平成２８年度環境省委託事業

平成２８年度環境省委託事業低炭素型３Ｒ技術・システム実証事業

ＡＳＲプラスチックの
材料リサイクル深化技術の実証

報告書

平成 29 年 3 月 1 日

株式会社サイム

目　次

要　約

1.　背景・目的 1

2.　実施内容 4
2.1.　実施項目と内容 4
2.2.　実施体制 8

3.　実施結果 9
3.1.　夾雑物除去のレベルアップ実施結果 9
3.1.1.　再資源化原料施設からの入荷原料組成 9
3.1.2.　複数回処理によるレベルアップ 13
3.1.3.　ゴム除去装置の除去能力検証 14
3.1.4.　木屑除去装置の除去能力検証 17

3.2.　材料リサイクルを深化する技術の実証 18
3.2.1.　比重選別精度の実証 18
3.2.2.　光学識別によるグレード別回収の実証 22
3.2.3.　表面劣化除去の検討 50
3.2.4.　深化技術検証のための実証作業 57

3.3.　回収プラスチックの品質管理手法の確立 84
3.3.1.　回収プラ種別物性データの収集 84
3.3.2.　物性改善検討 89
3.3.3.　物性劣化特性の評価 90

3.4.　環境負荷低減効果の検証 96
3.4.1.　評価モデル 96
3.4.2.　評価 98

3.5.　事業の実現・横展開可能性評価 103
3.5.1.　検討対象施設と稼働条件 103

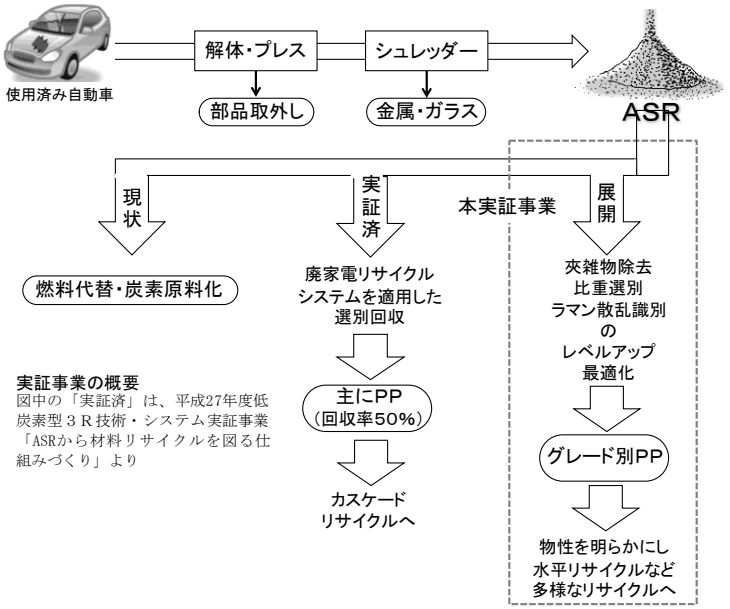
3.5.2.　プラスチック回収量・売り上げの検討 105
3.5.3.　損益評価 105

4.　まとめ 107
4.1.　本実証事業の成果 107
4.2.　今後の課題 110

要　約

１．実証事業の概要

自動車リサイクル法に基づき、使用済み自動車は年間 333 万台（平成 26 年実績）処理されている。これらは解体、スクラップされる中で部品や金属が回収されるが、最後には、自動車シュレッダーダスト（Automobile Shredder Residue,以下「ASR」と記載）が、約 185kg／台、全体で約 58 万トン／年発生している。ASR の中には 30%以上のプラスチック（平成 22 年度環境省請負業務結果報告書「自動車破砕残さにおける性状把握調査業務」より）が含まれるが、現状、ほとんどがセメント製造での原燃料化により処理されている。この ASR 由来プラスチックのリサイクルを目指し、報告者らは平成 27 年度低炭素型３Ｒ技術・システム実証事業「ASR から材料リサイクルを図る仕組みづくり」に取り組み、廃家電リサイクル向けのプラスチック選別回収システムを活用して、カスケードなら材料リサイクルで約 50%回収できること、CO2 排出量は原燃料化に比べ 35%削減できることを示した。しかし、より一層の夾雑物除去の必要性、黒色プラスチック識別の難しさ、充填剤タルク量分布の広さへの対応などの問題も明らかになった。



そこで本実証事業では、①ASR 由来プラスチックの材料リサイクル可能量を増加させるために、コンパウンド工程で問題となるゴムや木屑といった夾雑物の除去技術をレベルアップする、②回収プラスチックについて材料リサイクルとしての適用範囲を広げるために比重選別やラマン散乱光学式識別などを最適化し、PP（ポリプロピレン）をタルク含量でグレードに分けて選別回収する、③水平リサイクルすなわち Car-to-Car リサイクルを目指し、グレード別回収プラスチックの物性評価を実施した。

２．実証事業成果

１）夾雑物除去のレベルアップ

① 分析対象とした再資源化施設からの入荷原料のプラスチック含量を明確にした。再資源化施設との連携により安定した組成分布での供給が実現できた。

② 一連の選別回収操作（風力選別・回転式ゴム除去・水比重選別）を複数回行うことでの夾雑物含量が低減することを実証した。ゴム、繊維類、木屑、被覆線のいずれもが１回処理に比べ３回処理することで半減することが明らかになった。

③ 摩擦係数の違いを利用したゴム除去装置を２種類（回転式、ベルト式）組み合わせ、それぞれで異なる形状のゴムを取り除き、事業スケール処理量（150 kg/h）で、ゴム含量を１%以下にできることを実証した。ゴム含量がこの水準になれば、通常のコンパウンド技術により再生樹脂製造が可能となる。

④ 帯電吸着による木屑除去装置により木屑含量を 0.1%以下に、併せてゴム含量も 0.1%以下にできることを実証した。木屑含量がこの水準になれば、実際にコンパウンド装置を数時間稼働させて処理しても目詰まりはおきない。

⑤ 以上のような複数の夾雑物除去処理を行うことで、全行程を通してのプラスチック回収率は 80%以上（散逸は 20%以下）となることを実証した。

２）材料リサイクルを深化する技術の実証

① ASR 由来プラスチックは泥や油による汚れがひどく、水の汚れによる水比重選別の精度低下が懸念される。そこで、水質と比重選別精度の関係を明らかにした。浮遊物質（SS）による汚濁は比重選別精度にほとんど影響を与えず、SS が倍増しても 97%以上の精度を保った。一方で、表面の小さな凹凸やそこに入った油汚れが比重選別精度を劣化させることが明らかになった。

② タルク含量の度合いに応じた選別回収にはラマン散乱などの光学識別を適用しなければならない。測定時間、ベルトコンベアスピード、プラスチック片サイズなどを最適化し、事業スケール処理量（100ー200 kg/h）での選別回収を実証した。PP 中に混入する PE（ポリエチレン）の識別や数%水準でのタルク含量の識別ができることを実証した。さらにこの成果により、これまで重液比重でも選別できずに廃棄されていたタルク含有 30%以上の PP も選別回収できることが分かった。

③ 最近、ヨーロッパで実用化された中赤外吸収による黒色プラスチック識別につき、市販装置と同等と考えられる装置でその性能を検証した。PE 識別は可能であったが、タルク含量の度合いに応じた識別はできなかった。

④ ASR 由来プラスチックはその素性から表面劣化が著しい。この劣化部分を除去する研磨方法につき検討した。しかし、現状では、適切な研磨方法を見出せなかった。

３）回収プラスチックの品質管理手法の確立

① タルク含量でグレード分けした回収 PP をペレット化した。再生原料として手選別によりほぼ 100%の純度で回収したもの（バッチモデル）と、これまで実証した選別回収技術により機械的に連続処理したもの（連続モデル）を用意した。いずれも通常条件の一軸押し出し機装置でコンパウンドでき、長いストランドを引くことができた。

② ①の各ペレットで試験片を作り、機械物性を測定した。物性値はタルク含量の度合いやゴム混入を反映していた。自動車向け市販リサイクル PP に比べ、やはり機械強度は劣っていたが（例えば、曲げ強度は市販リサイクル PP よりも約 30%劣る）、半減といった著しい低下はなく、リサイクルプラスチックとして利用可能な値を示した。現状では、表面劣化部分除去の効果は見出せなかった。一方で、小さな夾雑物（100μm以下）が多く残っているもの、ゴムの混入があるものでは光や熱による加速劣化試験で明らかに早い劣化が観察された。

③ 連続モデルで回収したタルク含量が低い（15%以下）PP を使用し、適切に選択した添加剤をコンパウンドすることで自動車に使われる PP の目標物性値が得られるか検討し、目標値を達成（Car-to-Car リサイクルの可能性）できることを明らかにした。

４）環境負荷低減効果の検証

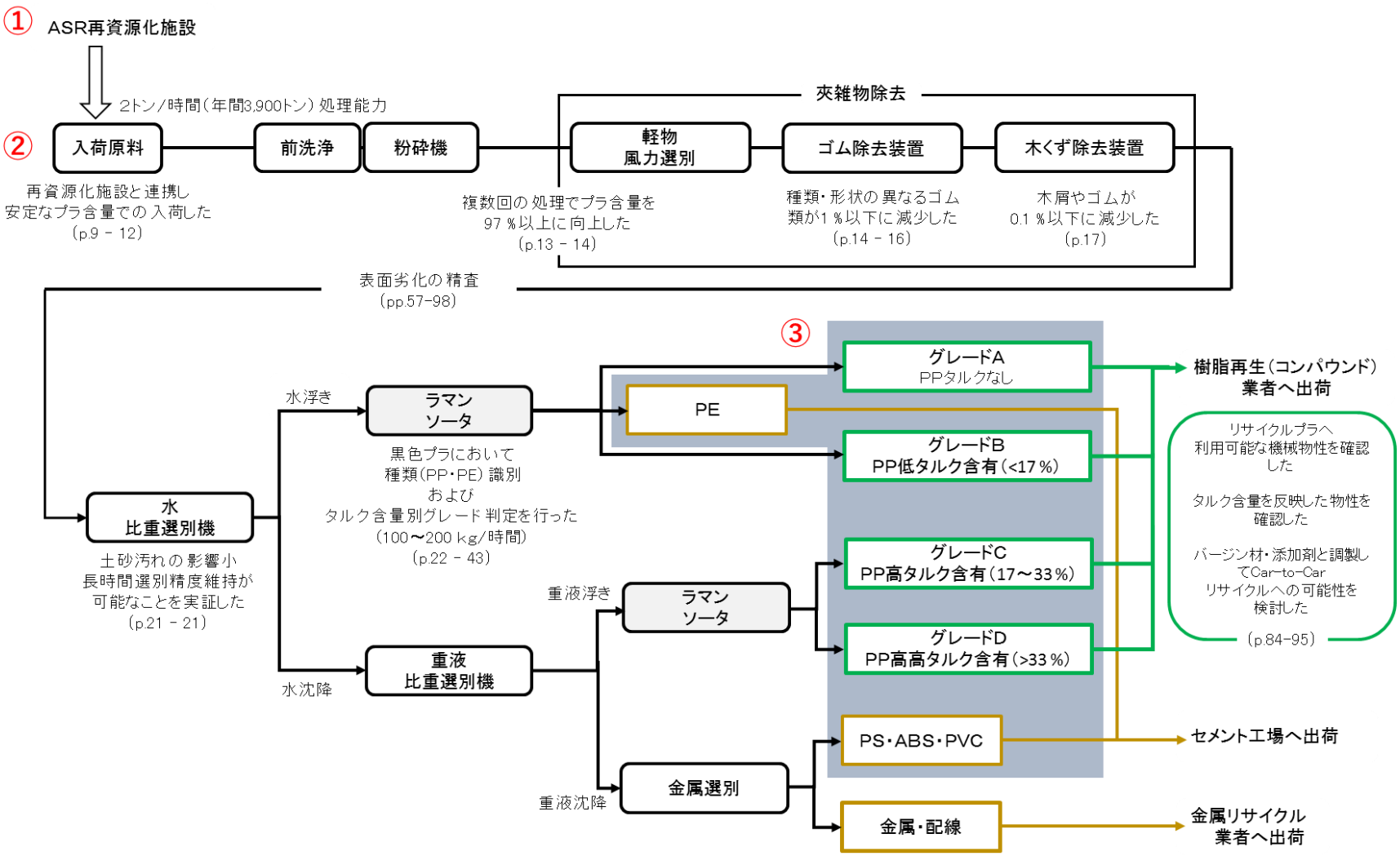
本実証事業では、ASR 再資源化施設から入荷する原料１トン（700 kg の硬質プラスチックを含む／プラスチック含有率 70%）を評価対象の機能単位として評価した。実証事業で明らかになった再生樹脂原料として利用可能なプラスチック量は 514.6 kg（当初含まれていた硬質プラスチックの 74%）であり、リサイクルによりこの量のバージンプラスチックおよびタルク製造代替効果が得られるとして CO2 排出量削減効果を算出した。従来のセメント製造原燃料として処分した場合の CO2 排出量は 775 kg である。ASR 中のプラスチックを材料リサイクルした場合には、バージプラスチックとタルク製造代替による CO2 排出量は － 86.9 kg であり、セメント製造原燃料利用からの転換効果としては、合計 862 = 755-(-86.9) kg という大きな CO2 削減効果が期待されるという結果が得られた。

５）事業の実現・横展開可能性評価

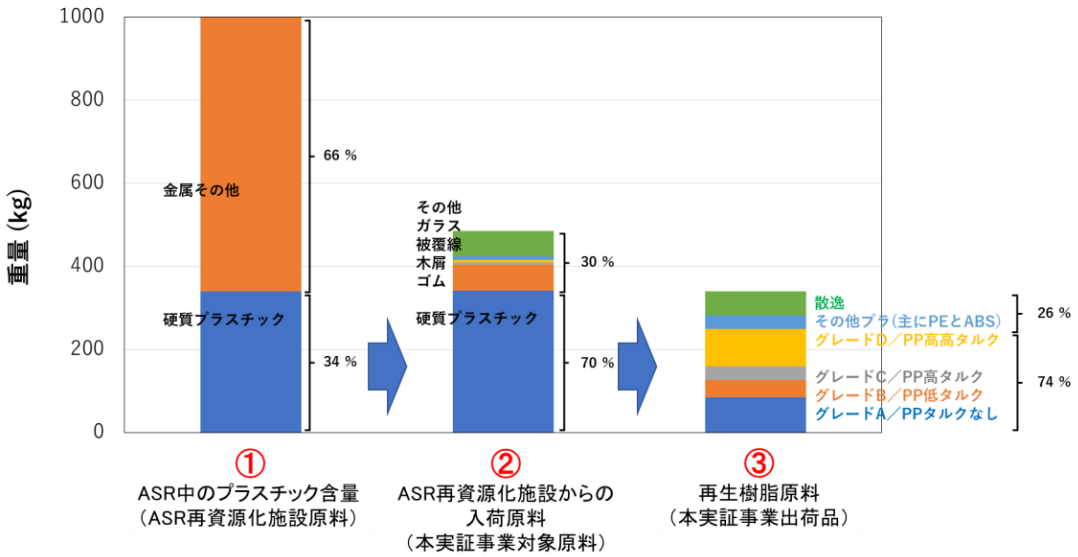
本実証事業の成果から想定される ASR 由来プラスチック選別回収システムの全体像を下図に示す。国内 ASR 発生量 約 60 万トン／年について、プラスチック含有率が約 30%とすれば、ASR 中のプラスチック含有量は約 18 万トン／年となる。このうち 1 万トン／年・施設で処理するモデルを想定している。ここでの売り上げは、高グレードプラスチックが市場相場単価 50 円/kg で売却できた場合、年間売り上げは 232 百万円／年となる。また減価償却費を含めた経費は 230 百万円となり（設備投資 3.8 億／施設で（洗浄粉砕水選別・夾雑物除去等ラインおよびラマンソータ 9 ライン含む））、初

年度から営業利益確保は可能であるとの見積もりを得た。したがって本件は、以上のような収益性のある事業モデルとして、例えば全国 18 ヶ所で展開できれば、全国レベルで Car-to-Car リサイクルを実現することができる。

最後の図に、本実証事業で得られた成果を整理し、想定される ASR 由来プラスチックを材料リサイクルするための選別回収スキームの全体像を示す。


①
ASR再資源化施設
2トン/時間（年間3,900トン）処理能力
②
入荷原料
前洗浄
粉砕機
夾雑物除去
軽物
風力選別
ゴム除去装置
木くず除去装置
再資源化施設と連携し
安定なプラ含量での入荷した
（p.9 - 12）
複数回の処理でプラ含量を
97％以上に向上した
（p.13 - 14）
種類・形状の異なるゴム
類が1％以下に減少した
（p.14 - 16）
木屑やゴムが
0.1％以下に減少した
（p.17）
表面劣化の精査
（pp.57-98）
③
水
比重選別機
土砂汚れの影響小
長時間選別精度維持が
可能なことを実証した
（p.21 - 21）
水浮き
ラマン
ソータ
黒色プラにおいて
種類（PP・PE）識別
および
タルク含量別グレード判定を行った
（100～200 kg/時間）
（p.22 - 43）
PE
グレードA
PPタルクなし
グレードB
PP低タルク含有（<17％）
グレードC
PP高タルク含有（17～33％）
グレードD
PP高高タルク含有（>33％）
樹脂再生（コンパウンド）
業者へ出荷
リサイクルプラへ
利用可能な機械物性を確認
した
タルク含量を反映した物性を
確認した
バージン材・添加剤と調製し
てCar-to-Car
リサイクルへの可能性を
検討した
（p.84-95）
重液浮き
ラマン
ソータ
水沈降
重液
比重選別機
重液沈降
金属選別
PS・ABS・PVC
セメント工場へ出荷
金属・配線
金属リサイクル
業者へ出荷

上図中①～③のプラスチック組成を以下に示す。



ASR 1 トン処理におけるプラスチック組成の変化

Summary

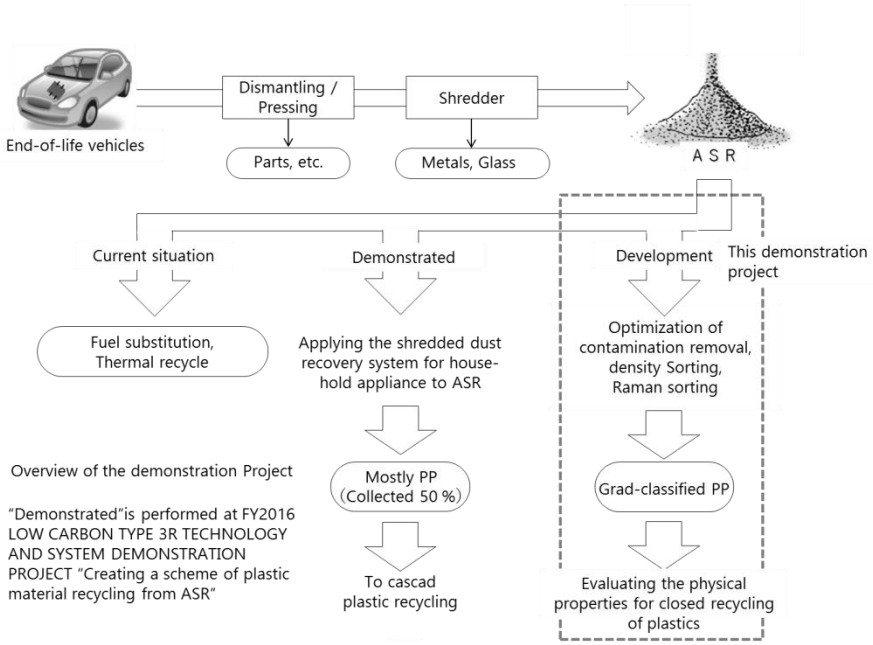
Overview of demonstration project

Annually, 3,330,000 end-of-life vehicles (figure for 2014) are disposed in compliance with the End-of-Life Vehicles Recycling Law (Act on Recycling. Etc. of End-of-Life Vehicles). These vehicles are dismantled and scrapped to recover parts and metals. At the final stage, about 186 kg/car, or about 590,000 tons per year overall, of automobile shredder residue (ASR) is discharged.

Plastics (mainly hard plastics) account for over 30% of ASR ("Investigation of the Properties of Automobile Shredder Residue," a FY 2010 report on the results of contracted work with the Ministry of the Environment), and most of these are currently used as the fuel substitutes and thermal recovery in cement production.

In order to revitalize this plastics from ASR, Our group have worked on a FY2016 LOW CARBON TYPE 3R TECHNOLOGY AND SYSTEM DEMONSTRATION PROJECT "Creating a scheme of plastic material recycling from ASR". It could show that 50% of the plastics in the ASR can be reused, and it reduce carbon dioxide emission by 35% comparing with the fuel substitutes and thermal recovery in cement production.

However, for the closed material recycling, that is, Car-to-Car recycling, following problems was not covered in the last report. One of the problem is that it requires to remove more amount of contaminants. And, there is a difficulty for identifying dark color plastics with our Raman sorter. Also, the discrimination by the filler talc content.



Therefore, in this demonstration project,

We improve our contamination substance removal technique to increasing the amount of revitalized material. This technique removes shredded rubber and wood that causes problem at re-pelletizing process,

We optimize the density separation and our Raman Plastic Sorter to widen the application of collected plastics. This optimization classify PP (polypropylene) according to its talc content.

We evaluate the physical and mechanical properties of the collected plastics from ASR for the Car-to-Car recycling.

Result of demonstration project

Ⅰ. Increase the level of contaminant removal

We clarified the plastic contents of the incoming raw materials from the ASR recycling plant. With the cooperation of the recycling facility, more stable composition was realized.

We verified that contaminant decreases by the multiple sorting operations (a series of wind winnowing, rubber removing and water density separation). It became clear that all of contamination such as rubbers, fablic, wood scraps and electric wires are halved by treating three times compared to single treatment.

We demonstrated that rubber content reduce to 1% or less at the business scale throughput of 150 kg/h by using the two different type of friction based rubber remover apparatus. Each of these machines are able to remove different shapes of rubber. When the rubber content reaches this amount, plastic recycling process is possible by the ordinary plastic compounding technology.

We demonstrate that the wood scrap content can be reduced to 0.1% or less, and also the rubber content to 0.1% or less by using the electrostatic charged based wood scrap remover. When the wood scrap content reaches this level, clogging does not occur even if the plastic compounding apparatus is operated for several hours.

We demonstrated that the 80% or more plastics can be recovered (dissipation is 20% or less) by applying a several contaminant removal treatments as described above.

Ⅱ. Demonstration of technology to deepen material recycling

The plastics from ASR are soiled with mud and oil, so there is a concern that

accuracy of water density separation process will be reduced due to water contamination. Therefore, we clearfy the relationship between water quality and accuracy of water density separation process. The result shows that the water pollution by suspended solids (SS) was little influence on the accuracy of the water density sorting, and even when SS doubled, it maintains accuracy of 97% and more. Instead, we found that the many scratch and oil stains on the plastic surface deteriorate the accuracy of density sorting.

Spectroscopic sorting system such as Raman Plastic Sorter needs to be applied for sorting by the degree of talc content. We optimized the measurement time, belt conveyor speed, plastic size, etc. and demonstrated the plastic sorting at business scale throughput of 100 to 200 kg/h. It proved that PE (polyethylene) mixed in PP can be identified. And, several-percent difference of talc content can also be identified. From this result, It is become possible to sort sank portion of heavy liquid separation, which contains PP with talc content of 30% or more that is been wasted since it was not able to run the recovery process.

Furthermore, recently, dark color plastic sorter which based on mid-infrared absorption was put into practice in Europe. Its performance was verified with a device considered to be equivalent. Although PP and PE identification was possible, it could not be identified according to the degree of talc content.

And, plastics from ASR have great surface degradation due to their usage. We examined the polishing method to remove this degradation. However, at the present time, no appropriate polishing method could be found.

Ⅲ. Establishment of quality control method for recovered plastics

1, PP in the ASR is graded according to talc content. Then, it made into pellet. We prepared the two type of recycled raw material. The one which recovered with purity of almost 100% by hand sorting (named batch model). Another mechanically process with recovery technology demonstrated in this report (named continuous model). Both outcome were processed with the single screw extruder under normal conditions, and long strands could be drawn.

2, Physical and mechanical properties has been measured for each test pieces made from the recovered plastics. The properties reflected the degree of talc content and contamination of rubber. Comparing with commercially available recycled PP for automobiles, the strength was inferior. For example, the bending strength was about 30% inferior to commercially avaliable recycled PP. But, there was no remarkable decrease such as half reduction. Therefore, It satifize the

specification for recycles plastics on the market. And also, there are no change by removing the surface degradation as well. Furthermore, those with small contaminants of less than 100 μm and those with rubber contamination shows obvious and rapid deterioration in the acceleration deterioration test by light and heat.

3, An investigation carried out to gain the physical and mechanical properties to use for automobiles. It shows that it is possible to achieve the target physical and mechanical properties for automobiles by adding the certain addtives to the plastics collected as low talc content of less than 15%. From this result, we are able to show that plastics in ASR are revitalized and used in automobile again.

Ⅳ. Verification of environmental impact reduction effect

In this demonstration project, 1 ton of raw material arriving from the ASR recycling plant (including 700 kg of hard plastic) was evaluated as a functional unit of evaluation of carbon dioxide emission.

The amount of carbon dioxide emission has been calculated to substitute for the revitalized plastics for the virgin plastics and the talc production. In this demonstration project, the plastics of 514.6 kg could be used within the hard plastics content of 74%.

The amount of the carbon dioxide emission is 775 kg when it used for raw material and fuel for cement production as usual. On the other hand, that amount become -87 kg by the revitalising the plastics from ASR. As the result, a remarkable reduction effect of -862 (= 775+87) kg was obtained.

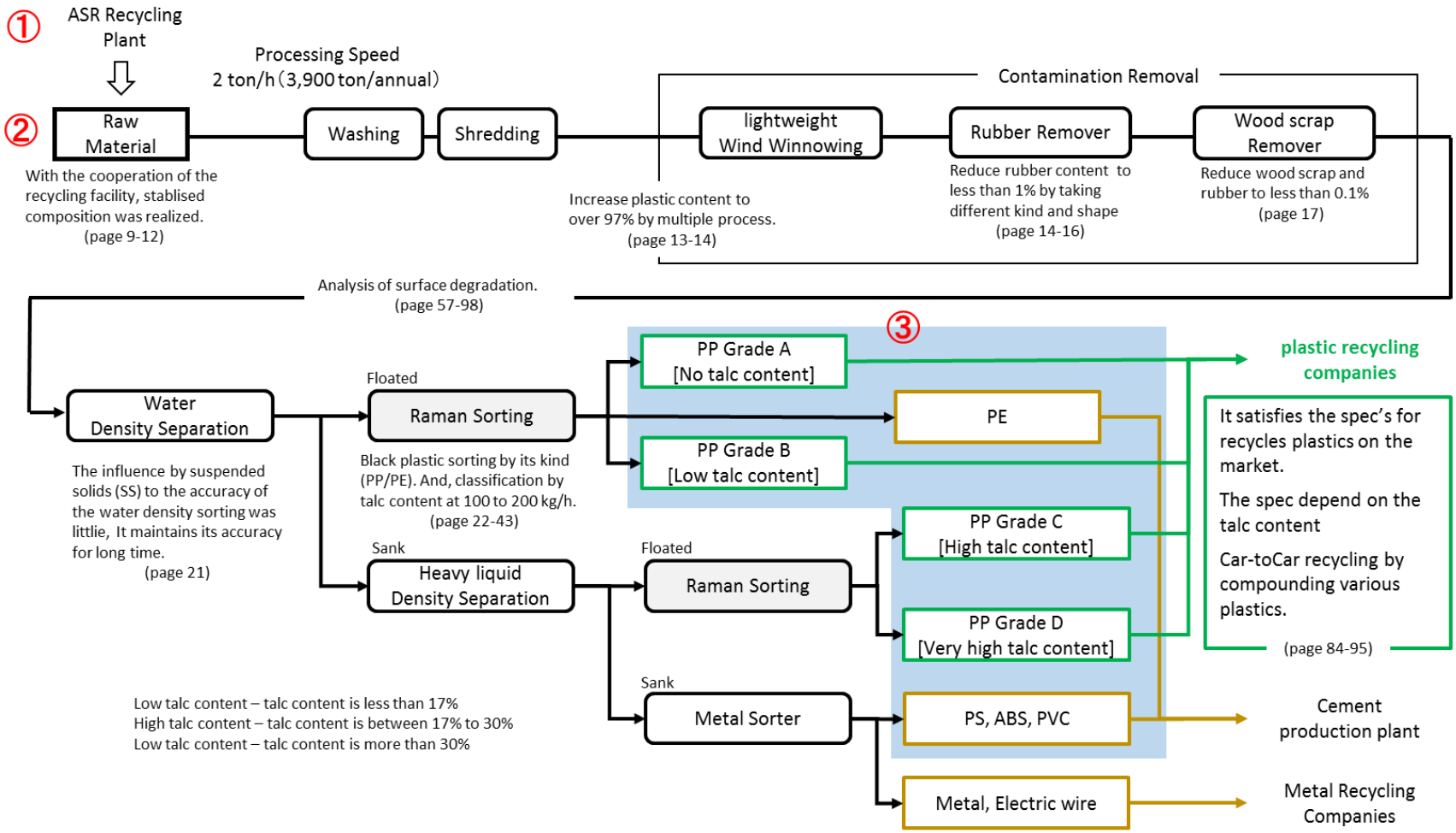
Ⅴ. Evaluation of project feasibility / horizontality development

When the domestic production amount of ASR is about 600,000 ton per year, and if plastic contents of the ASR is about 30%, the plastic content in ASR will be about 180,000 tons per year.

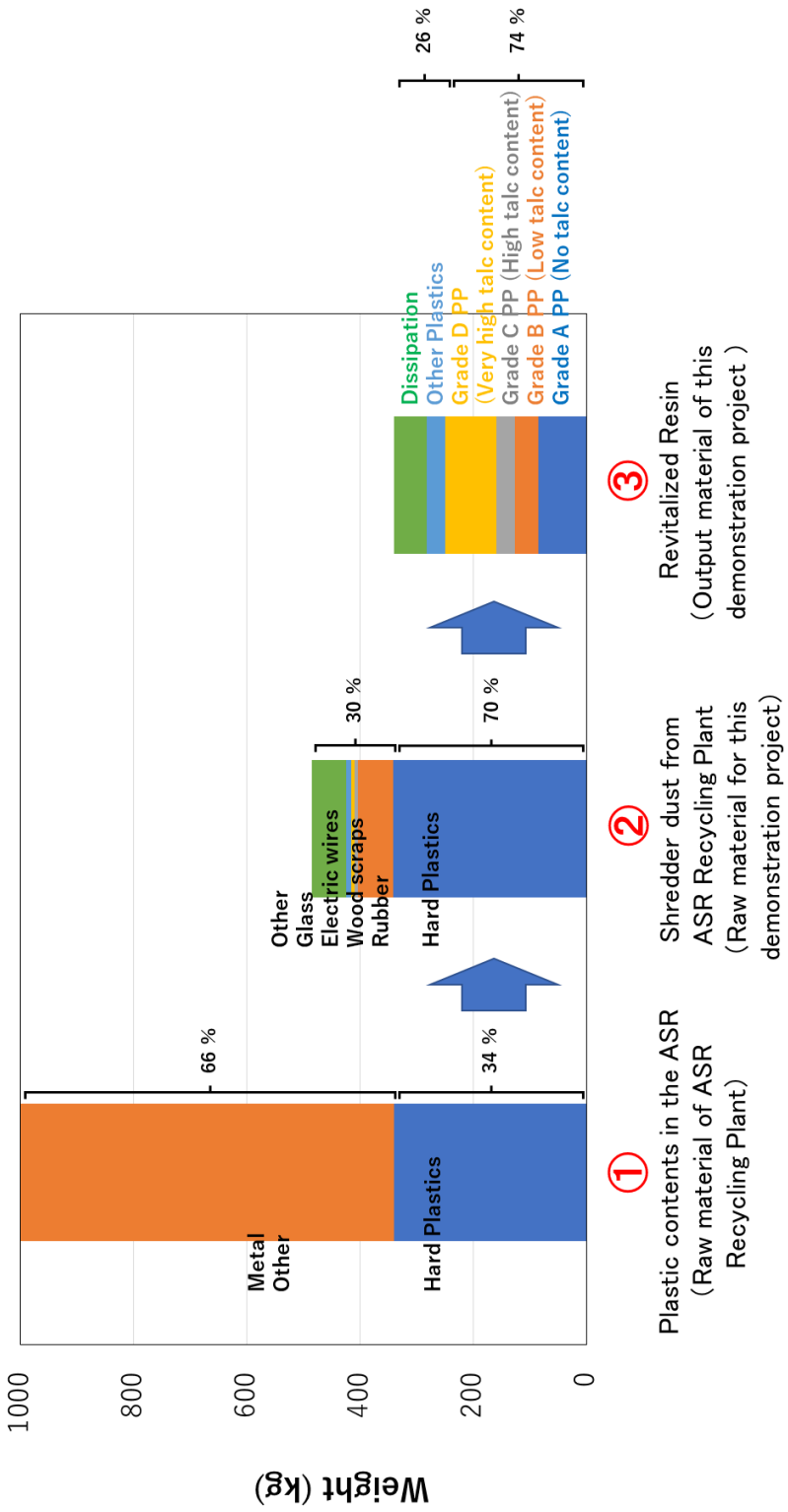
Assuming a model to process at 10,000 tons per year at one plant, sales will be 232 million yen / year if high-grade plastic can be sold at a market price of 50 yen / kg.

The capital investment for the plant with washing and shredding, density sorter, raman sorter is 380 million yen. The expenses including depreciation and amortization cost were 230 million yen. Therefore, it secures operating profit from the first year.

Therefore, this is the profitable business model, and this realize Car-to-Car recycling from ASR at the nation-wide level if the plants deployed at 18 places in Japan.


①
ASR Recycling Plant
Processing Speed
2 ton/h（3,900 ton/annual）
②
Raw Material
With the cooperation of the recycling facility, stablised composition was realized.
(page 9-12)
Washing
Shredding
Contamination Removal
lightweight Wind Winnowing
Increase plastic content to over 97% by multiple process.
(page 13-14)
Rubber Remover
Reduce rubber content to less than 1% by taking different kind and shape
(page 14-16)
Wood scrap Remover
Reduce wood scrap and rubber to less than 0.1%
(page 17)
Analysis of surface degradation.
(page 57-98)
③
Water Density Separation
The influence by suspended solids (SS) to the accuracy of the water density sorting was little, It maintains its accuracy for long time.
(page 21)
Floated
Raman Sorting
Black plastic sorting by its kind (PP/PE). And, classification by talc content at 100 to 200 kg/h.
(page 22-43)
Sank
Heavy liquid Density Separation
PP Grade A [No talc content]
PE
PP Grade B [Low talc content]
Floated
Raman Sorting
PP Grade C [High talc content]
PP Grade D [Very high talc content]
Sank
Metal Sorter
PS, ABS, PVC
Metal, Electric wire
Low talc content – talc content is less than 17%
High talc content – talc content is between 17% to 30%
Low talc content – talc content is more than 30%
plastic recycling companies
It satisfies the spec's for recycles plastics on the market.
The spec depend on the talc content
Car-toCar recycling by compounding various plastics.
(page 84-95)
Cement production plant
Metal Recycling Companies

Plastic composition of ① to ③ in the above figure are shown below.



Changes in Plastic Composition in 1 ton Treatment of ASR

1. 背景・目的

自動車リサイクル法に基づき、使用済み自動車は年間 333 万台（平成 26 年実績）が処理されている。これらは解体、スクラップされる中で部品や金属が回収されるが、最後には、自動車シュレッダーダスト（Automobile Shredder Residue,以下「ASR」と記載）が、約 185kg／台、全体で約 58 万トン／年発生している。ASR の中には 30 %以上のプラスチック（平成 22 年度環境省請負業務結果報告書「自動車破砕残さにおける性状把握調査業務」より）が含まれるが、現状、ほとんどが燃料代替や炭素原料化により処理されている。この ASR プラスチックのリサイクル促進を目指し、実証事業が環境省により 2 件行われている。平成 25 年度自動車リサイクル連携高度化事業「光学選別機を利用した ASR 由来プラの材料リサイクルおよび油化実証試験事業」では、複雑な混合物である ASR からでもプラスチックが材料リサイクルできる可能性があり、サーマルリサイクルはもちろんケミカルリサイクルよりも CO2 排出削減効果が大きいこと、近赤外吸収方式の光学識別では黒色の ASR プラスチックは全く選別できないこと、比重選別によりケミカルリサイクル向けに約 50 %のプラスチックが回収できることが明らかにされている。

平成 27 年度低炭素型３Ｒ技術・システム実証事業「ASR から材料リサイクルを図る仕組みづくり」（以下、平成 27 年度実証事業あるいは報告書）では、本実証事業実施者らが事業化している廃家電リサイクル向けのプラスチック選別回収システムを使用して、カスケード材料リサイクル利用なら約 50 %回収できること、ラマン散乱光学識別によりポリプロピレン（PP）が濃縮でき、水平リサイクルの実現可能性があること、CO2 排出量はセメント製造の原燃料化に比べ約 35 %削減できることを明らかにしている。また、複数の ASR 再資源化施設から様々な性状の原料を受け入れた場合につき、事業として ASR 由来プラスチックを材料リサイクルするための処理法などの方策も検討している。

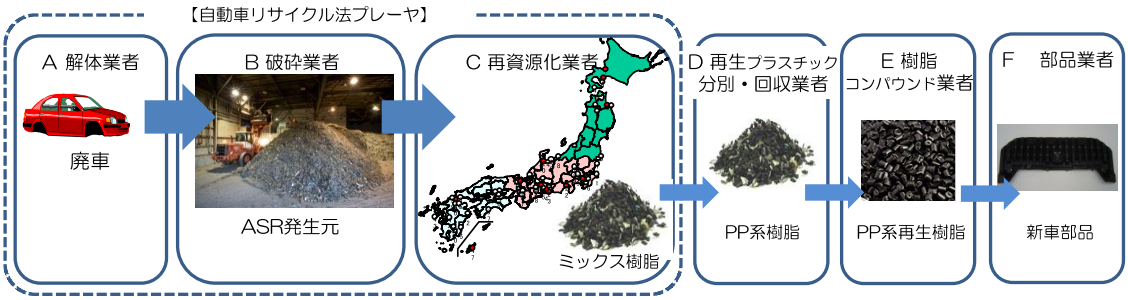


図 1-1 ASR 由来プラスチックの材料リサイクルの流れ

これまでの環境省実証事業の成果を踏まえると、自動車リサイクル法の中で、ASR 由来プラスチックを材料リサイクルする流れとしては、図 1-1 のようなフローを想定することができる。しかし、Car-to-Car リサイクル、すなわち回収したプラスチック片から再生樹

脂ペレットを作り、それを材料として自動車部品を製造し、新しい自動車に使用することを目指すには、より一層の夾雑物除去や、添加剤であるタルク含量の度合いに応じた選別回収等、より高度化が必要なことも明らかとなっている。例えば、自動車プラスチックの約 50 %を占める PP 内外装材では、部品ごとに求められる特性が異なり、それぞれに専用グレードが定められている。回収プラスチックの使用量を拡大するためには、再生樹脂でもグレードを考慮し、それぞれに適した物性を見据えたグレード別選別回収技術の確立が必要である。

図 1-2 に、現状、平成 27 年度実証事業で明らかになった成果、本実証事業の目的を並べた概要を示す。本実証事業では、平成 27 年度実証事業の結果をもとにして、ASR 由来プラスチックの材料リサイクルの深化を目指し、①ASR 由来プラスチックの材料リサイクル可能量を増加させるために樹脂再生工程で問題となるゴムや木屑といった夾雑物の除去技術をレベルアップすること、②回収プラスチックの材料リサイクル適用範囲を拡大するために、比重選別やラマン散乱といった光学式識別を最適化して、タルク含量の度合いに応じた回収を行うこと、③水平リサイクルすなわち Car-to-Car リサイクルでの利用を視野に入れて、上記のプロセスから回収した再生樹脂の物性評価を行うことに取り組んだ。本実証事業における具体的な ASR 由来プラスチックの選別回収プロセスの概要と選別回収するプラスチックのグレードを図 1-3 に示す。

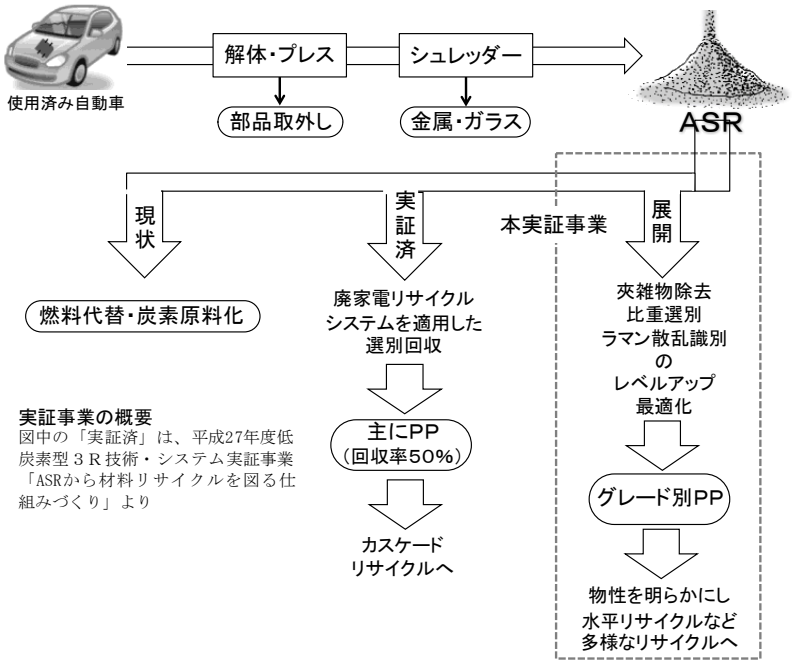


図 1-2　H27 年度実証事業成果と本実証事業の目的

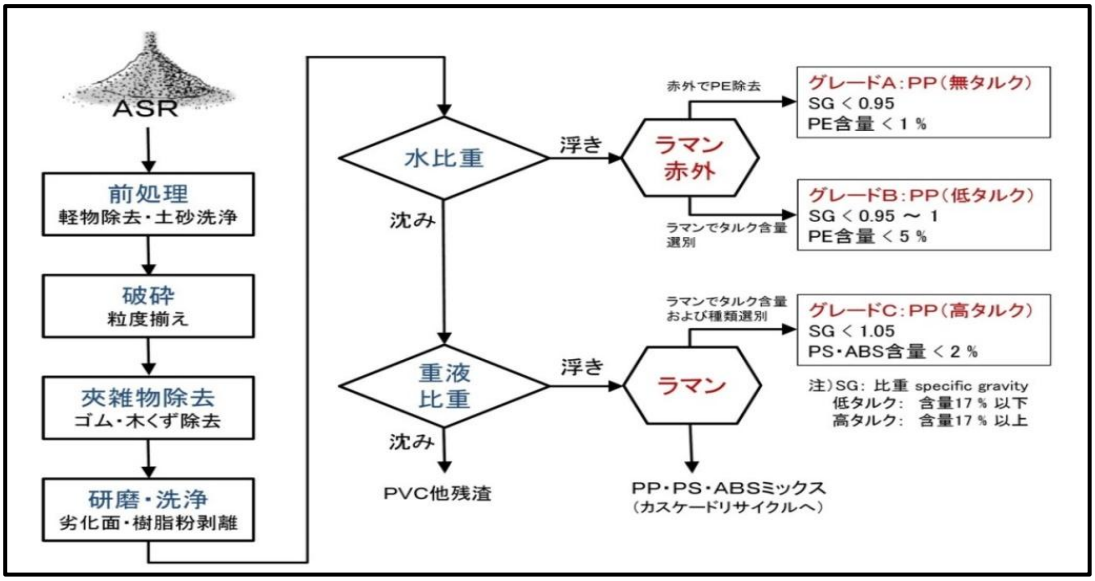


図 1-3　本実証事業における ASR 由来プラスチック選別回収プロセスの概要

2.　実施内容

2.1. 実施項目と内容

これまでの環境省実証事業を通じて、従来、セメント製造やガス化溶融炉の原燃料としてサーマルリサイクルされてきた ASR 由来プラスチックから、材料リサイクルに使えるプラスチックが相当量回収できることが明らかになった。本実証事業では、回収プラスチックの利用を拡大し、実証するプラスチック選別回収システムの導入を促進するためにも、出口戦略を見据えた項目を実施する。具体的には、H27 年度実証事業で明らかになった夾雑物除去技術のレベルアップ、光学識別の活用といった材料リサイクルを深化させる技術を実証する。そして、それらを再生樹脂の物性などの品質管理と結びつけ、後段の再生樹脂利用拡大ための技術として確立することを意図する。図 2.1-1 に、ASR 由来プラスチックを材料リサイクルするまでの流れに沿って、平成 27 年度実証事業で得られた知見と本実証事業での実施項目を示す。

