頼し製造を委託した。④～⑩の自社開発油化装置と組み合わせることで、ケミカルリサイクルシステムとした。

本装置の特徴として、⑤生成油蒸留塔を設置することで、分解が十分でない重質分を反応釜に戻しているため、生成される油は低温でも固化しない油となる。従来の油化装置では常温でも固まる油が生成されるため、輸送や使用用途が制限されていた。

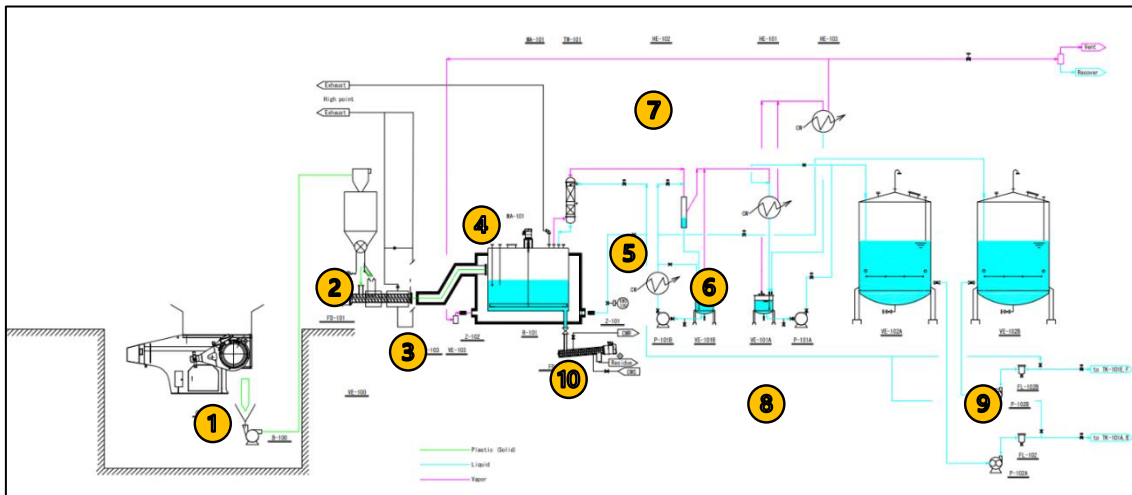
本装置であれば、輸送や使用用途に問題が生じることはない。また、自社で分析機器を所有しているため、製造した生成油の品質のチェックをリアルタイムに行うことができる（図表3）。⑨静置槽では、生成油の分析結果がでるまで貯蔵しておき、成分に問題ないことを確認の上、貯蔵タンクに移送する。

廃プラスチック投入量の約15%は分解ガスを冷やしても油にならない⑦オフガスとなる。発生したオフガスを④反応釜の燃料として使用することで、ランニングコストを抑えることができ、環境にも配慮した装置にすることができる。

⑩残渣抜出装置は、一定量（投入量の3～5%）発生する残渣（炭化物）を取り出す装置である。従来は、残渣を取り出すために反応釜内に人が入り、回収作業が必要となるため、装置を止めて温度が下がるまで約8-10時間待つ必要があった。さらに生産を再開する際には、3～4時間の昇温作業が必要となる。そのため従来式のバッチ方式では生産量に制限があった。



図表 1 油化装置外観写真



図表 2 全体構成図

図表 3 分解油分析器及び項目一覧

分析項目	分析装置	分析方法
成分分析	ガスクロマトグラフ	社内法
引火点	ペンスキーマルテンス密閉型引火点測定装置	JIS K 2265
流動点	手動流動点測定器	JIS K 2269
水分	カールフィッシャー水分計	JIS K 2275
動粘度	キャノン・フェンスケ動粘度計	JIS K 2283
蒸留性状	自動蒸留試験装置	JIS K 2254
密度	浮標密度計	JIS K 2249
残留炭素分	マイクロ残留炭素分試験機	JIS K 2270
灰分	電気炉	JIS K 2272
酸価	自動滴定装置	JIS K 2501
塩基価	自動滴定装置	JIS K 2501
セタン指数	算出式	JIS K 2280
全硫黄	蛍光 X 線分析装置	JIS K 2541
全塩素	蛍光 X 線分析装置	社内法
全窒素	微量元素分析装置	JIS K 2609

