

# 混合プラスチック高度選別技術の進展と自己循環リサイクルの拡大

井関康人\*  
Yasuto Iseki  
筒井一就\*  
Kazunari Tsutsui  
中 慈朗†  
Jiro Naka

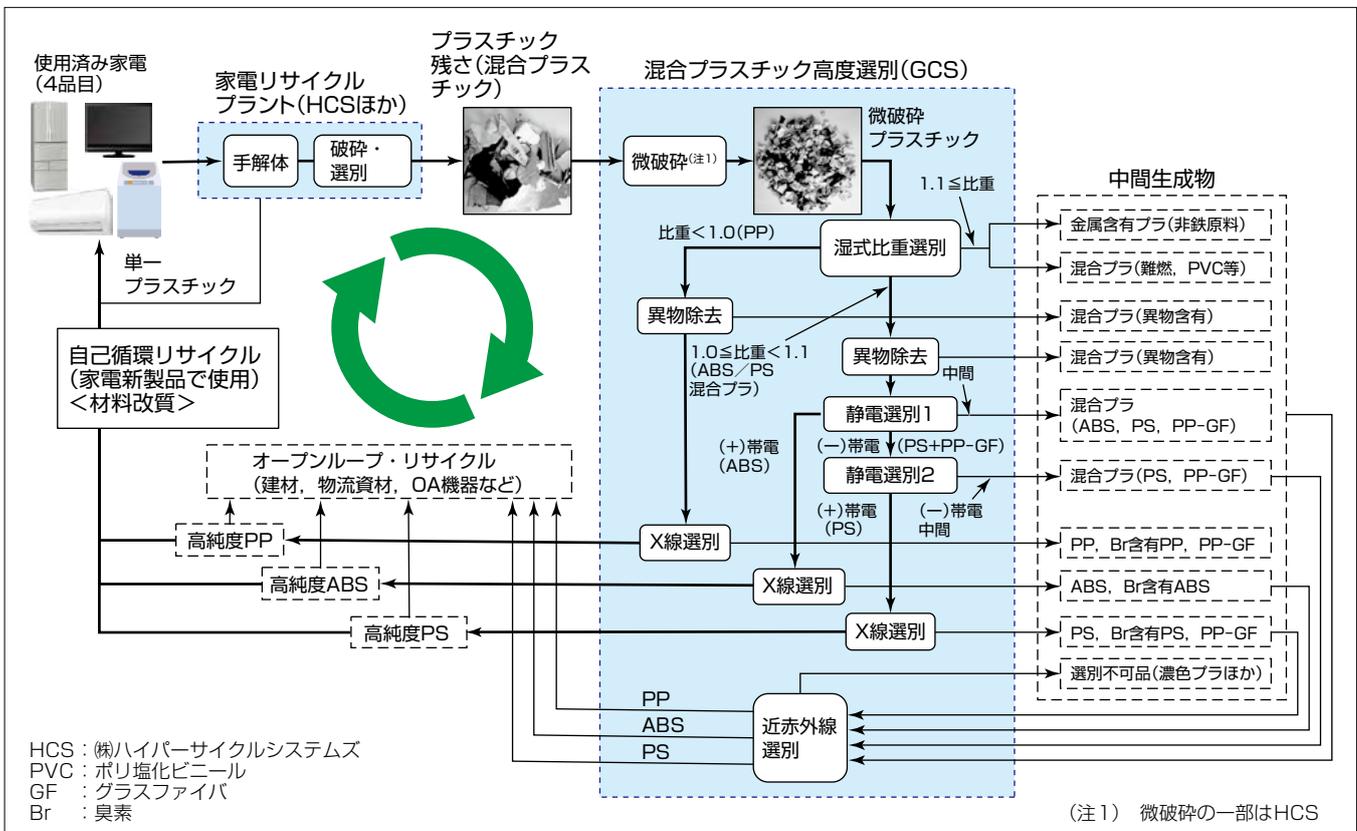
Progress of Advanced Sorting Technologies for Mixed Plastics and Expanding of Closed-loop Recycling

