2018 年度　自動車リサイクルの高度化等に資する調査・研究・実証等に係る助成事業（ー水流選別活用による樹脂リサイクルの技術開発と設備導入及び普及ー）

報告書

2019 年 3 月 28 日

ハリタ金属株式会社

担当者連絡先
担当者名：寺崎　英樹
部門：取締役ゼネラルマネージャー
電話番号：0766-64-3516
メールアドレス：h-terasaki@harita.co.jp

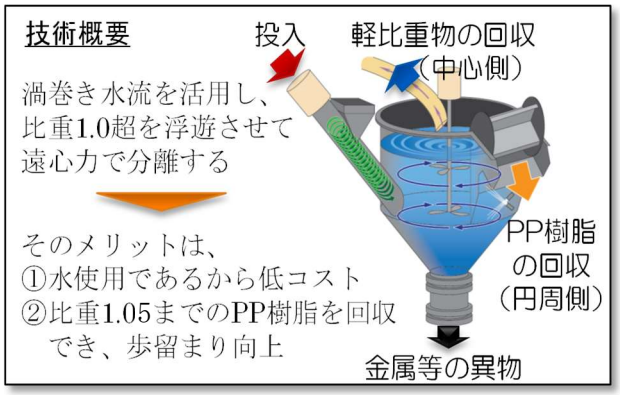
はじめに

（目的）

廃自動車のマテリアルリサイクルを促進して ASR を削減するため、自動車に多く使われる PP 樹脂を低コストで歩留りよく回収できる選別技術を普及させることを目的として、渦巻き水流を活用した水流選別装置を使って ASR 等から自動車用 PP 再生樹脂を製造できるシステムを確立し、Car to Car リサイクルを実現させる。

（技術概要）

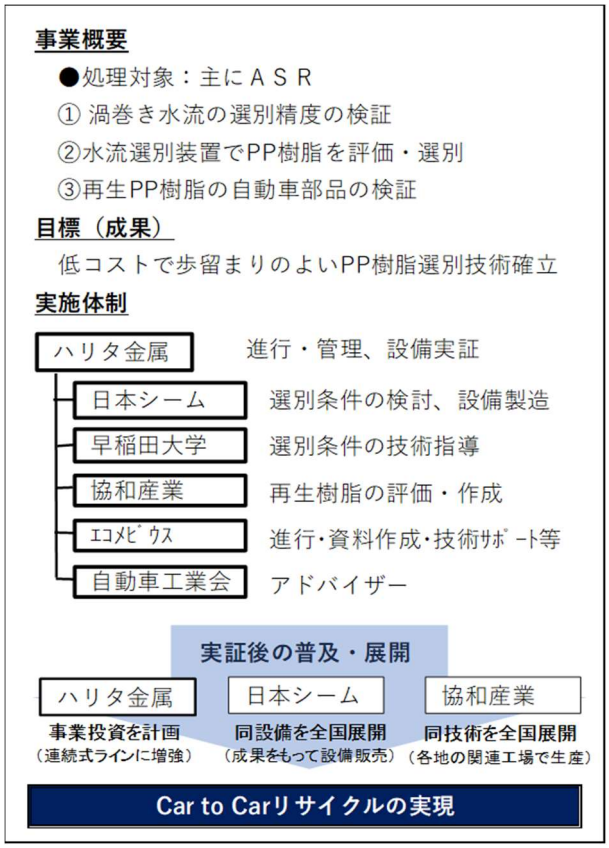
日本シームがもつ水流選別装置「流選なると」は、渦巻き水流による浮力を活用して、水中でありながら比重 1.0 を超える領域の樹脂を選別することを可能とする。水のみを使うために低コストで、比重 1.05 までの PP 樹脂を回収できるため、歩留まり向上が期待できる。



（事業概要）

実証事業では、主に ASR から①渦巻き水流の選別に最適な水流の形や速度・向き等を検証し水流比重選別の精度を向上、②上記条件で最適化された水流選別装置で PP 樹脂を選別・回収し、③選別・回収された PP 樹脂を使い自動車部品の物性に合わせた再生 PP 樹脂をコンパウンド（配合）生産し、自動車メーカーにて検証する。

次年度以降には、水流選別装置のさらなる効率向上を目指すとともに、再生素材の物性向上等を試みることで、採算性の高い事業モデルを構築し、普及のための量産機の検討を行う。



（実施体制）

各種リサイクル事業で豊富な実績を有するハリタ金属が実証設備の導入から実証、事業性評価を行う。また、シミュレーション活用による水流選別のメカニズム解明は早稲田大学、水流選別機の実用化は日本シーム、再生樹脂の分析・コンパウンドは協和産業が担当し、それぞれ連携して事業を進める。