本システムは最小限の降温（約2時間程度）で、残渣抜出装置による残渣排出を行い、直ぐに連続生産を開始することができる。よって、従来式のバッチ生産方式と比較して約2倍の生産量が可能となった。

上記のような運用を行うことによって、高効率な運転と生成油の品質をコントロールすることが可能となったため、廃プラスチックを油に戻して、もう一度、プラスチックを作る原料（原油代替）として化学会社での使用が実現し、資源循環が可能となった。

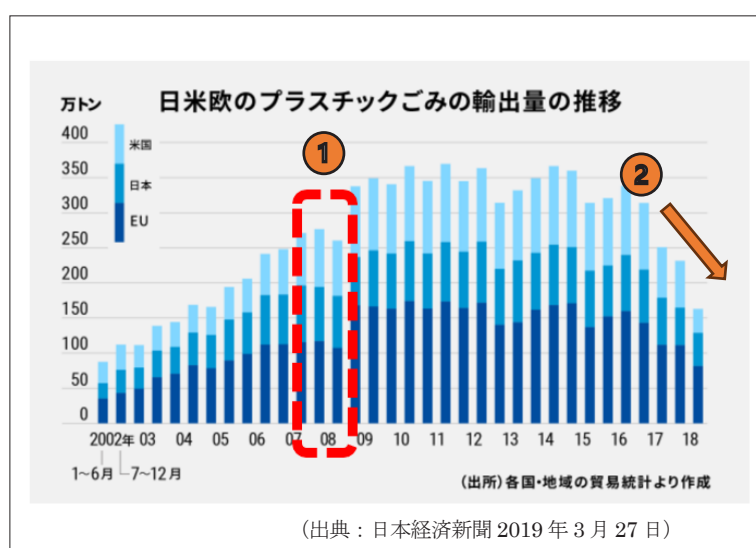
2. 開発経緯

(1) 開発経緯

弊社は、設立当初より、廃プラスチックを含むプラスチック原料の取り扱いを行っている。プラスチック製品工場から排出される廃プラスチックを有価物として購入しマテリアルリサイクルを行っている。マテリアルリサイクルでは廃プラスチックを新たなプラスチック製品の原料となる再生ペレットに加工し、国内・外に販売を行っている。

ケミカルリサイクルを研究するきっかけとなったのは、2008年リーマンショックによる世界的経済の混乱時である。原油価格の暴落をうけてプラスチック原料も大幅に価格が下がったことでマテリアルリサイクルも大混乱に陥った。さらに顧客の生産調整も頻発し、再生ペレットをはじめプラスチック原料の販売が滞った。このような現象は世界中で起こっており、その際に大きな問題となったのが、マテリアルリサイクル用に有価物で売買されていた廃プラスチックが行き場を失い、産廃物になってしまうことであった。

この頃、廃プラスチックを日本から中国やベトナムなどアジアに輸出して、アジア等の輸入国でリサイクルする流れが旺盛であった。それが経済の混乱によって輸出が滞ってしまい（図表4_①）、有価物で売買されていた廃プラスチックは行き場を失い、産業廃棄物へ一変してしまった。その後も、2017年に中国が環境汚染を防ぐため輸入を禁止したことから、廃プラスチックの輸出は大幅に減少している。（図表4_②）



図表4 廃プラスチック輸出の推移

当時、廃プラスチックを有価物として取り扱えるリサイクル方法は、マテリアルリサイクル以外には無く、マテリアルリサイクルの市場からあふれたものは、処理費用を支払って産業廃棄物（サーマルリサイクルを含む）にするほか選択肢が無かった。

当社は「廃プラスチックを有価物として扱える他のリサイクル方法を模索すべきではないか。」と思い調査を開始し、ケミカルリサイクルに行き着いた。さらに、国内で発生する廃プラスチックは国内で処理したい、との思いもあった。