## 要 旨

三菱電機は、2001年4月の家電リサイクル法施行当初からプラスチックリサイクルを重要課題として位置付け、長年、技術開発に取り組んできた。その結果、リサイクルが困難であった破碎後の混合プラスチックから、ポリプロピレン(PP)、アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン(ABS)、ポリスチレン(PS)を高純度に分離する技術を確認した。そして2010年4月、(株)グリーンサイクルシステムズ(GCS)で、年間15千トンの使用済み家電由来の混合プラスチックを処理する大規模なりサイクル事業を実現した。高品質な再生材を大量かつ安定的に調達可能になったことによって、回収プラスチックを自社製品に再利用する“自己循環リサイクル”の拡大が可能になった。

選別で、純度と回収率はトレードオフの関係にあるが、静電選別やX線選別の性能改善や選別工程で発生する中間生成物の再選別によって、高純度を維持したままで回収率の向上を実現した。また混合プラスチックから回収されたプラスチックは、混色で異物もゼロではないことから、意匠性や高い強度を求める部品には適用できなかった。色彩選別や様々な改質技術の導入によってこうした制約を補い、白色部品や難燃性、耐候性、耐衝撃性などが要求される部品への展開が可能になり、自己循環リサイクル量が飛躍的に増加した。

今後も技術を進展させ、環境配慮と経済性が両立する自己循環リサイクルの拡大を推進していく。



## 混合プラスチック高度選別と自己循環リサイクルの流れ

使用済み家電製品を破碎した後のプラスチック残さ(混合プラスチック)を微破碎して微細な金属を除去する。次に湿式比重選別、静電選別によって、PP、ABS、PSを回収する。さらにRoHS(電気・電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限に関する欧州議会及び理事会指令)に適合させるためX線選別でBr含有プラスチックを除去する。こうして得られた高純度プラスチックを自己循環リサイクル(家電新製品に再利用)する。選別技術や材料改質技術の進展によって自己循環リサイクル量が飛躍的に拡大した。

## 1. ま え が き

近年、海洋プラスチック問題や中国に端を発してアジア諸国にまで広がっている廃プラスチック輸入規制等によって、国際的にプラスチックの3R(Reduce・Reuse・Recycle)への関心が高まっている。これを受け、国は、2019年5月に“プラスチック資源循環戦略”を立案し、3Rの推進に積極的に取り組むことになっている<sup>(1)</sup>。

当社は、1999年にHCSで家電業界初<sup>(注2)</sup>の商用家電リサイクルプラントを立ち上げて以来、プラスチックリサイクルを重要課題と位置付け、長年、技術開発に取り組んできた。その結果、最も再利用が困難であった破碎後の混合プラスチックから、PP、ABS、PSを高純度で選別する“高度選別技術”と、回収されたプラスチックを当社家電製品に再利用する“自己循環リサイクル”を確立し、2010年にGCSで事業化を実現した<sup>(2)(3)</sup>。