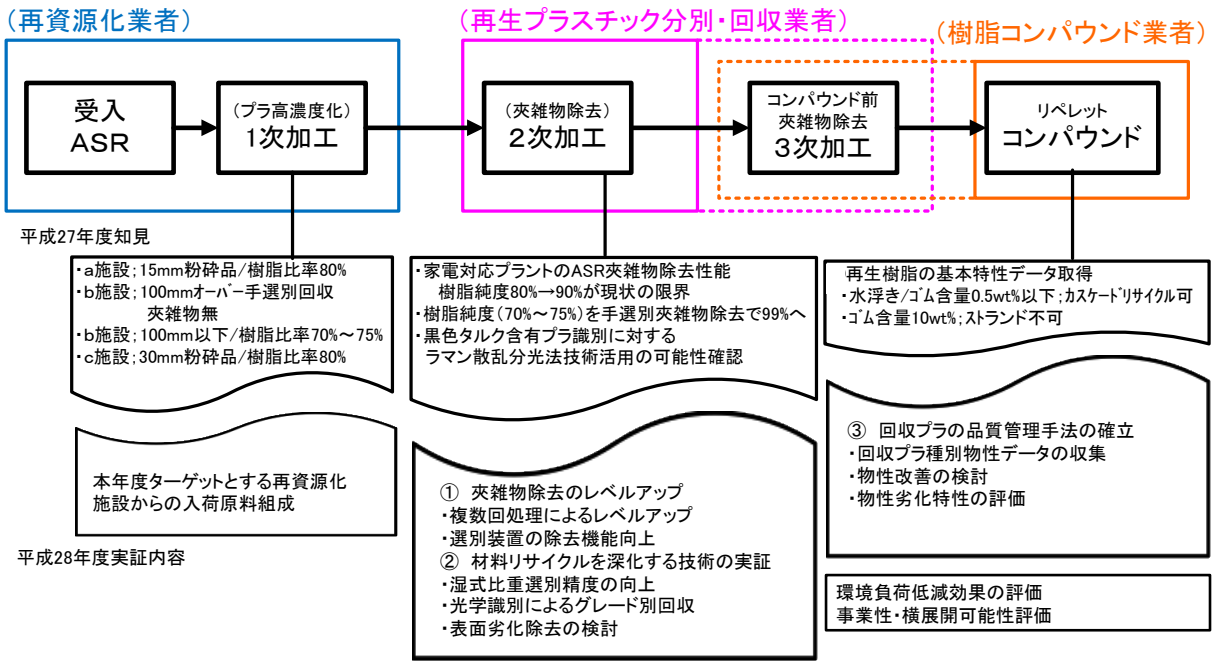


図 2.1-1　平成 27 年度実証事業の知見と本実証事業実施項目

（1）夾雑物除去のレベルアップ

①　再資源化施設からの入荷原料組成

平成 27 年度実証事業において ASR 供給の協力を得た再資源化施設のうち 2 つからリサイクルの対象となる入荷原料の供給を受けた。ひとつの供給者（KM 社）は手選別を取り入れており、破砕粒度 100 mm 以上では夾雑物含量が実質的に 0 %となる ASR 由来プラスチックの供給を受けた。これを、特別に、理想的な選別回収の状態を想定した

回収プラスチックとみなし、本実証事業での選別回収プロセスから得られる再生樹脂の物性評価において、比較参照の対象とした。KM 社のプロセスには手作業が入るため「バッチモデル」と称することとした。もうひとつの供給者（TM 社）からは、15mm サイズの粉砕品が供給されるが、全工程を機械選別で行っており、本実証事業での選別回収プロセスとつないで一連の連続工程を想定することができるものである。したがってこれを「連続モデル」と称することとした。はじめに、本年度実証事業で対象としたこれら再資源化施設からの入荷原料組成を明らかにした。

② 複数回処理によるレベルアップ

複雑な性状のリサイクル原料では純度向上のために全く同じ処理を複数回行うことがしばしば行われる。本実証事業でもその効果を検証した。

③ ゴム除去のレベルアップ

平成 27 年度実証事業では、動摩擦係数の違いを利用したゴム除去装置によりゴムの含有率を数 %程度に低下させることができたが、再生樹脂製造工程で安定的にストランドが引けるようになるには 1 %以下にする必要がある。これを目指して方式の異なるゴム除去装置を組み合わせるなどによりゴム除去のレベルアップを行った。

④ 木屑除去のレベルアップ

平成 27 年度実証事業では、静電・コロナ放電併用式の木屑除去装置を用いて木屑含量を数分の一にできることを示したが、木屑の形状やサイズの違いへの対応は不十分であった。木屑は再生樹脂製造のコンパウンド工程でメッシュの目詰まりを引き起こすため、回収プラスチックの商品価値を著しく低下させる要因となっている。静電・コロナ放電併用式により木屑除去のレベルアップを目指した。

また、いずれの夾雑物除去においても、その処理は事業スケール（150 kg/h）と同様の条件で実証した。

（２）材料リサイクルを深化する技術の実証

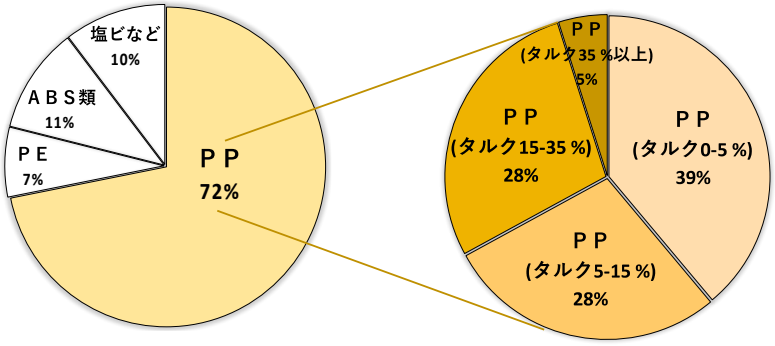
① 湿式比重選別精度の実証

廃家電リサイクルにおける水比重選別では、水質管理を十分に行うことで水に浮く PP の純度を 97 %以上にまで高めることができている。一方で、土砂による汚れのひどい ASR 由来プラスチックでは水質汚濁による選別精度の低下も懸念される。本実証事業では、水比重選別精度を浮遊物質（SS）の値と関係付けて検討した。処理量２ ｔ / ｈ でも十分な性能が維持できるかの実証を行った。

② 光学識別によるグレード別回収の実証

平成 27 年度実証事業により ASR 由来プラスチックの 70 %以上が PP であり、それは広い含量範囲で添加剤タルクを含んでいることが明らかになった（図 2.1-2）。含量 15 ー17 %を境に、少なければ水に浮き、多ければ水に沈むことで水比重（比重 1.0）により選別できる。重液比重（比重 1.12）を用いれば 30 %程度を境に選別できる。しかし、

水比重ではタルクを 10 %程度含んだ PP とタルクを全く含まない PP は選別できない。また、重液比重で浮いたもののうち 20 %程度タルクを含む PP と ABS 樹脂とは選別できない。これらの選別にはラマン散乱といった分光測定に基づく光学識別が必要である



PP:ポリプロピレン、PE:ポリエチレン
ABS:アクリロニトリル、ブタジエン、スチレン共重合体

図 2.1-2　ASR 中のプラスチックの種類（平成 27 年度実証事業報告書より）

本実証事業では、廃家電リサイクルで使用しているラマン散乱識別装置を使い、事業スケール処理量（150 kg/h）で先に述べたような選別が可能かどうか検証した。

また、最近、ヨーロッパにおいてラマン散乱と同様の識別作用を期待した中赤外吸収識別装置が市販された。その装置を試用することはできなかったが、それと同じ原理の装置を使用し、その性能を検証した。

③　表面劣化除去の検討

ASR 由来プラスチック表面は、廃家電に比べ使用済み自動車になるまでの期間が長く、使用環境も過酷であるため高分子材料としての機能低下や金属付着による汚染といった観点で劣化していると考えられる。本実証事業では表面状態を明らかにし、プラスチック相互の共摺り作用やガラス片による研磨作用を活用した表面層除去技術の検討を行った。

（３）回収プラスチックの品質管理手法の確立

①　回収プラ種別物性データの収集

タルク含量によりグレード分けした回収 PP をペレット化し、それから試験片を作成し、機械物性を測定した。夾雑物除去などで理想的な選別回収状況に相当するバッチモデルとプラスチックリサイクルの事業化を意図した連続モデルでの物性の違いやタルク含量の違いを評価した。

②　物性改善の検討

実業でのコンパウンド工程に習い、適切な物性を持つバージンプラスチックを選択し、回収 PP ペレットとコンパウンドすることで、自動車向け PP の目標物性値に近づくよ

う物性改善した。

③　物性劣化特性の評価

回収 PP 試験片で熱と光による加速劣化試験を行い、物性の劣化を評価した。

（４）環境負荷低減効果の検証

本実証事業実施によるリサイクル可能なプラスチック量の見通しをもとに、CO2 排出量低減効果を検証した。評価範囲（CO2 排出量評価のバウンダリ）は、「ASR 再資源化施設からの入荷原料」とし、従来のセメント製造原燃料になった場合の CO2 排出量をベースラインとして、材料リサイクルがもたらすバージン材製造代替効果による CO2 排出量削減の効果を定量的に評価した。

（５）事業の実現・横展開可能性評価

本実証事業実施の実現性をコストバランス面から評価した。設備投資、リサイクルプラスチック単価データおよび回収量をもとに事業の経済的実現性を検討した。その実現可能性をもとに横展開可能性を検討した。

2.2. 実施体制

本実証事業の実施体制を役割分担とともに、図 2.2-1 に示す。実証項目の具体的な実施はほぼすべてを（株）サイムにおいて行った。実証内容の詳細な評価検討を大学研究者と共同で行うとともに、対象となる原料を供給する ASR 再資源化業者、回収したプラスチックを再生加工する樹脂コンパウンド業者等を主な協力者とし、それぞれプラスチック回収率向上や再生樹脂物性向上などのために密接な情報交換を行った。さらに、自動車メーカ、自動車リサイクル関連企業からは、リサイクルプラスチックの需要者の観点からアドバイスを受けた。

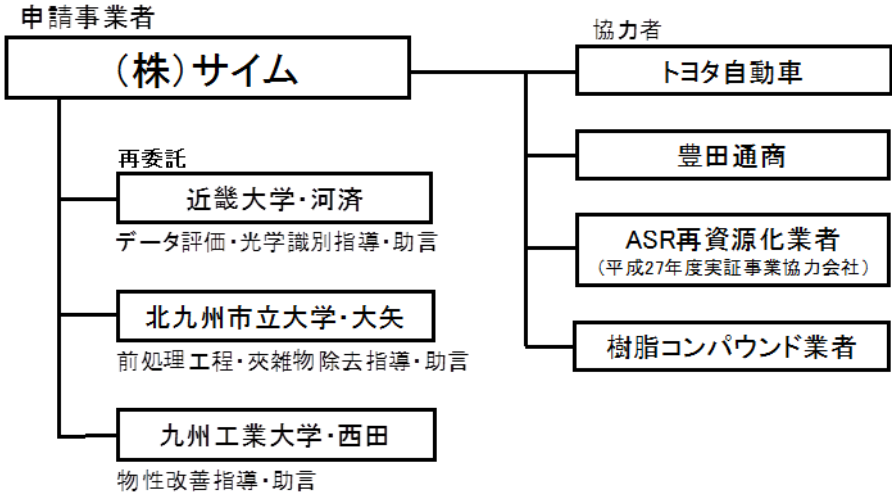


図 2.2-1　実施体制

3.　実施結果

3.1. 夾雑物除去のレベルアップ実施結果

3.1.1.　再資源化原料施設からの入荷原料組成

平成 27 年度実証事業において ASR 供給の協力を得た再資源化施設のうち 2 つからリサイクルの対象となる入荷原料の供給を受けた。ひとつの供給者（KM 社）は手選別を取り入れており、KM 社の原料を使用した処理を「バッチモデル」と称することとした。もうひとつの供給者（TM 社）からは、全工程を機械選別した原料が入荷する。本実証事業での選別回収プロセスとつないで一連の連続工程を想定することができるものであり、TM 社の原料を使用した処理を「連続モデル」と称することとした。

はじめに、KM 社からの入荷原料につきまとめる。KM 社再資源化処理施設の処理工程を図 3.1.1-1 に示す。

ASR をサイズで選別（分級）し、100 mm 以上の大きさ ASR は手選別でプラスチックのみを抽出する（図中の KM_100）。100 mm 以下のサイズは機械選別と分級の処理を行い、金属と再生プラ原料を分け、再生プラ原料を水比重選別により浮き成分（PP・PE（図中の KM_35））と沈降成分（PP・その他のプラ）に選別する。KM 社入荷原料 KM_35 の写真を図 3.1.1-2 に示す。

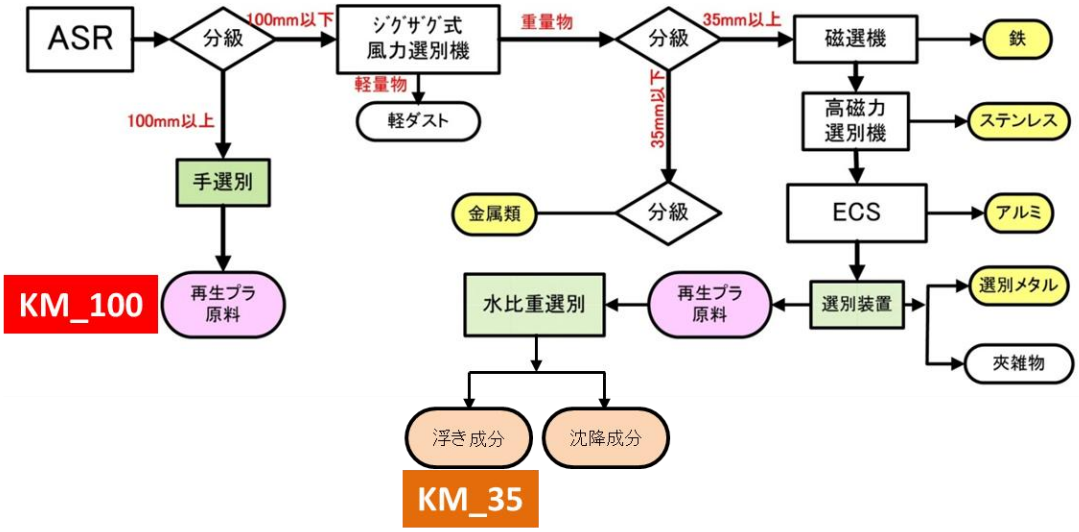


図 3.1.1-1　再資源化処理施設 KM 社の処理工程

図 3.1.1-2　KM 社由来の入荷原料（KM_35）

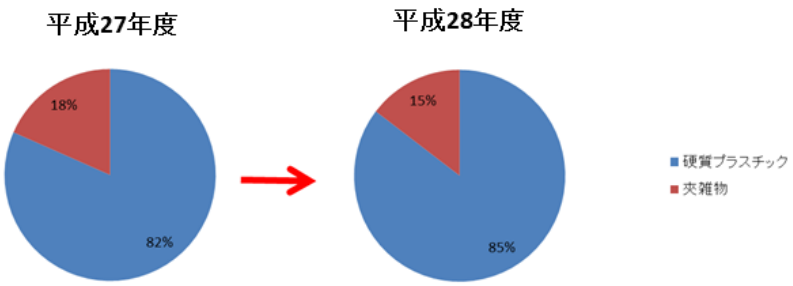


図 3.1.1-3　KM 社由来の KM_35 の性状

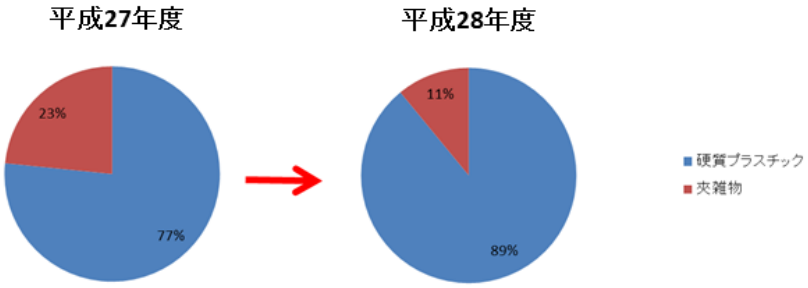


図 3.1.1-4　KM 社由来の水選別沈降品の性状

再資源化施設（KM 社）由来の本年度入荷原料について、図 3.1.1-3 と図 3.1.1-4 に示すように原料中に含まれるプラスチック含有量が平成 27 年度実績から浮きプラで 3 ポイント、沈降プラで 12 ポイント向上していた。

TM 社の場合、全工程を機械選別で行い 15mm サイズの粉砕品となる。図 3.1.1-5 中の燃料代替材を本実証事業における TM 社由来原料とする。

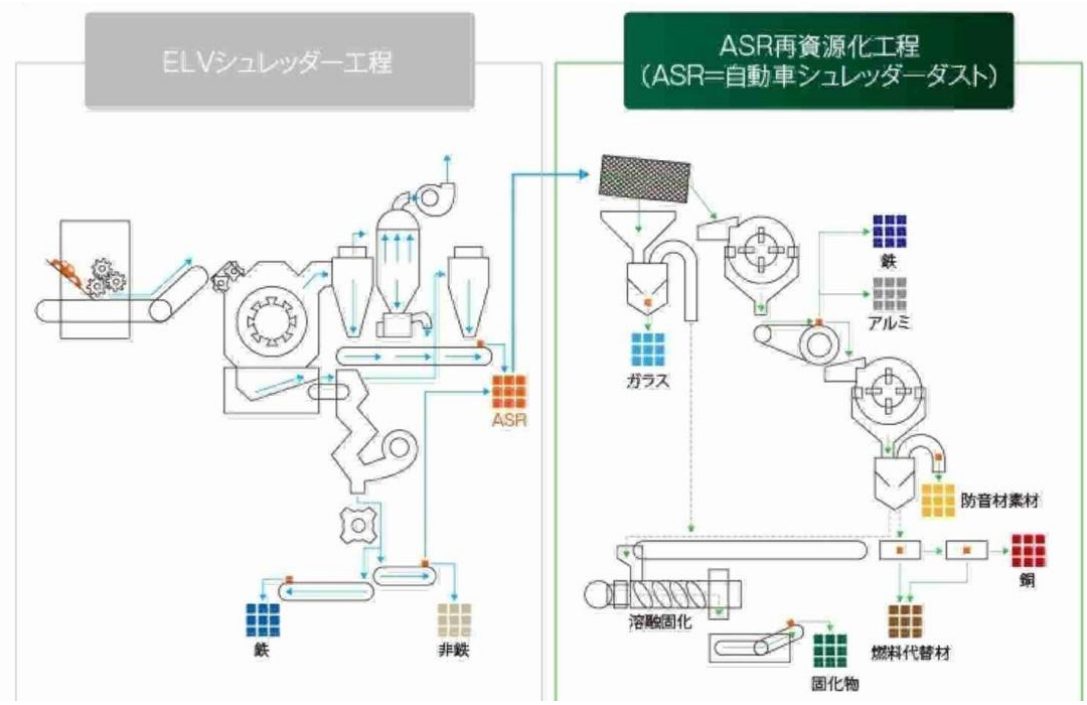


図 3.1.1-5　TM 社処理工程（出典；再資源化施設 HP）

図 3.1.1-5 の燃料代替材の性状を図 3.1.1-6 および表 3.1.1-1 に示す。TM 社の ASR プラスチックには夾雑物が多く、平成 27 年度実証事業ではコンパウンド時のメッシュ詰まり（図 3.1.1-7）やストランド切れ（図 3.1.1-8）によりリペレット化が困難であった。本実証事業では夾雑物除去精度を深化させることでリペレット化原料におけるプラスチック成分を濃縮させ、コンパウンドに成功した。

図 3.1.1-6　TM 社由来原料の含有物写真

表 3.1.1-1　TM 社由来原料の性状

成分	含量(%)
硬質プラスチック	70～80
ゴム・スポンジ	13.1
木屑	1.2
その他(ガラス・金属・被覆など)	5～15

図 3.1.1-7　コンパウンド工程でのメッシュの目詰まり

図 3.1.1-8　ゴム類によるストランド切れ

3.1.2. 複数回処理によるレベルアップ

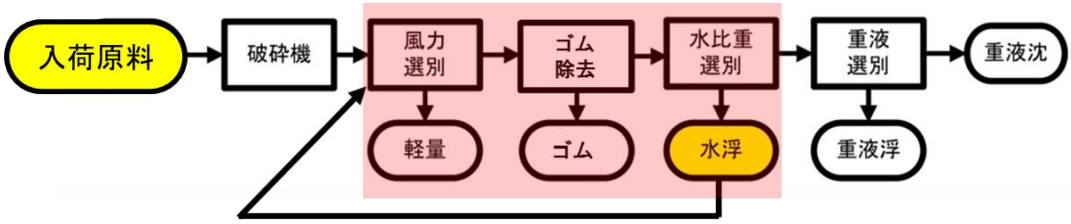


図 3.1.2-1　機械選別の複数回処理工程

表 3.1.2-1　使用した装置

装置メーカ	装置名	型式	作業日時	作業場所
C＆I	風力選別機	APS-1500	随時	㈱サイム関西事業所
自社製	ゴム除去装置	-	随時	㈱サイム関西事業所
國恩工業	水比重選別機	KOW IN-KBS	随時	㈱サイム関西事業所

ここでは、入荷原料について、機械選別工程での複数回処理による含有プラスチックの純度の向上について実証した。TM 社由来の入荷原料を風量選別、ゴム除去、水比重選別の 3 工程（図 3.1.2-1 および表 3.1.2-1）に複数回かけた場合の選別品中に含まれるプラスチック、異物（繊維他）、ゴム、被覆、木屑の重量比の変化について図 3.1.2-2 に示す。

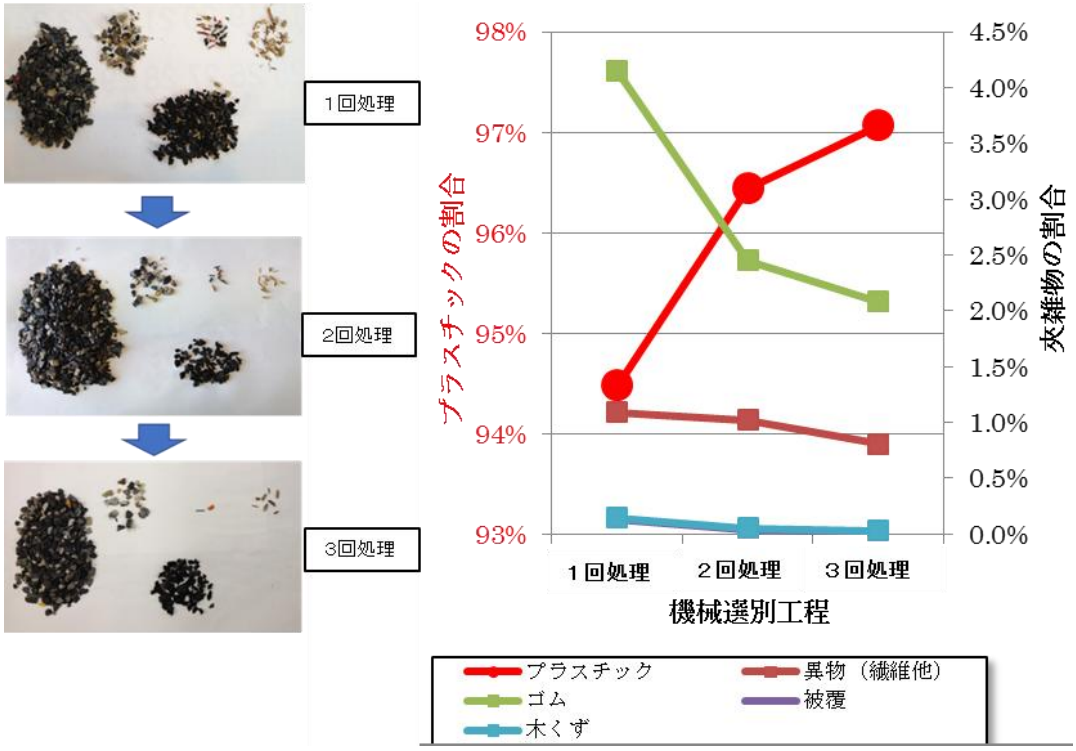


図 3.1.2-2　機械選別処理回数と性状の変化(サンプル：TM 社由来の入荷原料)

複数回処理により、プラスチックの含量を 97 %に向上でき、２回流し以降で、１回流しでは取り切れなかった夾雑物を除去できていることが分かる。今後の入荷原料処理システム構築の上で機械選別装置の設置台数の目安となる結果が得られた。

3.1.3. ゴム除去装置の除去能力検証

平成 27 年度実証事業では、動摩擦係数の違いを利用したゴム除去装置によりゴムの含有率を数 %程度に低下させることができたが、再生樹脂製造工程で安定的にストランドが引けるようになるには１ %以下にする必要がある。本年度実証事業では、除去効果が確認された２つのパターンのゴム除去方法を組み合わせ、除去効果の向上を検証した。

・パターン１：逆さコンベアについて

図 3.1.3-1 に示す方法は、搬送コンベアの搬送方向延長線上からの立ち上げ角度 θ として、動的摩擦係数の大きな物質が立ち上げ角方向に上り、小さいものは乗り移り先のコンベアから搬送方向と逆方向に滑り落ちるものである。

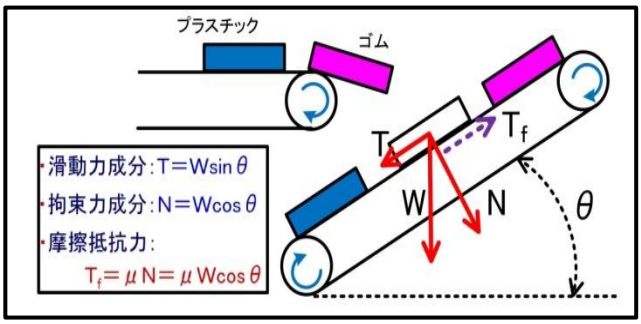


図 3.1.3-1　逆さコンベア模式図

・パターン２：ゴム除去ローラーについて

図 3.1.3-2 に示す方法は、コンベア先端に滑りやすい PP 管ローラーを据え付け、高速で順方向に回転させることで摩擦係数の小さなプラスチックはローラー手前に滑り落ち、摩擦係数の大きなゴムなどの夾雑物はローラーの回転方向に引っ張られ、奥に落ちることを利用した方式である。装置仕様を最適化し、ローラー径：90 mm、ローラー速度：毎分 700 回転とした。

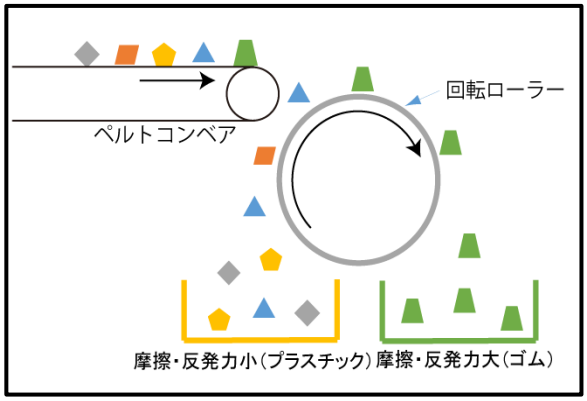


図 3.1.3-2　ゴム除去ローラー模式図

・2 つのパターンの組み合わせ

図 3.1.3-3 に示すようにゴム除去ローラー、逆さコンベア、ゴム除去ローラーの組み合わせでゴム除去ラインを構成した。使用したシステムの写真を図 3.1.3-4 に示す。

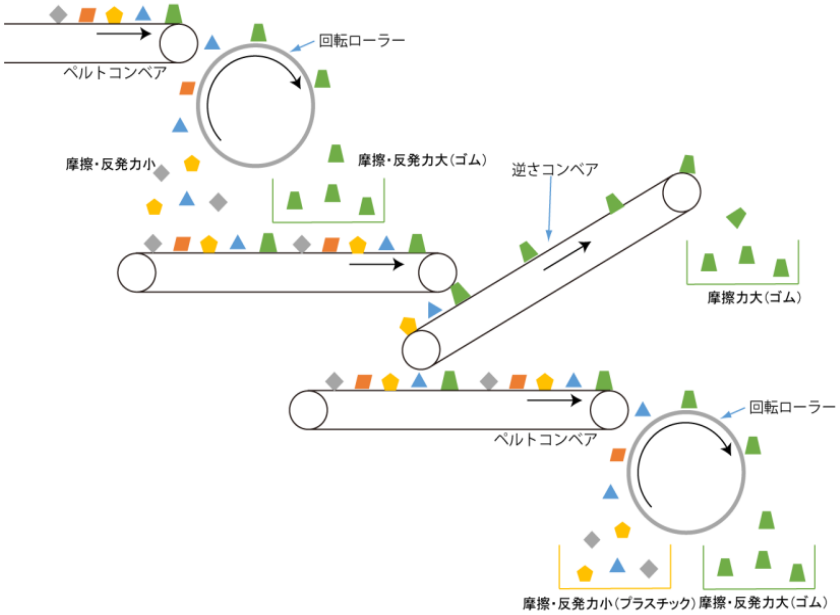


図 3.1.3-3　ゴム除去ライン構成

表 3.1.3-1　使用した装置

装置メーカ	装置名	型式	作業日時	作業場所
自社製	ゴム除去ライン	-	随時	㈱サイム関西事業所

表 3.1.3-2 に図 3.3.1-2 の PP1 をゴム除去ラインにラボスケールで複数回処理した結果を示す。1 回処理ごとにゴムの含有率が 1/2 ずつ減少し、4 回処理することでゴムの含有率を 1 %以下にまで減らせることが実証された。除去されたゴムの特徴として、ゴム除去ローラーでは発泡ゴムや厚みのあるゴムが、逆さコンベアでは薄い（平たい）ゴムが比較的多く確認された。除去されたゴムの写真を図 3.1.3-5 に示す。

図 3.1.3-4　構成したゴム除去ラインの写真

表 3.1.3-2　ゴム除去ライン処理の試験結果
（サンプル：TM_PP1）

		処理後の含有比率(wt%)				
		プラスチック	ゴム	ウレタン	木片	その他
	原料	92.84%	6.94%	0.11%	0.12%	-
ゴム除去処理工程	1回目	95.02%	3.75%	0.23%	0.08%	0.92%
	2回目	97.24%	2.11%	0.28%	0.09%	0.28%
	3回目	98.43%	1.15%	0.10%	0.10%	0.21%
	4回目	98.92%	0.90%	0.13%	0.04%	0.40%

図 3.1.3-5　除去されたゴム類（左：ゴム除去ローラー、右：逆さコンベア）

次に性状の異なる原料（A、B、C）について、実証スケールである 150 kg/h の処理量で処理した結果を表 3.1.3-3 に示す。いずれの原料でもゴムの含有率を 1/2 程度に減少することが実証された。

A：図 3.1.2-2 の１回処理

B：図 3.1.2-2 の２回処理

C：図 3.1.2-2 の３回処理

表 3.1.3-3　実証スケール：ゴム除去ライン処理結果（サンプル：TM_PP1 処理量 150 kg/h）

処理原料			(wt%)
	A	B	C
プラ	94.484%	96.441%	97.070%
異物（繊維他）	1.093%	1.022%	0.805%
ゴム	4.148%	2.453%	2.084%
被覆	0.128%	0.035%	0.010%
木くず	0.147%	0.050%	0.031%
合計	100.000%	100.000%	100.000%

ゴム除去ライン処理後			(wt%)
	A	B	C
プラ	94.880%	97.318%	98.688%
異物（繊維他）	2.095%	1.018%	0.471%
ゴム	2.483%	1.590%	0.822%
被覆	0.388%	0.027%	0.000%
木くず	0.155%	0.047%	0.018%
合計	100.000%	100.000%	100.000%

3.1.4. 木屑除去装置の除去能力検証

本実証事業では、静電・コロナ放電併用式による木屑の除去について検証した。模式図（図 3.1.4-2）に示すように、帯電させたドラムを順方向に回転させる。帯電により木屑は吸着するが、プラスチックは吸着しないためドラム奥に落下する。木屑は吸着し落下しないためスクレーパーまでたどり着き、そぎ落とされドラム手前に集められる。木屑除去装置の写真を図 3.1.4-1 に示す

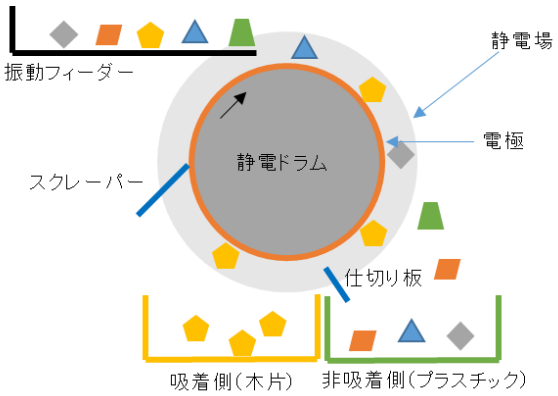


図 3.1.4-2　木屑除去の模式

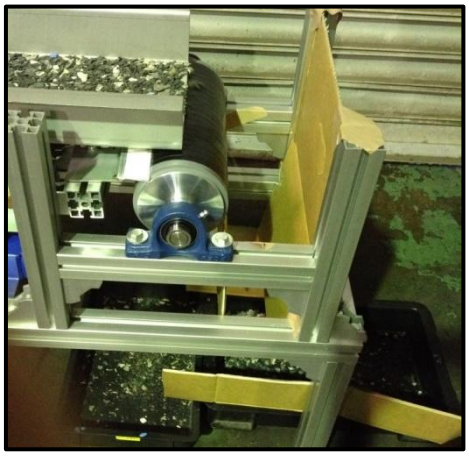


図 3.1.4-1　木屑除去装置

表 3.1.4-1　使用した装置

装置メーカ	装置名	型式	作業日時	作業場所
自社製	木屑除去装置	-	随時	㈱サイム関西事業所

木屑除去処理の結果を表 3.1.4-2 に示す。図 3.1.1-1 中の KM_35 を手選別処理した原料を木屑除去装置で処理し、プラスチック 99 %以上で回収し、木屑の含有量を処理原料の 1/4 まで減少させることが実証された。ゴムも同様に除去でき含有量も 1/20 まで減少した。

表 3.1.4-2　木屑除去処理の結果(サンプル：KM_35 手選別品)

	(wt%)
プラスチック	98.450%
ゴム	0.400%
木屑	0.249%
被覆・その他	0.300%
色付きプラ	0.400%
粉塵	0.199%

	(wt%)
プラスチック	99.810%
ゴム	0.018%
木屑	0.063%
被覆・その他	0.052%
色付きプラ	0.031%
粉塵	0.004%
布・糸くず	0.020%
PVB	0.002%

3.2. 材料リサイクルを深化する技術の実証

3.2.1. 比重選別精度の実証

廃家電リサイクルにおける水比重選別では、水質管理を十分に行うことで水に浮く PP の純度を 97 %以上にまで高めることができている。一方で、ASR 再資源化施設から入荷する原料は土砂汚れがひどく、水比重選別機内に土砂が持ち込まれる。この土砂が比重選別精度に与える影響について検証した。

（1）経時変化による水質悪化の影響

水比重選別槽の清掃直後から入荷原料を連続４日間処理し、水槽の水を１日ごとにサンプリングし、水に含まれる SS（浮遊固形物）の変化と選別精度の関係について検証を行った。図 3.2.1-1 に実証に用いた水比重選別機の写真を示す。

図 3.2.1-1　水比重選別機

表 3.2.1-1　使用した装置

装置メーカ	装置名	型式	作業日時	作業場所
國恩工業	水比重選別機	KOW IN-KBS	随時	㈱サイム関西事業所

清掃直後と連続処理４日後で採取した水を見比べると明らかに４日処理することで水が汚れていることが分かる（図 3.2.1-2）。

図 3.2.1-2　水槽の水入れ替え直後（左）と４日後（右）の水

表 3.2.1-2、図 3.2.1-3 に示すように、４日間連続処理することで、水槽の水に含まれる SS が２倍に増加していることが分かる。しかし、処理後のプラスチックの比重と材質（図 3.2.1-4、図 3.2.1-5、

図 3.2.1-6）を確認したところ、変化が見られず選別精度に与える影響は確認されなかった。

表 3.2.1-2　装置内の水の SS 分析（サンプル：関西事業所の水比重選別装置の水）

18t / 日

	内容	濾過液量(ml)	SS（mg/L）
1	11/29　家電後TM社開始前	500	239.4
2	11/30　TM社１日経過２パス前	400	278.8
3	12/1　TM社２日経過（内２パス昼組）	400	245.3
4	12/2　TM社３日経過２パス１回	400	369.3
5	12/3　TM社４日経過２パス１回	300	441.0

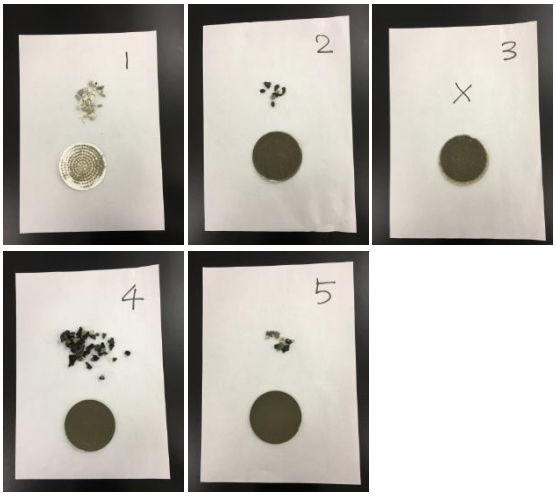


図 3.2.1-3　ＳＳ測定時フィルターに付着したＳＳ

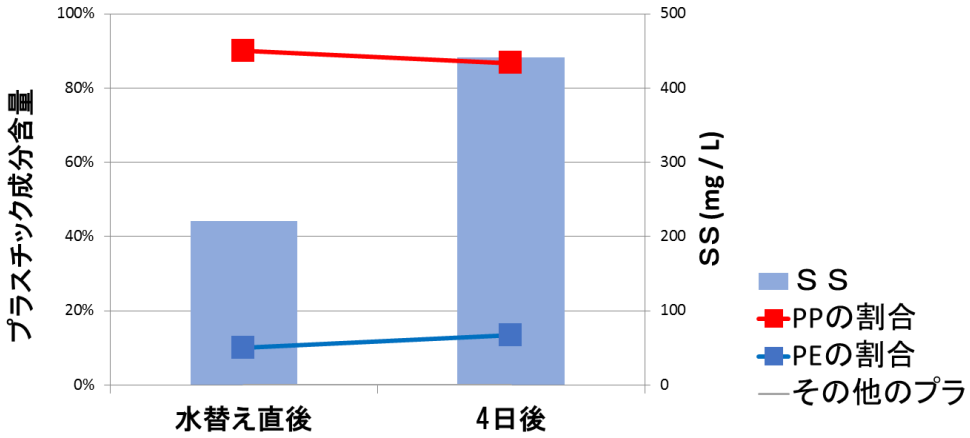


図 3.2.1-4　SS の増加と選別精度

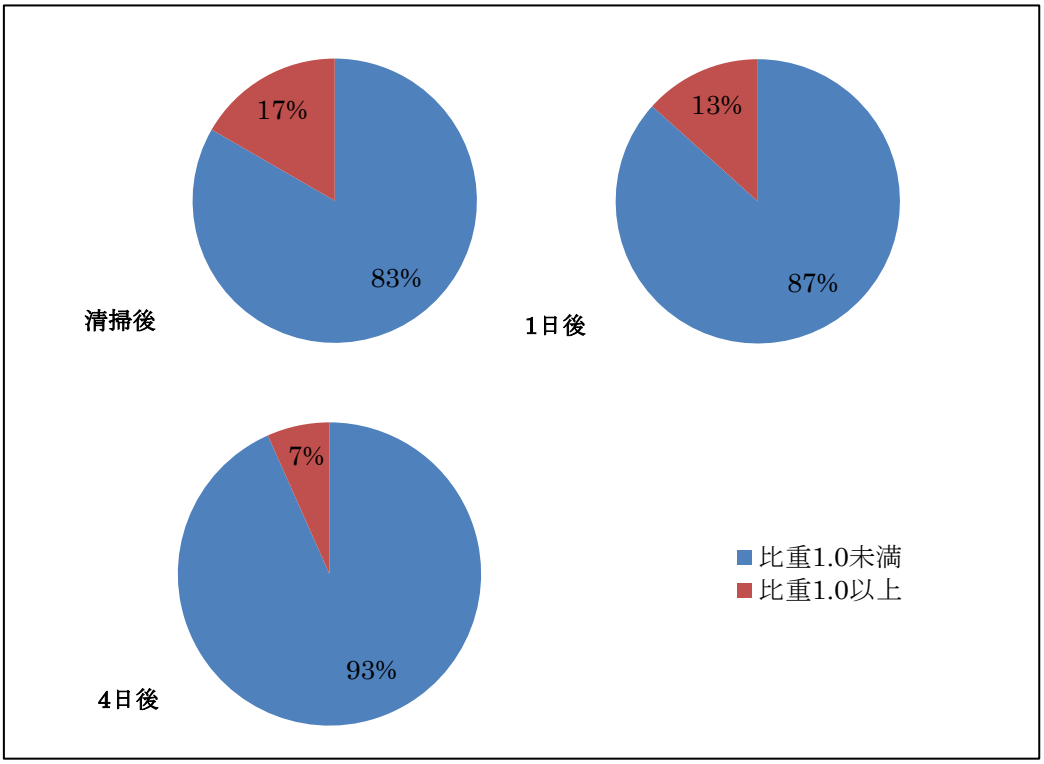


図 3.2.1-5　連続処理による水比重選別精度の変化

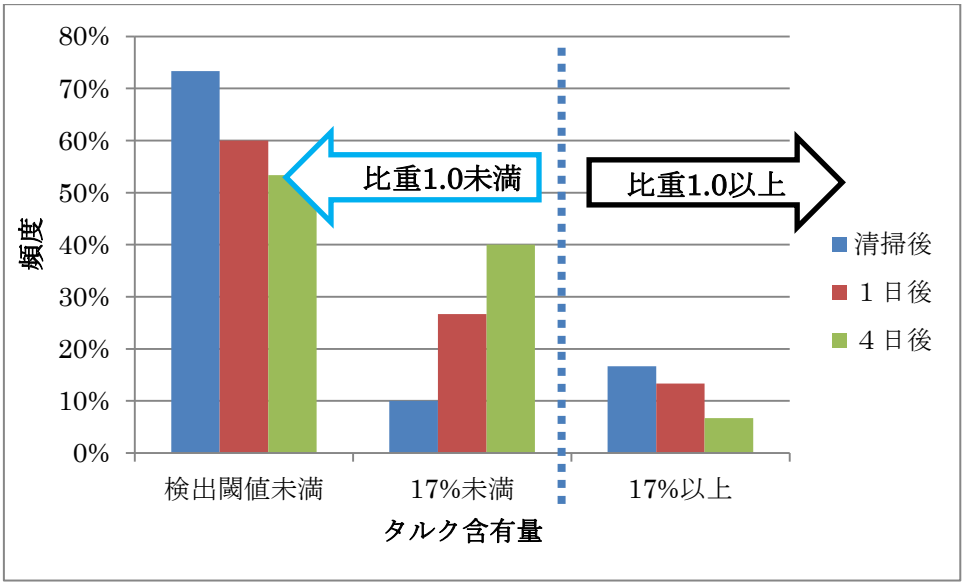


図 3.2.1-6　連続処理による水比重選別精度の変化(詳細)