ケミカルリサイクルを始めるにあたり、まずは日本国内でマテリアルリサイクルされていない、廃プラスチックをケミカルリサイクルの対象原料とした。

対象の廃プラスチックは輸出されているか、またはサーマルリサイクルで処理されている。その中からケミカルリサイクルの材料として適している PP 及び PE、PS 樹脂を選定し、装置開発の取組みを始めた。開発当初より、廃プラスチックを有価で購入してケミカルリサイクルできる油化装置を開発し、産業廃棄物ではないケミカルリサイクルのビジネスモデルを目的とした。

以下に開発経緯を示す。

2010 年～2011 年	市場調査、ラボ機製作、実験 ・市場調査：ケミカルリサイクル対象の材料調査 ・ラボ機製作：触媒接触分解方式（油化）に取り組む。 ・実験：実験と分析、改良を繰り返す。
2011 年～2015 年	実証機（1 号機、2 号機、3 号機）製作、実験 ・実証機 1 号機：触媒による接触分解方式の油化装置。 実験と改良を繰り返し行う。 ・実証機 2 号機：触媒による接触分解方式の油化装置。 1 号機の改良点を 2 号機に反映。実験と改良を繰り返し行う。 ・実証機 3 号機：現在の熱分解方式の油化装置。 熱分解方式の研究を開始。
2015 年～2016 年	JICA 民間提案型普及・実証事業 ・南アフリカへ実証機を納入、実験 ・生成油を発電機燃料（内燃機関）として使用 ・フォークリフト燃料として使用
2016 年 3 月	第 1 号機納入
2018 年～2022 年	実証機（4 号機）製作、実験

(2) 共同開発
なし

(3) 技術導入
なし

3. 独創性

本装置では、独自開発の生成油蒸留塔を採用することによって、従来課題であった常温で固化する廃プラスチック分解油（生成油）の問題を解決し、生成油を化石資源の代替えとして化学会社に販売することでプラスチックの再資源化を実現した。

また、オフガスの燃料利用や反応釜の廃熱有効活用等により、ケミカルリサイクルの懸念材料であった新たなエネルギーの投入を最小限に抑えることで二酸化炭素排出抑制と、高コストとされているランニングコストの抑制を実現した。

さらに、残渣拔出装置の設置や高効率な運転方法により、生産量は従来の油化装置の2倍以上を可能とした。

(1) 独自開発の生成油蒸留塔（特許取得済）

本装置では、生成油蒸留塔を設置することで、反応釜で分解したプラスチック分解ガスの成分を安定させることができる。

仮に当社の生成油蒸留塔を設置せずに熱分解（油化装置）を行うと、反応釜で分解したガスに、分解が不十分な未分解ガス（ワックス成分）が混ざって出てきてしまい、液化（生成油）した際に低温で固化する油になってしまう。

当社の生成油蒸留塔では、反応釜から発生する分解ガスを還流することで未分解ガスは再度、反応釜に戻る仕組みになっている。生成油蒸留塔により分解ガスを安定させることで、生成する油は低温でも固化することのない油となり、輸送の問題をクリアして、化石資源の代替使用が可能となった。

(2) 反応釜内の液面確認（特許取得済）による高効率な運転を実現

油化装置を効率よく安全に運転するには反応釜内の樹脂及び分解油量を知る必要があるが、反応釜内の温度は400℃以上であり、その温度に耐えられる液面計がなかった。よって、当社では複数の温度計を設置しその温度の違いにより反応釜内の分解油量を推定した。

油化装置の運転では、反応釜に廃プラスチックが、搬送ルーダにより軟化した状態で投入され、反応釜の熱により液体になり、その後気体（分解ガス）となるため、常に状態変化が起こっている。さらに投入する廃プラスチックの種類によって、分解速度に違いがあるため、時間計測で管理できるものではない。そのため、投入量（搬送ルーダ）を把握しても反応釜の液量を推測することは不可能であった。

仮に反応釜内の残量を把握できなければ、安全を考慮して投入量を制限する運転方法となり、生産量が大幅に減るため、効率の良い運転が不可能となる。

当社では、複数の温度計の温度差で液量を推定することができたが、温度計の設置位置は独自開発によるものである。反応釜には攪拌機を設置しており、一定の速度で羽根が回転している。そのため温度計の設置位置は、回転羽根に干渉せず、且つ正確な温度を計測できる位置に設置する必要があるが当社では最適な設置を実現した。