本稿では、その後の混合プラスチック高度選別技術の進展と自己循環リサイクルの拡大について述べる。

(注2) 1999年5月12日現在、当社調べ

## 2. 混合プラスチック選別技術の進展

### 2.1 静電選別の高度化<sup>(4)</sup>

図1に静電選別の原理を示す。静電選別は、帯電工程と選別工程で構成される。帯電工程では、回転する円筒内で異種のプラスチックを衝突させる。各プラスチック片の表

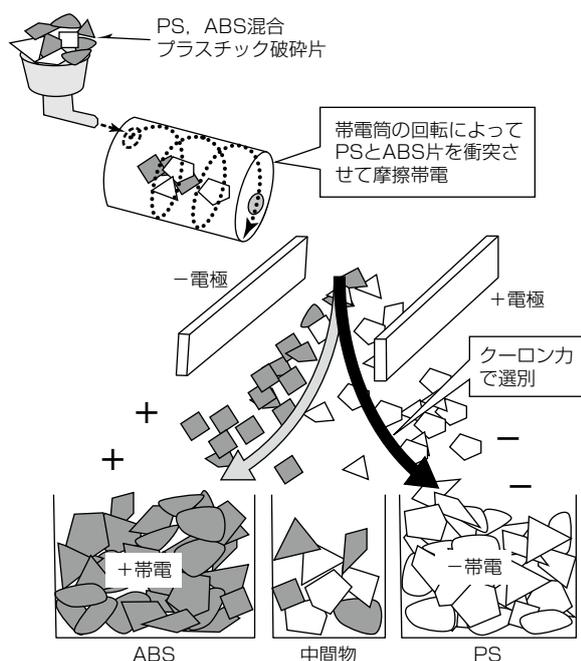
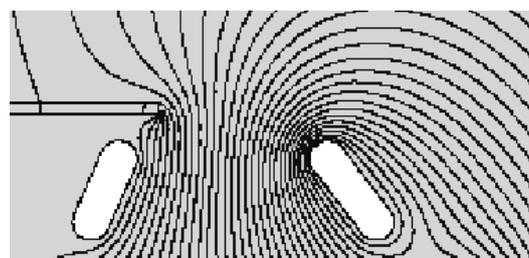


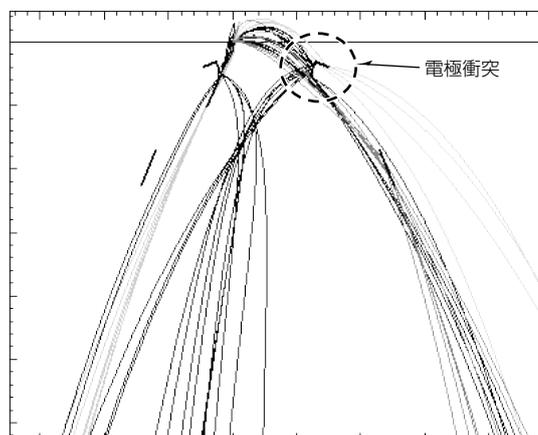
図1. 静電選別の原理

面は、帯電列に従って異なる極性の静電気を帯びる。選別工程では、直流高電圧を印加した電極間に帯電プラスチック片を落下させ、クーロン力によって軌道を変化させて回収箱に選別する。

静電選別は、選別対象に合わせて選別条件を最適化しないと安定した選別が難しい。当社では選別工程をモデル化し、高電界中の帯電片の軌道解析を行うことによって、電極形状や印加電圧の最適化を図り、回収率や純度などの選別性能を向上させている。図2に選別空間の電界及び軌道解析の例を示す。プラスチック片は、フィーダの右端から落下し、左右の電極(図2(a)中の白抜き部)間に生成された高電界中でクーロン力を受けて、図2(b)に示した軌道で落下する。電界強度が過剰であったり、フィーダからの飛び出し初速が大きすぎたりする条件では、選別電極への衝突が起こることがある。図2(b)では右側の電極に衝突した粒子が左側へ落下し純度を低下させていることが分かる。図3に落下位置分布の軌道解析結果と実測結果を示す。図3(a)は粒子の電極衝突がある条件での解析・実測結果を示す。図中の太矢印部が、衝突によって反対側に落ちた粒子の分布を示している。解析結果は、実測とよく整合している。図3(b)は、粒子の電極衝突がない条件での解析・実測結果を示す。衝突が解消され純度良く選別されていることが分かる。このような解析手法を用いて選別結果を予測することによって、純度や回収率等の向上を効率的に行うことができる。