また、事業全体の進捗管理や会議資料・報告書等の作成はエコメビウスが担当し、代表事業者であるハリタ金属を支援する。

（実証後の普及展開）

実証の成果を踏まえ、ハリタ金属は次年度以降に事業化ラインに投資する計画で、日本シームは本技術を他のリサイクル業者に営業展開し、Car to Car リサイクルの実現を目指す。

目 次

1. 助成事業の計画 3

1.1. 本事業を実施するに至った背景 3

1.2. 事業の実施内容 3

1.2.1. 事業計画概要 3

1.2.2. 事業の実施体制 5

1.2.3. 事業の実施スケジュール（2018 年度） 5

2. 助成事業の報告 7

2.1. 助成事業の実施結果 7

2.1.1. 流系シミュレーションによる最適な水流選別装置の検討 7

2.1.2. 循環型水流選別装置中の粒子挙動に関する基礎的検討 17

2.1.3. 最適な装置形状の検討 20

2.1.4. 試験設備による選別能力の評価 23

2.1.5. 回収製品の物性評価 29

2.1.6. ASR 中の臭素分析 31

2.2. 導入設備内容及び稼働結果 33

2.2.1. 試験原料供給設備の導入 33

2.2.2. 水流選別装置の導入と改良 35

2.3. 実施結果を踏まえた考察 36

3. 今後の実証事業実施における課題及び解決方法等 38

3.1. 現状の課題 38

3.2. 課題の解決方法 39

3.3. 次年度以降の助成事業展開 40

3.3.1. 想定する事業の内容 40

3.3.2. 設備導入内容 41

3.3.3. 事業の実施体制 41

3.3.4. 事業スケジュール（工程表を含む） 42

3.3.5. 資金計画 42

4. 事業化の計画 43

5. 事業の評価 44

5.1. ASR からの樹脂回収可能量 44

5.2. 有効性の評価 46

1. 助成事業の計画

1.1. 本事業を実施するに至った背景

日本では2005年に自動車リサイクル法が施行されて以来、解体から破砕処理、自動車シュレッダーダスト（ASR：Automobile Shredder Residue）の処理工程において、廃棄物適正処理の観点から、最適なリサイクルシステムの確立を進めてきた。一方、ASRは焼却処理を中心に適正処理されているものの、プラスチックを始め多くのマテリアルリサイクルが可能な素材が含まれている。

自動車に用いられるプラスチックについては、バンパー等に用いられるポリプロピレン（PP:Polypropylene)樹脂が一部でマテリアルリサイクルされているケースがあるものの、大きなコスト課題を抱えており、収益性のある事業として持続困難なのが現状である。

過去の環境省の低炭素型3R技術システム実証事業では、平成27年度の「動静脈の連携による自動車樹脂部品リサイクルスキームの構築」において、取り外したバンパー等を車体プレスと同時に積載・運搬して積載効率を上げる“ついで便”を利用した物流システムを実証した。また、平成28年度の「使用済自動車由来PP部品の効率的な再生材生産プロセスの検証」では、ASR由来のPP樹脂から製造した再生素材に対する自動車メーカーによる評価を行い、事業性のあるPP樹脂のリサイクル実現が現実味を帯びてきている。

一方、PP 樹脂のリサイクルシステムを構築するにはさらなる収益性の改善が不可欠であり、過去の実証事業では選別工程における効率向上や処理コストの低減が課題とされた。ASRからPP樹脂を回収する場合には、水を使用した比重選別（浮沈選別）が用いられることが多いが、この方式ではタルクを含む水より重い（比重1.00を超える）PP樹脂の回収が出来ず、効率が低下することも一因とされる。そのため、より選別精度が高く、処理コストが安価なPP樹脂回収技術の開発が期待されている。

こうした中、本事業では水流選別方式に着目し、本方式の有効性や事業性を検討することとした。効率的なPP樹脂回収方法が開発されれば、自動車の資源効率性は高まり、廃棄物の減量化にも繋がる高度なリサイクルシステムが構築できる。また、日本のみならず、世界へのシステム展開も期待できると考えられる。

1.2. 事業の実施内容

1.2.1. 事業計画概要

＜事業の目的＞

ASRからの効率的なPP樹脂回収方法の開発によるマテリアルリサイクルの実現

＜PP樹脂の回収方法と目標＞

従来の重液選別装置（湿式比重選別）では、比重調整を目的として塩水や鉄粉等を使用するため選別後の洗浄が必要となる。また、消耗品として一定量のメジウム（調整材）が必要となるため高コストとなる。