(3) オフガスの有効利用

分解ガスから液化（生成油）しないオフガスは、反応炉を加熱し、樹脂を分解、ガスを発生させるための燃料として使用できるルートを確立し、有効利用している（特許出願中）。

油化装置稼働中は、オフガスのみで反応釜の燃料を賄うことができるため、加熱のために新たなエネルギーの追加投入が不要となった。

仮に当社のオフガス利用ルートがない場合は、化石燃料などを使用する必要があり新たな二酸化炭素を排出してしまう。

本装置では、エネルギーの有効活用で新たな二酸化炭素の発生を抑制するとともにオフガス（メタン及びエタン、プロパン、ブタンなど）を大気に放出することなく利用することで、リサイクルによる環境負荷にも配慮している。

（４）廃熱の有効活用

本装置では、廃プラスチックを熱によって分解するため、反応釜を 400℃～500℃に加熱する。その際に発生する熱を利用して、搬送ルーダ（押出機）の熱源を賄っている。従来、搬送ルーダは電気により 230℃～300℃の熱をヒータに加えて使用されている。

当社では、油化装置専用の搬送ルーダをメーカーに製作依頼し、ヒータに代わる加熱方法として、反応炉を加熱した燃焼ガスの廃熱を利用している。そのため、新たなエネルギーを加える必要がなく、ランニングコストも大幅に抑制できる。

搬送ルーダの電気使用量を比較すると、廃熱を有効活用することで、加熱部分のヒータに電気使用がなくなり、電気の使用はスクリューを動かすモータのみとなり、電力使用料金は約 3 割の削減となる。

（５）残渣拔出装置

油化装置で廃プラスチックを熱分解すると、分解ガスにならない残渣（炭化物）が一定量発生し、反応釜に蓄積していく。本装置の残渣拔出装置では発生した残渣の排出をする際、運転を止めることなく排出を可能とした。

従来は、反応釜に蓄積した残渣を排出するために、反応釜の中に人が入り残渣を回収する作業が必要であった。そのために冷却時間（降温）が 10～12 時間必要となり、バッチ式の運転であった。