(a) 電界



(b) 軌道解析

図2. 選別空間の電界及び軌道解析の例

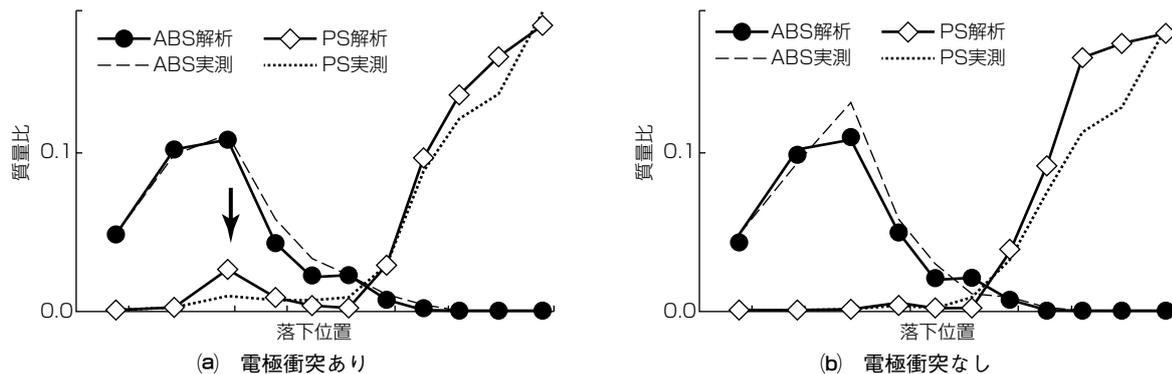


図3. 回収分布

## 2.2 異物除去の高度化

乾燥機能付洗濯機の水槽等には、高温時に剛性低下を防止するためグラスファイバ(GF)を15~20%程度添加したPP(PP-GF)が使われている。PP-GFがごく僅かでも混入すると、押出機でペレット化する際にGFが異物になってスクリーンの目に詰まって生産性が著しく低下するため、これを除去したい。PP-GFは比重が重く1.0を僅かに超えるため、湿式比重選別で $1.0 \leq \text{比重} < 1.1$ の比重帯に混入する。その後、静電選別工程で帯電列の違いを利用して除去される。しかしながら、PPとPSの帯電序列は近傍にあるため、PSの回収率を高めようとする、PP-GFがPSに混入して純度を低下させてしまう。混入したPP-GFを除去するため、RoHS対応で導入したX線選別を改良して、Br含有プラスチックとGF含有プラスチックの両方を検知して除去できるようにした。

従来Br含有プラスチックを除去するために利用していた長波長 X線に加え、短波長X線も検出できるデュアル検出器を導入し、両X線の透過強度を基にプラスチック片の厚さばらつきの影響を排除することで、GF含有プラス

チック片を高精度に検出し、エア噴射で除去する。これによって、一波長での検出・除去に比べ、回収率を損なわずに回収プラスチック中のGF含有量を半分以下に低減可能にした(図4)。

## 2.3 中間生成物の再選別

選別精度と回収率の間にはトレードオフの関係があり、高精度で選別しようとする、中間生成物が多く発生して回収率が低下する。このため、2.1節と2.2節で述べたように、個々の選別工程の技術改善によって精度と回収率の両立を図ってきたが限界がある。静電選別とX線選別の中間生成物は、前工程の比重選別や異物除去によってリサイクルを阻害する異物等が除去されており、PP, PS, ABSを主成分とする良質な混合プラスチックになっている。GCSでは、回収率向上のため2018年4月に近赤外線選別を導入し、この中間生成物からPP, PS, ABSを再選別している。市販の近赤外線選別は、処理能力が小さい上に濃色のプラスチックを選別できないという欠点があるため、選別の主幹に使うには不十分であるが、発生規模の小さい中間生成物の選別手段としては有効になる。これによって、