（２）比重選別精度低下の原因について（北九州市立大学・大矢教授レポートより）

本実証では比重の大きなプラスチックが比重選別で浮くことが度々観測される。その原因を明らかにするために、再資源化処理施設の比重選別時に媒体として用いた水を図 3.2.1-7 の写真のようにサンプリングした。目視からは、明らかに ASR 比重選別を行ったことで、ASR に付着していた泥や埃によって水が汚れていることが分かる。

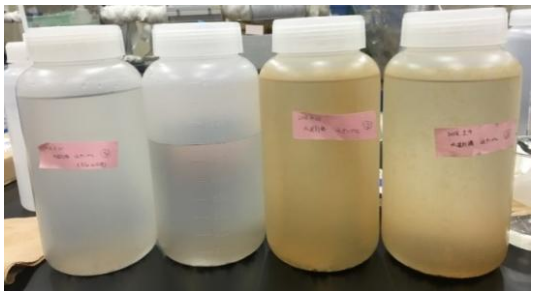


図 3.2.1-7 比重選別で使用した水
（左から水を取り換えてから 0，2，4，6 週間後）

しかしながら、この水をろ過して固形物量を測定したところ比重選別に影響を与えるような多量の固形物は観測できなかった。また、ろ液を ICP-AES で測定した結果からも比重が大きく変化するほどの塩類は検出されなかった。

そこで、一度沈んだ PP サンプルを集めて乾燥し、比重 0.999 での比重選別を数回行った。その結果１回目の比重選別では、約 10 %の PP が沈むことなく媒体の上面に浮き上がった。図 3.2.1-8 には、３回の実験ですべて浮いた PP 粒子の表面を拡大した写真を示す。このように浮くことが多い PP 粒子表面には、細かい傷や割れが存在し、その傷や割れに気泡や軽い繊維等の不純物が付着しやすいため、PP 粒子の見かけ比重に影響を与えることが比重選別時に媒体に沈む粒子が浮き上がる原因であることが推測された。

図 3.2.1-8 比重 0.999 の比重分離で３回とも浮いたサンプル

3.2.2. 光学識別によるグレード別回収の実証

平成 27 年度実証事業により ASR 由来プラスチックの 70 %以上が PP であり、広い含量範囲で添加剤タルクを含んでいることが明らかになった。タルク含量は水比重だけでは選別できず、PE（ポリエチレン）や ABS 樹脂の混入も防ぐことができない。これらの選別にはラマン散乱や中赤外吸収といった分光測定に基づく光学識別が必要である。

表 3.2.2-1　本章で使用した装置の一覧

装置メーカ	装置名	型式	作業日時	作業場所
自社製	ラマン測定試験装置	-	随時	㈱サイム
Thermo Fisher Scientific	ラマン分光光度計	DXR SmartRaman	随時	近畿大学産業理工学部
島津製作所	蛍光Ｘ線分析装置（EDX）	EDX-GP	随時	㈱サイム
自社製	ラマンプラスチックソータ	-	随時	㈱サイム関西事業所
島津製作所	赤外吸光光度計	IR Prestige-21	随時	㈱サイム
Spectral Imaging	ハイパースペクトルカメラ	MWIR	平成28年10月1日～10月31日	デルフトハイテック㈱

（1）ラマン識別機による黒色 ASR 由来プラスチックの選別

平成 27 年度実証事業より、ラマン識別ではタルクの含量が判定できることが明らかになっていた。本年度実証事業では各種条件の最適化を行い、タルク含量の違いによるグレード別の識別と水比重選別で共に浮くタルク含量 17 %以下の PP と PE の識別が、事業スケールで可能か実証した。

条件最適化で用いた装置

黒色のプラスチックをラマンソータで選別するにあたりラマンセンサーの最適化を行う。処理量や選別精度に関わるラマンセンサーのパラメーターとその関連について概要を図 3.2.2-1 にまとめる。

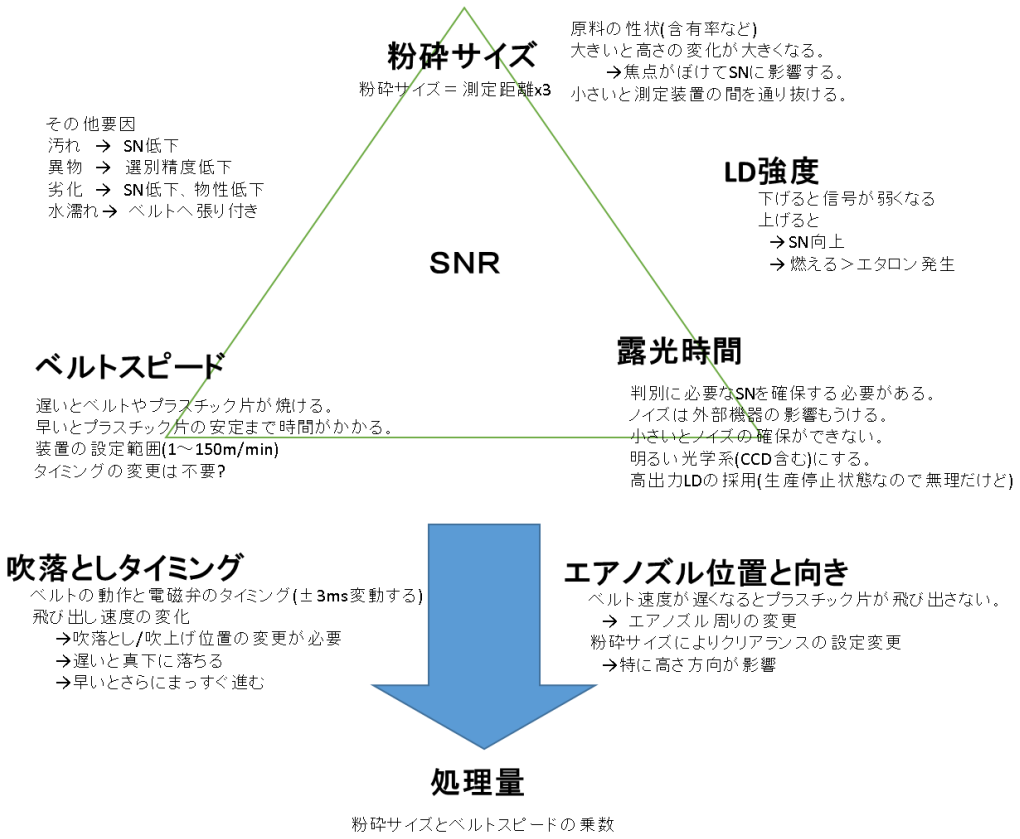


図 3.2.2-1　ラマンセンサーのパラメーターとその関係

ここでは識別に必要な Signal-to-Noise Ratio(以下 SNR)を確保しつつ処理量を最大化するための設定値を検討した。ラマン散乱識別法は光源の強度に比例して信号強度が上がるが、光源の強度が強すぎるとサンプルを燃やしてしまう。また、露光時間は長い方がきれいなスペクトルデータを得ることができるが、露光時間が長いとベルトスピードを遅くする必要があり処理量の低下につながる。また、スピード低下に伴う処理量の低下を補うため粉砕サイズを上げることもできるが、高さ方向での変化が大きくなるため信号強度は低下する。(図 3.2.2-1)

本節では ASR 由来の黒色プラスチックの測定に最適な露光時間の検証を行い。次に、プラスチックの移動速度を求め ASR のプラスチック選別に最適となるような条件を探った。最後にノイズ分を少なくする方策を検討した。

本節の測定試験において用いるラマン測定試験装置を図 3.2.2-2 **エラー！参照元が見つかりません。**に示す。

図 3.2.2-2　ラマン測定試験装置

利用するのはラマンセンサーおよび簡易型の制御装置。写真下部の黒い直方体のものがラマンセンサー。その左にあるものが回転テーブルである。また、写真中央にあるノートパソコンが乗っている箱が簡易型の制御装置で、その制御装置上にあるものはラマンセンサー制御用の専用ソフトウエアがインストールされたノートパソコンである。ラマンセンサーと制御装置はノイズの影響を抑え高速通信が可能な光ケーブルで接続されている。また、ノートパソコンと制御装置はLANケーブルで接続されている。

本節で用いるラマンセンサーは、関西事業所で用いるものをベースとし、レーザー出力は2Wとなるように設定し半値幅は1.2nmほどである。また、光学系は測定前にレンズの清掃および再調整を行っており阻害要因が少なくなるようにした。さらに、電子回路はノイズが少なくなるようにシールドなどを行った。

本測定試験では、回転テーブルに一定間隔でプラスチックを貼り付け、この回転テーブルを一定の速度で回転させる。回転テーブル上には2種類の白色プラスチックを貼り付け回転方向や回転速度が測定結果から分かるようにしている。通常の識別・選別処理ではラマンセンサーから照射されたレーザー光が測定対象に当たりそこから散乱するラマン散乱をとらえ、光ケーブルで接続された制御装置に連続的に記録されると同時に、識別処理を行いTTL信号として分別機構に送られる。今回はこの連続的に記録されたデータを読み出す機能を用いて、回転テーブル上に取り付けられたプラスチックを含む回転テーブル円周上のデータを取得する機構を用いて検証を進めることとする。

条件最適化：露光時間の設定

本節では最適な露光時間について検証した。図 3.2.2-3 **エラー！参照元が見つかりません。**は回転テーブルと貼り付けたプラスチックの写真を示す。

図 3.2.2-3　回転テーブルと貼り付けたプラスチック

回転テーブル上に ASR プラスチックを 2 種類 4 つずつ貼り付けた。使用したプラスチックはタルク含有が検出できなかった Not Detected(ND)と呼ぶグループと 17 %以下のタルクを含有する低タルクのグループを用いた。タルク量の分析には島津製作所社製のエネルギー分散型X線分析（Energy dispersive X-ray spectrometry、以下 EDX）装置、商品名 EDX-GP を用いたものである。使用したプラスチックは弊社で取り扱う入荷原料である。この ASR 由来プラスチックを EDX で分析し、タルク含有量ごとに分けたものからランダムに取り出した。また、白色プラスチックとしての PP と PE を 120°で設置した。

ラマンセンサーは写真の赤線上連続的に測定する。この測定結果をもちいてタルクに影響を受け変化するピークの高さおよび、PP 固有のピーク高さの変化を観察した。図 3.2.2-4 **エラー！参照元が見つかりません。**はこれらピークの位置と算出方法を示している。

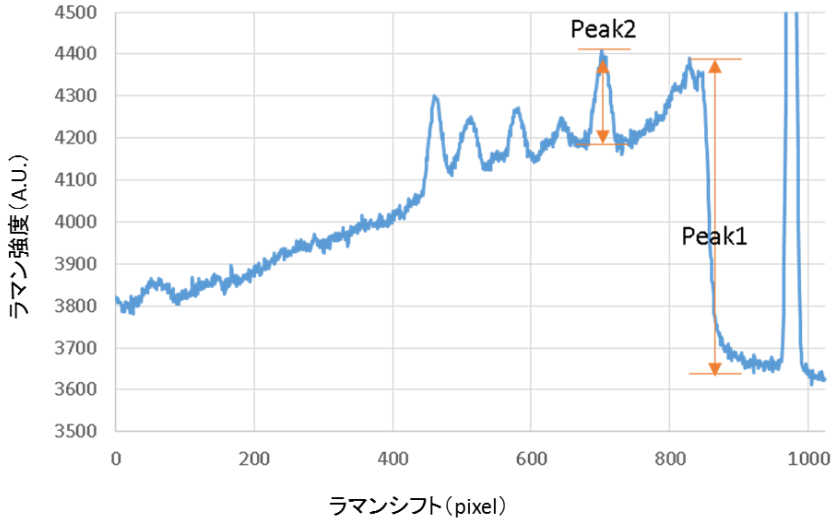


図 3.2.2-4　測定に用いるピーク位置と算出方法

上の図では白色 PP のラマンスペクトルを示している。ラマンスペクトルは横軸に波数、縦軸に光強度を示す。通常、波数は励起光からの差(単位は cm^{-1})で表すが、本測定装置は工業での利用を目的としているため、簡易表示としており横軸は受光素子のピクセル値で表している。

Peak1 はタルク含有量に影響を受け変化する。また、Peak2 は通常 660 cm-1 付近で見られるもので CH_3 の構造に由来する PP 固有のものである。これらのピーク高さを連続的にモニタリングすると、特定の材質や添加剤を含むプラスチックがセンサーの下を通過するとその部分だけ信号強度が跳ね上がる。この現象をとらえることで該当するプラスチックの有無を知ることができる。

この解析結果を以下に示す。解析では露光時間の影響を確認するため設定時間を 12, 18, 24 ミリ秒(1 ミリ秒 = 1/1000 秒)に設定し測定した。

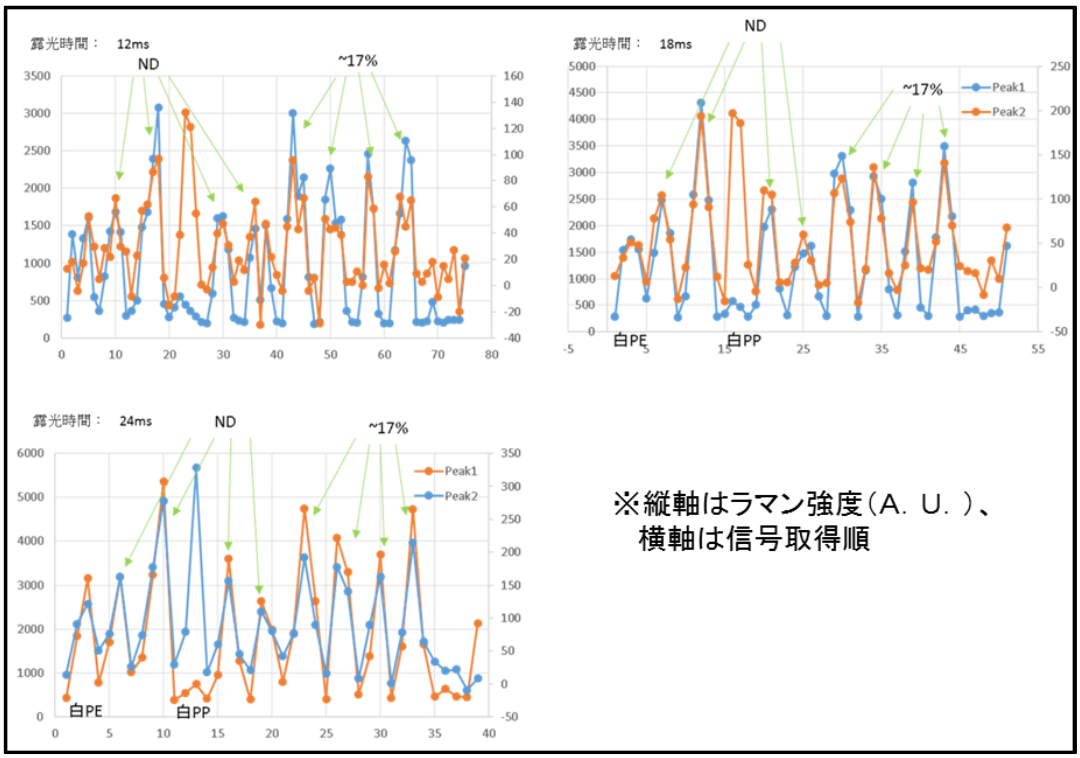


図 3.2.2-5　12，18，24ms での露光時間の依存性

ここでは信号としては弱い方の Peak2 の信号強度が実証スケールの試験で耐えうるかを確認する。そこでピーク頂点でのカウント値と関西事業所で測定されるノイズの高さの比が 0.5 以上になる露光時間を選ぶ。関西事業所で測定するノイズは通常時に 200 カウントである。そのため、ここでの測定結果がおおよそ 100 カウントあることが望ましいことになる。これを踏まえ図 3.2.2-5 **エラー！参照元が見つかりません。**を眺めると 12ms の測定で 70 カウント前後、18ms の測定で 100 カウント前後、24ms の露光時間で 160 カウント前後と推移していることから、安全を見て 24ms を取ることとした。

また、図 3.2.2-5 **エラー！参照元が見つかりません。**の Peak1 において ND と示した部分と～17 %と示した部分の測定結果を見ると、それぞれの頂点の位置が異なることが分かる。これはタルクを含まないものと低タルクを含むものとで識別できることを示している。

条件最適化：ベルト速度

ベルトコンベア上のプラスチックをできるだけゆっくり移動させながら測定することができればはっきりとした信号を得ることができる。その上、はっきりとした信号は材質などの判断が容易になる。一方、プラスチックをゆっくり移動させるということは強力な光を一点に集中させる必要のあるラマン分光器では、光の強度が強いため発火し、ラマン散乱が測定できないことも考えられる。

ここでは、プラスチックが発火しない程度の移動速度を測定した。実験は回転テーブルの回転数を変化させながら、回転テーブル一週分のデータを測定し発火時に発生する特徴的な波形がいくつ発生するかカウントした。

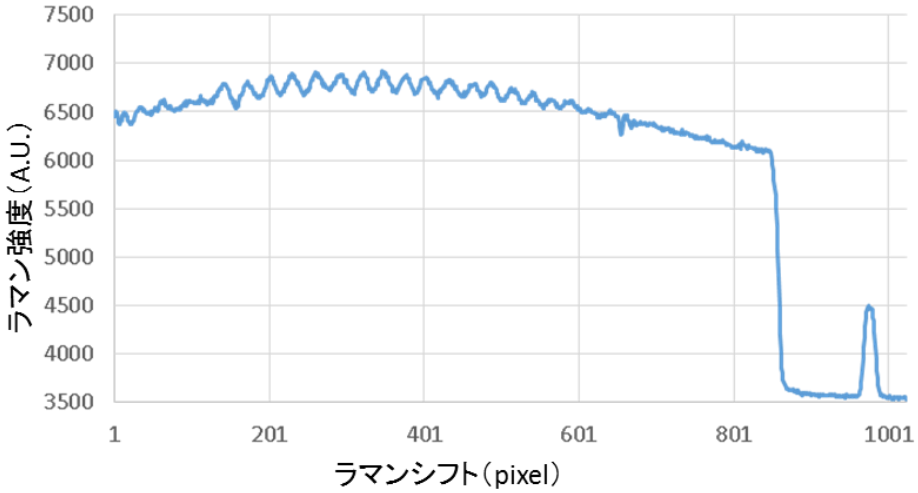


図 3.2.2-6　燃焼状態で発生するスペクトル

表 3.2.2-2　ベルト速度と燃焼した波形の数

設定値	200	180	150	130	100
周回scan数	37	41	50	58	77
周回時間(ms)	888	984	1200	1392	1848
周回速度(m/min)	29.7	26.8	22.0	18.9	14.3
燃焼波形の数	0	2	4	5	8

回転テーブルは小型 AC モーターをテーブルに接続し回転させているため回転数が小さいばあい回転が安定しない。そのためある程度燃えている波形が出ても無視することとして、設定値が 130 を下回ると燃焼している波形の数が増えている。そのため余裕を見てベルト速度は 20 m/min とすることにした。

これにより最適なプラスチックサイズが算出できる。露光時間 24ms で移動速度が 20m/min として計算すると 1 露光時間分の移動距離は 8mm となる。そのため、その 3 倍の 24mm を理想の粉砕サイズと設定した。

条件最適化：PP vs PE

これまでの実験結果から PP のタルク有無で識別するための条件はそろえることができた。今回はこの条件で PP と PE の識別ができるか否かを確認する。

ここでは、前出回転テーブルに低タルク含有 PP の代わりに ASR の PE を貼り付けて測定を行うこととした。図 3.2.2-7 **エラー！参照元が見つかりません。**は今回の測定で使用した回転テーブル。

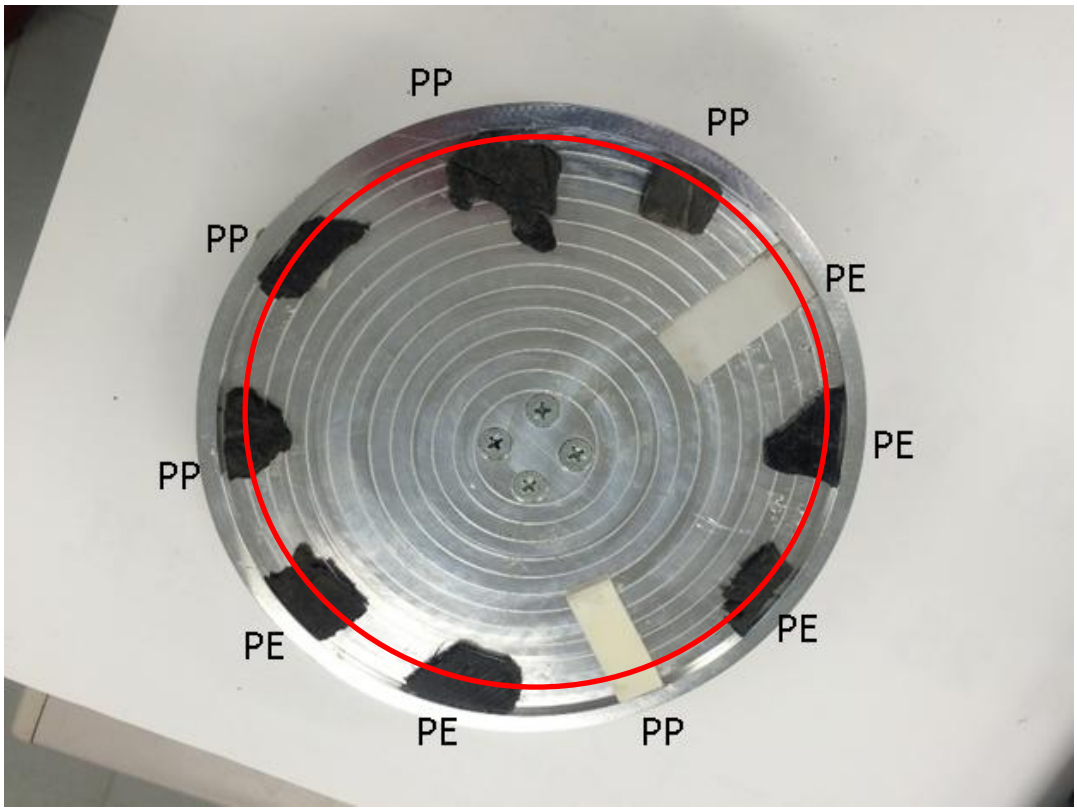


図 3.2.2-7　回転テーブルに貼り付けたプラスチック

前節同様、赤線上を測定するように機器を配置し、測定条件はこれまでの測定結果から、LD 強度は 2W、露光時間は 24ms とし、テーブルの回転速度は前節での測定条件に合わせた。

測定結果を、図 3.2.2-8 **エラー！参照元が見つかりません。**に示す。

Peak2 の推移を見ると PE がある部分は変化が少ないのに対し PP を設置している部分はピークがある。例えば、3 個目の PE と 4 個目の PE（図 3.2.2-7 **エラー！参照元が見つかりません。**の左から 3 番目と 4 番目の矢印）では変動は 100 以下であるのに対し PP の部分は 200 程度まで上昇している。

このことから、PP と PE の識別が可能であることが確認できた。

さらに、図 3.2.2-7 **エラー！参照元が見つかりません。**では 2 番目の PE が PP と同程度の振幅があるため FTIR により、Peak2 が少ない PE と Peak2 が多い PE 比較した。図 3.2.2-9 **エラー！参照元が見つかりません。**はその結果である。

1700 cm-1 付近に明確な違いがある。1700 cm-1 はカルボニル基の振動に関わる部分で樹脂の劣化によるものである。よって、PE は劣化により PP と誤判定されるリスクがあることも分かった。

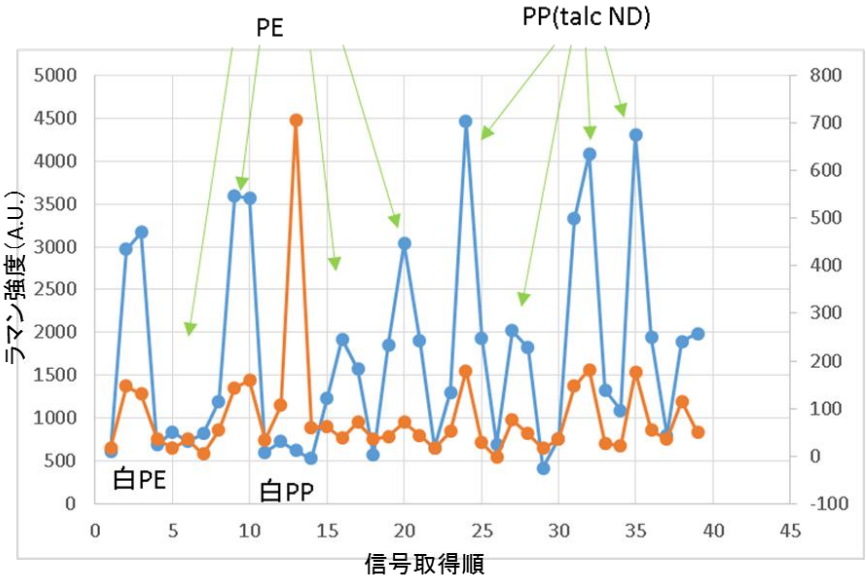


図 3.2.2-8　ラマンセンサーによる測定結果

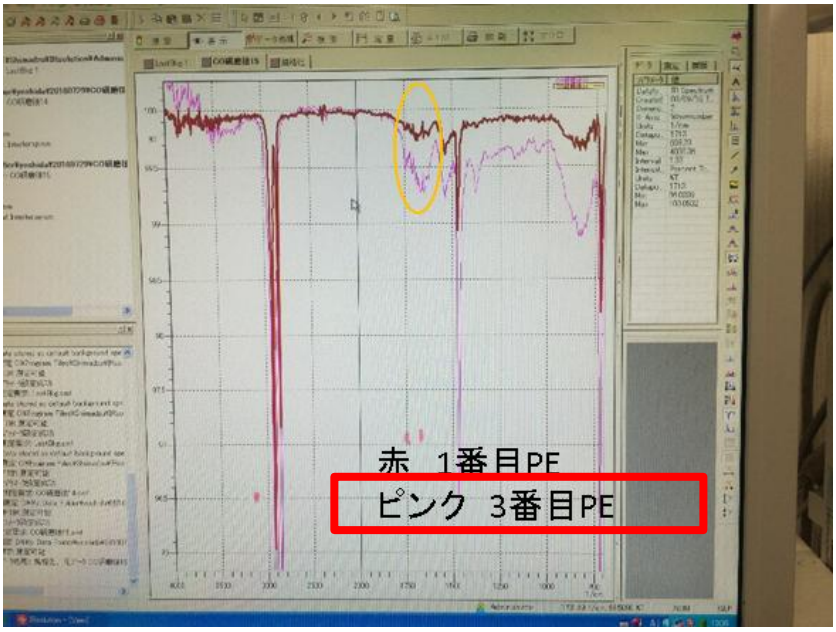


図 3.2.2-9　FTIR による分析結果

条件最適化：低ノイズ化

今回の実験はクリーンルーム環境下で実施しており、ノイズや振動など極力少ない環境で測定を行っている。一方、実証設備のある関西事業所は実際に稼働中のプラントであり、周囲にはモーターやリレー、インバーターなどノイズ源となりうる設備が多く設置されている。装置にもよるが関西事業所での測定結果はクリーンルーム環境下と比べると 4 倍以上のノイズを測定することが一般的である。そのためこのノイズを抑えることは、関西事業所で実証を行う上で必要事項となる上、これまで以上の精度を出すことも可能となる。

今回は対策として、バイパスコンデンサと絶縁処理の検討を行い、電源装置の低ノイズ化およびノイズフィルターの設置行った。

まずはバイパスコンデンサの有効性を確認した。図 3.2.2-10 **エラー！参照元が見つかりません。**は、バイパスコンデンサ取り付け前と取り付け後のダークスペクトルである。

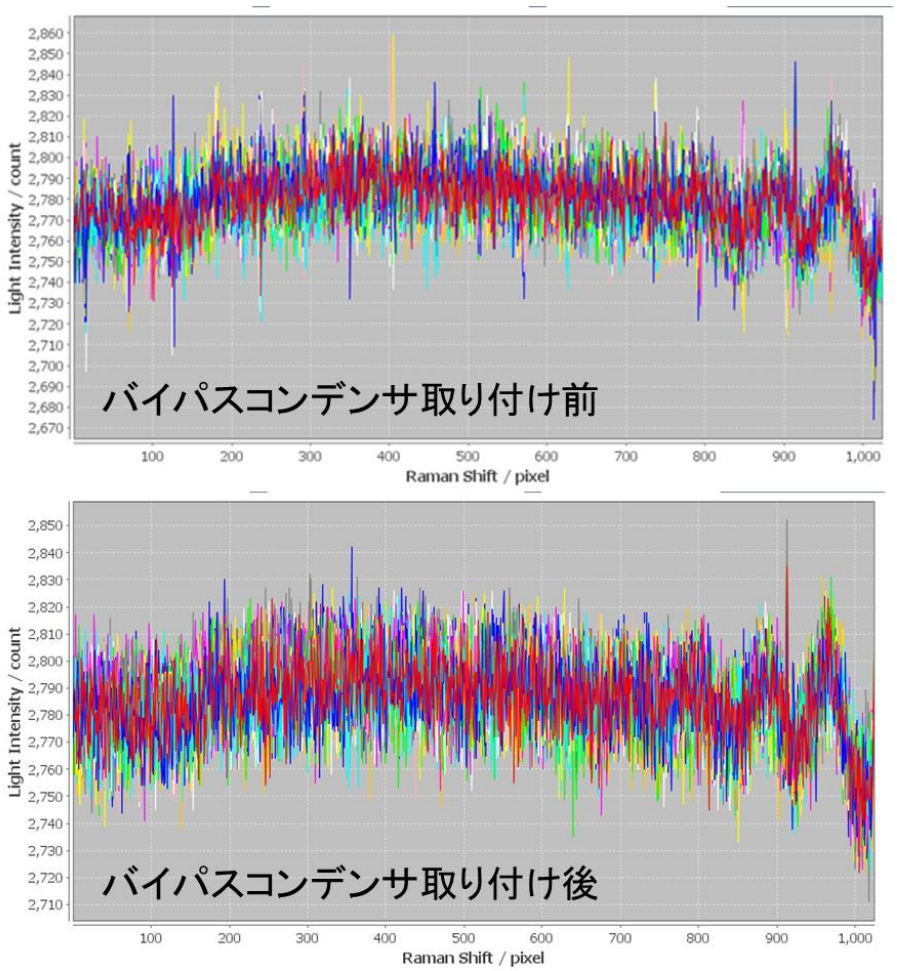


図 3.2.2-10　バイパスコンデンサ取り付け前後のダークスペクトルデータ

測定はバイパスコンデンサの容量を変えながらスペクトルを測定していった。今回の測定は、レーザーを点灯させない状態で入射光が入ってこないように対物レンズを遮光

幕で覆い光の入ってこない状態のスペクトル(ダークスペクトル)を測定する。コンデンサ容量は 0.001 uF から 0.1 uF まで 6 種類を用いた。

図 3.2.2-10 **エラー！参照元が見つかりません。**上はバイパスコンデンサ設置前のダークスペクトル、下は 0.047 uF のバイパスコンデンサを設置後のダークスペクトル。

時折出現していたシャープな立ち上がりが消えていることが分かる。そのためこのバイパスコンデンサをラマンセンサー内部に設置することにした。また、同時に絶縁処理を行うことも有効なノイズ対策として知られているため、その調査も行った。図 3.2.2-11 **エラー！参照元が見つかりません。**は絶縁処理後のダークスペクトル。

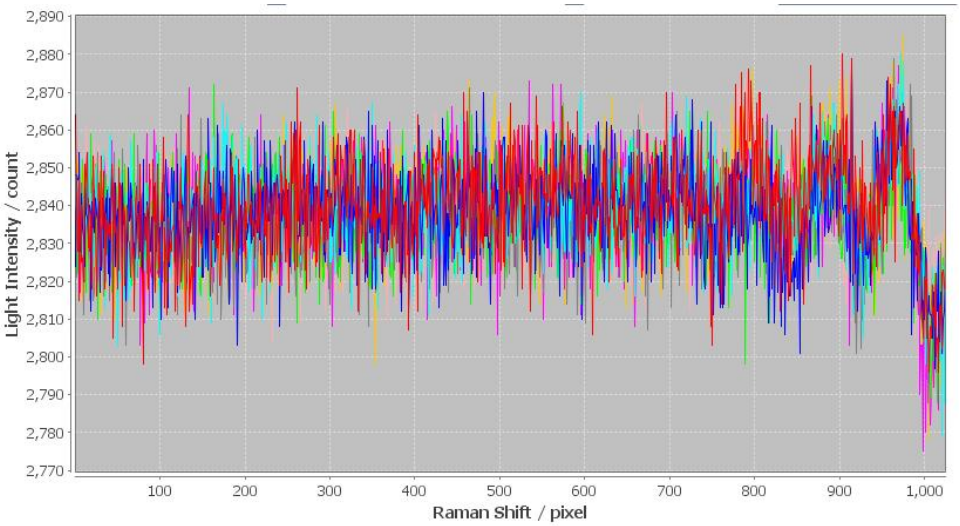


図 3.2.2-11　絶縁処理後のダークスペクトルデータ

同様に、シャープなノイズが消えていることが確認できた。そのため、電源の安定化処理およびノイズフィルターの設置に加え、バイパスコンデンサの搭載と設置時に絶縁処理を施すこととした。また、従来通りノイズ対策としては光モジュールのシールドや筐体アースの設置など行う。図 3.2.2-12 **エラー！参照元が見つかりません。**は改造時の様子である。

図 3.2.2-12　ラマンセンサー改造時の様子

実証スケールへのラマン識別機の適合

連続モデル試験：原料

前節での検証結果より粉砕サイズは24mm程度が最適であることが分かった。今回の試験では弊社が保有する粉砕機のメッシュからそれに近い 23mm を用いて粉砕することとした。

原料はASR再資源化施設（KM社）からの入荷原料を用い、事前にASR再資源化施設で大まかな選別作業を経たもの（図 3.1.1-1 中のKM_35）である。サイズは35～100mmに分級されており、浮沈選別で浮いたプラスチックである。

この原料を弊社本社/工場にて手選別で木屑やゴム類などの夾雑物除去を行い、23mmメッシュを設置した粉砕機で粉砕を行った。さらに、簡易水槽で水比重選別を行い、水に浮く成分(ASR_PP1と表記)を取り出した。処理後の原料の写真を図 3.2.2-13 **エラー！参照元が見つかりません。**に示す。

図 3.2.2-13　本実証事業で用いたASR_PP1

この段階でプラスチックのみの状態になっている。また、粉砕サイズを大きくしたことによる、形状による高さ方向での変化もそれほどないため、レーザーと焦点距離への影響も少ないと思われる。

今回はこの原料をホッパから投入し一定量で流しながら測定を行うため、測定時間を考慮し200 kg程度準備した。この性状を以下に示す。

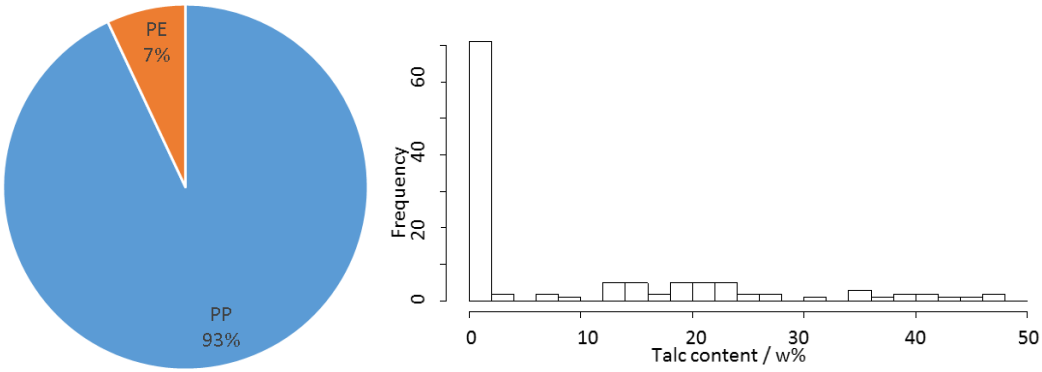


図 3.2.2-14　ASR PP1 の性状分布

図 3.2.2-14 **エラー！参照元が見つかりません。**左は ASR PP1 の性状分布を示している。PP が 93 %で PE が 7 %含有していることが分かった。図右はタルクの含有量分布を示している。約 60 %がタルクを含まない PP で残り 40 %には幾分かのタルクを含んでいる。これら結果は前年度の A 施設分析結果と相違ない。

連続モデル試験：装置

本試験では関西事業所にて実際に業務で使用しているプラスチック選別装置(製品名：ラマンプラスチックソータ)を用いて行うこととした。図 3.2.2-15 **エラー！参照元が見つかりません。**は選別装置の写真である。

図 3.2.2-15　関西事業所に設置しているプラスチック選別装置

本装置は原料がホッパ(図 3.2.2-15 **エラー！参照元が見つかりません。**写真左)へと投入されると、定量切り出し装置が一定量を切り出すようになっている。切り出してきたプラスチックは振動フィーダーを用いて分散化させ、供給コンベアにより 70m/min まで加速させる。そののち、100m/min で移動しているベルトコンベアへと供給される。その後、ラマン識別機(製品名：ラマンセンサー)によりプラスチックの材質を確認し、エアガンでそれらを選別する。本装置はこれら機器に加えそれらを制御する制御装置群により構成される。

識別部の 100m/min で稼働するベルトコンベアは速度に影響を受けることなくトルクの正確な制御を可能とする AC サーボモーターを採用し、0～150m/min まで自由に変更することが可能となっている。また、本装置はベルトコンベア上でワークの材質を検出し、のちにタイミングを合わせて選別する方式は採用を採用している。そのため、ベルトの蛇行やスリップなどに選別結果が大きく影響される。そのため、ベルトコンベアの蛇行防止に直径 150mm のクラウンローラーを採用しており、蛇行防止ガイドなどを取り付ける必要がなく蛇行を自動的に補正できるようなっている。また、スリップを抑えるためにベルト駆動用プーリーをモーターから直接駆動する方式採用している。これらの結果ベルトの速度変化や蛇行は非常に少なく、これらを原因とする誤選別はこれまで確認されていない。

選別部には 50 連のエアノズルとマイクロ秒の単位での開閉が可能な高速電磁弁を搭載し、電磁弁上部には 2 つのエアタンクを搭載している。ベルトコンベア上にあるワークは高速移動するベルトコンベアから投げ出されエアノズルで対象物を吹き落とす。そのため、エアノズルは直線性が良くなるよう流体力学を考慮し設計されており、30mm 程度の直線性がシミュレーションで確認されている。また、エアブローのタイミングも非常に重要で 100m/min で稼働時にタイミングのずれは最大で 5 mm以下となるように設定されている。他社製品では高純度の製品を得るために何度か選別を繰り返す必要があるが、本選別装置はこの精度により、1 度の選別処理だけで 95 %以上の純度のものが回収することができる。そのため、他社製品とのコストパフォーマンスは大差ない。