一方で、今回開発する新たな水流選別装置では、水のみを媒体として比重1.00を超えた領域に分離点を設定出来るため、選別後の洗浄は不要であり、消耗品となるメジウムも不要なので低コストでPP樹脂の回収が可能となる。この新たな水流選別を活用し、収益性の高いマテリアルリサイクルを実現することを目標とする。

＜詳細＞

本事業では、渦巻き水流を活用した水流選別装置を使って、ASR およびバンパー・内装材から PP 樹脂（比重 1.05 以下）を選別し、自動車用再生樹脂としての適性を評価する（図 1-1 参考）。

検討課題は、①稼働実績のある水流選別装置をベースに、ASR 等の自動車用樹脂の選別に最適な水流の形や速度・向き等を明らかにし比重選別の精度を向上させること、②選別された PP 樹脂を使い自動車部品の仕様に合わせた再生樹脂をコンパウンド生産し、その再生樹脂の物性を評価することである。

発生 ASR の回収を行うため、ハリタ金属に洗浄粉砕機（時間 50kg 程度/10mm 粉砕）を導入し、日本シーム所有の水流選別装置『試験機』（処理能力 50kg/時）で条件の最適化（水流を作る羽の開発や水流および選別対象物のシミュレーション）を行った上で、水流選別装置（ラボ装置・時間 100kg）を導入、同技術により選別された回収物から再生樹脂を作製し、異物混入、物性等を分析し、普及のための量産機の検討を行う。

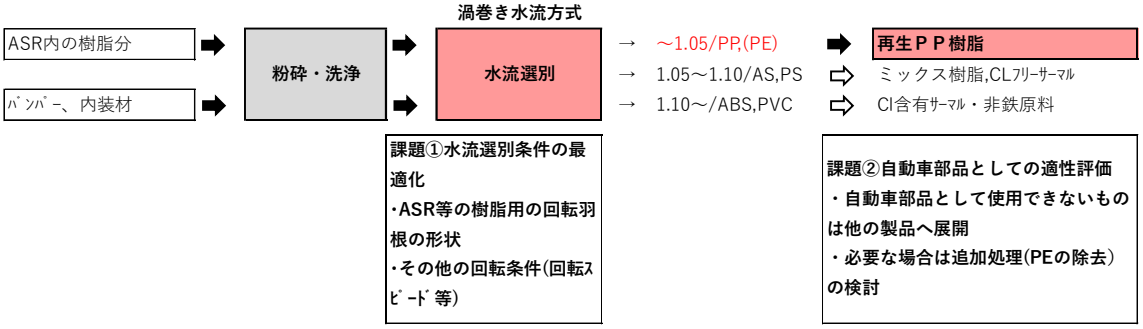


図 1-1　水流選別による選別概要

出所）エコメビウス作成

＜導入設備内容＞

本実証では、ハリタ金属が ASR から PP 樹脂を選別するため日本シーム既設の試験用水流選別装置「なると」に試験原料を供給する設備一式（洗浄粉砕、洗浄脱水）を導入する。各設備の機能および主な仕様を表 1-1 に示す。

なお、日本シームによる選別条件の最適化に関する検討では、日本シームがもつ既存の水流選別装置を活用し、また選別した PP 樹脂からの異物除去（ゴム等）が必要となった場合には、協和産業がもつ既存設備（振動ふるい機、静電分離機等）等を使う。

表 1-1　導入設備の内容

設備名	機能	主な仕様
①洗浄粉砕装置	『洗浄』と『粉砕』を同時に行い、強力な洗浄効果を発揮し、選別・加工工程に適した状態にする。	処理能力：50kg/h(10mm粉砕) サイズ：W815mm×L1,150mm×H1,970mm
②洗浄脱水装置	らせん状に本体を通過させ、強力に洗浄脱水し、残った汚れを落とす。	処理能力：50kg/h、方式：縦型遠心脱水 サイズ：W910mm×L2,425mm×H1,835mm
③水流選別装置	既設装置を基本に、流系シミュレーションの結果を基に最適形状を決定し、試験装置の設計製造を行う。	処理能力　100kg/h 方式：渦水流選別

出所）エコメビウス作成

1.2.2. 事業の実施体制

代表事業者であるハリタ金属が水流選別装置を中心とする実証設備を導入し、PP 樹脂の選別実証を行って事業性を評価する。ハリタ金属は公的な助成事業や実証事業に関わる複数の実績を有しており、本事業の遂行、進捗管理および経理処理等を円滑かつ効率的に行う。また本実証事業は次の 4 社との共同で実施する。体制および役割を図 1-2 に示す。