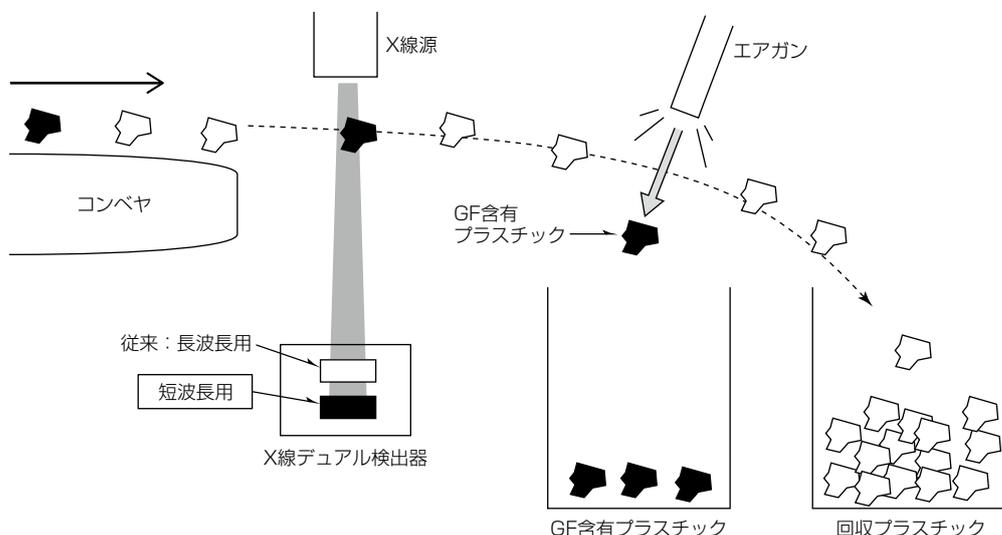


図4. デュアルX線選別

図5に示すとおりPP、ABS、PSの回収率が大幅に向上した。なお、この近赤外線選別導入に当たっては、環境省の平成29年度二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金(省CO<sub>2</sub>型リサイクル高度化設備導入促進事業)を活用した。

### 2.4 品質管理の強化

RoHSが2019年7月に改正され、フタル酸エステル類の4物質が新たに規制対象物になった。リサイクル材は過去の様々な製品から回収されるため、サプライチェーンによる規制対象物の非含有保証は不可能である。GCSでは、事業開始当初から蛍光X線分析装置を導入し、サンプリング検査を行うことで非含有保証を行ってきた。

改正RoHSでフタル酸エステルが追加されたが、蛍光X線分析装置では検知できない。このため、GCSではIEC62321-8で新たにスクリーニング方法として採用された熱分解ガスクロマトグラフィー(Py-GCMS)(島津製作所:GCMS-QP2020NX)を2019年5月に導入し、フタル酸エステルにも対応している。Py-GCMSはポリ臭化ビ

フェニル(PBB)、ポリ臭化ジフェニルエーテル(PBDE)も直接検知できるため、従来の蛍光X線でBr濃度を測定してスクリーニングする方法からPy-GCMSによるスクリーニングに切り替える予定である。

X線選別前のPP、ABS、PSの2019年5~12月のPy-GCMSによる濃度測定結果を表1に示す。フタル酸エステル、PBB、PBDE共にスクリーニング判定基準の500ppmを十分に下回っており非含有と判定できるレベルにある。

2019年5~10月のX線選別前後の蛍光X線によるBr濃度測定結果を表2に示す。X線選別前ではスクリーニング判定しきい値300ppmを上回る濃度が検出されるが、X線選別後は300ppmを下回っており非含有と判定できるレベルにある。一方、表1で示したとおり、X線選別前であってもPBB、PBDEは非含有であることから、X線選別で除去しているのはPBB、PBDE以外のBr系難燃剤を使用しているプラスチックであることが分かる。PBB、PBDEは2006年にRoHS規制物質となり国内家電メーカーは使用を中止している。中止から既に12年が経過しており、家電リサイクル回収品に含まれるPBB、PBDEは今後も減少していくことを踏まえると、Py-GCMSの導入によって、将来的にはX線選別に依存せずにRoHSに対応可能と考える。今後更にデータを蓄積して検証を行う。