また、弊社独自開発のラマンセンサーは専用の高出力レーザー素子と分析用の高感度 CCD に加え、内部欠損が少ない明るい分光系で構成される。さらに、識別処理は高速処理を可能にするため専用ハードウエアに組み込まれており、設定や調整はパソコンからも行えるようになっている。また、8 種類までユーザーによる材質の登録が可能となっており、選別装置の操作パネルからこれらを簡単に切り替えることができるため、急なライン替えにも対応が可能となっている。

本装置は家電製品由来の白色プラスチックの選別で PS と ABS の混合物を選別するために実際に使用しているもので、内部に 50 台のラマン分光器が設置されており、最高 3ms での連続運転が可能な唯一の工業用高速高感度ラマン分光器である。このラマン分光器

を本実証事業実施にあたり、ノイズ対策や、内部の清掃、光学系の調整などを行い、これまで以上により高い感度が得られるようにした。

本実証事業で用いたラマンプラスチックソータの仕様を下記にまとめる。

表 3.2.2-3　ラマンプラスチックソータ　仕様

項目	内容
処理対象	粉砕プラスチック
対象サイズ	23 mm アンダー　分級なし　　(通常は 5～15mm に分級)
供給量	100 ～ 200 kg/h
ベルト幅	300 mm
ベルト速度	20 ～ 40 m/min
検出器	ラマン分光器
選別方法	圧縮空気
ラマンセンサー	
光源	クラス 4 高出力レーザー
波長	785 nm
最大出力	2 W
ユーティリティ	
圧縮空気	0.6 MPa
ドライエア	露点温度-20℃以下
水冷装置	設定範囲 20℃±5℃, 制御範囲±0.2℃以下
電力	3 相 200、100V、アース 2 系統

連続モデル試験：測定条件

事前にベルトコンベア速度を 20m/min にプラスチック供給量を 100 kg/h 相当に設定し測定を行ったところ、プラスチックと思われる信号が 20 scan あたり 1 つの確率で確認できた。そのため、100 以上のプラスチックデータを取り込むために、余裕を見て 3,000 scan のデータを収集することとした。また、データの取り込みは 2 の乗数で行うことが効率的であること、大きなデータ転送は機器に大きな負荷を与えるため。一度の取り込みを 256 scan 分のデータとして、間隔を置いて断続的に 15 回の測定を行うことした。これにより 3,840 scan のデータ測定を行う。

ラマンセンサーの設定は、これまでの検証結果から、露光時間 24ms、レーザー強度は平均で 1.5 W となるように設定した。また、ベルトコンベアは基準速度を 20m/min とし、30m/min、40m/min でも測定を行うこととした。またプラスチックの供給量も 100kg/h、200kg/h、300kg/h にて行うこととした。今回測定する条件の一覧は以下の通り。

表 3.2.2-4　測定条件一覧

		コンベアスピード		
		20 m/min	30 m/min	40 m/min
供給量	100 kg/h	○	—	—
	150 kg/h	○	○	—
	200 kg/h	○	—	○

実証モデル試験：測定結果と解析方法

前節の条件においてラマンスペクトルの連続的なデータを取得した。測定時の写真を以下に示す。

図 3.2.2-16　ラマンソータにプラスチックを流している様子

この写真は供給ホッパから流れてきたプラスチックがコンベアに乗りラマンセンサーへ流れていくところを撮影したものである。今回の測定は中央に位置したラマンセンサーを使用することとした。

以下に今回測定した代表的なベルトコンベアの信号とプラスチックの信号を示す。

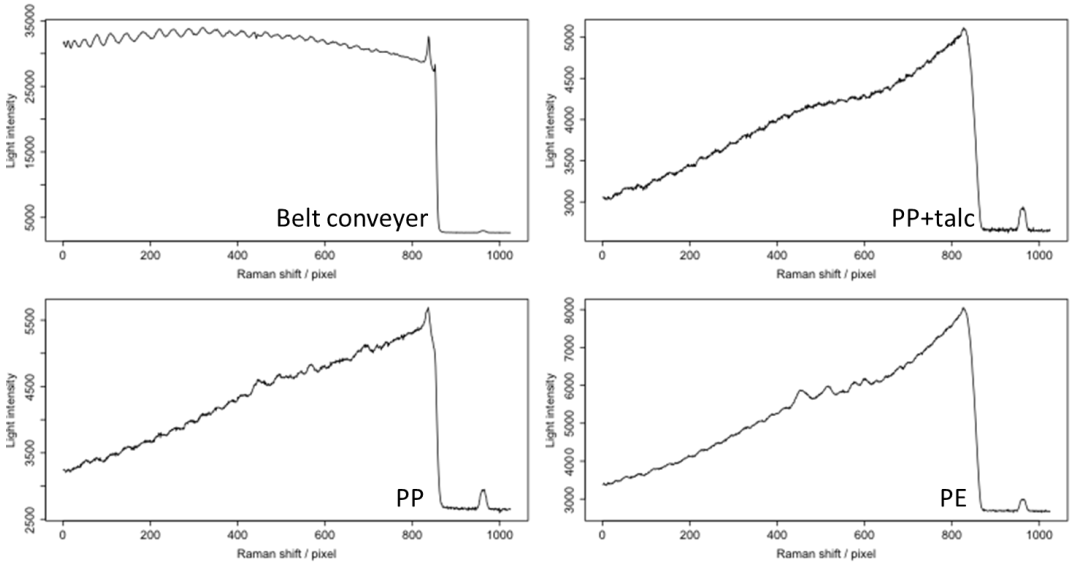


図 3.2.2-17　今回測定した代表的な ASR 由来プラスチックのラマンスペクトル

図 3.2.2-17 **エラー！参照元が見つかりません。**の左上はベルトコンベアを測定しているときのラマンスペクトル。コンベアは測定対象のプラスチックより熱に弱いため発火している。そのため、他の３種類とは異なり、横にうねったような波形となっている。左上はタルク含有 PP のラマンスペクトルである。タルク含有 PP のスペクトルでは中央にカーボンブラック由来の大きなピークがある他、他の信号と比べ高い立ち上がりがあることからこのプラスチックがタルクを含有していることが分かる。そして、下段の 2 つは左から PP、PE のラマンスペクトル。PP には 660cm^{-1} 付近に見られる CH_3 の構造に由来する特徴的なピークがある。また同様に PE でも、800cm^{-1} 付近に見られる CH の構造に由来する特徴的なピークが確認できる。このことからこれらの違いを識別することができる。

次にデータ解析について、図 3.2.2-18 **エラー！参照元が見つかりません。**に識別処理のフローを示す。

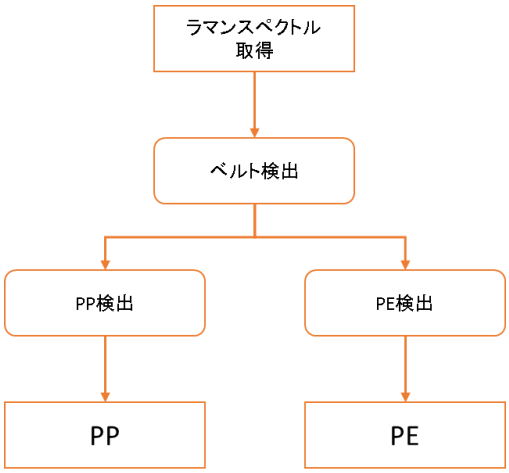


図 3.2.2-18　スペクトル解析フロー

データ解析では取得したラマンスペクトルのデータから、それぞれ PP と PE の条件に該当するものを取り出した。以下の図 3.2.2-19 **エラー！参照元が見つかりません。**は測定に用いるポイントを示した図である。

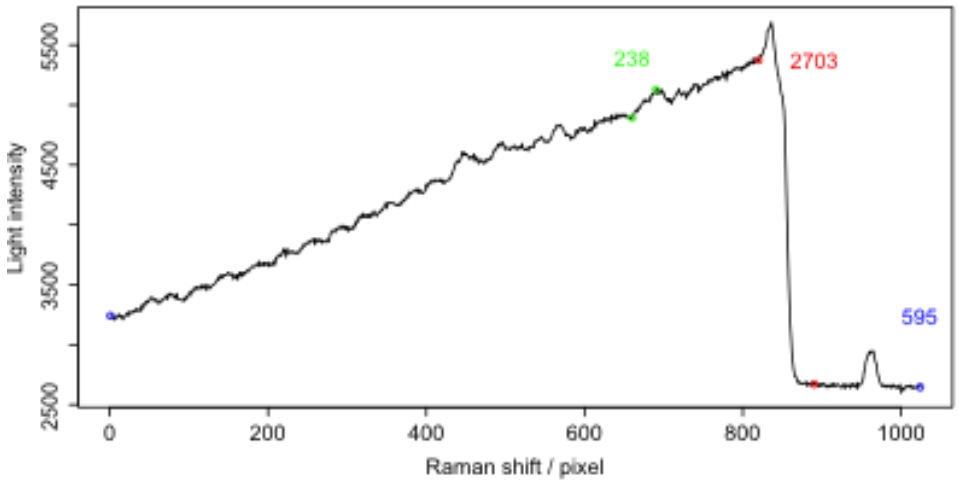


図 3.2.2-19　データ取得ポイント

図 3.2.2-19 **エラー！参照元が見つかりません。**の赤丸は条件最適化で用いた Peak1 である。同様に緑のポイントは条件最適化で用いた Peak2 である。今回の検証では新たに青の点を追加している。この点は Peak1 の補助として用いるもので Peak3 とする。このピークデータは異常データの排除に用いるものである。以下にそれぞれの条件をまとめる。

表 3.2.2-5　識別条件

項目	条件
ベルト/異常値	Peak3 is less than 12000 Peak3 / Peak1 is less than 0.45 Peak3 / Peak1 is more than 0.00 ABS(Peak3.base - Peak1.base) is less than 1000
PP	Peak3 is less than 8000 Peak2 is more than 100
PE	Peak3 is less than 2000 Peak2 is less than 25

まずはベルトコンベアおよび異常値データを排除する必要があるため、前節で示したベルトコンベアの図（図 3.2.2-17）にあるように発火した状態の波形で特徴的な Peak1 と Prak3 の値が大きくなる現象を捉える。そのため Peak3 が大きな値となるものをベルトコンベアと認識するようにさせている(表 3.2.2-5 **エラー！参照元が見つかりません。**の 1 行目)。次に、プラスチックの波形は一般的に低波数側が大きくなり高波数側に向かって下がる、前節で示した PP+Talc のような波形が一般的となるため Peak1 と Peak3 の比を求めてその傾斜が 0 から 45 %以内であることを確認している(2-3 行目)。次に異常データの排除として Peak3 の下の点と Peak1 の下の点の差の絶対値が一定以下となることを確認している。

次にタルクを含まない PP の識別は前記異常データでないことに加え Peak2 が一定の高さ以上であることが条件となる。この場合値は 100 に設定した。

また、PE の識別条件も PE 同様にベルトと異常値は排除し、Peak2 が一定の高さ以下のものを条件とした。この条件での値は 25 と設定した。

なお、これら測定条件はラマンセンサーの個体差などにより大きく変動するためあくまで、今回測定に使用した個体でのみ有効であることを補足しておきたい。

これらのスペクトルデータを統計処理ソフト「R」にて処理を行った。

R はオープンソース・フリーソフトウエアの統計解析向けのプログラミング言語およびその開発実行環境である。AI などで知られるニューラルネットワークやディープラーニングをはじめ多くの統計処理機能が実装されており、これら解析が簡単に行えることが特徴である。R の詳細については以下を参照。

R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna,

Austria. URL https://www.R-project.org/.

連続モデル試験：解析結果①：20m/min, 100kg/h

本節ではまずデータ解析の妥当性を確認するため、コンベアスピード 20 m/min および供給量 100 kg/h で取得したデータの一部を用いて、ソフトウエア解析結果と目視によるスペクトルの判別の結果を比較した（表 3.2.2-6 **エラー！参照元が見つかりません。**）。以下にその結果を示す。

表 3.2.2-6　データ解析と目視解析の識別結果

	データ解析	目視での判別結果
ベルトと識別した数	221	216
PP と識別した数	32	31
PE と識別した数	2	8
総計	255	255

データ解析の結果も目視判別とあまり変わらない結果となっている。このことから識別条件およびデータ解析がうまく機能していることが分かる。その上で、本条件での取得した全データ解析結果を以下に示す。

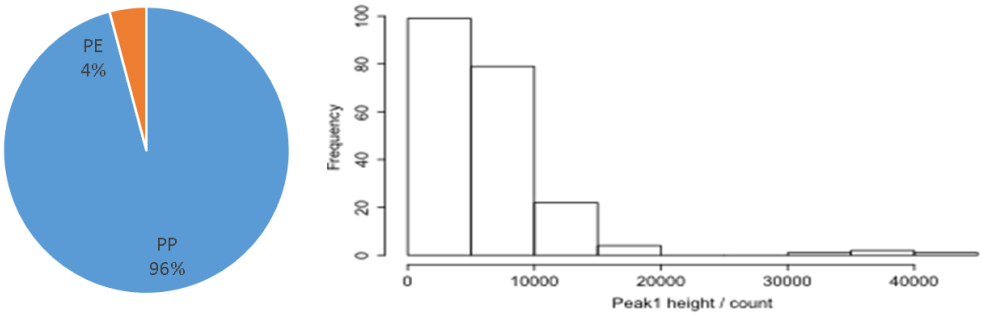


図 3.2.2-20　データ解析による性状分布および Peak1 の強度分布

この解析に用いたデータ総数は 3825。そのうち PP と識別した数は 208 個、PE としたものは 9 個である。前節で上げた測定数と本節でデータ解析に用いたデータ総数の違いについてはデータ保存方法に由来するものである。

前節で示した機器分析の結果と、ここに示したデータ解析結果の分布は類似していることから、ラマンソータを用いることで ASR 由来プラスチックでも材質ごとに選別できることを示している。また、タルクのグレード別選別についても**エラー！参照元が見つかりません。**の図 3.2.2-20 が図 3.2.2-14 と同様の分布を示しており、適切な閾値の設

定することでタルクのグレード別選別が可能である。

連続モデル試験：供給量による検出結果の変化

ここでは、供給量の変化に伴う検出結果の変化について調査した結果を示す。以下は供給量と PP および PE の分布の変化をプロットしたものである。

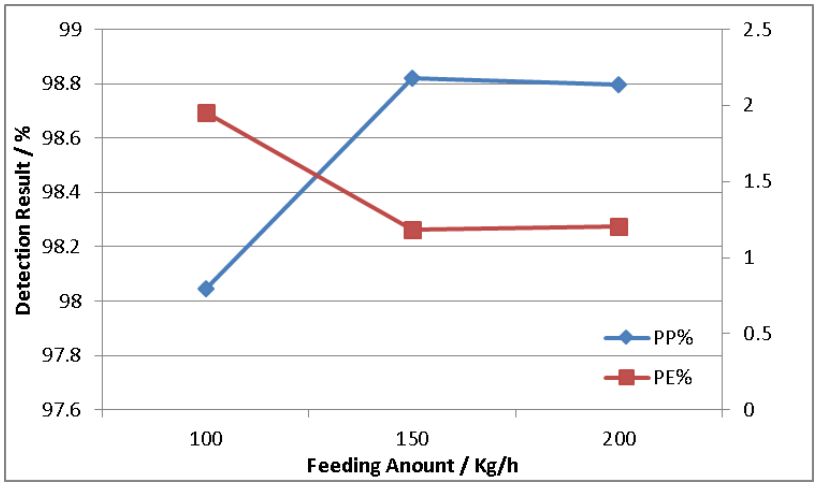


図 3.2.2-21　供給量による性状分布の変化

図 3.2.2-21 は横軸に供給量を示しており、左軸に PP の識別結果そして右軸は PE の識別結果を示している。このグラフでは、PP および PE の割合はほぼ一定の範囲で推移している。そのため、ラマンソータは 200 kg/h での処理が可能であることが確認できた。

連続モデル試験：ベルト速度よる違い

次に、ベルト速度による違いについて検証した。以下は、流量が同じ条件の時にベルト速度を変化させた場合の PP の検出数を示している。

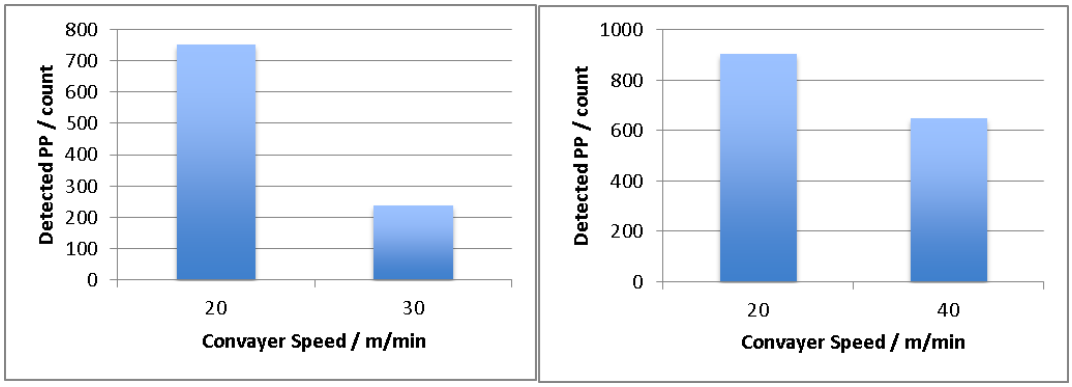


図 3.2.2-22　コンベアスピードによる検出数の変化

図 3.2.2-22 は横軸にベルトスピード、縦軸は PP と識別したプラスチックの数を示し

ている。　どちらのグラフでもベルトスピードの増加に伴い検出数の減少が確認できる。つまりベルト速度の増加は選別精度の低下をもたらすことが確認できた。

今回の検証では、測定時間、ベルトコンベアスピード、プラスチック片サイズなどを最適化することで、事業スケール処理量（100ー200 kg/h）での選別回収が可能であることが実証できた。具体的には PP 中に混入する PE（ポリエチレン）の識別や数 %水準でのタルク含量の識別ができることを実証した。この成果により、これまで重液比重でも選別できずに廃棄されていたタルク含有 30 %以上の PP も選別回収できることになる。リサイクルにおける回収率という非常に重要な項目が大きく改善できることになる。

（２）中赤外分光法の黒色 ASR 由来プラスチック選別への適用可能性

装置と測定条件

欧州の有名な選別機メーカのひとつに” STEINERT Elektromagnetbau GmbH”社がある。金属選別装置をはじめ多くのリサイクル向け機器を製造している企業で、最近発表した製品に、黒色のプラスチックも選別できるプラスチック選別装置がある。これまでのプラスチック選別装置はセンサーなどの制約から白色のみがターゲットとされてきた。しかし、昨今の中赤外検出の技術革新に伴い黒色のプラスチック選別も可能になりつつある。STEINERT 社のホームページから抜粋した当該装置の写真を図 3.2.2-23 に示す。

図 3.2.2-23　Unisort BlackEye の写真と原料(STEINERT 社のホームページから抜粋)

本節では、黒色のプラスチック選別装置「Unisort BlackEye」のものと同様のセンサーを用い、その性能を検証する。本検証で用いた識別装置の写真を図 3.2.2-24 に示す。

図 3.2.2-24　実装事業で用いた装置イメージ

本装置はアルミニウムフレームに中赤外用のハイパースペクトルカメラおよび赤外線光源を設置し、その下に可動式のステージが設置されている。稼働ステージ上に乗せたサンプルを移動させながら測定を行うハイパースペクトルカメラの装置である。本装置の仕様を表 3.2.2-7 に示す。

表 3.2.2-7　測定に用いた装置　仕様

項目	内容
カメラ	Specim Spectral Imaging 社製 MWIR ハイパースペクトルカメラ
波長	3000 ～ 5000 nm
露光時間	1.5 ms, 0.75 ms, 0.3 ms.
フレームレート	370fps @ 0.3ms 320fps @ 075, 1.5ms
焦点距離(対物レンズ―対象物間)	750 mm
対物レンズ	中赤外用レンズ(OLEM43) （焦点距離：43mm, F 値：3.8, FOV: 24°）
光源	赤外光源
出力	1000 W x2
ソフト	LUMO Scanner acquisition
データフォーマット	ENVI
稼働テーブル	
移動速度	250 mm/sec (15m/min)
トレイサイズ	500x1000 mm
トレイ表面	ポリウレタンコーティング
白リファレンス	アルミニウムブロック
室温	20ー21℃

赤外分光法は一般的にプラスチックの材質を調べるために用いられている手法で、同様の非接触式の連続測定検査装置は平成 23 年度産業技術実用化開発事業費補助金にて三菱電機および島津製作所により製作され、翌々年より一般向けに販売開始されている。

赤外分光法もラマン散乱識別法同様に分子構造に影響を受けた光を測定する方法であるため、正確な材質の特定が可能である。しかし、赤外分光法は対象物の分子振動により光がどれだけ吸収されたかを測定するものであり、バックグラウンドなどのリファレンス光を正確に測定することが重要となる。一方、ラマン散乱識別法は単波長の光を対象物に照射し、対象物の分子振動に影響を受け変化した光を測定する。そのため、昼に星を観測するのが赤外分光法で、夜に星を観測するのがラマン散乱識別法と例えられる

ように、論理的にはラマン散乱識別法の方が測定も解析も容易とされている。

本節の検証試験として、事前に材質を確認した 7 個のプラスチックをデルフトハイテック社に送り、それらを各条件で測定した。以下に測定テーブルの写真とそれぞれのプラスチックの説明を示す。

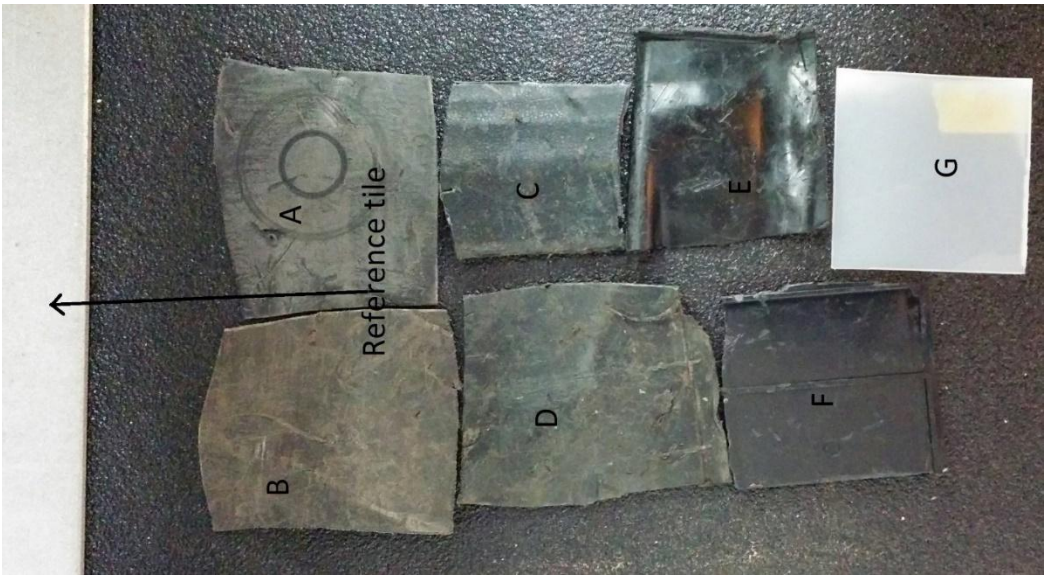


図 3.2.2-25　本実証試験で用いたプラスチック

表 3.2.2-8　プラスチックの名称と詳細

項目	内容
Sample A	PP（タルクなし）黒 ASR
Sample B	PP（タルクなし・汚れ）黒 ASR
Sample C	PP（タルク低）黒 ASR タルク 5.9 %
Sample D	PP（タルク高）黒 ASR タルク 19.8 %
Sample E	PE 黒 ASR
Sample F	ABS 黒 ASR
Sample G	PP 白 市販品の板

図 3.2.2-25 **エラー！参照元が見つかりません。**は測定時のサンプルの写真である。写真、左にアルミニウムブロックがリファレンスとして置かれており、右側の黒色部はポリウレタンコートされたトレイである。このトレイの上に測定対象を並べている。表 3.2.2-8 **エラー！参照元が見つかりません。**は並べられたプラスチックの説明である。今回の測定は、露光時間を 1.5ms，0.75ms，0.3ms としそれぞれ 2 回測定した。測定データは平面方向に 320x498pixel、波長方向に 256 pixel。今回の解析では赤外分光法で大まかな構造の違いを分析するときに用いられる 3000 cm^{-1} 付近を用いてその違いを比較し

た。

また、解析には統計処理ソフトＲを用いた。

露光時間による違い

露光時間の違う 3 種類の波形を以下に示す。

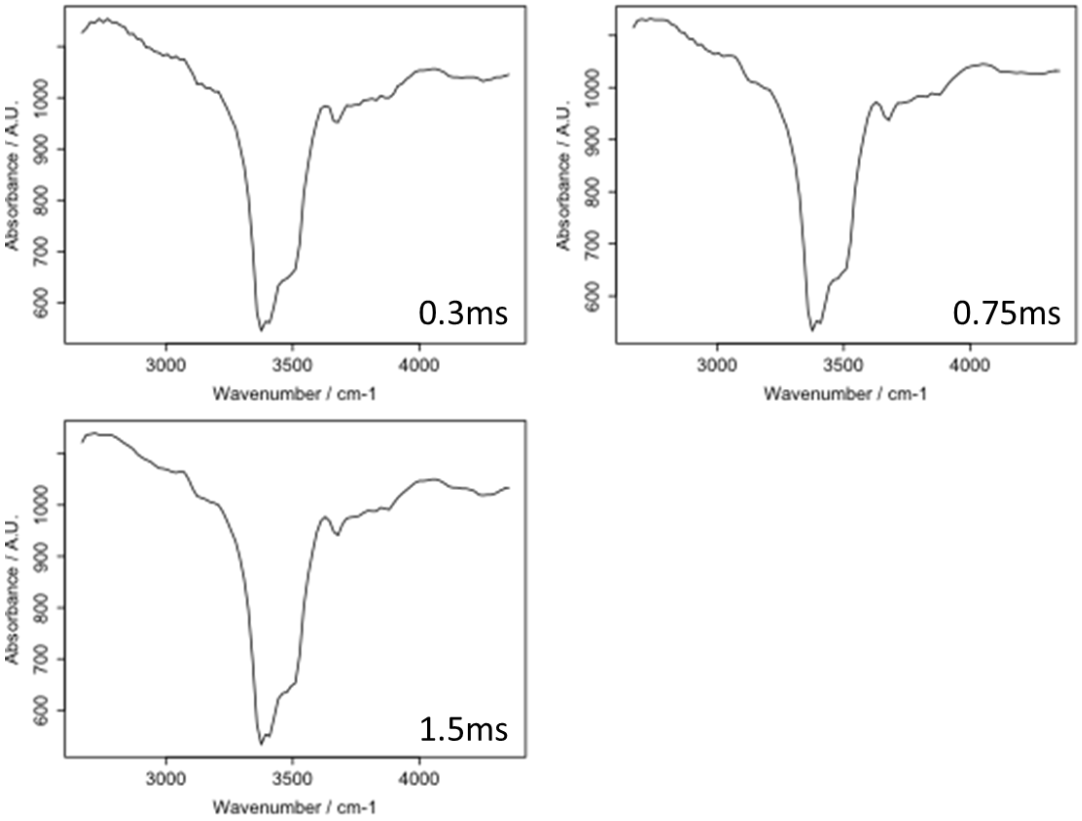


図 3.2.2-26　Sample A の露光時間による違い

図 3.2.2-26 は Sample A の一部を取り出し平滑化処理した後の赤外吸収スペクトルである。縦軸は吸光度を示しており。横軸は波長となっている。図 3.2.2-26 **エラー! 参照元が見つかりません。**は、左上から 0.3 ms、0.75 ms、1.5 ms で測定したものである。0.3ms のものには枠内の左上 3000 nm 付近に若干のうねりが見られるが、露光時間増加に伴い少なくなっていることが分かる。それ以外に大きな違いはない。つまり、露光時間が 0.3 ms でも PP を正確に検出できることを示している。

タルク含有量による違い

次に、タルク含有量の違いによる識別の可能性を分析した。今回測定したタルク含有量の異なるPPの赤外吸収スペクトル(図 3.2.2-27 **エラー！参照元が見つかりません。**)を示す。

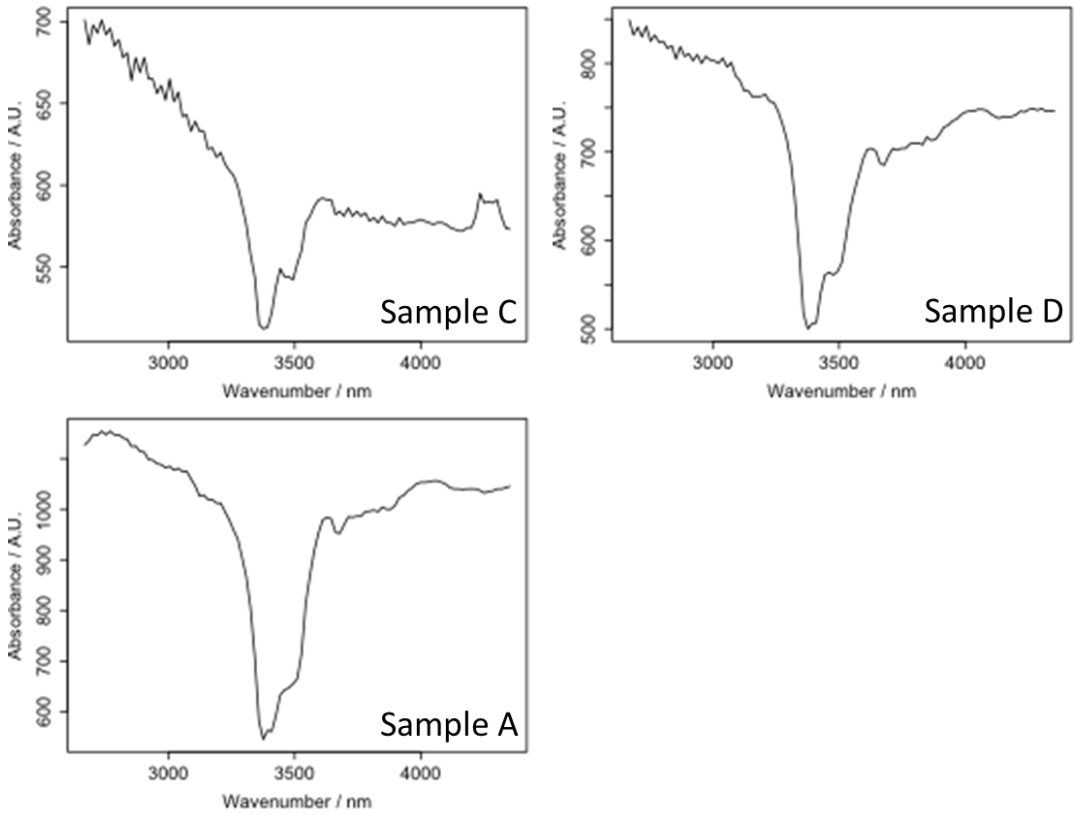


図 3.2.2-27 タルク含量の違いによる赤外吸収スペクトル

タルク含有量が少ない場合は吸収のピークは大きくなることが図 3.2.2-27 **エラー！参照元が見つかりません。**のSample Aとその他2つのスペクトルの比較から分かる。しかし、Sample Cはタルク含量が5.9 %、Sample Dはタルク含量が19.8 %であり、含量に応じてピークが比例しているとは言えない。これは光量の差を測定している点に加え外乱ノイズやサンプル形状に影響を受けていることが原因であると考えられえる。これにより、実験室に設置したFTIRのような安定した分析環境でない限り含量の違いを分析することは困難であることが分かる。

汚れの有無による違い

また、汚れによる違いを調査した結果を以下に示す。

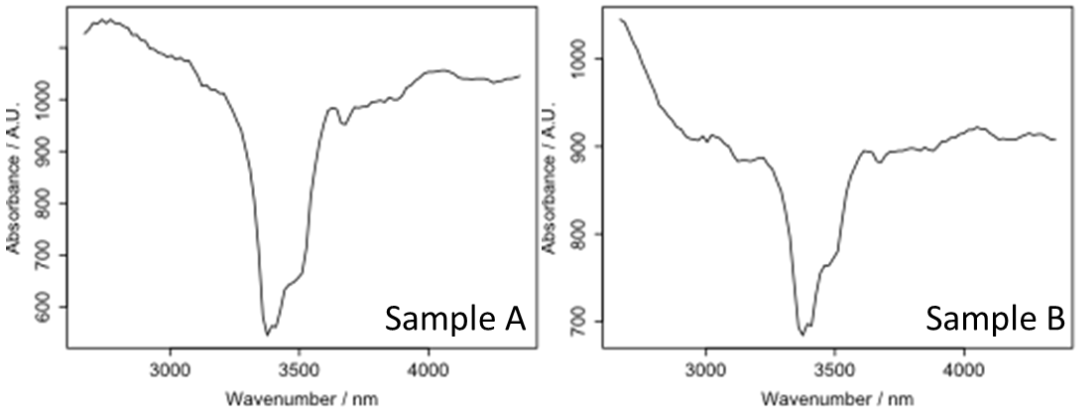


図 3.2.2-28　汚れの有無による違い

図 3.2.2-28 の Sample A は表面のダストを取り除いた ASR 由来プラスチック、Sample B は汚れたままの ASR 由来プラスチック。PP に特徴的な 3000 cm^{-1} 付近のピークを見ると、プラスチック表面が汚れている方のピークが小さいことが分かる。これは、表面のダストに影響を受けた結果である。

樹脂種類による違い

さらに樹脂の種類による違いを以下に示す。

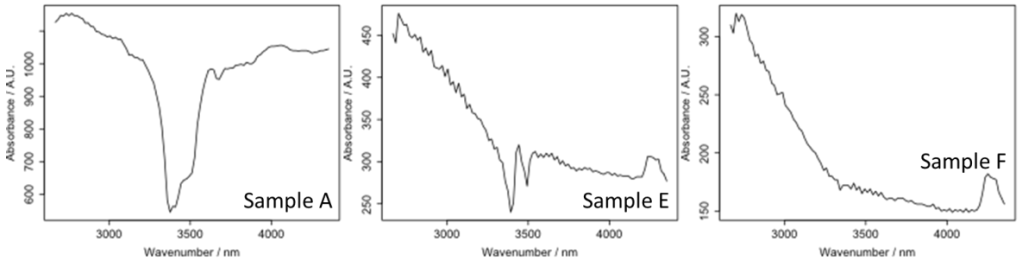


図 3.2.2-29　樹脂の種類による違い

図 3.2.2-29 **エラー！参照元が見つかりません。**は左から PP、PE、ABS の赤外吸収スペクトル。主に主鎖の形状に由来する 3000 cm-1 付近を抽出している。PP および PE に関しては一般的な赤外分光で測定する形状と類似したものになっており、この手法でも PP と PE を識別できることが分かった。

3.2.3. 表面劣化除去の検討

本章で処理・分析に用いた装置の一覧を表 3.2.3-1 に示す。

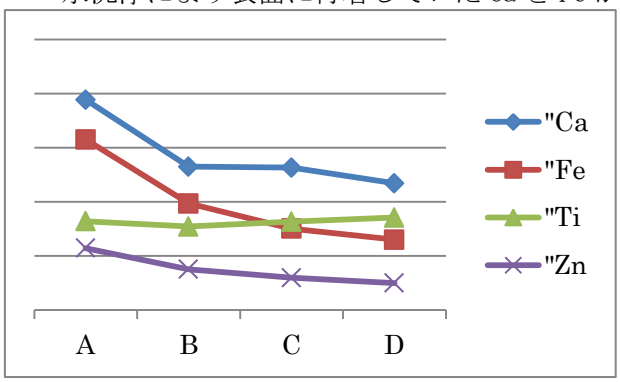
表 3.2.3-1　本章で使用した装置一覧

装置メーカ	装置名	型式	作業日時	作業場所
自社製	ラマン測定試験装置	-	随時	㈱サイム
島津製作所	蛍光Ｘ線分析装置（ＥＤＸ）	ＥＤＸ-ＧＰ	随時	㈱サイム
島津製作所	熱分析装置	ＤＴＧ-60Ｈ	随時	㈱サイム
飯室商店	乾式撹拌剥離設備	-	平成28年6月29日および9月3日	㈱西日本ガラスリサイクルセンター
タナカ	粉砕洗浄脱水装置	プラショリPR型	平成28年9月26日～9月27日	㈱タナカ

（1）ASR 由来プラスチック表面の汚れと劣化

自動車プラスチックの再利用にあたって、家電プラスチックとの大きな違いは、一緒に持ち込まれる土砂やプラスチックの経年劣化があげられる。図 3.2.3-1 は、持ち込まれたプラスチック表面の土砂汚れを表している。

水洗浄により表面に付着していた Ca と Fe が取り除かれたことが分かる。



A：入荷時
B：水洗浄後
C：表面研磨
D：表面を深さ 0.3mm 程度除

図 3.2.3-1　プラスチック付着物の EDX 分析

次に、ラマン測定試験装置を用い、経年劣化がラマン識別精度に与える影響について検証した。図 3.2.3-2 はプラスチック表面の除去深度によるラマンスペクトルの変化を示す。

水洗浄のみでは、ラマンスペクトに表れる蛍光（図の縦軸）が強く、プラスチック表面を除去することで蛍光が小さくなることが分かる。

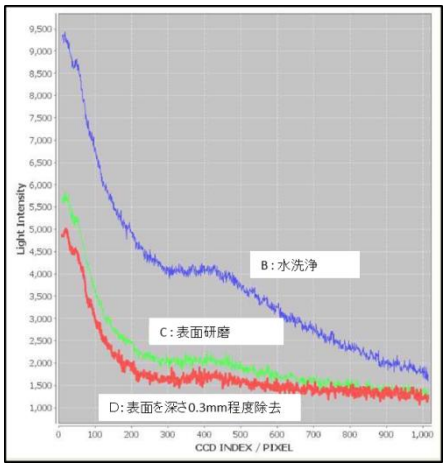


図 3.2.3-2　経年劣化のラマン識別精度に与える影響

（２）研磨検証のための実証作業

回収プラスチックの品質を向上させるために、プラスチック表面の研磨方法（ガラス研磨と共擦り研磨）につき検討した。

（A）ガラス研磨

乾式攪拌剥離設備の概要

鏡の反射面塗布剤除去に開発され、液晶パネルや太陽光パネルの希少金属塗布面剥離にも適用されている研磨装置を本実証事業ではプラスチック表面夾雑物の除去に利用した。

試験条件選定に際し、本装置ではプラスチックのみでの共擦り作用では表面研磨効果が得られないことが分かり、ガラス破片を研磨用に投入して、ガラスとプラスチック共摺り作用による研磨効果の検証を行った（図 3.2.3-3）。

円形篩（粒度別選別機）で 45 分～1 時間の容器内バッチ処理を行い、研磨ダストとプラスチックを分離回収した。プラスチックは水洗浄により、付着ガラス粉などを除去した。

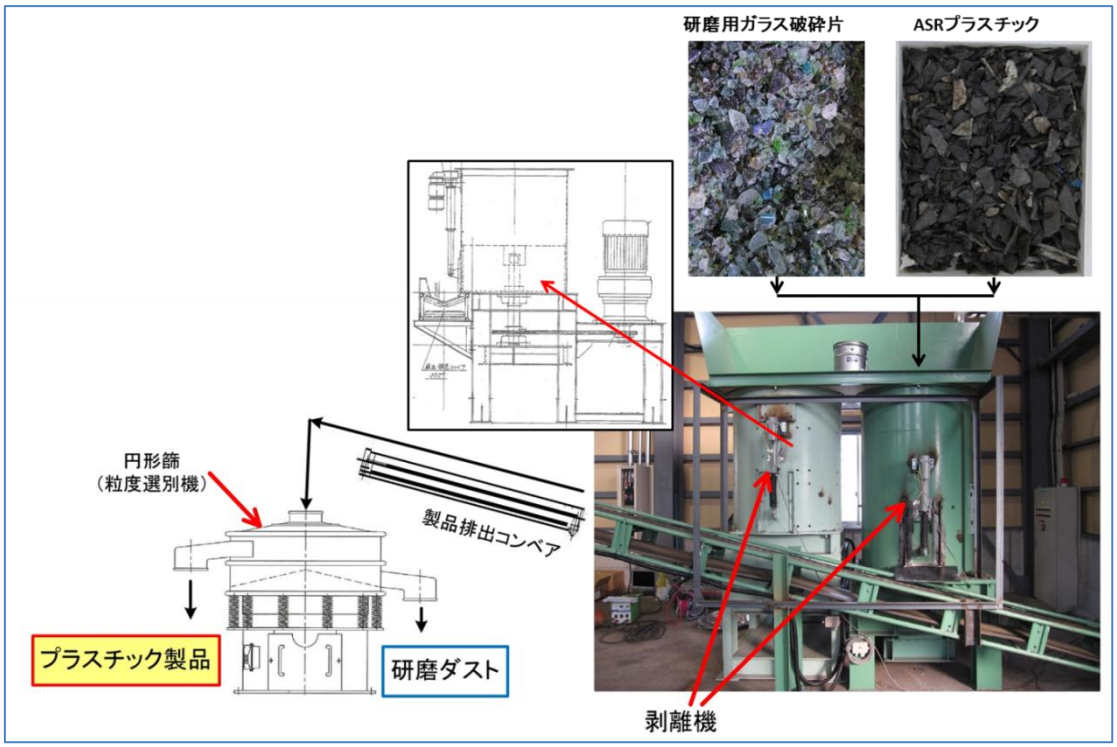


図 3.2.3-3　乾式攪拌剥離設備概要

本実証で処理した原料はKM社由来原料のKM_100（図 3.1.1-1）をもとにタルク含有量ごとに蛍光X線分析装置で手選別した以下の３種類（図 3.2.3-4および図 3.2.3-5）を用いた。