バッチ式の運転は生産効率が悪い上、昇温・降温を頻繁に繰り返すことによる装置のダメージも多くなる。

本装置では、残渣排出に必要な降温・昇温を最小限に抑えた高効率な連続運転が可能となったため、バッチ式と比べて約 2 倍の生産が可能となった。

4. 特許の有無

次のとおり、特許 4 件を取得済み、3 件を出願中。

特許番号：第 6129801 号 / 名称：廃プラスチック油化处理装置

特許番号：第 6100223 号 / 名称：廃プラスチック油化处理装置

特許番号：第 7005042 号 / 名称：廃プラスチック油化处理装置

特許番号：第 7145524 号 / 名称：廃プラスチック油化处理装置

出願番号：特願 2023-145115 / 名称：廃プラスチック油化处理装置

出願番号：特願 2023-145119 / 名称：廃プラスチック油化处理装置

出願番号：特願 2023-145117 / 名称：廃プラスチック油化处理装置

5. 性能

油化装置に加えて、破碎機及び空気輸送、搬送ルーダ等高効率な設備の組み合わせを行い、一体の設備としてケミカルリサイクルシステムとした。

設備全体の効率化が図れることにより、ランニングコスト削減や生産効率の向上が可能となる。

(1) 残渣排出装置による連続運転

本装置は残渣排出装置を採用し、生産能力を向上させている。

従来型の残渣排出を行った場合との生産能力（処理量）の違いは図表5のとおりである。

(2) オフガスと廃熱の有効利用

本装置はオフガスラインを設置し、反応釜の燃料として有効利用している。

また、反応釜で発生した廃熱を搬送ルーダのヒータの代替えとして利用している。

従来型は反応釜の燃料は化石燃料を使用し、搬送ルーダのヒータは電気を使用していた。

本装置は従来型と比べて、大幅なコスト削減となっている。

従来型との違いは図表6のとおりであり、1時間あたり9,500円のコスト削減になっている。

上記によって、ランニングコストが抑えられていることから、ランニングコストが問題視されているケミカルリサイクルでも事業性が成り立っている。

オフガスと廃熱の有効利用に絞った年間削減コストは以下のとおり。

- ・申請装置（24h稼働、300日/年）0円
- ・従来装置（10h稼働+3時間昇温、300日/年）37,050,000円

図表5 残渣排出装置による生産量の違い（1日あたりの生産/1,000kg/h処理装置）

	処理量	生成油生産量	備考
申請装置	20,000kg	16,000kg	運転：10時間→残渣排出：2時間→ →運転：10時間→残渣排出：2時間
従来装置	10,000 kg	8,000kg	運転：10時間→冷却：10時間→ →清掃：1時間→昇温：3時間

図表6 オフガスと廃熱の有効活用によるコスト（1時間あたり/1,000kg/h処理装置）

		反応釜燃料	搬送ルーダ	備考
申請装置	使用量	なし	なし	・反応釜燃料→オフガス利用 ・搬送ルーダ→廃熱利用
	コスト	0円	0円	
従来装置	使用量	510	140kw	・A重油→100円/0想定 ・電気→32円/kw想定
	コスト	5,100円	4,400円	

(3) 安全性の確保

本装置では、反応釜に安全弁を設置することで安全性を高めている。

また、搬送ルーダから反応釜のライン配管は、分解ガスが逆流しない構造としている。

油化装置の運転で最も危険とされている、配管に閉塞が生じた際の対策としては、本装置では反応釜内の液面確認が可能のため、仮に配管閉塞が生じた場合には直ぐに異変に気付くことができる構造となっている。

(4) 油化装置を含むケミカルリサイクルシステムの操作性

本装置では、破碎機、空気搬送機、搬送ルーダ、油化装置のそれぞれの供給を自動で制御しており、手動介入がなくても運転操作を可能としている。

例えば、反応釜からの発生する分解ガスの量を自動計測しており、分解ガス量に応じてオフガスバーナからの熱量をコントロールする。また、反応釜の液面量によって、搬送ルーダの供給量がコントロールされ、搬送ルーダの供給が少ない場合は、空気搬送機も破碎機も連動して運転を制御する仕組みとなっている。

(5) 維持管理性

本装置は、化学プラントであるため定期的な修繕期間を設けてメンテナンスを行うが、当社は配管も含めて自社設計しているので、メンテナンスの容易さを考慮の上、設計を行っている。

また、化学プラントではあるが1つずつの構造はシンプルに設計しているため、メンテナンスは容易である。

6. 経済性

本申請の油化装置は現時点で国内には殆ど設置されておらず、従来装置と比べることは困難であるため海外プラントや過去に国内で稼働していたプラントとコストを比較した(図表7)。

本装置のインシヤルコストが低い理由としては、シンプルな構造にある。また、油化装置は近年の急激なりサイクル需要の高まりによって、注目を集める形となった。

よって、世界的にも油化技術は多いとは言えず、直ぐに装置を導入したい場合は、技術を保有している会社とライセンス契約を行って、導入するケースが多い。そのため、装置費用も高額になっている上、ライセンス契約により生産量に応じてフィーが発生する仕組みとなっているので、他社のランニングコストは非常に高額となっている。したがって現時点では当社のコスト競争力は高いといえる。

図表7 投資とランニングコストの比較

	申請装置	従来装置A	従来装置B	従来装置C	備考
インシヤルコスト	1	2.7倍	3.2倍	1.8倍	処理量1tあたりのコスト
ランニングコスト	1	3.3倍	4倍	2.5倍	生成油1kgのコスト

7. 将来性

廃プラスチック油化装置を含むケミカルリサイクルシステムは、今後の廃プラスチックリサイクルの資源循環には必要不可欠なシステムといえる。一度きりの使い捨てではなく、循環型であるサーキュラーエコノミーを実現するために、国内外でケミカルリサイクルが急速に広がっている。