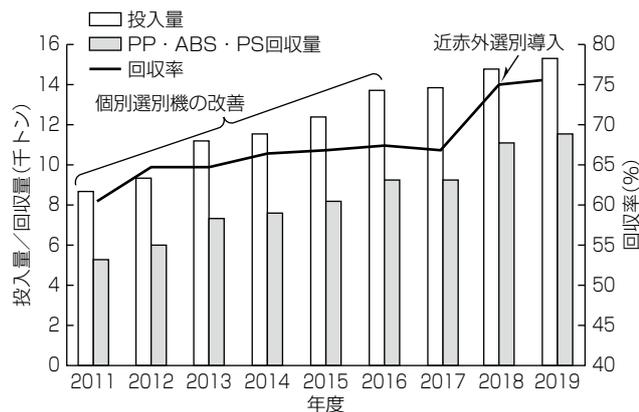


図5. 回収率の推移

### 3. 自己循環リサイクルの拡大

混合プラスチックから選別されたフレークは、様々な着色されており、これを押出機で混練してペレット化すると灰色になってしまう。また、異物を完全に取り除くことはできないため、成形品の表面に黒点として露出して意匠性

表1. RoHS対象物質濃度測定結果

分析方法	分類	物質名	RoHSしきい値	単位: ppm								
				PP(N=105)			ABS(N=27)			PS(N=27)		
				平均	最大	3σ	平均	最大	3σ	平均	最大	3σ
Py-GCMS	フタル酸エステル	DIBP	1,000	3.2	7.9	4.2	2.4	5.4	5.0	0.0	0.0	0.0
		DBP	1,000	8.0	19.0	8.2	8.8	13.6	5.6	7.4	13.0	7.2
		BBP	1,000	1.0	59.0	20.0	16.0	63.9	44.0	18.0	26.0	24.0
		DEHP	1,000	35.0	54.0	24.0	54.0	169.0	94.0	94.0	281.0	175.0
	Br系難燃剤	PBB <sup>(注3)</sup>	1,000	0.4	20.0	7.3	0.2	6.7	3.9	0.0	0.0	0.0
		PBDE <sup>(注4)</sup>	1,000	13.0	288.0	126.0	17.0	165.0	128.0	9.0	121.0	89.0

(注3) DecaBB

(注4) Tetra~DecaBDEの合計

DIBP: フタル酸ジイソブチル, DBP: フタル酸ジブチル, BBP: フタル酸ベンジルブチル, DEHP: フタル酸ジ-2-エチルヘキシル, DecaBB: デカプロモジフェニル, TetraBDE: テトラプロモジフェニルエーテル, DecaBDE: デカプロモジフェニルエーテル

表2. Br濃度測定結果

分析方法	物質名	Br濃度基準 <sup>(注5)</sup>	サンプリング	単位: ppm								
				PP(N=120)			ABS(N=120)			PS(N=120)		
				平均	最大	3σ	平均	最大	3σ	平均	最大	3σ
蛍光X線	Br	<300 <sup>(注5)</sup>	X線選別前	497	1,924	630	492	1,292	1,001	764	1,393	719
			X線選別後	151	223	90	143	257	153	106	242	95

(注5) スクリーニング判定基準

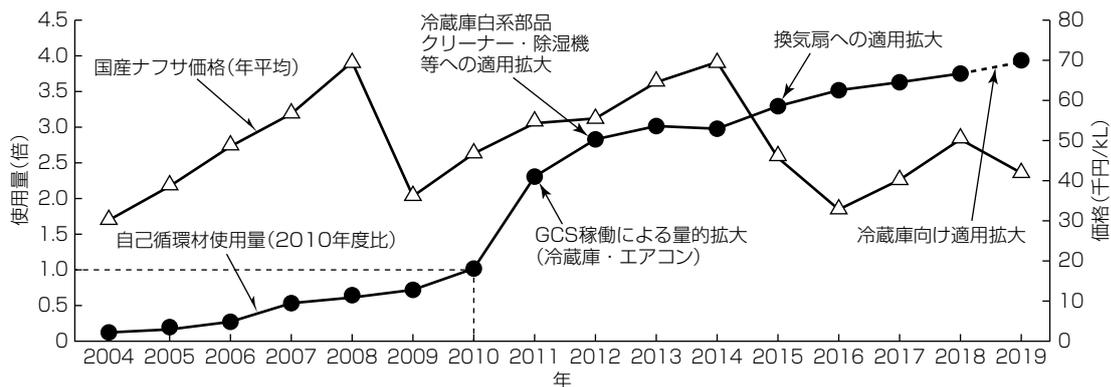


図6. 自己循環使用量及び国産ナフサ価格の推移

を損なう。また残存異物が破断の起点になりやすいため、衝撃強度が低下する。このような欠点があるため、適用可能な部品は、色が黒又は灰色の非意匠で、かつ高い強度を要求しない部位に限定されていた。自己循環リサイクルを更に拡大するために、本稿で述べたような選別技術の進展のほか、このような欠点を補う様々なプラスチック改質技術を開発し、意匠性や強度を要求する部位への展開を進めてきた<sup>5)</sup>。