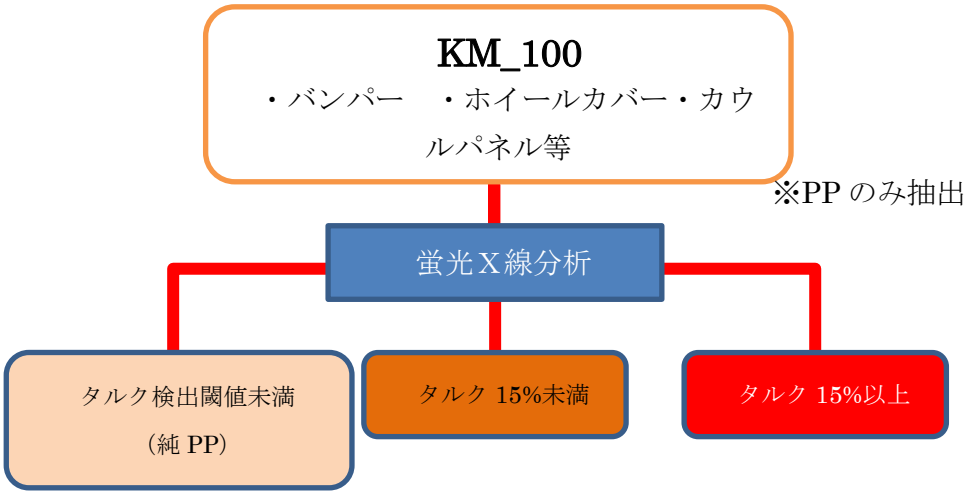


図 3.2.3-4　バッチモデルの選別方法

図 3.2.3-5　ガラス研磨処理前の原料
（左：純PP、中：タルク 15 %未満、右：タルク 15 %以上）

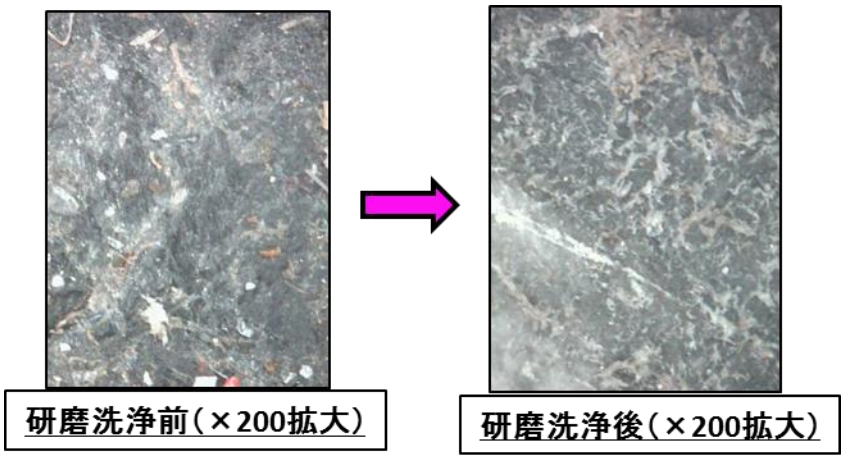
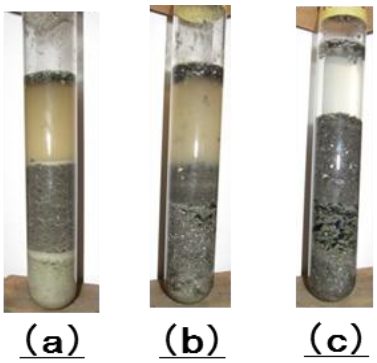


図 3.2.3-6　研磨前後のプラスチック表面の比較

図 3.2.3-6 のようにプラスチック表面に付着した汚れが除去されていることが分かる。

また、図 3.2.3-7 の研磨ダストからもプラスチック粉が得られたことから、プラスチックの研磨に成功していることがうかがえる。



(a)、(b)、(c) サンプルでは、
最下層からガラス、土砂類、
水沈降プラ、水浮きプラを確認
(a);純粋PP処理、
(b);ﾀﾙｸ15%未満PP
(c);ﾀﾙｸ15%以上PP

図 3.2.3-7　研磨ダストの分離

酸化誘導

・ガラス研磨前後による酸化誘導期の変化

研磨していないプラスチックおよび研磨済みのプラスチックについて、それぞれの表面と内部の酸化誘導期を熱分析装置で測定し、酸化誘導期の差を比較した（図 3.2.3-8)。研磨効果により表面と内部の酸化誘導期の差は小さくなったが、依然として表面と内部には差がある。以上の結果から、研磨の効果は認められるが、研磨の深度が不十分であることが分かった。

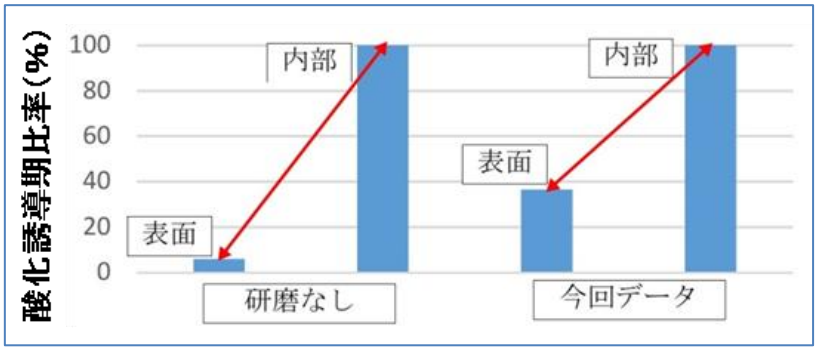


図 3.2.3-8　研磨効果

ラマンスペクトル

ガラス研磨前後のプラスチックのラマンスペクトルに与える変化について、ラマン測定試験装置を用い、検証した。

検証方法

ガラス研磨前後のプラスチック（図 3.2.3-9）を無作為に 100 個取り出し、そのラマンスペクトルを得た。図 3.2.3-10 に示すラマンスペクトルのベース強度とピーク強度を計測し、ベース強度とピーク強度の軸でプロットしたものを図 3.2.3-11 に示す。

ガラス研磨前後で、ベース強度には大きな変化はないが、ピーク強度ではガラス研磨前後で 1.5 倍の改善が見られた。

この結果から、研磨によるプラスチック表面状態の改善が実証された。

図 3.2.3-9　ガラス研磨前後のプラスチック（左：研磨前、右：研磨後）

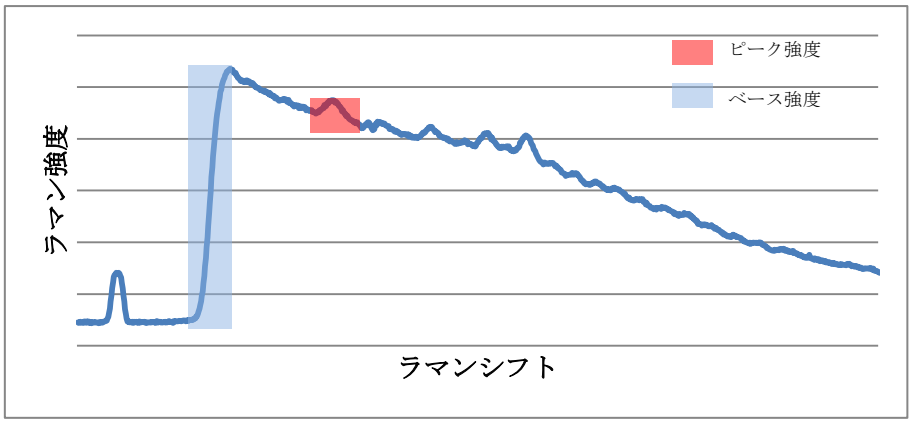


図 3.2.3-10　ピーク強度とベース強度の採取位置

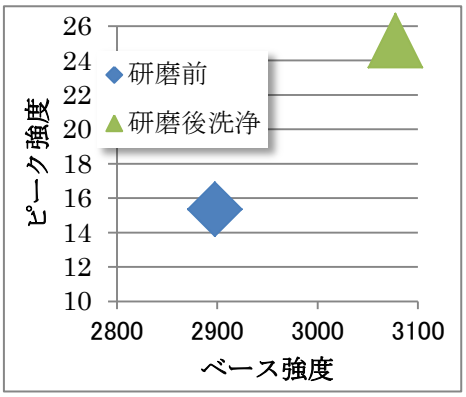


図 3.2.3-11　ベース・ピーク強度の平均値

（B）共擦り研磨

粉砕洗浄脱水装置の概要

プラスチックの粉砕、洗浄、脱水を一連の工程で行う装置(図 3.2.3-12)を用いた。この装置の洗浄工程でプラスチックの共擦り研磨効果によりプラスチックに付着した細かな夾雑物の除去の可能性について検証した。

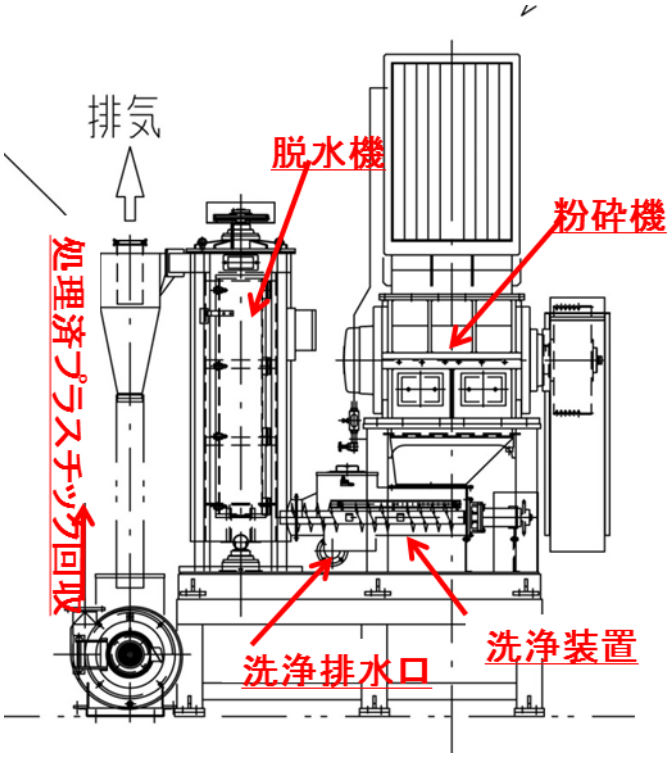


図 3.2.3-12　粉砕洗浄脱水装置の図

図 3.1.1-1 の KM_35 および KM_100 を処理し、その処理前後のプラスチック表面の状態を図 3.2.3-14 に示す。一連の処理により、表面の細かな汚れが除去されていることが確認でき、0.5 wt %の汚れ・粉砕くずが排出された。排水について、プラスチック 600 kg/h を 2.4 t/h の水で処理（洗浄）する場合、少なくとも 1.773 ppm/h の SS（固形浮遊物）が排出されることが分かった(図 3.2.3-13)。

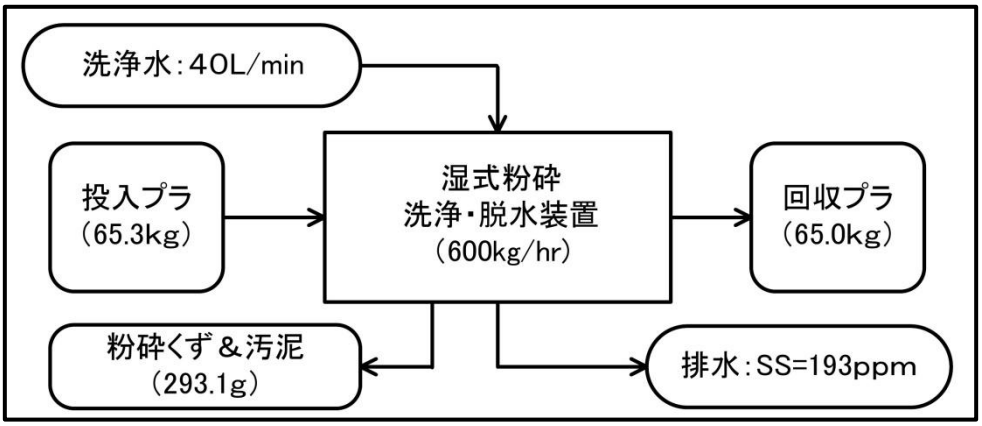


図 3.2.3-13　マテリアルバランス

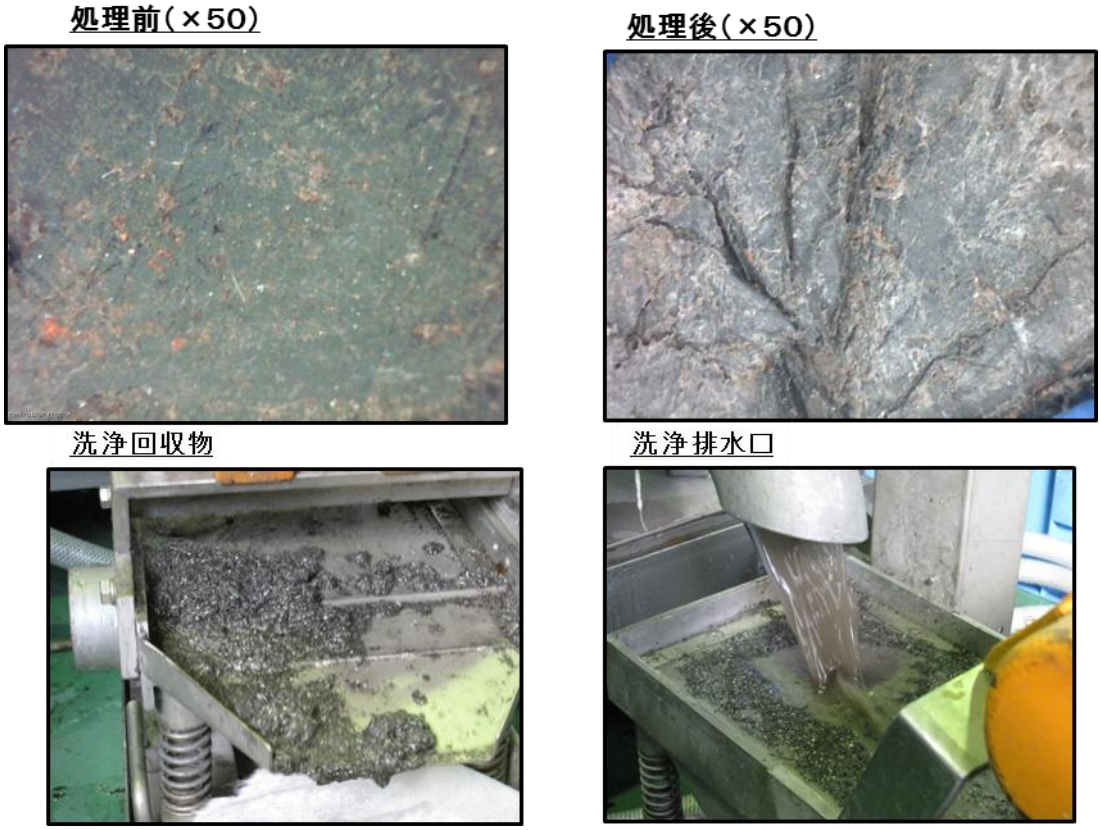


図 3.2.3-14　作業風景

3.2.4. 深化技術検証のための実証作業

プラスチックの表面劣化除去による改善処理が材料物性に及ぼす影響を検証した。また、選別回収した後、グレード分け処理を行った再生プラスチックの材料物性を評価した。

(1)検証内容

試料

以下の５種類の試料（表 3.2.4-1）を株式会社サイムより入手し、本件に用いた。ここで、サンプル No. 1 および 2 は未分別品であり、木屑やゴム類、あるいは塵埃類の付着も考えられる。一方、サンプル No. 3～5 は、分別後に研磨洗浄したサンプルであり、無機フィラーとしてのタルクの含量に応じて、さらに分別したサンプルである。

なお、本検討においては、微小サンプルを用いる試験、もしくは微細領域を分析するため、ミリメーターサイズの木屑やゴム類は、最初から検討対象となっていない。

表 3.2.4-1　ASR 由来プラスチックサンプル

No.	品名	タルク	研磨洗浄	備考
1	TM_PP1	未分別	無	異物にゴムを含む
2	KM_100	未分別	無	以下研磨洗浄品の原料
3	純 PP	未検出	有	No.2 からタルクを含まない PP を抽出し、研磨洗浄
4	PP_タルク 15 %未満	15wt %以下	有	No.2 からタルクを 15wt %未満で含む PP を抽出し、研磨洗浄
5	PP_タルク 15 %以上	15wt %以上	有	No.2 からタルクを 15wt %以上で含む PP を抽出し、研磨洗浄

サンプル No.1. TM_PP1:

TM 社由来の入荷原料を機械選別したもの中の PP1。機械処理の詳細は図 3.3.1-2　連続モデルの選別方法に記載。形状は図 3.2.4-1 に示す。

図 3.2.4-1　TM_PP1

サンプル No.2. KM_100：

KM 社由来の入荷原料を 15 mm アンダーに粉砕したもの。形状は図 3.2.4-2 に示す。

図 3.2.4-2　KM_100

サンプル No. 3. 純 PP：

バッチモデルの純 PP（図 3.3.1-1）をガラス研磨にかけたのち、付着ガラスを除去したもの。形状は図 3.2.4-3 に示す。

図 3.2.4-3　純 PP

サンプル No. 4. PP_タルク 15 %未満：

バッチモデルの PP_タルク 15 %未満（図 3.3.1-1）をガラス研磨にかけたのち、付着ガラスを除去したもの。形状は図 3.2.4-4 に示す。

図 3.2.4-4　PP_タルク 15 %未満

サンプル No. 5. PP_タルク 15 %以上：

バッチモデルの PP_タルク 15 %以上（図 3.3.1-1）をガラス研磨にかけたのち、付着ガラスを除去したもの。形状は図 3.2.4-5 に示す。

図 3.2.4-5　PP_タルク 15 %以上

実験方法

上記サンプルに対して、下記の分析方法を用いて、表面および熱分析を実施した。

① 表面形状分析： レーザーデジタル顕微鏡（KEYENCE 製、3D Laser Scanning Confocal Microscope Model VK-X110 ）形状測定レーザーマイクロスコープ（キーエンス製 VK-X100）を用いて表面の凹凸などの表面形態を観察した。

② 表面形状および元素分析： 試料表面を真空蒸着装置（日立製 E-1030）により、白金で表面被覆を 60 秒間行った後、電界放出形走査電子顕微鏡／エネルギー分散型Ｘ線分析（FE-SEM/EDS 日立製 S-5200）を用いて、加速電圧 5 kV、15kV で表面形状分析と元素分析を行った。

③ 熱分析： SEUKO Instruments Inc.社製、TG/DTA6200 を用いて、温度範囲 0～550℃の温度範囲、窒素気流（100mL/min）中、昇温速度 10℃/min でポリマーマトリックス成分の混合状態および無機フィラーの共存による耐熱性を調べた。

④ 表面化学分析： FT-IR（サーモフィッシャーサイエンティフィック(株)製 Nicolet iZ10）を用いて、減衰全反射（attenuated total reflection, ATR）法で表面の化学構造を分析した。

（2）測定結果（九州工業大学・西田教授レポートより）

レーザーデジタル顕微鏡による表面形状分析

サンプル表面の３Ｄ顕微鏡による観察と行った結果、未研磨洗浄サンプル（No.1.TM_PP1 およびサンプル No.2. KM_100）の表面には数μｍ～数十μｍの粒子状の付着物が観察された。一方、研磨洗浄サンプル（No.3. 純 PP、No.4. PP_タルク 15 %未満、No.5. PP_タルク 15 %以上）の表面には、数μｍ～数十μｍの粒子状の付着物はほとんど確認されなかった。したがって、研磨洗浄によって表面付着物の多くが除去されたと考えられる。

また、研磨洗浄サンプルにおいて、研磨による凹凸の平滑化という現象は特に認められず、研磨によって新たな凹凸が付加されたためと考えられる。

レーザーデジタル顕微鏡によって得られた表面写真と３D 画像を以下に示す。

サンプル No.1. TM_PP1：

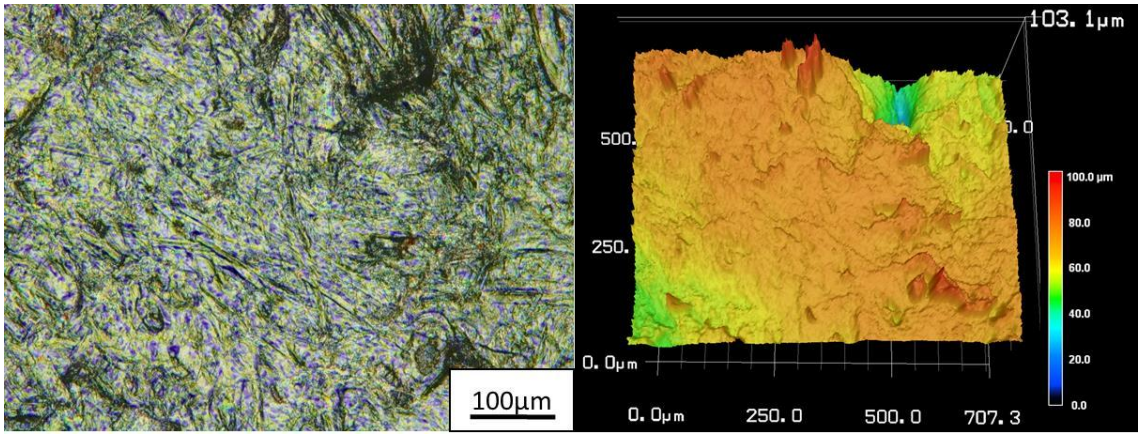


図 3.2.4-6　TM_PP1　黒（×400）

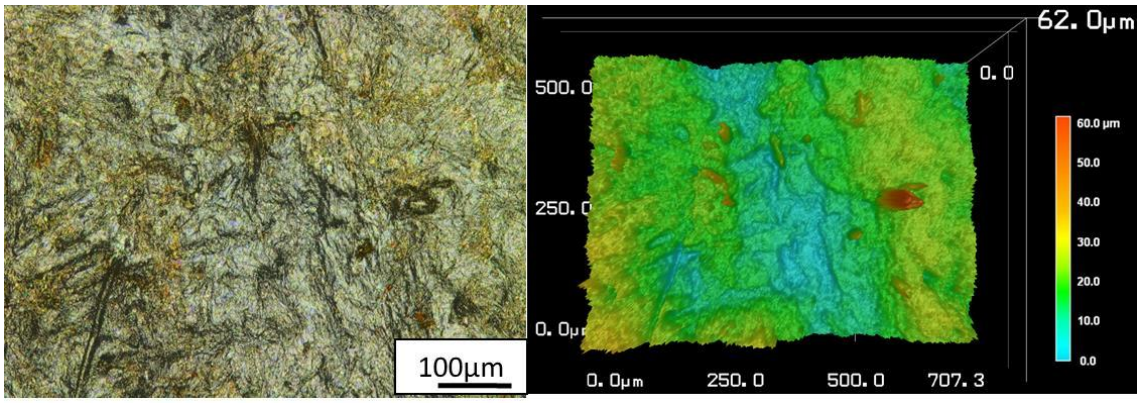


図 3.2.4-7　TM_PP1　白（×400）

サンプル No.2. KM_100：

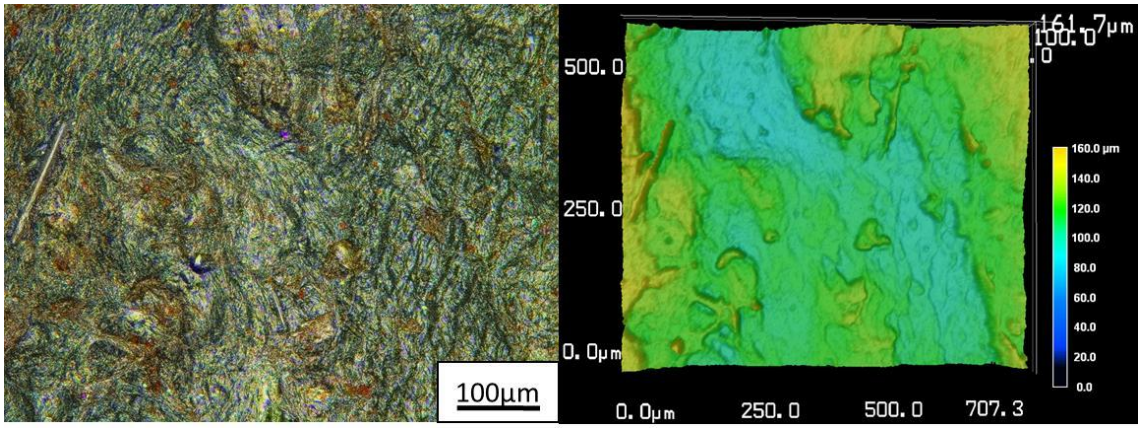


図 3.2.4-8　KM_100　黒（×400）

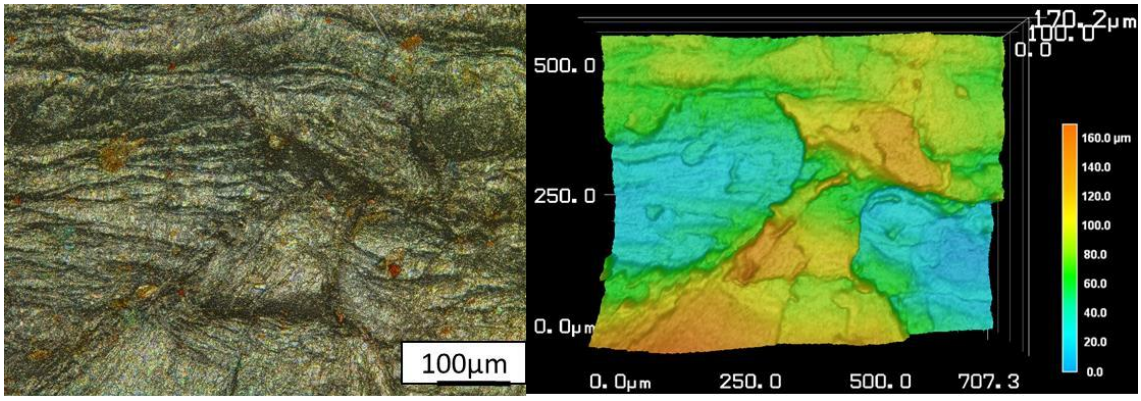


図 3.2.4-9　KM_100　白（×400）

サンプル No. 3.　純 PP：

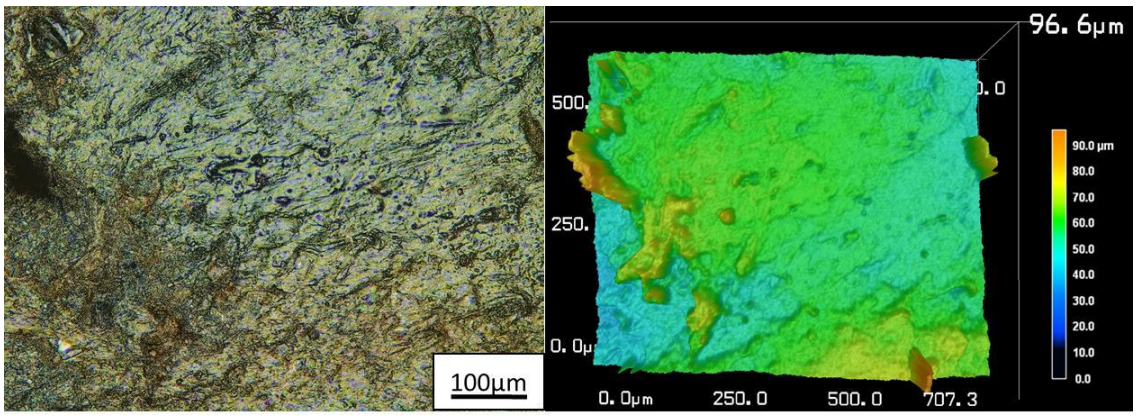


図 3. 2. 4-10　純 PP　黒（×400）

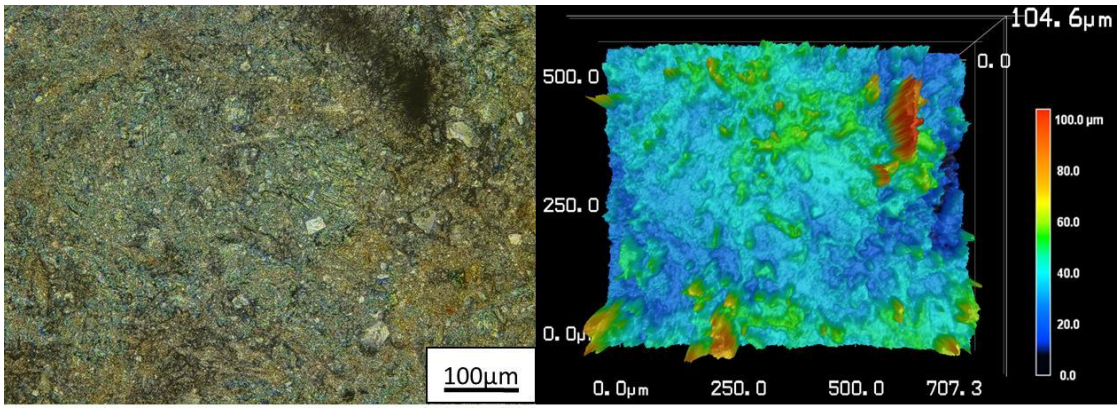


図 3. 2. 4-11　純 PP　白（×400）

サンプル No. 4.　PP_タルク 15 %未満：

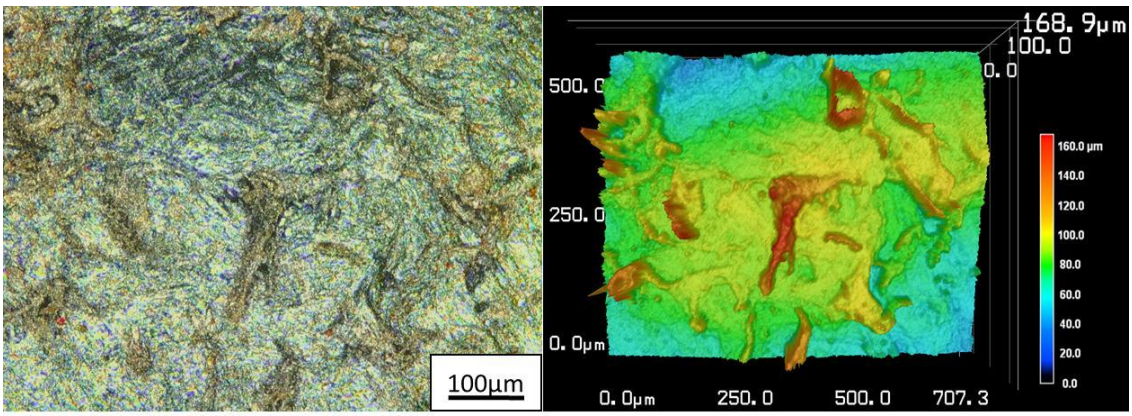


図 3. 2. 4-12　　PP_タルク 15 %未満　黒（×400）

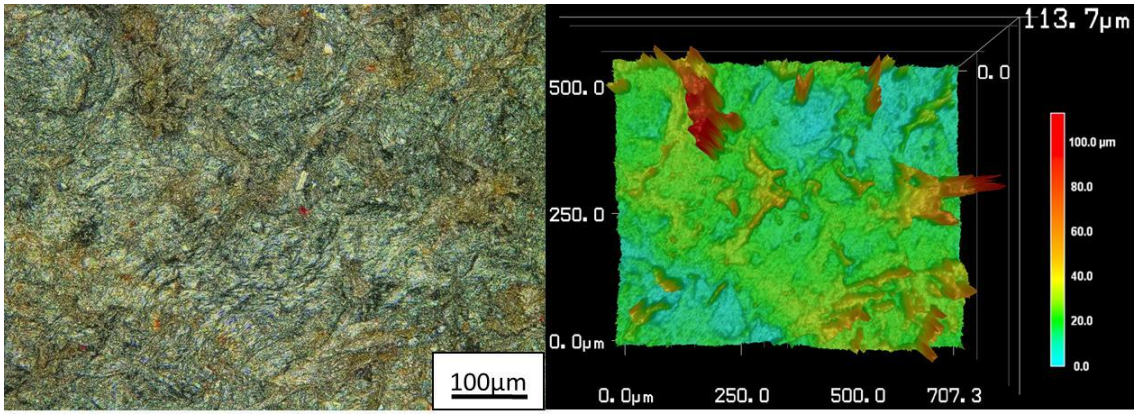


図 3. 2. 4-13　　PP_タルク 15 %未満　白（×400）

サンプル No. 5. PP_タルク 15 %以上：

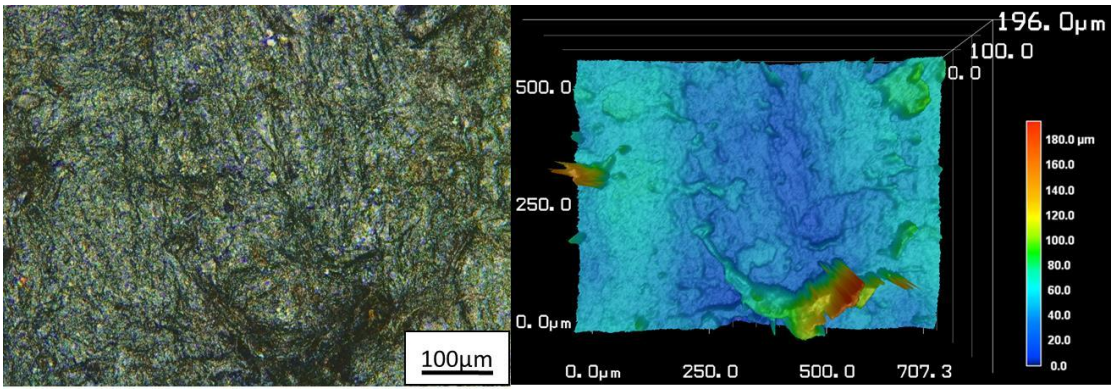


図 3. 2. 4-14　PP_タルク 15 %以上　黒（×400）

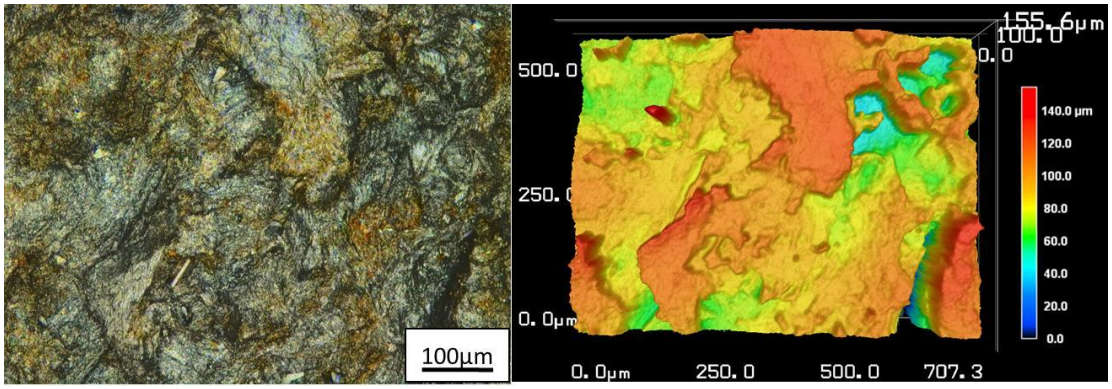
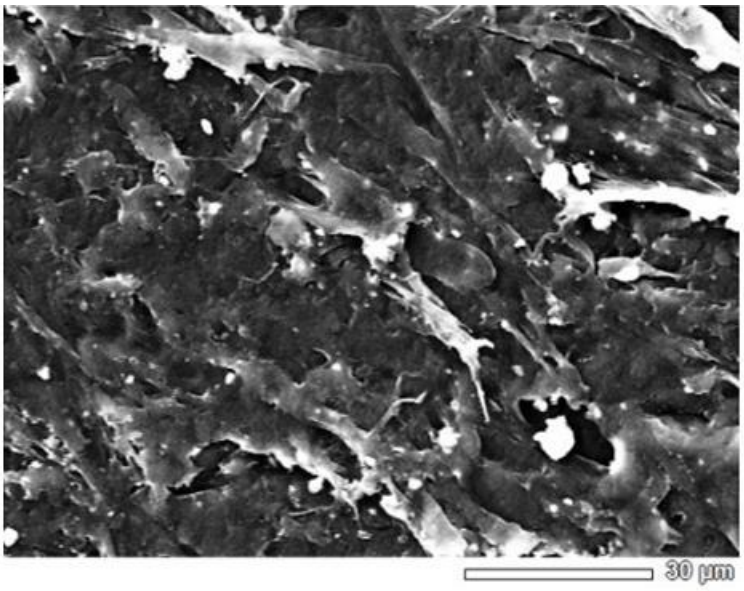


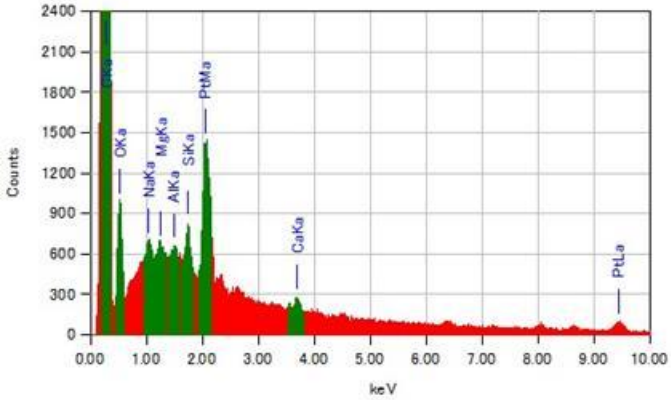
図 3. 2. 4-15　PP_タルク 15 %以上　白（×400）

SEM による表面形状分析と SEM-EDS による表面元素分析

ASR サンプル表面の物質を特定するために、SEM-EDS による元素分析を行った。それぞれのサンプルの分析結果を以下に示す。

サンプル No.1. TM_PP1：





測定条件
装置名 : 7800F
加速電圧 : 15.0 kV
照射電流 : 7.47500 nA
PHAモード : T2
経過時間 : 52.39 sec
有効時間 : 50.00 sec
デッドタイム : 4 %
計数率 : 15162 cps
エネルギ範囲 : 0 - 20 keV

ZAF法 簡易定量分析
フィッティング係数 : 0.0894

元素	(keV)	質量%	σ	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
C K	0.277	92.47	0.16	96.30				95.2212
O K	0.525	4.17	0.12	3.26				1.6398
Na K	1.041	0.10	0.01	0.05				0.1040
Mg K	1.253	0.05	0.01	0.03				0.0502
Al K	1.486	0.07	0.01	0.03				0.0767
Si K	1.739	0.23	0.01	0.10				0.2731
Ca K	3.690	0.17	0.02	0.05				0.2133
Pt M*	2.048	2.74	0.06	0.18				2.4216
合計		100.00		100.00				

図 3.2.4-16　TM_PP1　表面形状と元素分析結果（1/2）

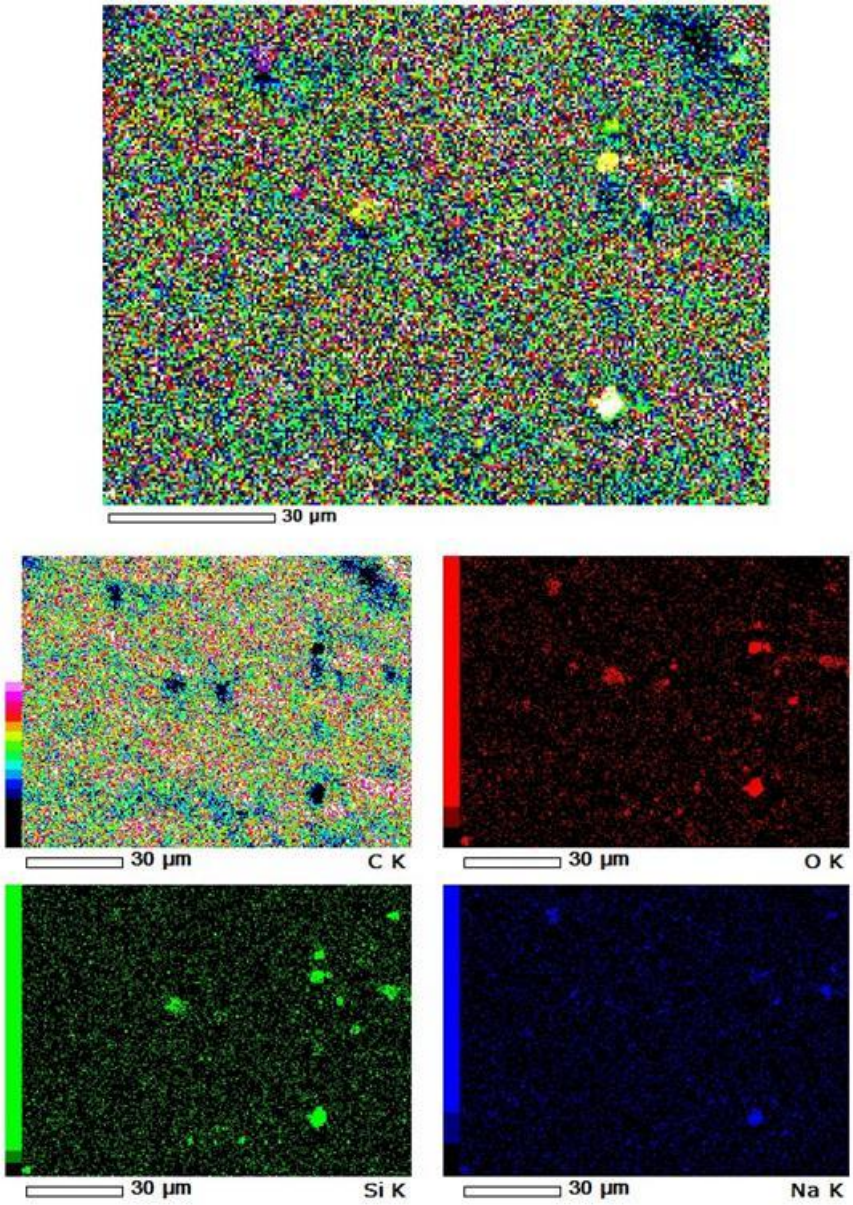
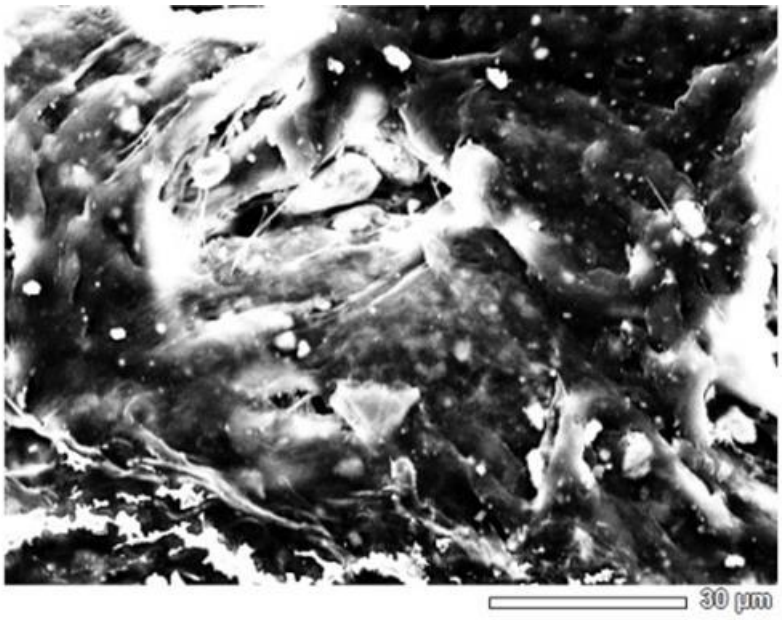
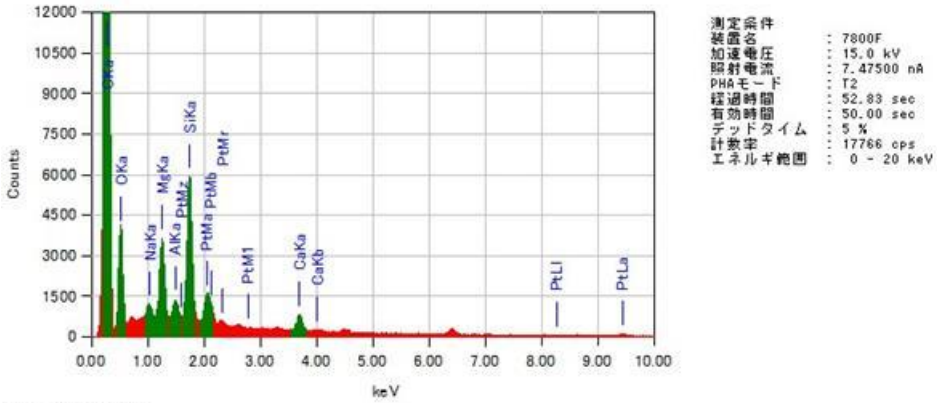