ケミカルリサイクルは、「プラスチック資源循環法」（2022年4月施行）で企業が求められる基本方針である行動にも沿った形となっている（図表8）。

また、廃プラスチックリサイクルにおいて、一般社団法人プラスチック循環利用協会の資料「プラスチックリサイクルの基礎知識 2023」によると、2021年の国内における廃プラスチックの総排出量は約824万トンであり、この排出された廃プラスチックのうち、サーマルリサイクル（リカバリー）で再利用されたものが約511万トン（約62%）と多く、次にマテリアルリサイクルが約177万トン（約21%）、ケミカルリサイクルにおいては29万トン（約4%）にとどまっておりプラスチックの資源循環を行うためにはマテリアルリサイクルとケミカルリサイクルの割合を増やすことが急務となっている（図表9）。



図表8 プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律（出典：環境省）

■廃プラスチックの総排出量・有効利用量・有効利用率の推移

(単位=万t)

年	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
廃プラ総排出量	1,006	1,005	994	998	912	945	952	929	940	926	879	860	863	861	850	822	824
マテリアルリサイクル量	185	204	213	214	200	217	212	204	203	199	173	174	177	188	186	173	177
ケミカルリサイクル量	29	28	29	25	32	42	36	38	30	34	30	29	27	26	27	27	29
サーマルリサイクル量	368	457	449	494	456	465	496	502	535	534	498	492	506	507	513	509	511
合計	582	688	692	733	689	723	744	744	767	768	701	695	710	720	726	710	717
有効利用率 (%)	58	69	69	73	75	77	78	80	82	83	80	81	82	84	85	86	87

出典：(一社)プラスチック循環利用協会

図表9 廃プラスチックの総排出量・有効利用量・有効利用率の推移

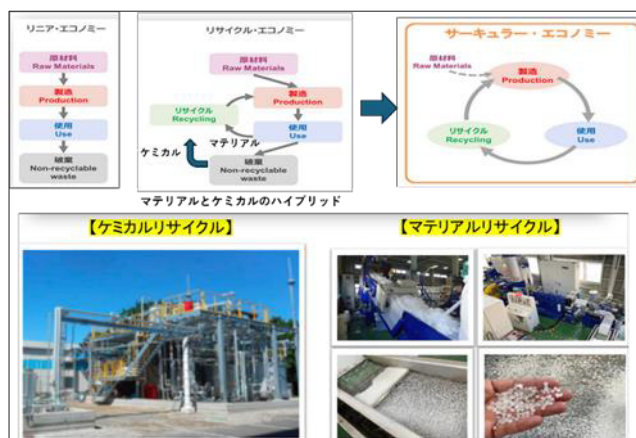
また、焼却を伴わないリサイクルを増やすことで、二酸化炭素排出量削減の効果も大きい。単純焼却はもちろん、廃プラスチックリサイクルの 62%を占めるサーマルリサイクルも二酸化炭素の排出につながるため、焼却を減らせば、二酸化炭素排出量の削減が可能となる。

一方、マテリアルリサイクルの課題もある。マテリアルリサイクルは単一素材のプラスチックでなければならず、複合素材の多い日本ではマテリアルリサイクルができる廃プラスチックが限られている。

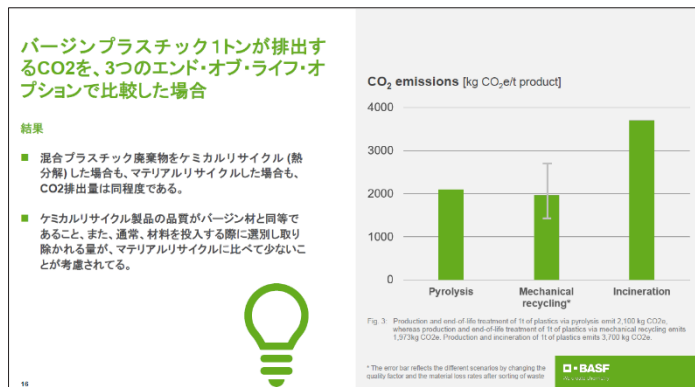
今後は、「モノ (mono) マテリアル (material)」(単一素材化) により、マテリアルリサイクルできる素材も増える方向ではあるが、リサイクル素材として回収されるにはタイムラグが発生する。