自己循環材の当社製品への使用量を、GCSが稼働した2010年を基準とした倍率で図6に示す。GCSが稼働したことによって、高純度のPP、PS、ABSを安定的に調達可能になり、冷蔵庫、エアコンを中心に使用量が飛躍的に増加した。2011年度には色彩選別機を導入し、白系PPフレックから白色ペレットを生成して冷蔵庫の白色系部品に適用することによって更に使用量が増加した。また、改質技術によって難燃性、耐候性、耐衝撃性などを付加することで、クリーナー、除湿機、換気扇などを含む幅広い製品群に適用範囲を拡大しており、年々使用量が増加している。

図6に国産ナフサ価格の推移を示す。ナフサ価格は原油価格にほぼ連動する。2008年のリーマンショックによって大幅に下落、以降回復するが、世界景気の不透明感、シェールガス/オイルの生産拡大による供給過剰などの影響によって2014年をピークに再び下落した。PP、ABS、PSのバージン材価格は国産ナフサ価格に連動して変動する。今後も原油価格の先行きは不透明であるが、枯渇資源であることを考えると長期的にはバージン材価格が高騰する可能性もある。

一方、自己循環材価格は製造コスト(人件費、動力費など)が大幅に変動しない限り変動しない。GCSのように大規模かつ高度な自動化設備によってコストを低減し、バージン材に対する価格優位性のある程度維持できるならば、価格変動リスクが少ないことは、需要側にとっても供給側

にとっても大きなメリットになる。

このように、技術の進展に加えて原油価格の変動に対しても安定した需給体制を維持できたことが、自己循環リサイクルの拡大に大きく寄与した。

#### 4. むすび

サーキュラーエコノミー(CE)への移行が欧州主導で進みつつある<sup>6)</sup>。これは、単なる環境政策ではなく、企業をも巻き込んだ経済・産業戦略となっている。日本の3R政策は決して世界に劣るものではないが、環境政策の域を超えるものにはなっていない。CEへの移行には、家電、自動車、OA機器などものづくりの企業がドライビングフォースとなって、3R技術やビジネスモデルを構築する必要がある。その点で、環境配慮と経済性を両立させた当社の自己循環リサイクルはCEの実践と言える。今後も引き続き技術を進展させ、自己循環リサイクルの拡大を推進していく。

この研究の一部は、経済産業省の平成26年度エネルギー使用合理化技術開発費補助金(省エネ型リサイクルプロセス実証支援事業費補助金)によって実施したものである。

#### 参考文献

- 環境省報道発表資料:「プラスチック資源循環戦略」の策定について  
<http://www.env.go.jp/press/106866.html>
- 高木 司, ほか: 家電製品における自己循環リサイクル, 三菱電機技報, 84, No.6, 351~354 (2010)
- 井関康人, ほか: 最先端の家電リサイクル技術, 三菱電機技報, 87, No.9, 537~540 (2013)
- 稲永康隆: プラスチックリサイクルにおける静電選別技術, 粉体技術, 7, No.8, 738~742 (2015)
- 松尾雄一, ほか: 自己循環リサイクルでのプラスチック改質技術, 三菱電機技報, 91, No.12, 671~674 (2017)
- 経済産業省 第5回 循環経済ビジョン研究会: 資料4-1 欧州のサーキュラー・エコノミー政策について  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/junkai\\_keizai/pdf/005\\_04\\_01.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/junkai_keizai/pdf/005_04_01.pdf)