図 3.2.4-17　TM_PP1　表面形状と元素分析結果（2/2）

サンプル No.1 の表面には、炭素（C）と酸素（O）の他に、ケイ素（Si）、ナトリウム（Na）、アルミニウム（Al）、マグネシウム（Mg）、およびカルシウム（Ca）が検出された。また、Si と Na、O を有する 10μm以下の粒子状物が表面に付着していることが確認された（図 3.2.4-16、図 3.2.4-17）。これらの粒子状物はその元素組成から、ソーダ雲母（$NaAl_2\square AlSi_3O_{10}(OH)_2$）が比較的多く配合され、タルク（$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$）やカオリナイト（$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$）などのフィラーの共存が考えられる。

サンプル No.2. KM_100：





ZAF法 簡易定量分析
フィッティング係数 ： 0.0799

元素	(keV)	質量%	σ	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
C K	0.277	79.44	0.15	86.69				81.9804
O K	0.525	13.07	0.17	10.71				7.8826
Na K	1.041	0.24	0.01	0.13				0.3089
Mg K	1.253	1.36	0.02	0.74				1.7025
Al K	1.486	0.29	0.01	0.14				0.4233
Si K	1.739	2.61	0.03	1.22				3.9517
Ca K	3.690	0.69	0.02	0.23				1.1687
Pt M	2.048	2.31	0.05	0.16				2.5818
合計		100.00		100.00				

図 3.2.4-18　KM_100　表面形状と元素分析結果（1/2）

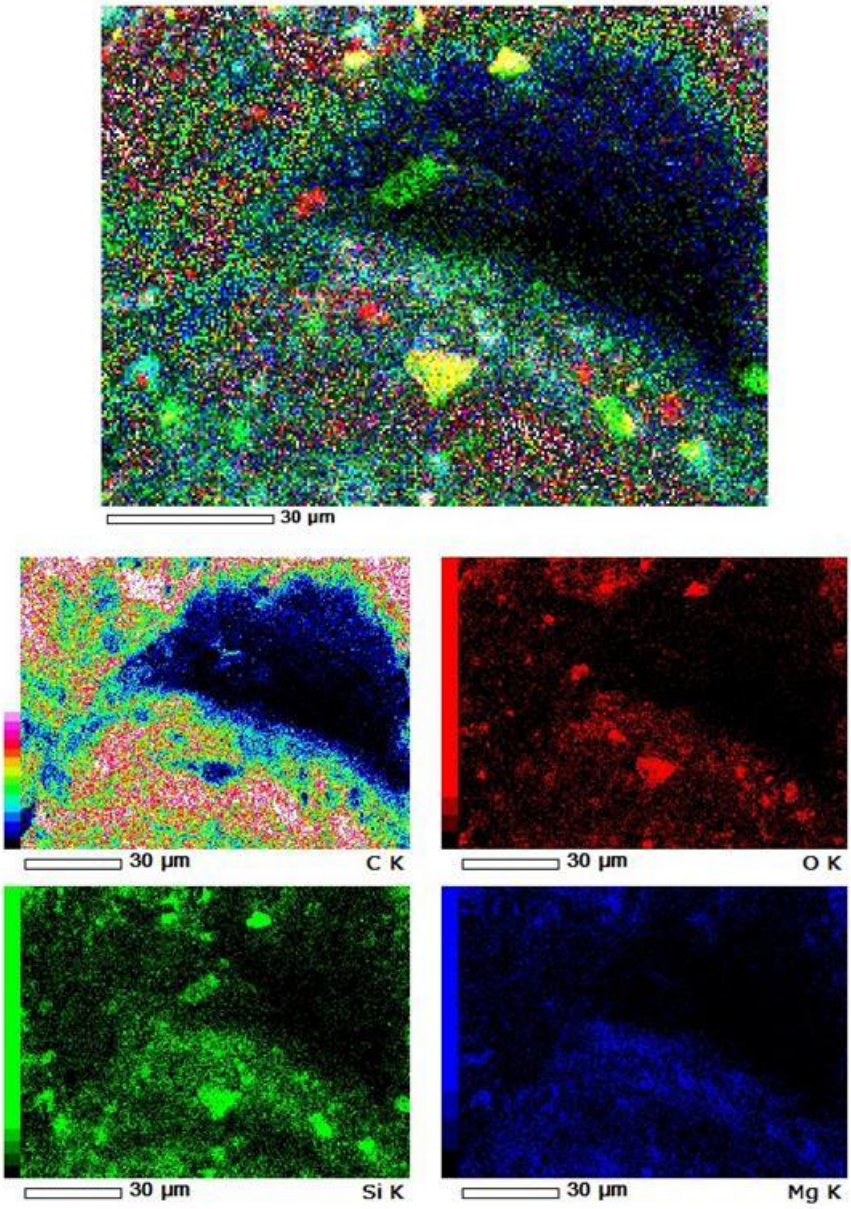
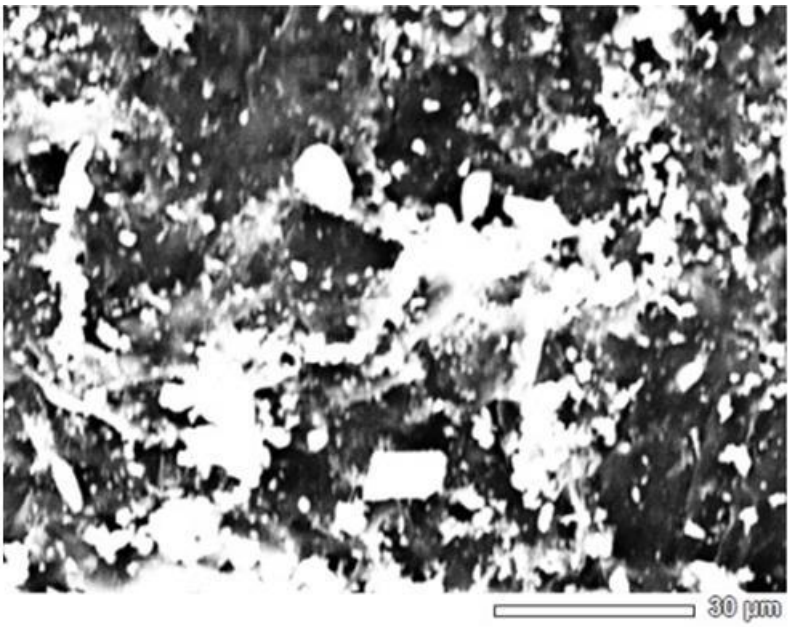
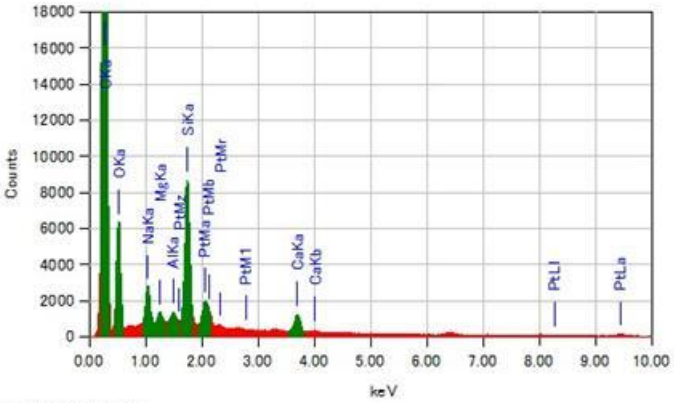


図 3.2.4-19　KM_100　表面形状と元素分析結果（2/2）

サンプル No.2 の表面にも、炭素（C）と酸素（O）の他に、ケイ素（Si）、マグネシウム（Mg）、アルミニウム（Al）、カルシウム（Ca）およびナトリウム（Na）が検出された（図 3.2.4-18、図 3.2.4-19）。また、Si と Al、O を有する 10μm以上の粒子状物が表面に付着していることが確認された。これらの粒子状物はその元素組成から、タルク（$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$）が比較的多く含まれており、カオリナイト（$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$）やソーダ雲母（$NaAl_2\square AlSi_3O_{10}(OH)_2$）などのフィラーの共存も考えられる。

サンプル No. 3. 純 PP：





測定条件
装置名 : 7800F
加速電圧 : 15.0 kV
照射電流 : 7.47500 nA
PHAモード : T2
経過時間 : 53.16 sec
有効時間 : 50.00 sec
デッドタイム : 5 %
計数率 : 18851 cps
エネルギ範囲 : 0 - 20 keV

ZAF法 簡易定量分析
フィッティング係数 : 0.0663

元素	(keV)	質量%	σ	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
C K	0.277	73.16	0.14	81.72				74.6516
O K	0.525	18.05	0.18	15.14				12.4996
Na K	1.041	1.16	0.02	0.67				1.5697
Mg K	1.253	0.24	0.01	0.13				0.3118
Al K	1.486	0.22	0.01	0.11				0.3470
Si K	1.739	3.57	0.04	1.71				5.7362
Ca K	3.690	1.03	0.03	0.34				1.8542
Pt M	2.048	2.57	0.05	0.18				3.0299
合計		100.00		100.00				

図 3.2.4-20　純 PP　表面形状と元素分析結果（1/2）

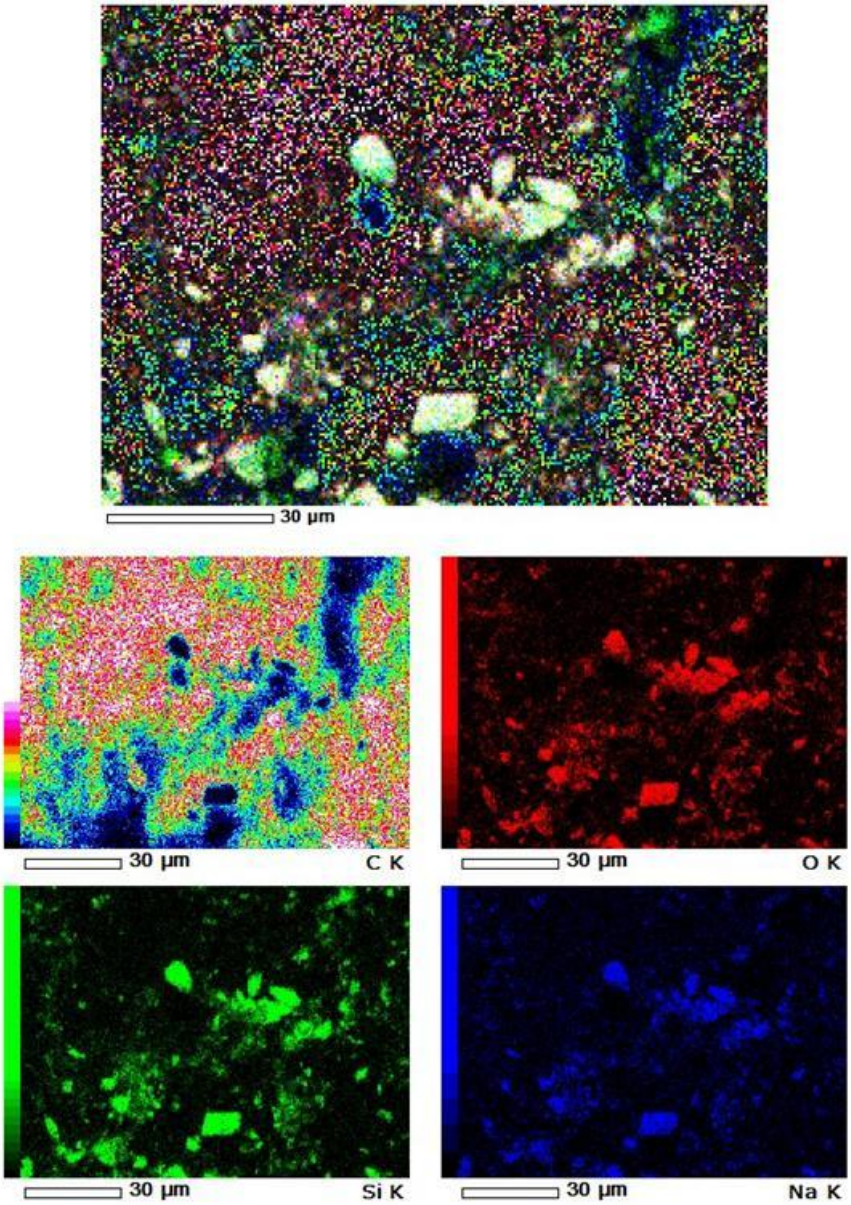
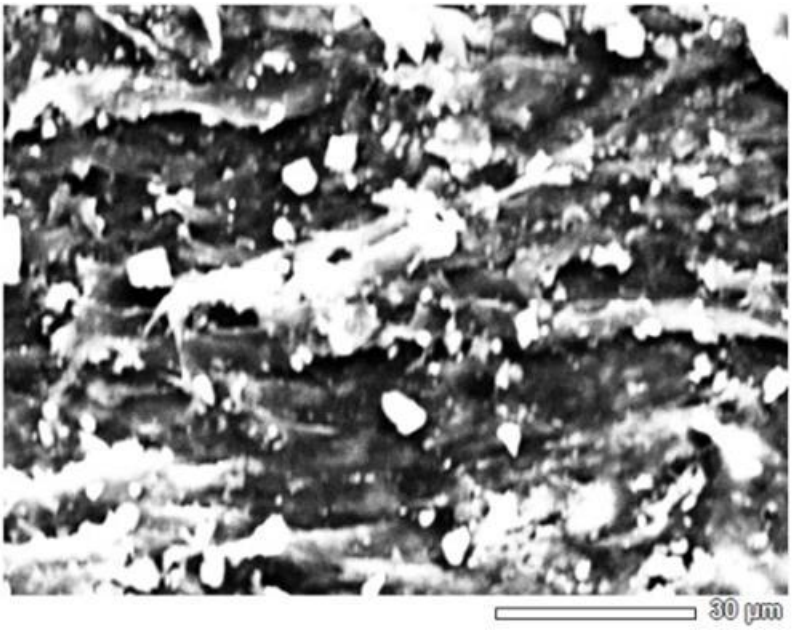
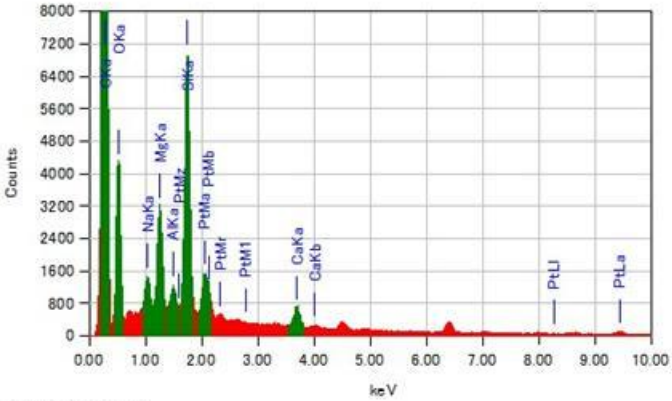


図 3.2.4-21　純 PP　表面形状と元素分析結果（2/2）

サンプル No.3 の表面には、炭素（C）と酸素（O）の他に、ケイ素（Si）、ナトリウム（Na）が強く観測され、マグネシウム（Mg）、アルミニウム（Al）、カルシウム（Ca）なども検出された（図 3.2.4-20、図 3.2.4-21）。また、Si と Na、O を有する 10μm以上の粒子状物が表面に付着していることが確認された。これらの粒子状物はその元素組成から、ソーダ雲母（$NaAl_2\square AlSi_3O_{10}(OH)_2$）が比較的多く存在し、その他にカオリナイト（$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$）やタルク（$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$）、白雲母（$KAl_2\square AlSi_3O_{10}(OH)_2$）、などのフィラーの共存も考えられる。

サンプル No. 4. PP_タルク 15 %未満：





測定条件
装置名 : 7800F
加速電圧 : 15.0 kV
照射電流 : 7.47500 nA
PHAモード : T2
経過時間 : 52.44 sec
有効時間 : 50.00 sec
デッドタイム : 4 %
計数率 : 14824 cps
エネルギ範囲 : 0 - 20 keV

ZAF法 簡易定量分析
フィッティング係数 : 0.0765

元素	(keV)	質量%	σ	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
C K	0.277	74.21	0.16	82.76				74.8708
O K	0.525	16.45	0.20	13.77				11.4642
Na K	1.041	0.56	0.02	0.33				0.7874
Mg K	1.253	1.48	0.03	0.81				1.9679
Al K	1.486	0.30	0.01	0.15				0.4854
Si K	1.739	3.70	0.04	1.77				6.0275
Ca K	3.690	0.72	0.03	0.24				1.3163
Pt M	2.048	2.58	0.06	0.18				3.0805
合計		100.00		100.00				

図 3.2.4-22　PP_タルク 15 %未満　表面形状と元素分析結果（1/2）

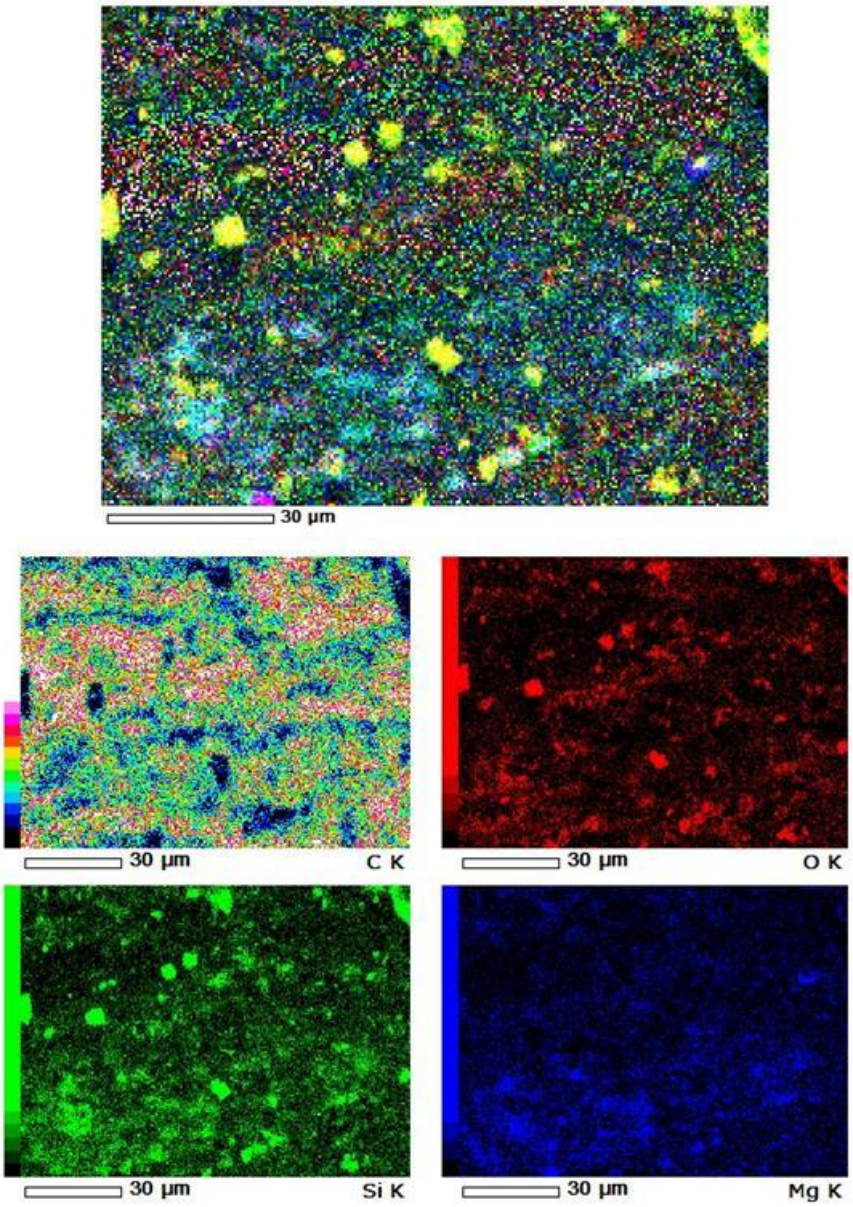
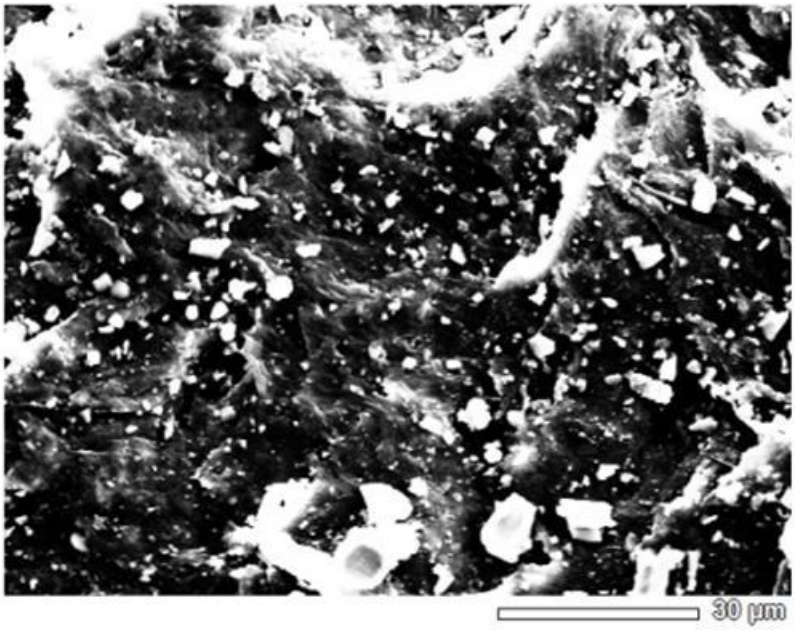
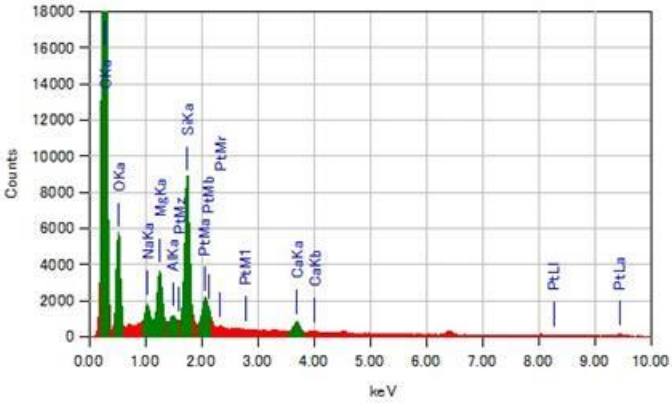


図 3.2.4-23　PP_タルク 15 %未満　表面形状と元素分析結果（2/2）

サンプル No.4 の表面にも、炭素（C）と酸素（O）の他に、ケイ素（Si）、マグネシウム（Mg）、アルミニウム（Al）、カルシウム（Ca）およびナトリウム（Na）が検出された（図 3.2.4-22、図 3.2.4-23）。また、Si と O を有する 10μm以下の粒子状物が表面に付着していることが確認された。これらの粒子状物はその元素組成から、シリカ（SiO_2）が主体であると考えられる。その他、タルク（$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$）やカオリナイト（$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$）やソーダ雲母（$NaAl_2\square AlSi_3O_{10}(OH)_2$）などのフィラーの共存も考えられる。

サンプル No. 5. PP_タルク 15 %以上：





測定条件
装置名 : 7800F
加速電圧 : 15.0 kV
照射電流 : 7.47500 nA
PHAモード : T2
経過時間 : 52.90 sec
有効時間 : 50.00 sec
デッドタイム : 5 %
計数率 : 17506 cps
エネルギ範囲 : 0 - 20 keV

ZAF法 簡易定量分析
フィッティング係数 : 0.0691

元素	(keV)	質量%	σ	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
C K	0.277	72.45	0.15	81.54				72.5836
O K	0.525	17.66	0.19	14.92				12.8352
Na K	1.041	0.61	0.02	0.36				0.8606
Mg K	1.253	1.36	0.02	0.75				1.8332
Al K	1.486	0.16	0.01	0.08				0.2644
Si K	1.739	3.98	0.04	1.91				6.6031
Ca K	3.690	0.63	0.02	0.21				1.1733
Pt M	2.048	3.16	0.06	0.22				3.8465
合計		100.00		100.00				

図 3.2.4-24　PP_タルク 15 %以上　表面形状と元素分析結果（1/2）

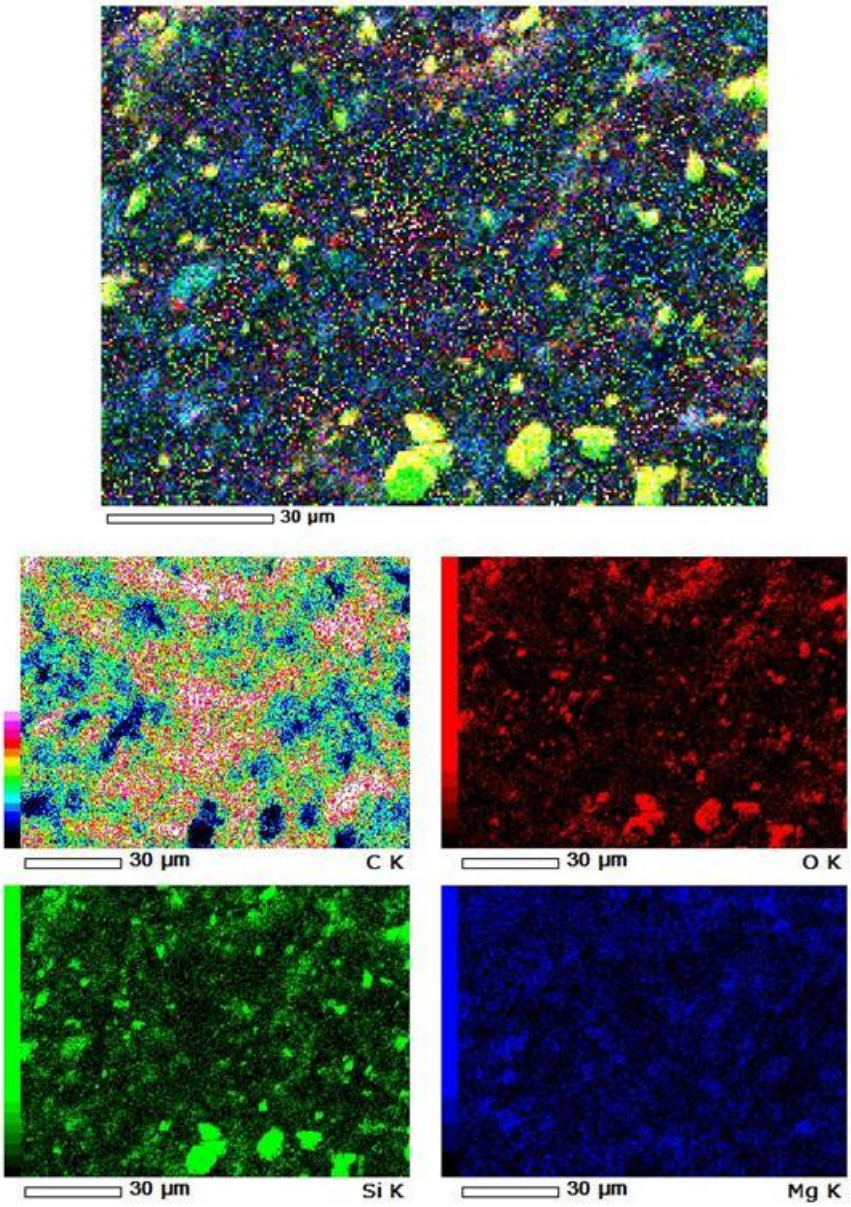


図 3.2.4-25　PP_タルク 15 %以上　表面形状と元素分析結果（2/2）

サンプル No.4 の表面にも、炭素（C）と酸素（O）の他に、ケイ素（Si）、マグネシウム（Mg）、アルミニウム（Al）、ナトリウム（Na）およびカルシウム（Ca）が検出された（図 3.2.4-24、図 3.2.4-25）。また、Si と O を有する 10μm以下の粒子状物が表面に付着していることが確認された。これらの粒子状物はその元素組成から、シリカ（SiO_2）が主体であると考えられる。その他、タルク（$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$）やカオリナイト（$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$）やソーダ雲母（$NaAl_2\square AlSi_3O_{10}(OH)_2$）などのフィラーの共存も考えられる。

TG/DTA による熱分析

TG/DTA を用いてサンプルの熱分析を行い、その熱重量減少挙動から有機成分の組成や無機フィラーの共存の影響などを調査した。結果を以下に示す。

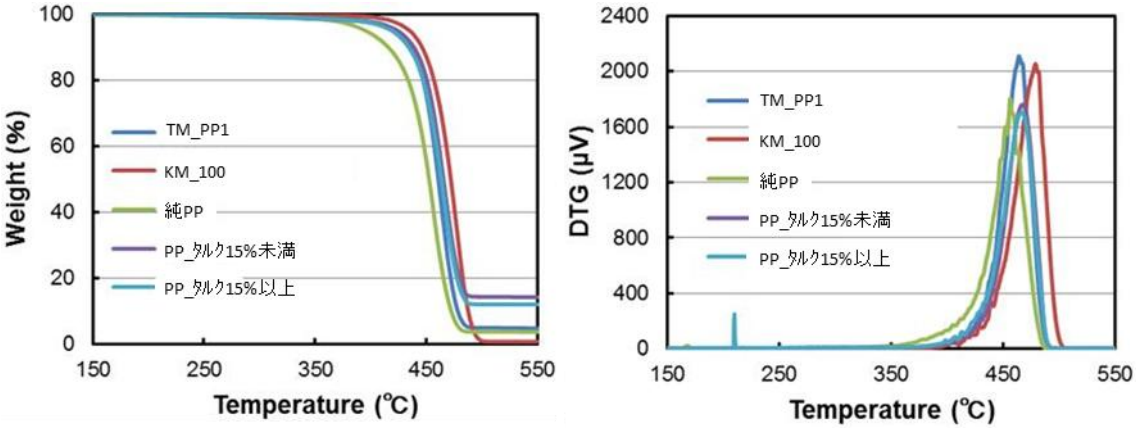


図 3.2.4-26　熱分析結果

表 3.2.4-2　ASR サンプルの TG/DTA 分析結果

Sample	d_5（℃）	d_{50}（℃）	Peak Top temperature of DTG(℃)	Final weight (wt%)
TM_PP1	424	461	464	4.80
KM_100	435	472	479	0.725
純PP	395	452	452	3.70
PP_タルク15%未満	423	465	467	14.2
PP_タルク15%以上	419	463	467	12.0

熱分解による重量減少挙動は明確な 1 段階で進行しており、これは、表層劣化の進行が顕著ではないことを示唆している（図 3.2.4-26、表 3.2.4-2）。さらに、これらの結果から、有機成分であるプラスチック類は、ほぼ PP 成分を主体とする組成であり、熱分解挙動の異なる他のポリマー成分は少ないと考えられる。

残重量比率から無機フィラーの含有量は下記の順番となった。サンプル数が少なく、試験に供される量がわずかに 5 mg 程度のため、かなりの誤差範囲を考える必要があるが、サンプル No. 1 に対するサンプル No. ３～５、およびサンプルサンプル No. 3 に対するサンプル No. ４～５のタルク含量の変化は有意であり、タルクの量に基づく分別は明確である。

PP_タルク 15 %未満 ＞ PP_タルク 15 %以上 ＞ TM_PP1 ＞ 純 PP ＞ KM_100

無機フィラーの効果としては、マトリックス熱分解温度（5％重量減少温度（d_5）および 50 ％重量減少温度（d_{50}））を向上し、熱安定化に寄与している。

一方、無機フィラーの含有率が極端に少ない KM_100 の特異的な熱安定性は難燃剤などの添加剤の共存が考えられる。

FT-IR による表面化学分析

サンプルの表面物質の化学構造に関する情報を得るため、FT-IR による表面化学分析を行った。透過率（Transmittance）で表したスペクトルを以下に示す。また、参照サンプルとして、ポリプロピレン（PP）、ポリエチレン（PE）、およびポリスチレン（PS）の縦軸を吸光度（Absorbance）で表した図（図 3.2.4-32、図 3.2.4-33、図 3.2.4-34）を示す。

個々のサンプルと参照サンプルを比較すると、ASR 中のポリマー成分は、基本的に PP が主成分であると考えられるが、1000cm^{-1} 付近に PP 以外の成分の強いピークが観測される。これは、Si-O-Si や Si-O-C、あるいはアルコールの C-O 伸縮結合に基づくものと推測され、無機フィラーや表面酸化などの化学構造の変化が進行していることを反映していると考えられる。