さらに、マテリアルリサイクルでは品質の低下が発生してしまう。熟履歴による劣化や不純物の混入などが避けられない。

そこで、当社が取り組んでいるのはマテリアルリサイクルとケミカルリサイクルのハイブリッドリサイクルである (図表 10)。マテリアルリサイクルは品質課題が残るが、再生されたリサイクルペレットは LCA 評価では CO₂ 排出量削減効果が非常に高い。一方で、マテリアルリサイクルには適していない廃プラスチックはケミカルリサイクルが必要となる。ケミカルリサイクルの LCA 評価の参考は下記の図表 11 のとおりである。



図表 10 ケミカルリサイクルとマテリアルリサイクルのハイブリッド



図表 11 ケミカルリサイクルの LCA (出典: BASF)

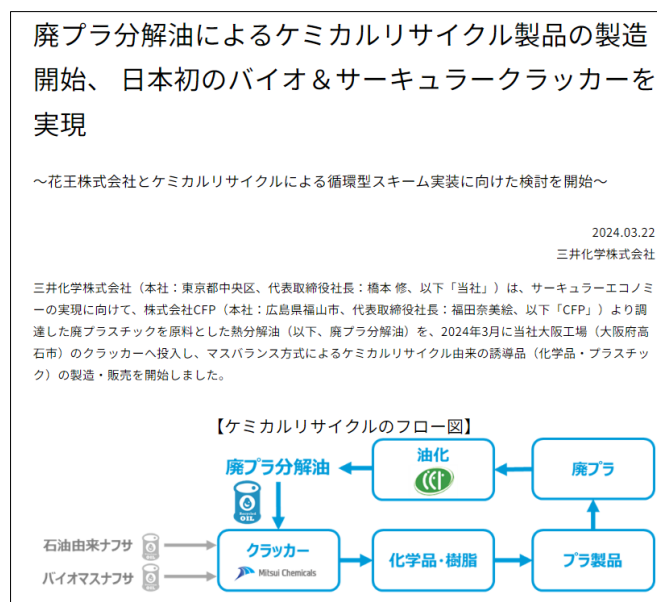
世界的なプラスチックリサイクルの流れは、欧州をはじめとしてリサイクル材の使用を義務付けていく方向である。規制は欧州のみにとどまらず、プラスチック製品に対するリサイクル率向上の流れはさらに強まっている。直近では、車のリサイクル規制が欧州から発表された。この規制を達成するためには、PCR 材（市場で使用済みの製品を回収、再生資源化）のリサイクルが不可欠になるため、複合素材の対応が必須になる。また、車から排出される廃プラスチックも複数種類のプラスチックが混合されているものが多いため、マテリアルリサイクルだけでは対応が難しく、ケミカルリサイクルの両方で対応するハイブリットが必要になる。

ケミカルリサイクルは、複合された廃プラスチックも化学反応により分子レベルにまで分解、油を生成するため、化学会社で化石資源の代替えとして使用できる。ケミカルリサイクルのメリットの一つとして、リサイクル品であるにもかかわらず、バージン素材の品質が手に入ることである。

よって、食品フィルムや医療関係にもリサイクル品が使用できることになる。

本装置では、2024年3月に日本で初めて廃プラスチックから出来た生成油を化学会社のクラッカーに直接入れることができた（図表 12）。今後、ケミカルリサイクルが進むことで化石資源の使用量抑制が可能となる。さらに、ケミカルリサイクルの生成油からプラスチック原料となり、再度プラスチック製品となることで、理想的な循環サイクルが形成されるとともに、廃プラスチック処理により排出される二酸化炭素の排出量を大幅に削減することができる。

今後、ますますリサイクルが必要となってくる中で、当社のケミカルリサイクルシステムは必要としていただけるシステムであると確信している。



図表 12 化学メーカーによる廃プラ分解油の製造事例（出典：三井化学株）