サンプル No.1. TM_PP1：

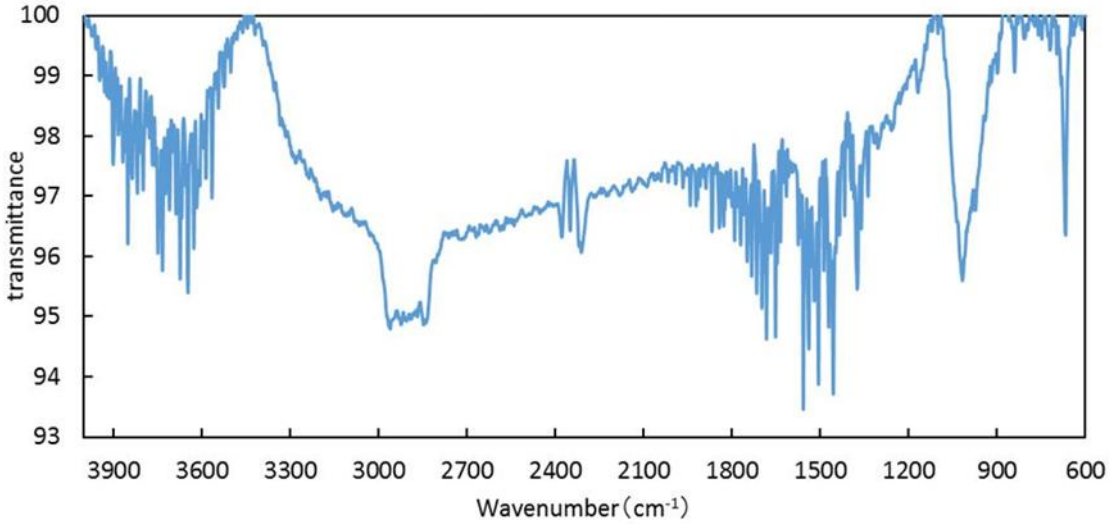


図 3.2.4-27　TM_PP1　IR 分析結果

サンプル No.2. KM_100：

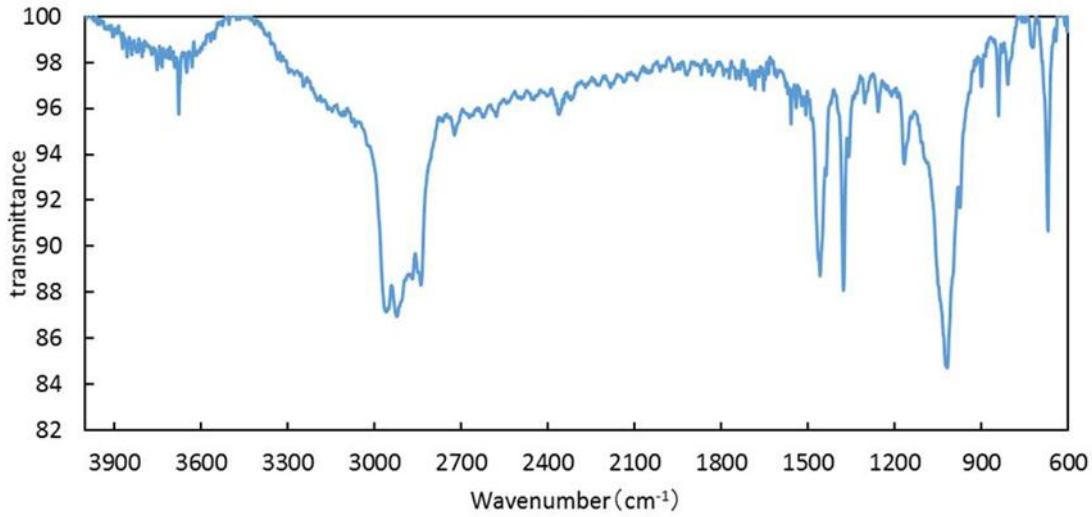


図 3.2.4-28　KM_100　IR 分析結果

サンプル No.3. 純 PP：

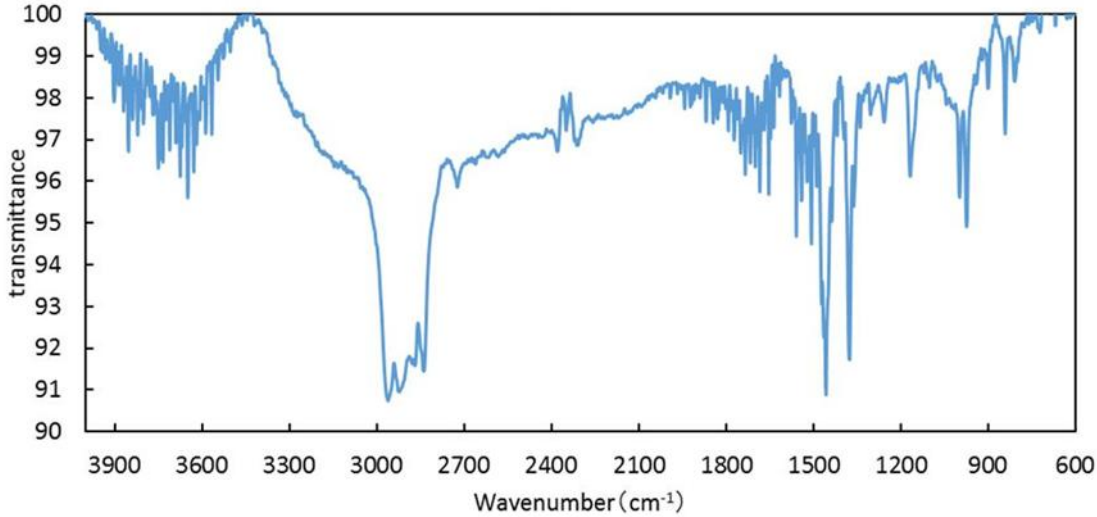


図 3.2.4-29　純 PP　IR 分析結果

サンプル No.4. PP_タルク 15 %未満：

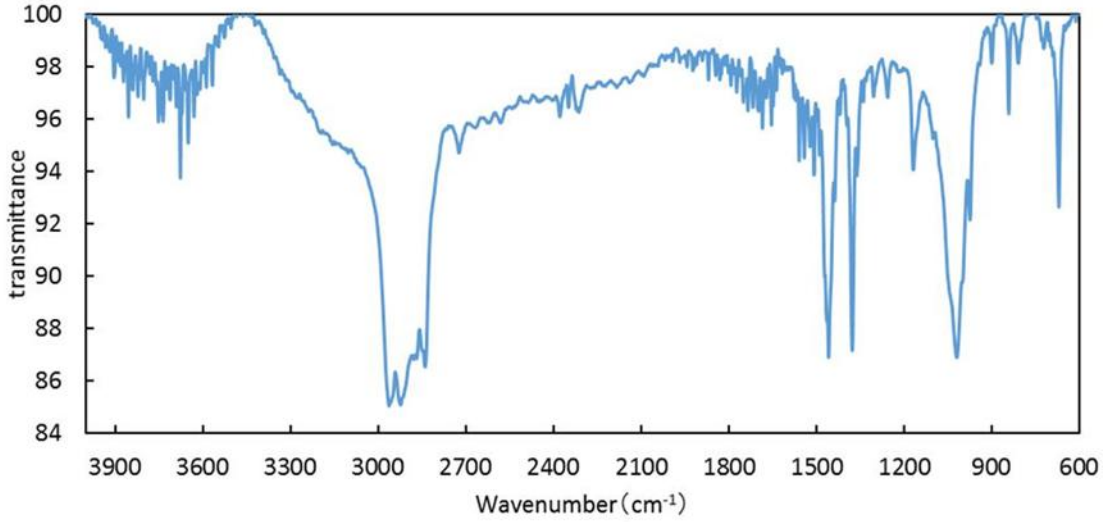


図 3.2.4-30　PP_タルク 15 %未満　IR 分析結果

サンプル No.5. PP_タルク 15 %以上：

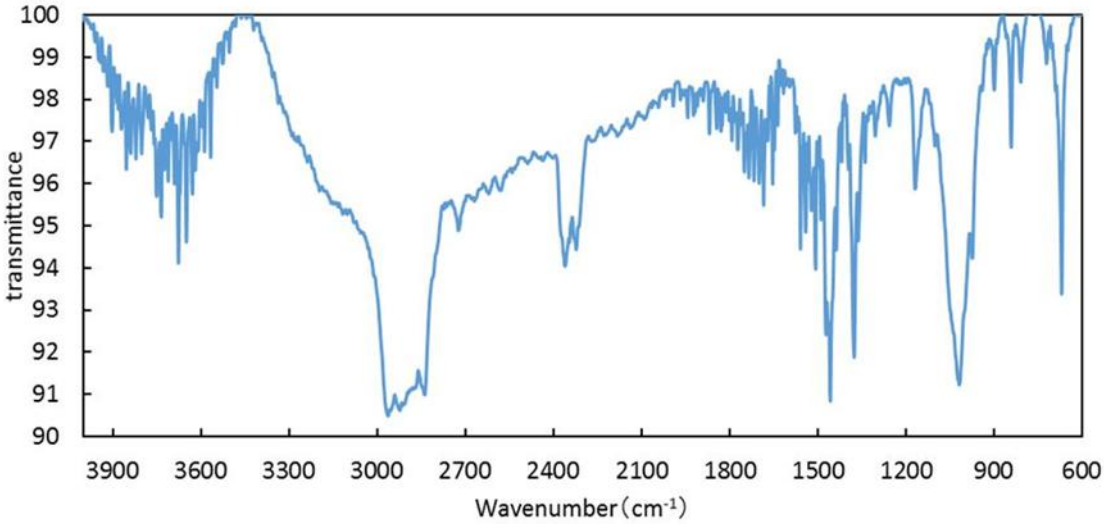


図 3.2.4-31　PP_タルク 15 %以上　IR 分析結果

参照スペクトル；

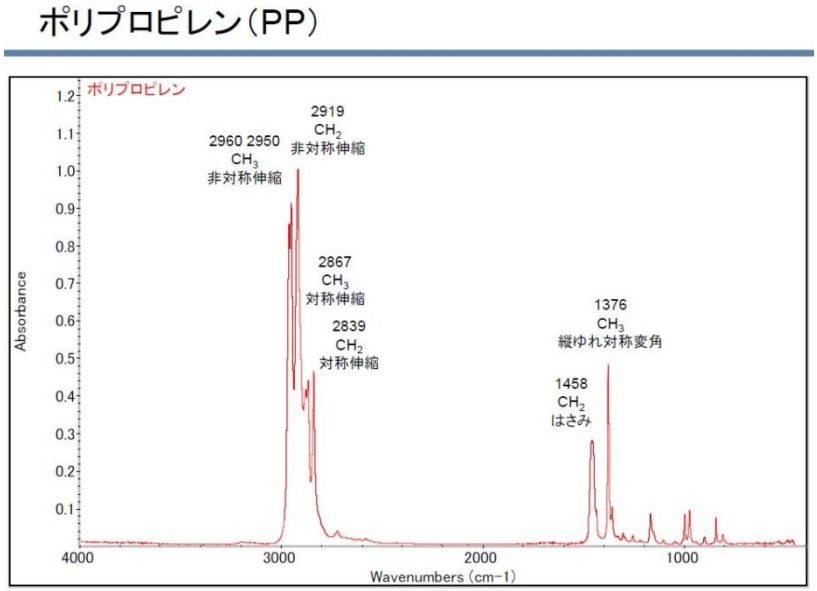


図 3.2.4-32　参照スペクトル　PP

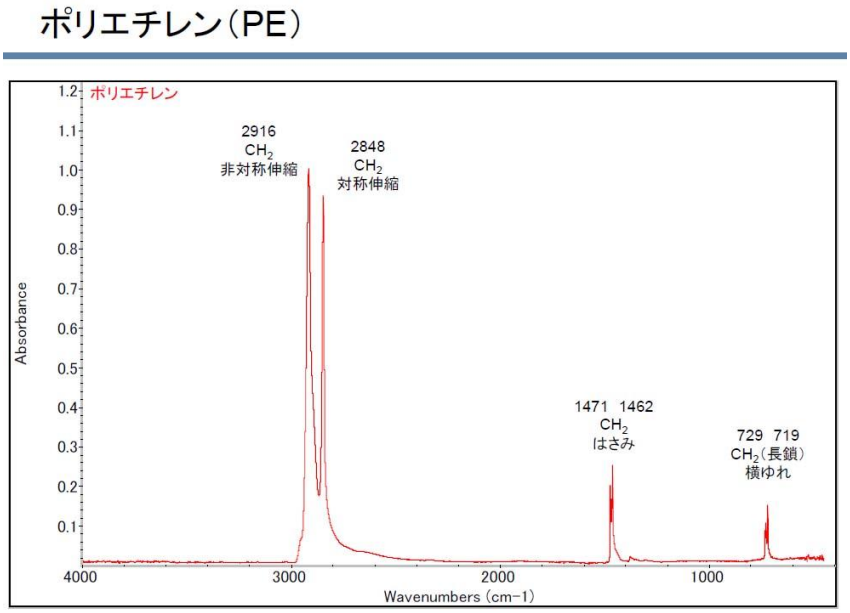


図 3.2.4-33　参照スペクトル　PE

ポリスチレン（PS）

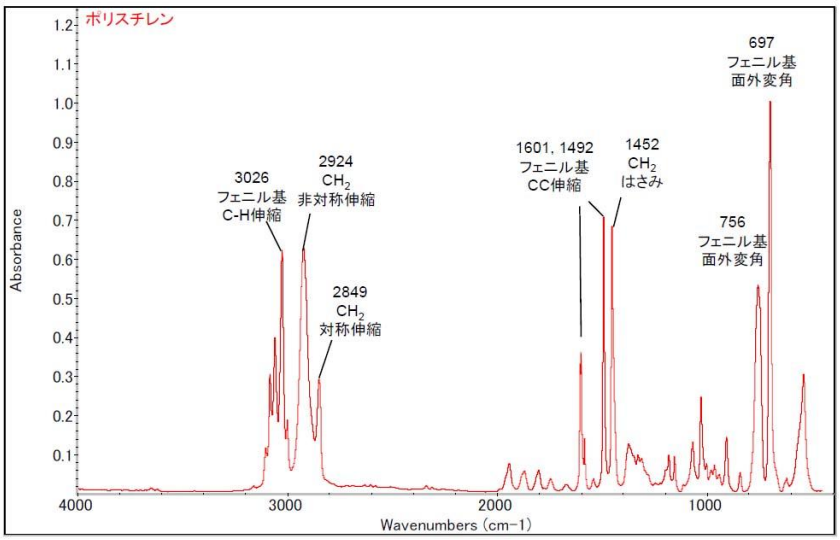


図 3.2.4-34　参照スペクトル　PS

(3)各種分析手法から得られた検証結果

以上、５種類の ASR サンプルに対し、①表面形状分析、②表面形状および元素分析、③熱分析、および、④表面化学分析を行った結果、下記のことが見出された。

① 研磨洗浄サンプルの表面には、粒子状の付着物はほとんど確認されなかったため、研磨洗浄の効果が有効であったと考えられる。一方、研磨による凹凸の平滑化という現象は特に認められず、研磨によって新たな凹凸が付加されたためと考えられた。

② サンプルの表面には、炭素（C）と酸素（O）の他に、ケイ素（Si）、マグネシウム（Mg）、アルミニウム（Al）、ナトリウム（Na）およびカルシウム（Ca）などが検出され、無機フィラーとして、タルク（$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$）やシリカ（SiO_2）、カオリナイト（$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$）、ソーダ雲母（$NaAl_2\square AlSi_3O_{10}(OH)_2$）などのフィラーの共存が考えられた。

③ 熱重量分析の結果から、有機成分であるプラスチック類は、ほぼ PP 成分を主体とする組成であり、表面劣化の影響はほとんど認められなかった。一方、熱分解挙動の異なる他のポリマー成分も少ないと考えられた。また、残重量比率から、タルクの量的分別は有意の差で区別されていることが認められた。

④ ASR 中のポリマー成分は、基本的に PP が主成分であった。その他、無機フィラーや表面酸化された層の存在が認められた。

以上の検討の結果、プラスチックの表面付着物除去の状況、並びに経年劣化部位除去の状況を検証することができた。また、選別回収した後、グレード分け処理を行った再生プラスチックの熱的材料物性を検証することができた。

3.3. 回収プラスチックの品質管理手法の確立

3.3.1. 回収プラ種別物性データの収集

本実証事業の選別・物性改善方法を用いて得られた再生プラスチック原料（表 3.3-1-1）について実際にコンパウンド・成型を行い、材質ごとに物性試験と加速劣化試験の結果についてまとめる。図 3.3.1-1 および図 3.3.1-2 は本実証事業におけるバッチモデルと連続モデルの選別方法について図表したものである。バッチモデルは選別方法に蛍光X線分析を用い、タルク含有量ごとに手選別したのち粉砕したものである。連続モデルは㈱サイム関西事業所での機械選別したものである。再生プラスチックの製作条件の詳細については表 3.3.1-2 に示す。また、本章で使用した装置についてにまとめた。

表 3.3.1-1　本章で使用した装置

装置メーカ	装置名	型式	作業日時	作業場所
島津製作所	蛍光Ｘ線分析装置（ＥＤＸ）	ＥＤＸ-ＧＰ	随時	㈱サイム
島津製作所	分析天びん/簡易比重測定キット	ＡＵＷ 220Ｄ/SM Ｋ-401	随時	㈱サイム
島津製作所	恒温装置	ＳＴＡＣ Ｎ-500Ｋ	随時	㈱サイム
島津製作所	赤外吸光光度計	ＩＲ Prestige-21	随時	㈱サイム
バンブーテクノ	押し出し機	-	平成28年11月1日～11月12日	㈱バンブーテクノ
エー・アンド・デイ	万能試験機	ＲＴＣ1350Ａ	平成28年12月2日	福岡県工業技術センター化学繊維研究所
安田精機製作所	アイゾット・シャルピー 衝撃試験機	ＮＯ.195-Ｒ	平成28年12月2日	福岡県工業技術センター化学繊維研究所
東洋精機製作所	加速劣化試験装置	アトラス・サンテストXXL	平成28年12月1日～平成29年1月23日	㈱伊都研究所

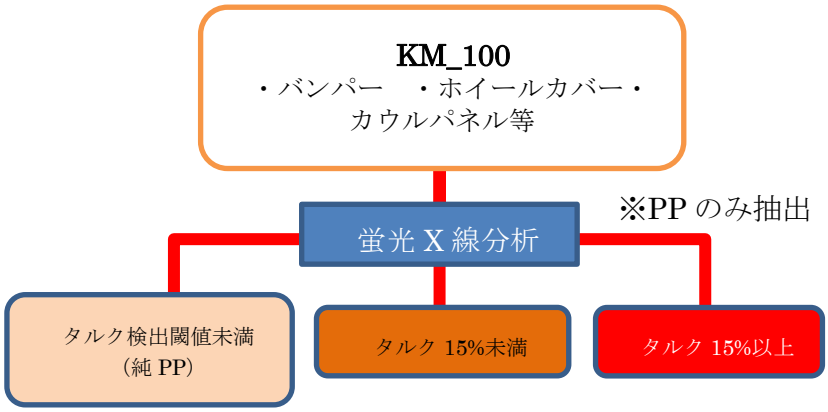


図 3.3.1-1　バッチモデルの選別方法

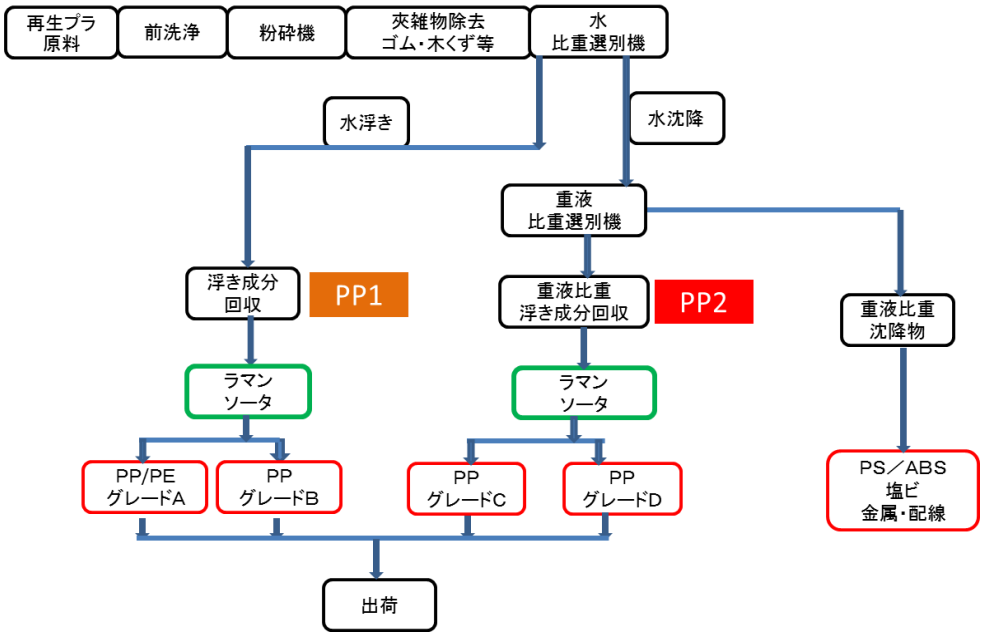


図 3.3.1-2　連続モデルの選別方法

バッチモデルで取得した３種のプラスチックは章 3.2.3 でガラス研磨処理し、表 3.3.1-2 中の KM_T_35 と KM_T_100 は、粉砕洗浄脱水装置にかけたものである。

また、比較用に図 3.3.1-1 中の純 PP と市販の自動車バンパーのリサイクル PP を用意した。

表 3.3.1-2　再生プラスチック作製条件

試料	由来	手選別	研磨	洗浄	タルク含有量	備考
純PP	KM_100mmオーバー	○	ガラス研磨	手洗い	検出閾値以下	バッチモデル
純PP 無洗	〃	○	–		検出閾値以下	バッチモデル
KM_タルク15%未満	〃	○	ガラス研磨	手洗い	15wt%未満	バッチモデル
KM_タルク15%以上	〃	○	ガラス研磨	手洗い	15wt%以上	バッチモデル
市販リサイクルPP	バンパー回収品にホモPPをコンパウンド				15wt%	
TM_PP1	TM_ASR	–	関西事業所で処理 水比重選別浮き成分		17wt%以下	連続モデル
TM_PP1 一軸押出機	TM_ASR	–			17wt%以下	連続モデル
TM_PP2	TM_ASR	–	水比重選別沈降成分を重 比重選別にかけた浮き成分		17wt%以上	連続モデル
KM_35	KM_35～100mm 水浮き	○	–	手洗い	17wt%以下	
KM_T_35	KM_35～100mm 水浮き	–	湿式粉砕洗浄脱水機 （研磨効果）		17wt%以下	バッチモデル
KM_T_100	KM__100mmオーバー	–			未選別	バッチモデル
		※1軸押出機の表記がない試料は2軸押出機でコンパウンド				

押し出し機を用い、220℃でコンパウンドした際の使用したメッシュ、取得重量、メッシュの交換周期について表 3.3.1-3 に示す。KM_T_35 と KM_T_100 は大きな夾雑物を除去していないため、メッシュの交換周期が短く、KM_T_35 ではウレタン、KM_T_100 ではアルミニウムが主な原因で目詰まりをおこした。

表 3.3.1-3　コンパウンド時のメッシュの交換周期等

試料	メッシュ	ペレット重量	メッシュ交換周期
純PP	50x1 100x1	約7Kg	交換無し
純PP 無洗		約7Kg	30分
KM_タルク15%未満		約7Kg	交換無し
KM_タルク15%以上		約7Kg	交換無し
TM_PP1		約7Kg	1時間
TM_PP2		約7Kg	1時間
KM_35		約7Kg	交換無し
KM_T_35		約3Kg	10分
KM_T_100		約7Kg	20分

装置設定温度：220℃

物性試験の結果を表 3.3.1-4 に示す。物性値はタルク含量の度合いやゴム混入を反映していた。例えば、タルク 15%以上含有 PP はタルクなしに比べ、曲げ強度や曲げ弾性で２割前後大きな値を示した。このことはグレード別に回収することで、次工程であるコンパウンド工程で物性調整が容易に精度高く行えることを示しており、本実証事業での回収プラスチック片の商品価値を高めると考えることができる。連続モデル（TM_PP のシリーズ）でもバッチモデルと比べてあまり変わらない機械物性を示した。ただ、衝撃強度のみ低い値を示した。ゴム混入の影響と考えられる。自動車向け市販リサイクル PP に比べ、やはり機械強度は劣っていたが（例えば、曲げ強度は市販リサイクル PP よりも約 30%劣る）、半減といった著しい低下はなく、リサイクルプラスチックとして利用可能な値を示した。現状では、表面劣化部分除去の効果は見出せなかった。一方で、小さな夾雑物（100μm以下）が多く残っているもの、ゴムの混入があるものでは光や熱による加速劣化試験で明らかに早い劣化が観察された。

さらに、この物性をもとに Car-to-Car リサイクルへの可能性につき次項 3.3.2 で検討を行った。

表 3.3.1-4　本実証事業再生プラスチックの主な物性

項目	MFR	曲げ強度	曲げ弾性	引張強度	引張弾性	伸び率	衝撃強度（ノッチあり）	比重	タルク
単位	g /10min	MPa	GPa	MPa	GPa	%	kj/m2		wt%
測定方法	JISK7210	JISK7171	JISK7171	JISK7113	JISK7113	JISK7113	JISk7111		
純PP	29	26.4	0.9	17.8	0.36	70.2	12.0	0.9111	検出閾値未満
純PP 無洗	23	26.3	0.93	16.8	0.32	87.0	10.3	0.9293	検出閾値未満
KM_タルク15%未満	29	25.7	1.13	15.9	0.39	98.4	10.4	0.9632	14.3
KM_タルク15%以上	28	30.8	1.7	17.8	0.56	77.4	11.4	1.0324	31.6
市販リサイクルPP	16	40.8	1.94	24.0	0.70	51.5	3.6	0.9863	15.3
TM_PP1	21	27.6	1.17	16.4	0.40	14.8	7.4	0.9544	5.1
TM_PP1 一軸押出機	19	28.3	1.06	17.2	0.39	25.4	6.2	0.9512	4.3
TM_PP2	5	29.8	1.81	15.1	0.54	3.7	0.5	1.0541	18.4
KM_35	12	26.7	1.04	16.7	0.40	51.5	12.0	0.9545	3.2
KM_T_35	24	27.3	1.07	16.4	0.37	47.5	9.0	0.9595	8.8
KM_T_100	5	26.1	1.12	15.9	0.42	43.5	14.7	0.9878	13.7

3.3.2. 物性改善検討

表 3.3.2-1 に TM_PP1 の物性とコンパウンド後の物性予想、目標値についてまとめた。

図 3.3.2-1 に示すように、TM_PP1 のみの場合でも目標値（標準グレード）を MFR 以外は達成しており、目標値（高剛性グレード）についても図 3.3.2-2 からバージン PP とコンパウンドすることで、達成できることが推測される。

表 3.3.2-1　TM_PP1 物性と目標値

		引張強度	伸び率	曲げ強度	曲げ弾性	シャルピー衝撃強度	MFR
		MPa	%	MPa	MPa	kJ / m^2	g / 10min
TM_PP1	100%	20	18	29	1070	8	16
TM_PP1	75%	24	15	36	2150	7	16
バージン	25%						
目標値（標準グレード）		>20	>15	>25	>1000	>5	25～45
目標値（高剛性グレード）		>23	>5	>25	>2000	>3	30～65
バージン		34	5	57	5400	3	16

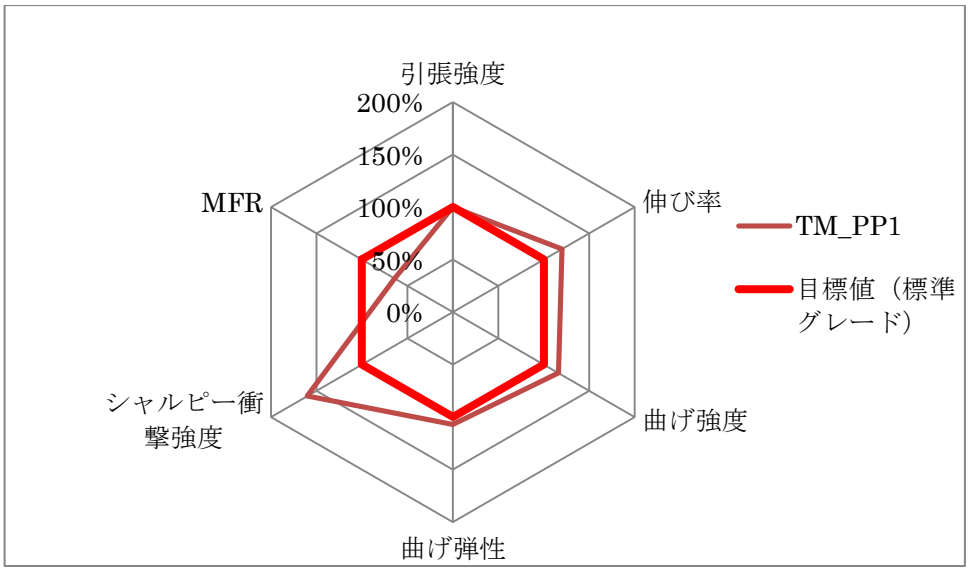


図 3.3.2-1　目標値への達成度(標準グレード)

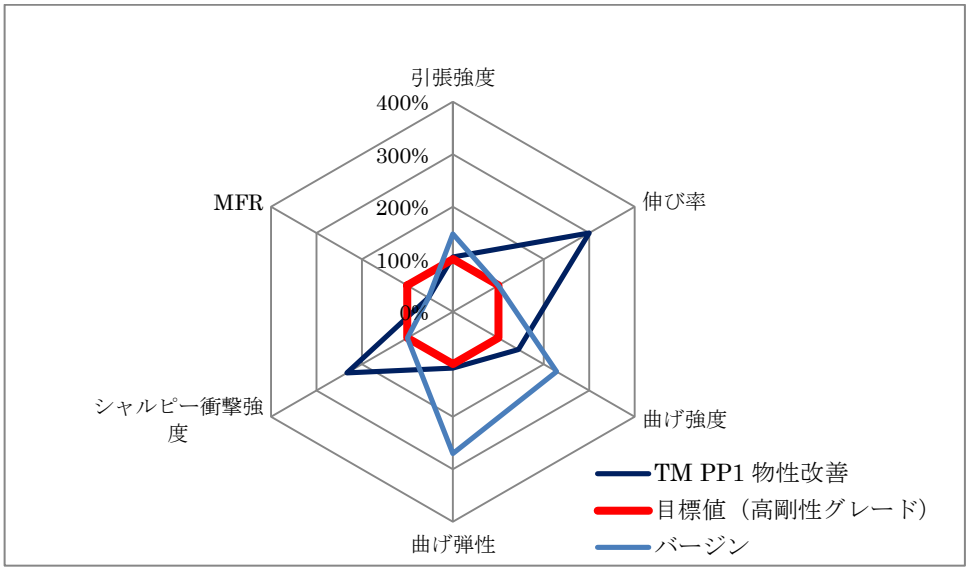


図 3.3.2-2　目標値への達成度（高剛性グレード）

3.3.3. 物性劣化特性の評価

次に製作した再生プラスチックの劣化試験を行った。試験方法を以下にまとめ、結果をプラスチックの表面顕微鏡写真（図 3.3.3-1）と IR スペクトル（図 3.3.3-3）で示す。

試験条件については表 3.3.3-1 に示す。

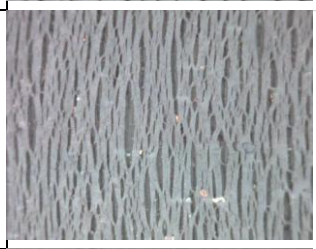
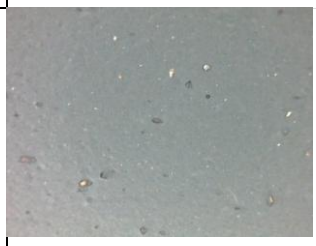
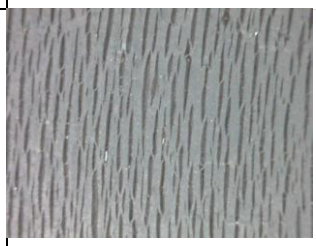
表 3.3.3-1　加速劣化試験の条件

	熱劣化試験	UV劣化試験	
		サンプルA	サンプルB
保持温度	150℃	63℃	63℃
保持時間	218時間	197時間	500時間
環境	空気下	UV、空気下	UV、空気下
UVの総エネルギー量	-	38422.1 kJ/m^2	97189.8 kJ/m^2

（1）目視による劣化程度の差異の判定

図 3.3.3-1 に加速劣化試験後の表面状態を撮影したものを並べて示す。

タルク含有量や細かな残留物（夾雑物）、ゴムの含有量により表面状態に違いが現れた。

	顕微写真 x50		顕微写真 x200
	150℃ 218 h	UV 63℃ 197 h	UV 63℃ 500 h
純PP			
純PP 無洗			
KM_タルク15%未満			
KM_タルク15%以上			
KM_35			
TM_PP1			

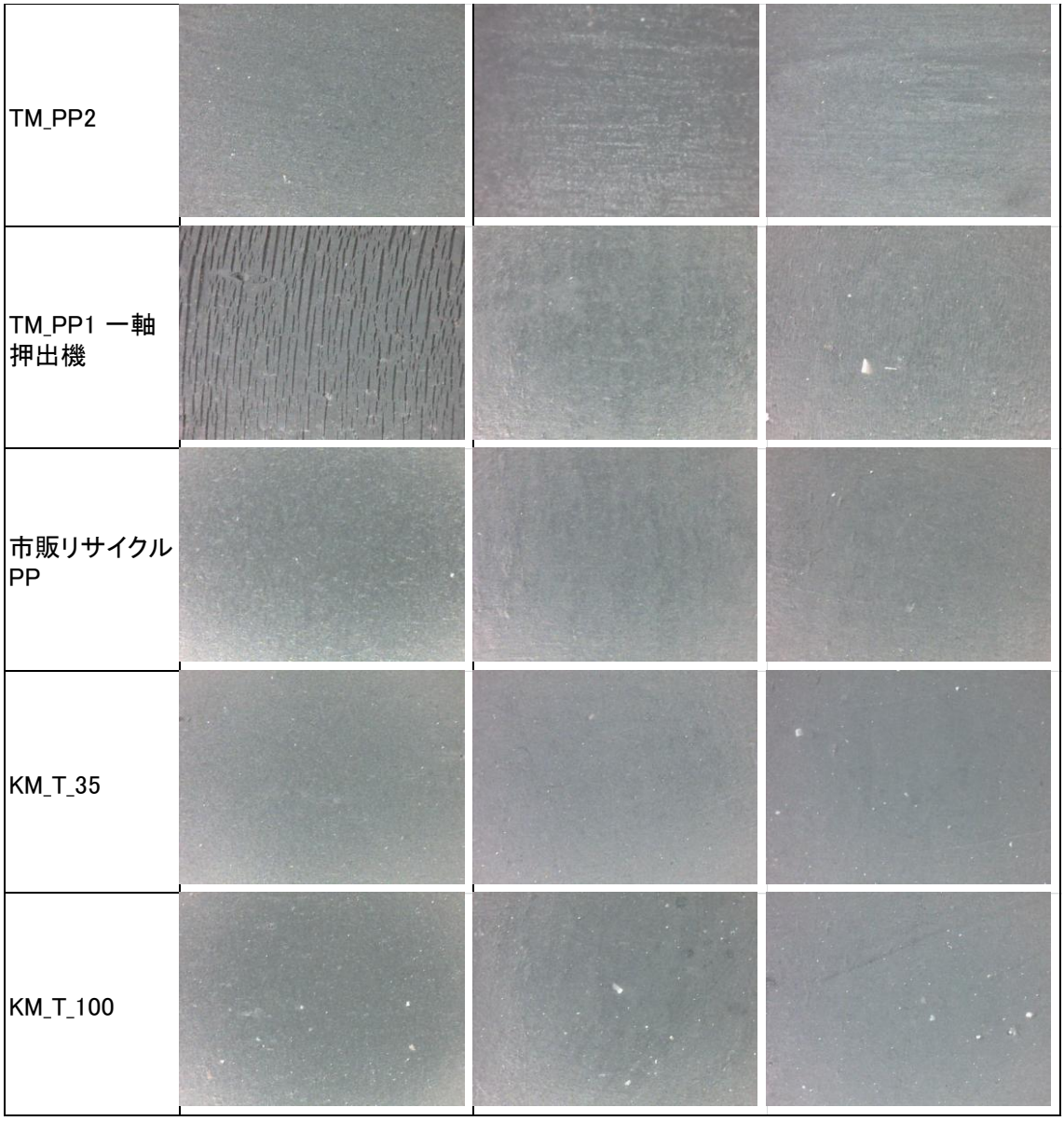


図 3.3.3-1　劣化試験結果（顕微写真）

熱加速劣化試験

150℃熱劣化試験では、タルクの含有率によりプラスチックの劣化具合に大きな差が見られた（図 3.3.3-2）。特に蛍光X線分析での検出閾値未満のタルク含有量では、プラスチックが大きくひび割れた。タルク含有率 15 %未満のプラスチックでは、プラスチックに残存している小さな夾雑物がプラスチック表面に浮き出ていることが確認できる。タルク含有量ごとに見られる試験プラスチックの外見的特徴を以下にまとめる。

①蛍光X線分析閾値未満の含有量

プラスチックが大きくひび割れ、劣化がプラスチック内部まで侵攻しており、とても脆くなっている。

②5 %未満含有

プラスチック表面に細かなひび割れができているが、内部までは侵攻していない。

③5～15 %未満含有

ひび割れは確認できないが、再生プラスチック内部にあったと思われる細かな夾雑物がプラスチック表面に浮き出ている。

④15 %以上含有

目視による表面の変化は確認できなかった。

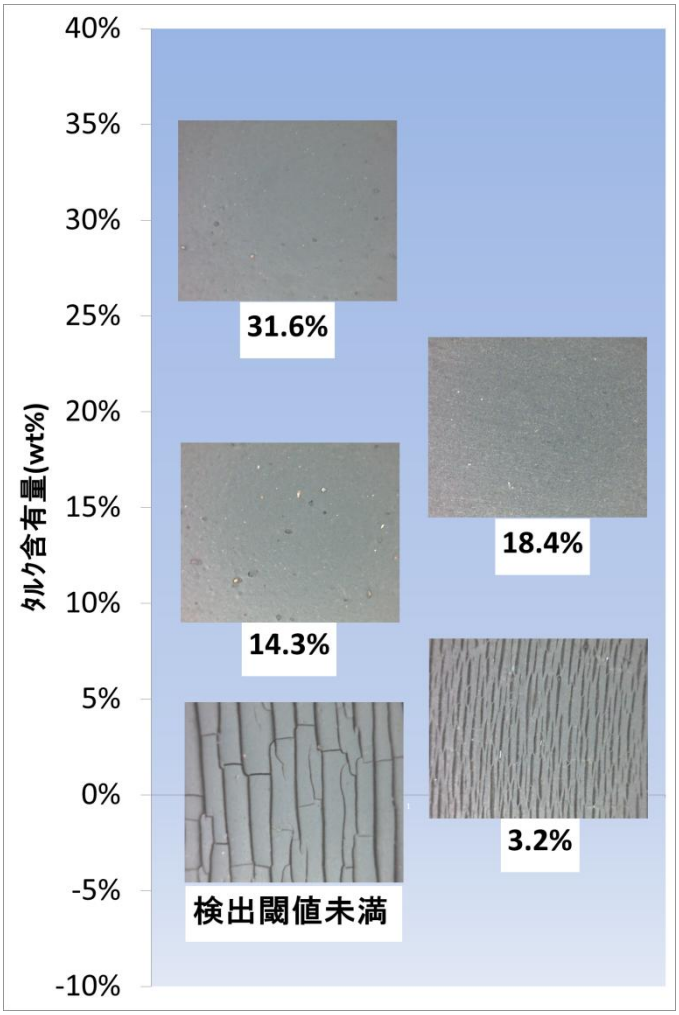


図 3.3.3-2　タルク含有量と劣化

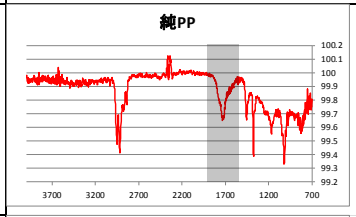
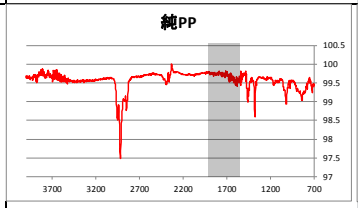
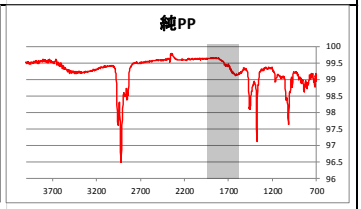
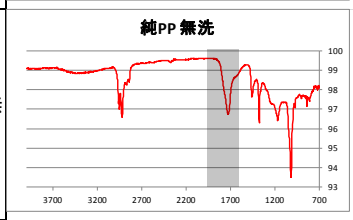
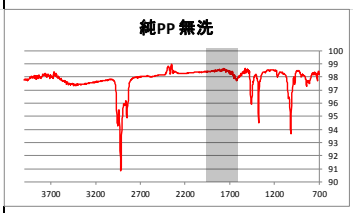
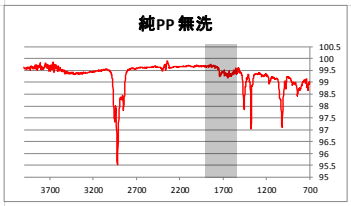
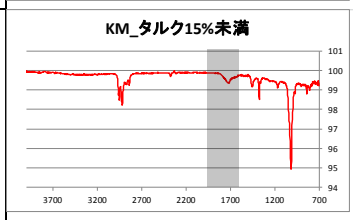
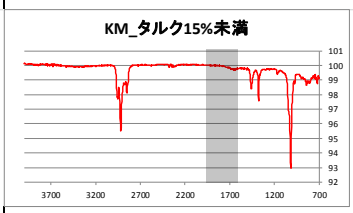
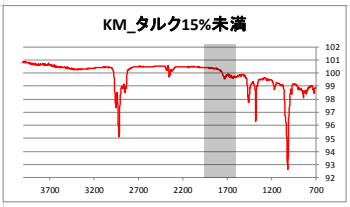
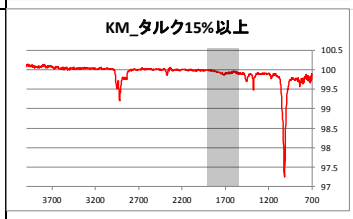
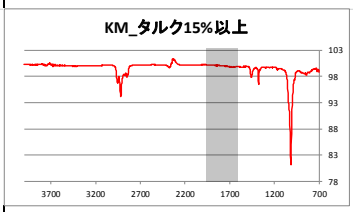
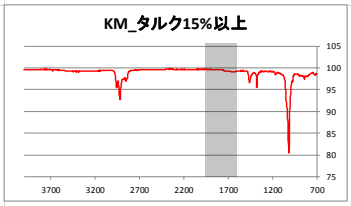
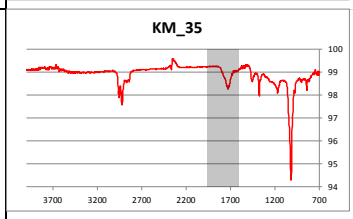
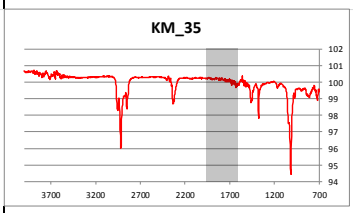
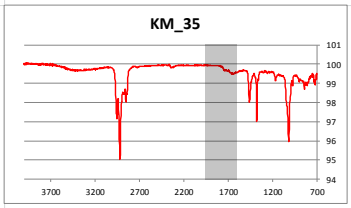
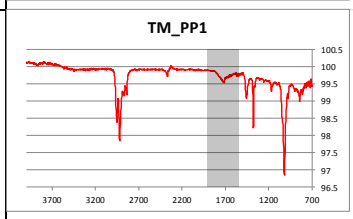
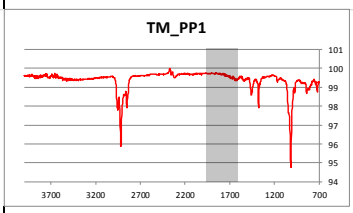
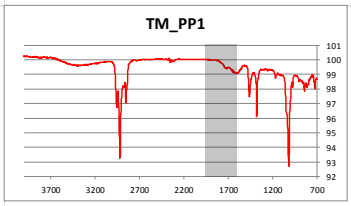
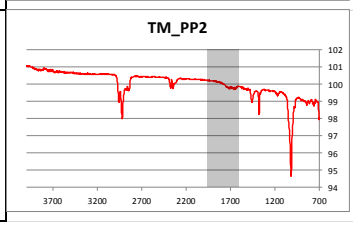
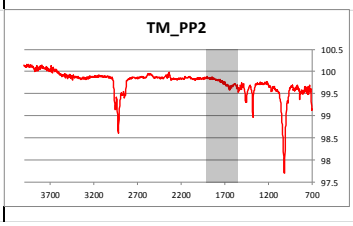
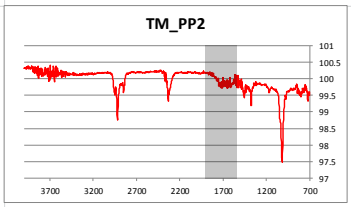
UV 加速劣化試験

197 時間では特に変化は見られなかったが 500 時間になると、多くのプラスチックで表面が白っぽく変化した。特に TM_PP1 は表面がひび割れた。TM_PP1_一軸押出機は TM_PP1 と同じ原料から試験片を制作したがプラスチック表面は白っぽくなるだけだった。差異が現れた要因として、コンパウント時の工程が考えられる。TM_PP1_一軸押出機を作製した装置では、コンパウンド時に熔け残り（または流れの悪い）の異物を取り除く機構がついており、そこでゴム等が除去される。TM_PP1 と TM_PP1_一軸押出機の結果から、再生プラスチックを作製する場合はゴム等の異物を極力取り除くことが望ましいという知見が得られた。

（2）IR スペクトルによる劣化程度の差異の判定

図 3.3.3-3 に加速劣化試験後のプラスチック表面の IR スペクトルを並べて示す。

図 3.3.3-1 の表面写真同様に劣化していることが分かる。

	IRスペクトル（y軸：%T，x軸：wavenumber[cm^{-1}]）		
	150℃　218 h	UV 63℃　197 h	UV 63℃ 500 h
純PP			
純PP 無洗			
KM_タルク15%未満			
KM_タルク15%以上			
KM_35			
TM_PP1			
TM_PP2			

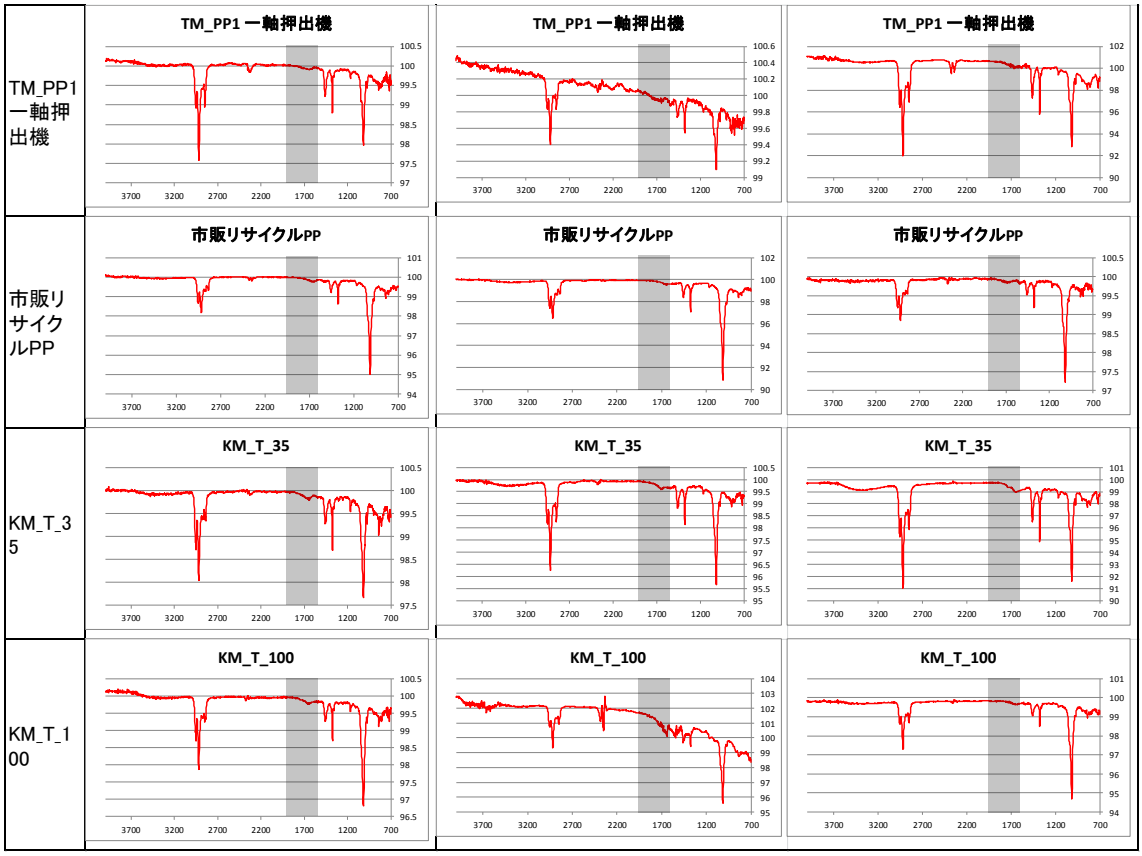


図 3.3.3-3　劣化試験結果（IR スペクトル）

PP が劣化（酸化劣化）し、主鎖が切れることでカルボニル基（C=O）が形成される。そのため IR スペクトルの 1750cm^{-1}（スペクトルの灰色マーカー部分）付近を見ることで PP の劣化具合を確認することができる（図 3.3-3-3）。

熱加速劣化試験

上記の目視による劣化程度の差異の判定ではタルクの含有量に準じた結果が示された。ここでも、タルクの含有量に準じ、タルク含有量が少ないほど劣化進む知見が得られた。

UV 加速劣化試験

純 PP と純 PP_無洗、TM_PP1 と TM_PP1_一軸押出機をそれぞれ比較すると夾雑物（ゴムや土砂等）を含む再生プラスチックで劣化が進んでいることが IR スペクトルから（図 3.3.3-4）も確認できる。再生プラスチック作製における夾雑物除去の重要性が再度確認された。

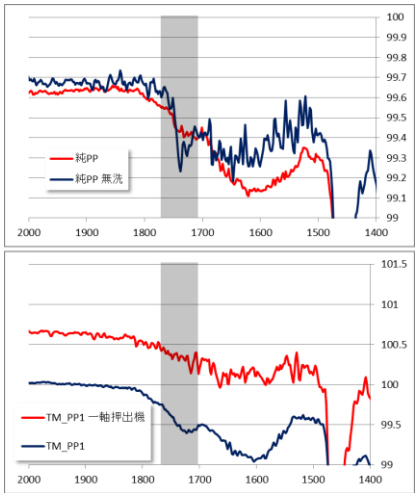


図 3.3.3-4　夾雑物と劣化

3.4. 環境負荷低減効果の検証

3.4.1. 評価モデル

（1） 評価対象の概要：CO2 排出削減効果の評価対象とするプロセス等

代表的な機械選別による再資源化施設では、ASR に対して図 3.4.1-1 に示すような選別処理を行い、金属類のみを回収して、残りのプラスチックを含む残渣はセメント製造の助燃剤燃料としてサーマルリサイクル処理を行っている。

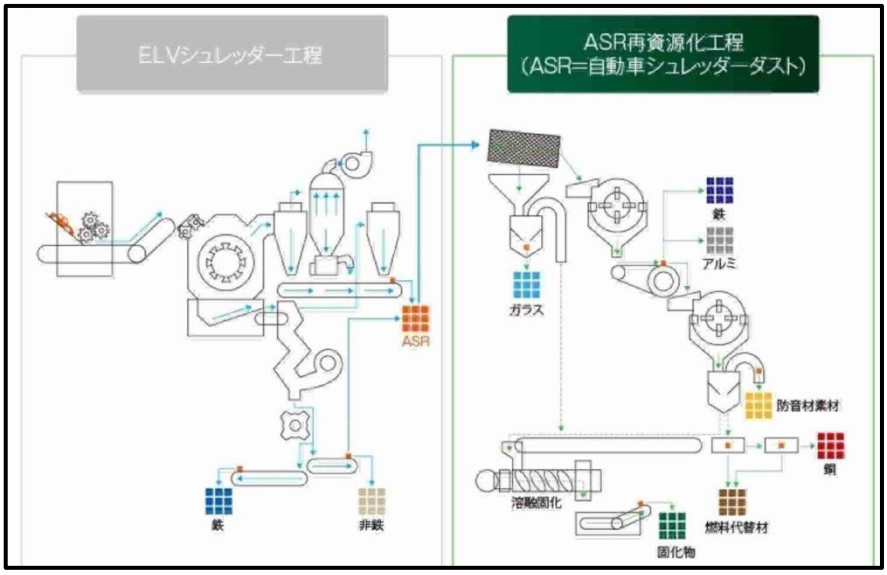


図 3.4.1-1 再資源化施設処理工程例（出典；豊田メタル HP）

本実証事業では、この金属類回収後の残渣からプラスチック材料リサイクルを行う。そこで、評価対象を「ASR 再資源化施設からの入荷原料」とし、「3. 実施結果」に記述した再資源化施設において「すべて機械選別により処理された」もので、表 3.4.1-1 に示すような「硬質プラスチック 70 %」成分組成での CO2 排出量削減効果を求めた。

表 3.4.1-1 ASR 再資源化施設からの入荷原料成分組成

成分	含量（%）
硬質プラスチック	70
ゴム・スポンジ	13.1
木屑	1.2
その他（ガラス・金属・被覆など）	15.7

（2）　ベースライン

従来の再資源化処理施設での選別処理工程により得られる選別品と残渣物の処理内容をまとめたフローが図 3.4-2 である。本実証事業は、セメント製造施設の原燃料として取り扱われていた残渣物の中から、新たにプラスチックを選別回収してマテリアルリサイクルを行うことによる CO2 排出量削減効果を把握する目的で行っている。したがって、評価のベースラインは、図 3.4.1-2 の朱記部とする。

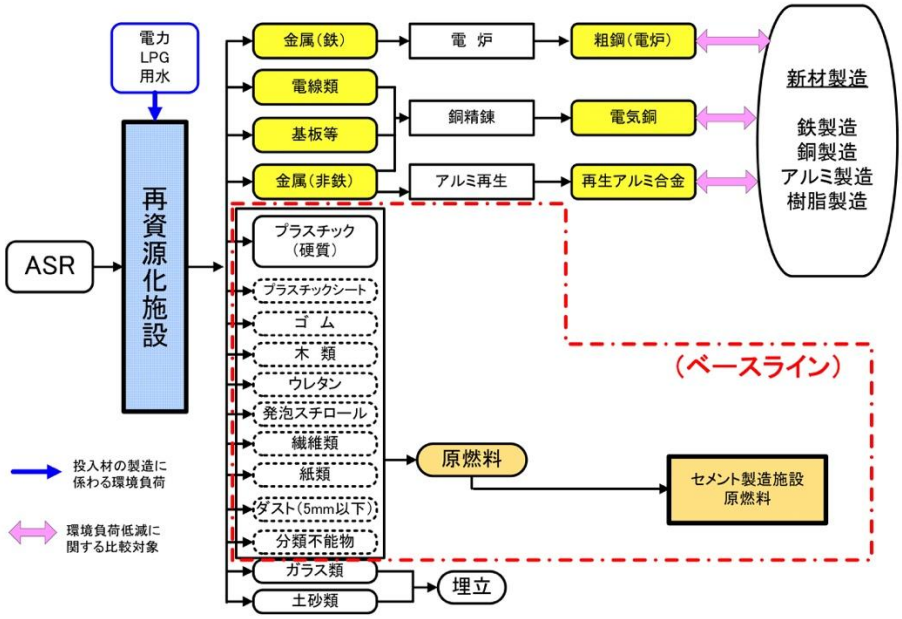


図 3.4.1-2　再資源化施設の選別品と比較対象の範囲（ベースライン）

（3）　評価範囲（バウンダリ）

本実証事業では、ASR に含まれる硬質プラスチックを選別回収して、材料リサイクルを行う。そのためにベースライン範囲内がどのように変わるかの概要を図 3.4.1-3 に示す。この朱記部の評価範囲(バウンダリ)で CO2 排出量削減量を評価した。硬質プラスチックを 70 %含む「ASR 再資源化施設からの入荷原料」を対象物として、図中の樹脂再生施設において本実証事業を実施し、再生樹脂原料を後段の樹脂製造、すなわちコンパウンド事業者に供給する。コンパウンド事業者は、通常の工程により再生樹脂ペレットを製造するものとした。評価範囲は、プラスチック成形加工の原料となる再生樹脂ペレット製造と硬質プラスチック選別回収操作の残渣をセメント製造施設において原燃料処理するまでとした。

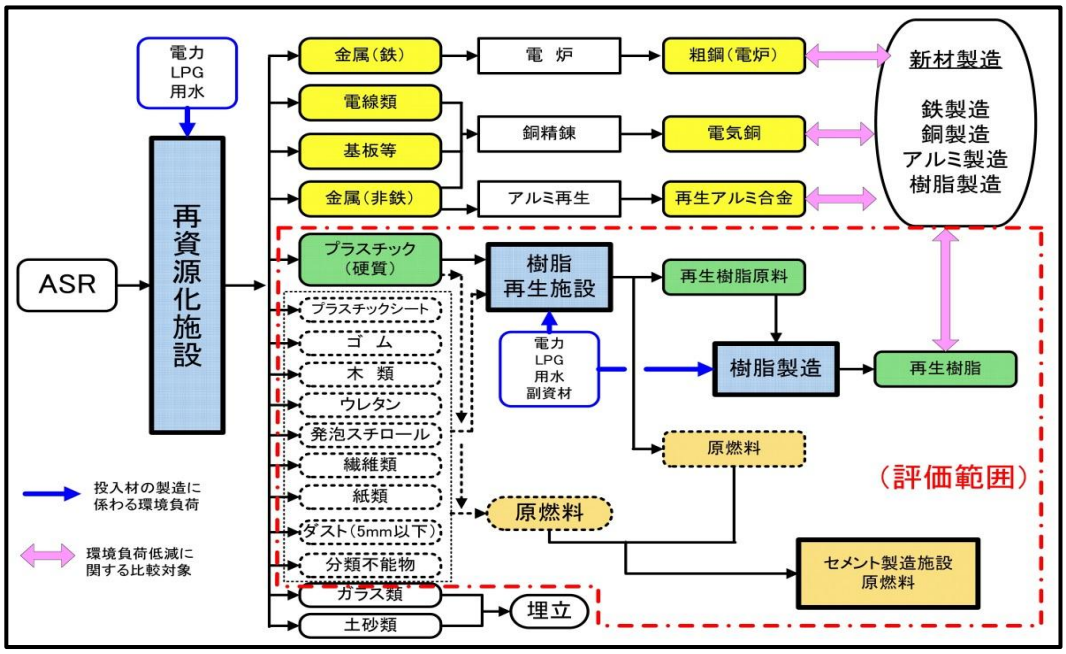


図 3.4.1-3　評価範囲におけるプラスチック材料リサイクルの概要

3.4.2. 評価

（1）　評価対象物の機能単位：ASR 再資源化施設からの入荷原料 1 トン

表 3.4.1-1 に示す組成の「ASR 再資源化施設からの入荷原料」1 トンを評価対象物の機能単位として、図 3.4.1-2 のベースラインの範囲に関する処理に伴う CO2 排出量が、図 3.4.1-3 に示す処理に変更することでの削減量を評価する。

（2）　排出原単位

排出原単位には、以下の出典を使用した。

1)　選別回収での電気負荷に対する環境負荷原単位：

電気事業者別排出係数（H27 年度実績）

2)　選別回収での工業用水に関する環境負荷原単位：

産業連関分析法による LCA 原単位（95 年版）

3)　選別回収での水質管理資材に関する環境負荷原単位：

産業連関分析法による LCA 原単位（95 年版）

4)　コンパウンド業者における再生樹脂製造に関わる環境負荷原単位：

全日本プラスチックリサイクル工業会 CFP ﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽ(登録番号:CR-EF01-15002)

5)　樹脂製造業者におけるバージン材製造に関わる環境負荷原単位：

一般社団法人プラスチック循環利用協会「石油化学製品の LCI データ調査報告書」

（2009 年 3 月）

6) セメント製造原燃料に関わる環境負荷原単位：

算定報告公表制度「別表４廃棄物等の焼却および原燃料としての使用」

ごみ固形燃料（RDF）CO2 排出原単位

（３） 投入エネルギー評価

選別回収に伴う投入エネルギーによる CO2 排出量として以下の項目を算入した。その算出結果を表 3.4-3 にまとめる。CO2 排出量は、通常（ASR 由来ではないという意味で）の再生 PP ペレット製造 104.8 kg に比べ、選別回収のために 82.2 kg 増加し、187.0 kg となった。

1) 選別プラント電気負荷に対する CO2 排出量：

0.587(kg・CO2/kWh)×277.3(kW) / 2(t/h)=81.4(kg・CO2 / t)

選別プラントの電気負荷容量は、表 3.4.2-1 とし、処理能力は２ｔ / h とする。

表 3.4.2-1 選別システム機器の電力負荷リスト

No.	機器名称	数量	定格容量 [kW]
1	定量切出し機	1基	1.5
2	振動篩機	2基	3.2
3	磁力選別機	1基	3.9
4	木くず・ゴム除去装置	4基	8.0
5	粉砕機	２基	37.0
6	風力選別機	1基	13.6
7	水比重選別機（含脱水機）	1基	35.0
8	重比重選別機(含脱水機)	1基	60.0
9	ラマン識別機	4基	11.8
10	コンプレッサ	一式	37.0
11	集塵機	1基	15.0
12	コンベア搬送系	一式	11.8
13	エア搬送系	一式	39.5
		（合計）	277.3

2) コンパウンド業者における再生樹脂製造に関わる CO2 排出量：

240(kg・CO2 / kg)

3) 樹脂製造業者におけるバージン材製造に関わる CO2 排出量：

1.483(g・CO2 / g)

4)　セメント製造原燃料に関わる CO2 排出量：

0.775(g・CO2 / g)

5)　工業用水に関する CO2 排出量：

0.0726 (kg・CO2 / m^3) ×25(m^3) / 300(t)=0.0061(kg・CO2)

処理対象 ASR300 トンごとに水比重選別装置の水全量 25m^3 を交換

6)　水質管理資材に関する CO2 排出量：

(塩鉄：pH 調整剤)1.117(g・CO2 / g)×625(g)=0.6981(kg・CO2) (625g：実績)

(消石灰：pH 調整剤)0.172(g・CO2 / g)×500(g)=0.0860(kg・CO2) (500g：実績)

表 3.4.2-2　プラスチックリサイクルにおける投入エネルギー

	樹脂再生事業者				樹脂製造事業者		合計
	処理施設（処理能力：2t/hr）				製造施設		
リサイクルへの	回収処理装置	工業用水	水質管理資材		CFP登録データ（*1）		
エネルギー投入	電気負荷：277.3kw	25m^3/300t	塩鉄	消石灰	ﾘｻｲｸﾙPP1kg製造当たり		
環境負荷	587	72.6	1.117	0.172	240		
原単位	g・CO2/kwh(*2)	g・CO2/m3(*3)	g・CO2/g(*4)	g・CO2/g(*4)	g・CO2/1kg		
ASR再資源化施設からの入荷原料１トン当り	81.4	0.0061	0.70	0.086	104.8		187.0
排出CO2量（kg）						(*5)	

(*1)全日本プラスチックリサイクル工業会の会員企業からの提供データ（登録番号：CR-EF01-15002）

(*2)電気負荷に対する環境負荷原単位：電気事業者ベル排出係数（H27年度実績）を適用して次式による。

0.587(kg・CO2/kwh)×277.3(kw)/2(t/h) ＝81.4(kg・CO2)

(*3) 工業用水に関する環境負荷原単位：産業連関分析法によるLCA原単位（95年版）を適用して、次式による。

0.0726 (kg・CO2/m3)×25(m3)/300(t)=0.0061(kg・CO2)

処理対象入荷原料 300トン毎に水比重選別装置の水全量25m3を交換することを仮定した。

(*4)水質管理資材に関する環境負荷原単位：産業連関分析法によるLCA原単位（95年版）を適用して、次式による。

（塩鉄：ph調整剤）1.117(g・CO2/g)×625(g)=0.6981(kg・CO2)（625gは使用実績データによる）

（消石灰：ph調整剤）0.172(g・CO2/g)×500(g)=0.0860(kg・CO2)（500gは使用実績データによる）

(*5)回収プラスチック 436.6kgのリサイクルPPペレット製造に必要な投入エネルギー

（４）　CO2 排出量削減効果

選別回収の対象となったプラスチックの典型的な成分分布のうち材料リサイクル可能なプラスチックはグレードＡーＤまでとした。ASR 1 トンから見たマテリアルバランスを図 3.4.2-1 に示す。これまでの調査（平成 22 年度環境省請負業務結果報告書「自動車破砕残さにおける性状把握調査業務」等）から知られている ASR 中の硬質プラスチック含量 34 %が、再資源化施設により含量が 70 %に高められ、本実証事業の入荷原料となる。本年度実証事業での選別回収操作やラマン識別の性能により、H27 年度実証事業では全く再生利用対象外であったタルクを 30 %以上含む PP（グレード D／PP 高高タルクと標記）も利用可能と評価した。その結果、ASR に含まれる硬質プラスチックの 74 %が材料リサイクルできることになった。

選別回収したプラスチックの性状・物性は、コンパウンド工程で使用可能と判断され、この量をバージンプラスチック製造の代替効果として算入した。また、CO2 削減効果への寄与は小さいものの、タルク含量を区別して回収しているため、コンパウンド工程

で、新しいタルク製造の代替効果も算入することができると考えた。機能単位：ASR 再資源化施設からの入荷原料 1 トンについて、ベースラインおよび評価範囲の各プロセスの CO2 排出量計算結果を表 3.4.2-3 にまとめる。これらに投入エネルギーを加えて評価した CO2 排出量削減効果を図 3.4.2-2 に示す。

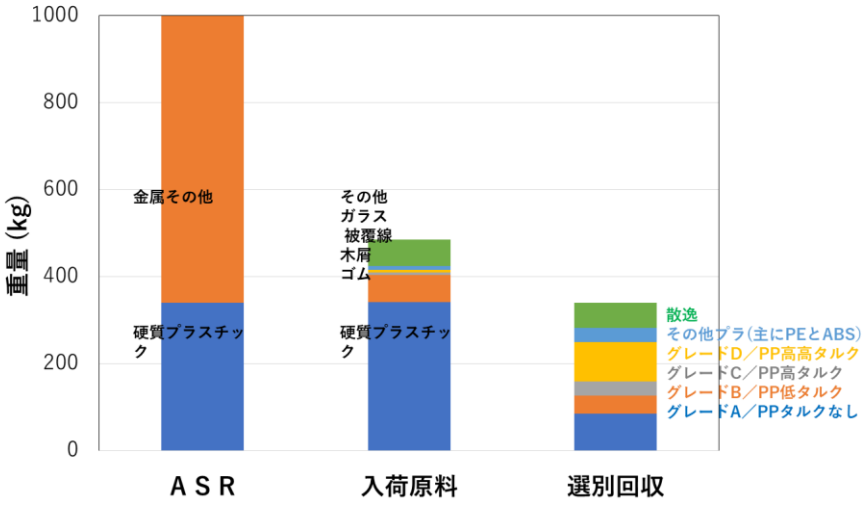


図 3.4.2-1　　評価範囲におけるプラスチック材料リサイクルの概要

表 3.4.2-3　ベースラインおよび評価範囲の CO2 排出量

	ベースライン	評価プロセス			
リサイクル方法	セメント製造 原燃料(*1)	PPバージン製造 代替効果(*2)	タルク製造 代替効果(*3)	セメント製造 原燃料(*4)	合計
ASR再資源化施設からの 入荷原料（kg）	1,000	436.6	78.0	485.4	1,000
環境負荷 原単位（g・CO2/g）	0.775	-1.483	-0.033	0.775	
CO2排出量（kg）	775.0	-647.5	-2.6	376.2	-273.9

(*1)セメント製造原燃料に関しては「算定報告公表制度/別表４廃棄物等の焼却及び原燃料としての使用」
ごみ固形燃料（RDF）CO2排出原単位より
(*2)製造原単位；一般社団法人プラスチック循環利用協会：石油化学製品のLCIデータ調査報告書
（2009年3月）による
(*3)製造原単位；一般社団法人産業環境管理協会CFPプログラム：CO2換算量共通原単位データベースB-JP304010
(*4)回収プラスチック以外のその他のASR中の物質全て（散逸分を含む）。

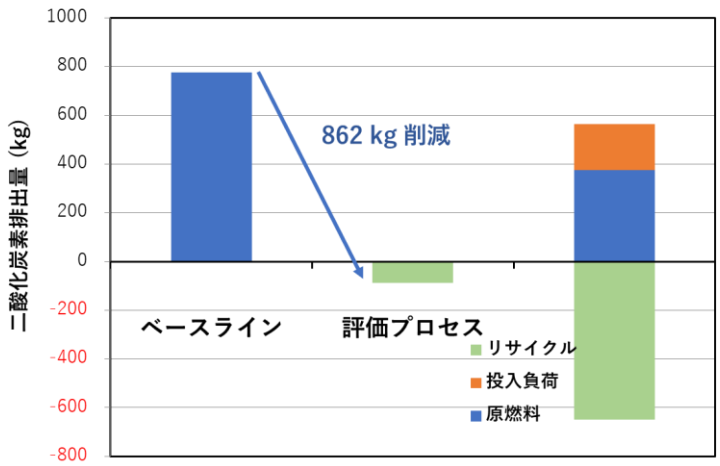


図 3.4.2-2　CO2 排出量削減効果

評価範囲（バウンダリ）における機能単位である ASR 再資源化施設からの入荷原料 1 トンあたりの CO2 排出量は、代替効果すなわちリサイクルによる削減分 − 650.1 kg に残渣の原燃料化分 376.2 kg と選別回収・ペレット化に投入したエネルギー分 187.0 kg を加えて、− 86.9 kg と評価した。評価範囲での機能単位における CO2 排出量がすでにマイナスとなった。ベースラインであるセメント製造原燃料化 775.0 kg に対して CO2 排出量 862 = (775 − (−86.9)) kg の非常に大きな削減効果があると算出された。石油等の枯渇性資源由来の有機化合物であるプラスチックでは、材料リサイクルすることによるバージン製造代替効果が非常に大きく、選別回収とペレット化に投入されるエネルギーを大きく上回ることが明らかになった。

3.5. 事業の実現・横展開可能性評価

3.5.1. 検討対象施設と稼働条件

前章までの個別の実証事業結果を踏まえ、それぞれ処理工程から全体工程を図3.5.1-1のように想定する。入り口である再生プラ原料の土砂汚れなど落とし綺麗にする前洗浄、再生プラ原料サイズをそろえる粉砕、粒度がそろった所で夾雑物除去（ゴム、木屑）を行う。さらに再生プラ原料の水比重選別を行い、水浮きと水沈降プラスチックに分け、水浮きプラスチックはラマンソータにてグレードＡとグレードＢになる。水沈降プラスチックは重液比重選別を行い、重液浮きと重液沈降物に分け、重液浮きプラスチックはラマンソータにてグレードＣとグレードＤになる。重液沈降物は金属・配線とプラスチックを分けて、金属はミックス金属で出荷し、プラスチックは助燃材としてセメント工場へ出荷する。重液沈降物を分ける工程はジグ選別装置などが有効である

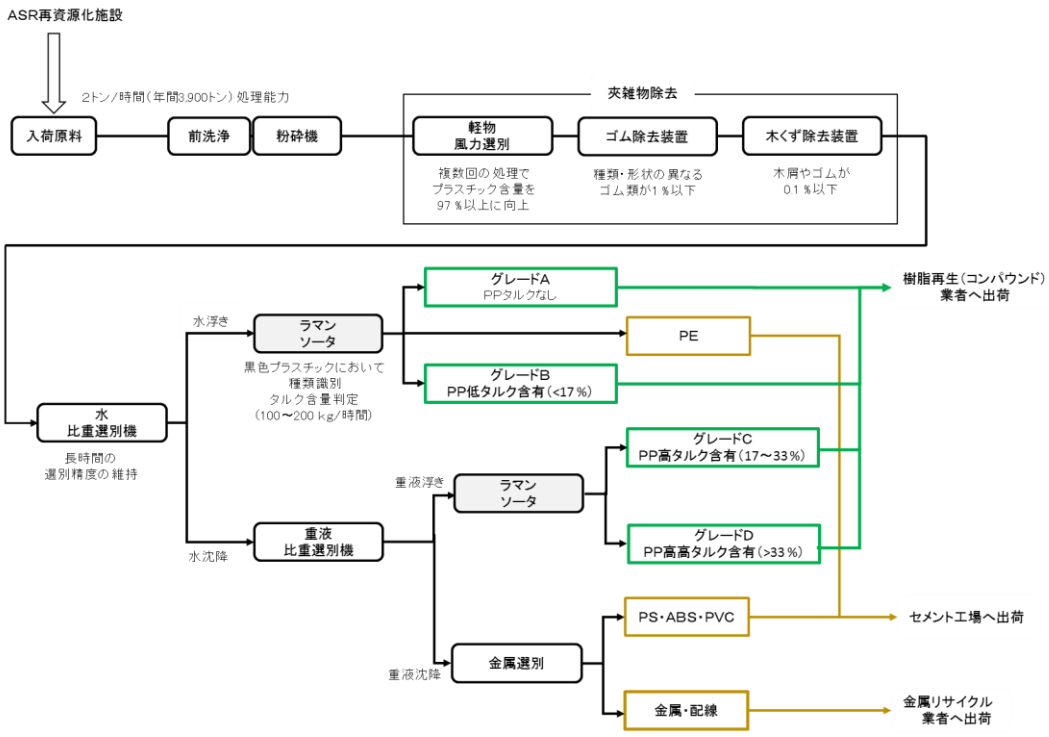


図 3.5.1-1　想定樹脂再生施設

設備装置内訳と価格

表 3.5.1-1 の設備装置内訳は下表の通りである

表 3.5.1-1　設備装置内訳

番号	系統名称	機器名称	数量	コストデータ（千円）
①	コンベア搬送系	供給ホッパー・切出しコンベア	一式	15,000
		切出し～粉砕機～ゴム取機乗継コンベア等		
		手選別コンベア架台等		
		中間貯留ホッパー・定量供給機		
②	エア搬送系	ダクト配管・支持装置・プレートファン	一式	15,000
		貯留ホッパー		
		フレコン詰め装置（含計量器）		
③	選別系	振動篩選別機	一式	100,000
		磁力選別機		
		風力選別機		
		粉砕機　２種類		
		ゴム選別機		
		木屑選別機		
④	比重選別系	水比重選別機	一式	60,000
		重液比重選別機		
		循環ポンプ・重液タンク・脱水機		
⑤	水処理系	凝集沈殿層・汚泥ポンプ	一式	25,000
		フィルタープレス		
⑥	ラマン識別・分別系	ラマン識別・分別ユニット(9 ライン)	一式	100,000
		電気・制御設備		
⑦	補助系	集塵系装置	一式	15,000
		圧縮空気供給系装置		
⑧	電気設備	受変電設備・動力盤	一式	50,000
		制御盤		
			総合計	**380,000**

3.5.2. プラスチック回収量・売り上げの検討

前章までのマテリアルバランスから事業収入は表 3.5.2-1 のように想定される

表 3.5.2-1　プラスチックの回収量と売り上げ

	割合	重量：トン	単価：Ｋｇ	金額：千円
再資源化施設ASR受入量（ﾄﾝ/年）		30,000		
樹脂加工事業者ASR受入量（ﾄﾝ/年）		10,168		
プラスチック回収量(歩留７４％)	0.74	7,525		
グレード　A(割合25%) @50¥/kg	0.25	1,881	50	94,058
グレード　B(割合12%) @４５¥/kg	0.12	903	45	40,633
グレード　C(割合10%) @３５¥/kg	0.1	752	35	26,336
グレード　D(割合27%) @３５¥/kg	0.27	2,032	35	71,108
合計		5,568		232,135

3.5.3. 損益評価

これまでの経費と収入に関する積算を踏まえて、収支分析（表 3.5.3-1、表 3.5.3-2）を行った。再生プラの売却単価は相場であり時期により上下する、ここでは単価を２種類想定して、それぞれの収支の分析を行った。両ケースとも十分に採算性が取れたシステムになっている（図 3.5.3-1）。

表 3.5.3-1　売り上げ額と経費一覧（１）

設備投資：３億８０00万円、高品位プラ：50円/kg
（プラ年間処理量１０，０００ﾄﾝ）

	初年度	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目
売上	232,135	232,135	232,129	232,126	232,123	232,120
人件費	56,000	56,000	56,000	56,000	56,000	56,000
動力費	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000
仕入費	7,796	7,796	7,796	7,796	7,796	7,796
処分費	10,168	10,168	10,168	10,168	10,168	10,168
設備メンテ費	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000
間材費	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000
原価償却	108,680	77,597	55,404	39,558	32,985	32,985
（支出計）	230,644	199,561	177,368	161,522	154,949	154,949
収支	1,491	32,574	54,761	70,604	77,174	77,171

表 3.5.3-2　売り上げ額と経費一覧（２）

設備投資：３億８０00万円、高品位プラ：80円/kg
（プラ年間処理量１０，０００ﾄﾝ）

	初年度	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目
売上	343,876	343,876	343,876	343,876	343,876	343,876
人件費	56,000	56,000	56,000	56,000	56,000	56,000
動力費	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000
仕入費	7,796	7,796	7,796	7,796	7,796	7,796
処分費	10,168	10,168	10,168	10,168	10,168	10,168
設備メンテ費	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000
間材費	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000
原価償却	108,680	77,597	55,404	39,558	32,985	32,985
（支出計）	230,644	199,561	177,368	161,522	154,949	154,949
収支	113,232	144,315	166,508	182,354	188,927	188,927

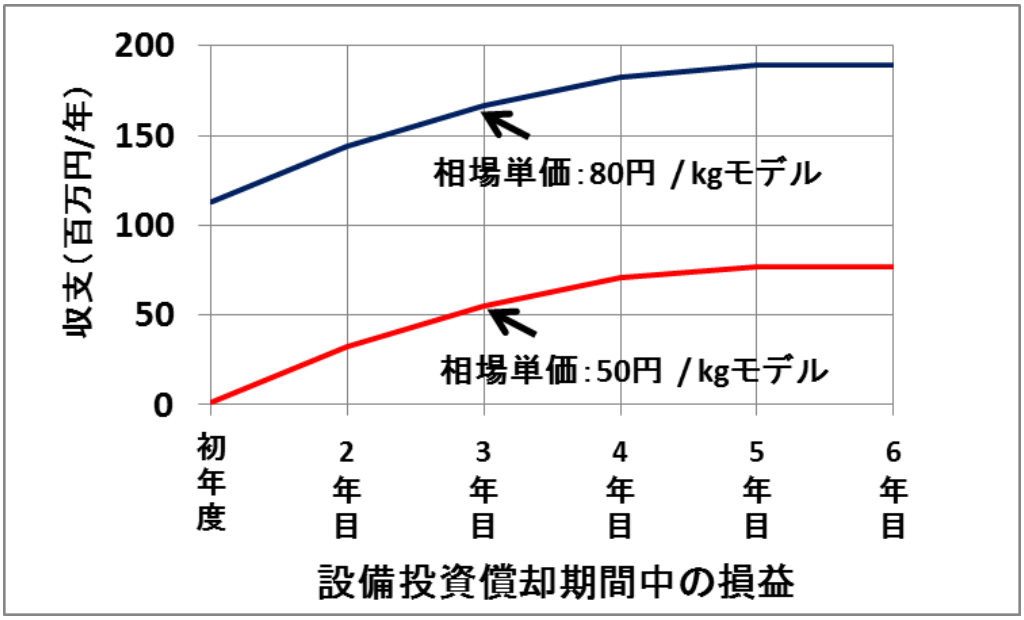


図 3.5.3-1　２種類の単価を想定した６年間の収支

国内ASR発生量 約60万トン／年について､プラスチック含有率が約30％とすれば、ASR中のプラスチック含有量は約18万トン／年となる。このうち1万トン／年・施設で処理するモデルを想定すると、その売り上げは、高グレードプラスチックが市場相場単価50円/kgで売却できた場合、年間売り上げは232,135千円／年となる。また減価償却費を含めた経費は230,644千円となり（設備投資3.8億／施設で（洗浄粉砕水選別・夾雑物除去等ラインおよびラマンソータ9ライン含む））、初年度から営業利益確保は可能であるとの結果を得た。したがって、収益性のある事業モデルとして、例えば全国18ヶ所で展開できれば、全国レベルでCar-to-Carリサイクルを実現することができる。

4. まとめ

4.1. 本実証事業の成果

本実証事業は、平成 27 年度低炭素型３Ｒ技術・システム実証事業「ASR から材料リサイクルを図る仕組みづくり」に引き続き、「ＡＳＲプラスチックの材料リサイクル深化技術の実証」として実施したものである。ASR 再資源化施設から、主に金属類を回収して残るいわゆる燃料代替材を対象に、その中の硬質プラスチックを選別回収して再生樹脂として使用することで生じる環境負荷低減効果を実証的に見積もることを目的とした。

平成 27 年度年度実証事業の成果に基づき、本年度は、夾雑物除去のレベルアップ、材料リサイクルの量拡大を目指した選別回収技術の検証、材料リサイクルをより実現性あるものにするための品質管理手法の確立を行った。

これまでの ASR 由来プラスチックの材料リサイクルでは、量的に豊富な PP をターゲットにひとまとめに回収しているため、選別品質や物性品質に限界があり、高付加価値化が図りにくいという状況である。そこで、本実証事業では、強度や成形性向上のために自動車プラスチック部品に非常に多く使われている添加剤タルクに注目し、その含有量を以下の４つに区別して選別回収するスキームを構築することで、より付加価値の高いマテリアルリサイクルビジネスが可能であり、環境負荷低減効果の向上が図られるとの仮説に立った実証を行った。

グレードＡ（タルク無含有）・グレードＢ（低タルク　0ー17 %含有）

グレードＣ（高タルク　17ー30 %含有）・グレードＤ（高高タルク 30 %以上含有）

実証事業の成果を以下にまとめ、図 4.1-1 に今回の成果により想定される ASR 由来プラスチックを材料リサイクルするための選別回収のスキームを、図 4.1-2 に ASR 由来プラスチックが選別回収品になるまでの含量変化をまとめた。図中の円グラフは処理の各段階での、ASR 中のプラスチックの含量や成分を示している。

夾雑物除去のレベルアップ

（１） 本年度ターゲットとした再資源化施設からの入荷原料のプラスチック含量を明確にした。再資源化施設との連携により安定な組成分布での供給が達成できた。

（２） 一連の選別回収操作（（風力選別・回転式ゴム除去・水比重選別））やゴム除去装置、木屑除去装置といった複数の夾雑物除去処理を行うことで、全行程を通してのプラスチック回収率は80 %以上（散逸は20 %以下）となることを実証した。

材料リサイクルを深化する技術の実証

（３） ASR由来プラスチックは泥や油による汚れがひどく、水の汚れによる水比重選別の精度低下が懸念される。そこで、水質と比重選別精度の関係を明らかにした。浮遊物質（SS）による汚濁は比重選別精度にほとんど影響を与えず、SSが倍増しても97 %以上の精度を保った。一方で、表面の小さな凹凸やそこに入った油汚れが精度を劣化させることが明らかになった

（４） タルク含量を区別した選別回収にはラマン散乱などの光学識別を適用しなければならない。測定時間、ベルトコンベアスピード、プラスチック片サイズなどを最適化し、事業スケール処理量（100ー200 kg/h）での選別回収を実証した。PP中に混入するPE（ポリエチレン）の識別や数 %水準でのタルク含量の識別ができることを実証した。さらにこの成果により、これまで重液比重でも選別できずに廃棄されていたタルクを30 %以上含むPPも選別回収できることが分かった。

（５） ASR由来プラスチックはその素性から表面劣化が著しい。この劣化部分を除去する研磨方法につき検討した。しかし、現状では、適切な研磨方法を見出せなかった。

回収プラスチックの品質管理手法の確立

（６） 各種選別方法で回収したPPをペレット化・成型した。

（７） 回収されたPPは、自動車部品への利用をターゲットとした再生樹脂製造に使える純度や物性を持っていた。

環境負荷低減効果の検証

（８） 精度の高いCO2排出量削減効果を見積もった。現状のセメント製造原燃料化に比べ、ASR再資源化施設からの入荷原料１トン（硬質プラスチックを700 kg含む）あたり、862 kg のCO2削減効果があることが明らかになった。

事業の実現・横展開可能性評価

（９） 本実証事業を事業化するための設備投資額を見積もり、処理量や回収プラスチック販売単価をベースにバランスシート評価を行った。再生樹脂市場がかつてのように高価格で推移すれば、３年目には単年度黒字化も可能であることを示した。しかし、現在は低価格で推移しており、事業実現性を高め、参入企業を増やし、自動車リサイクル法の中でASR由来プラスチックの有効利用を図るよう横展開するためには、地球環境問題に対する意識を高く持った各ステージのプレーヤの強い連携が必要と考える。

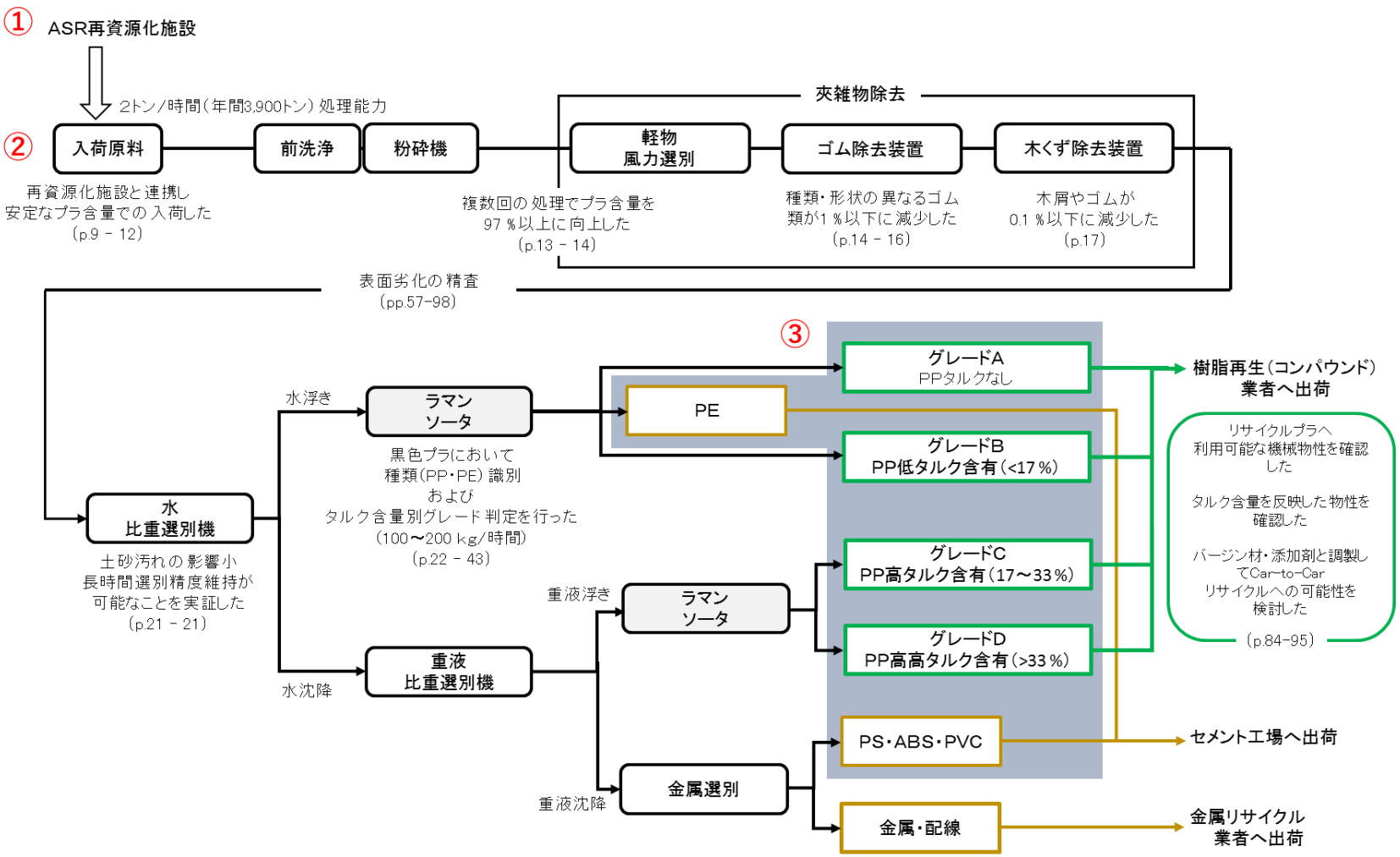


図 4.1-3　ASR 由来プラスチックを材料リサイクルするための選別回収スキーム

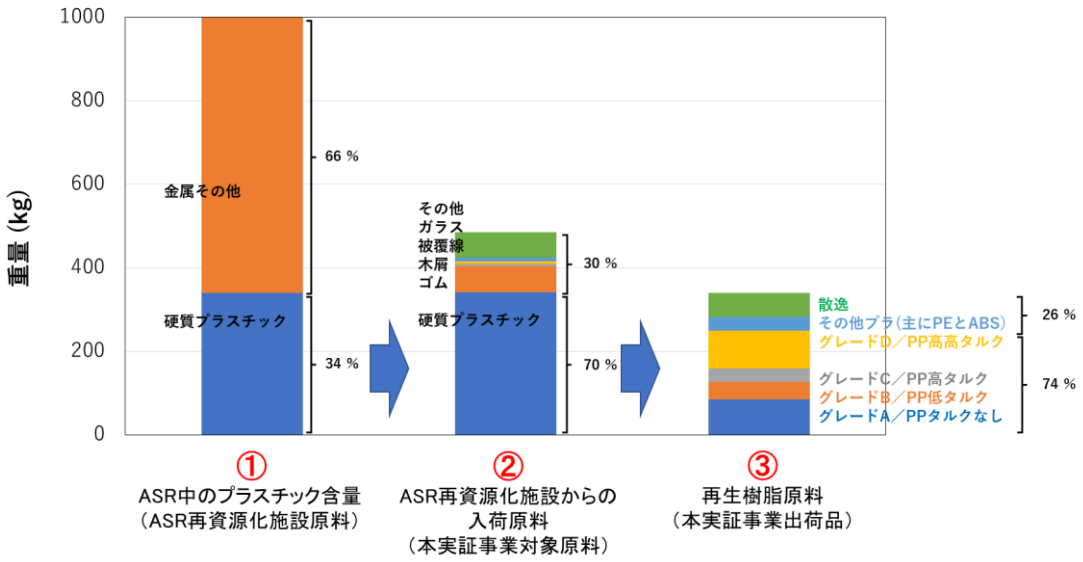


図 4.1-4　本実証事業での ASR 由来プラスチックが選別回収品になるまでの組成変化

4.2. 今後の課題

本実証事業で明らかになった課題を整理し、現状で考えられる解決に向けた方策を示す。

（1）　選別回収システム全体の最適化

本事業では、夾雑物除去や比重選別技術の高度化、ラマン散乱によるグレード別識別など材料リサイクル深化のための要素技術を実証した。今後は、夾雑物除去技術の組み合わせの最適化、実証スケール（水比重選別装置の 2t/h をベースとして）でコスト面まで含む台数の配置の最適化、光学識別で吹き落とし精度まで含めた選別回収の実証などを進め、実現可能性のある選別回収システム全体の設計を行う必要がある。

（2）　表面研磨方法の研究開発

今回提案した夾雑物除去技術をより高度化して回収プラスチックの純度を向上させることはもちろんであるが、物性試験、特に、劣化特性で示されたよう一般的な選別技術では除去できない非常に小さな異物の除去は今後の材料リサイクルの深化において大きな課題であると考える。当面の解決策は、土砂や油による汚れ、微細な金属粉の混入、高分子特性の低下といった表面に集中している広い意味での劣化部分を除去する方法を見出すことと考える。本実証事業でも複数の研磨装置を試用

したが、満足いく結果は得られていない。装置開発も含めて取り組むことが必要であろう。

（３） Car-to-Car を目指したグレード別物性改善法の研究

グレード別に選別回収する技術は本実証事業で提示することができたが、各グレードに応じた物性改善法を系統的かつ網羅的に示すには至っていない。それぞれのグレードに応じた利用先があってこそ利用拡大が図れると考える。今後は、プラスチック回収事業者と再生樹脂製造事業者が連携して適切かつ妥当な物性値を持った自動車部品向けリサイクルプラスチックを創り出していくことが求められる。