- フルラインナップ（粉砕、選別、乾燥等）を有する樹脂リサイクル装置のトップメーカーで、渦巻き水流を活用した比重選別装置「流選なると」を実用化した日本シーム
- Car to Car の樹脂リサイクルに関わる実績・樹脂コンパウンド技術をもつ協和産業
- リサイクルや水流選別の技術開発の技術指導を行う早稲田大学理工学術院 所千晴教授
- 自動車リサイクルに関する深い知見と人脈、業務実績をもつエコメビウス（過去 4 年間で、環境省 3R 実証事業 7 件に参画）

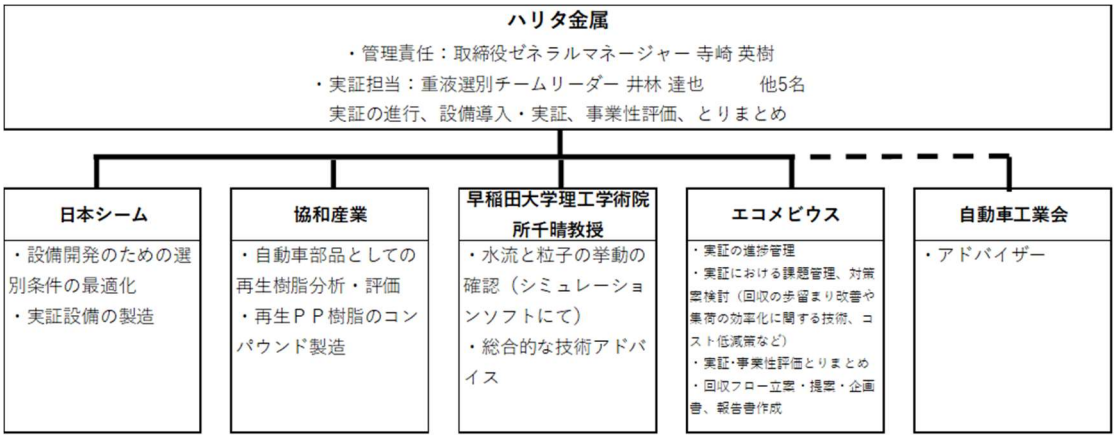


図 1-2　事業体制図

出所）エコメビウス作成

1.2.3. 事業の実施スケジュール（2018 年度）

表 1-2 に 2018 年度の項目別のスケジュールを示す。

2018 年 7 月から、日本シームが ASR およびバンパー・内装材からの PP 樹脂選別を最適化するための条件出しや羽根形状の設計等に関する検討を既存の水流選別装置を使って実施。これと並行して、ハリタ金属に導入する実証設備一式の設計・製造を進めるとともに、2018 年 9 月から回転羽根の設計・製造を開始した。また、試験原料作製用設備（洗浄粉砕装置、洗浄脱水装置）を 2018 年 9 月末までに導入する予定であったが、昨今発生している鋼材等の入荷遅れと合わせて、加工業者の繁忙期と重なったため導入設備の納品までに想定以上の時間を要し、試験原料作製用設備の納品は 2019 年 3 月となった。

そのため、別途 ASR から回収したサンプルを用意し、日本シーム所有のなると試験機で選別試験を実施。なると選別品については協和産業で成分分析と物性試験を行った。さらに、コンパウンド技術を駆使して自動車メーカーの要求規格に合わせた再生 PP 樹脂サンプルを作製し、2019 年 1 月より自動車部品としての適合判断を実施した。

なお、近年使用規制が進んでいる難燃剤「デカブロモジフェニルエーテル（DeBDE）」、「ポ

リ臭化ジフェニルエーテル（PBDEs）」については、比重が重いため今回の水流選別装置によって選別可能であることが推測され、マテリアルリサイクル対象からは除外されると考えられる。一方で、比重選別だけでは除去しきれない場合には、二年目以降に協和産業の保有技術である静電分離方式等の活用を視野に入れて、選別精度の向上および DeBDE 等の忌避物質除去技術の開発に取り組む。

表 1-2　事業推進の項目別のスケジュール（当初予定）

作業項目		4月	5月	6月	7月	8月	9月	備考
水流選別装置開発	流系シミュレーションによる最適装置形状検討							早稲田大学にてシミュレーション
	シミュレーション結果に基づくラボ装置の設計・製造・改良							
サンプル作成設備設置	設計・製造							サンプル必要量設備の設計
	導入							ハリタ金属にて導入
	稼働							
水流選別装置での条件検討	条件および樹脂リサイクルサンプル作成							
	樹脂評価に応じて、試験機の運転条件の見直し							
再生PP樹脂の評価	協和産業で物性分析評価 難燃剤混入評価							
	コンパウンド検討（配合等） 再生ＰＰ樹脂生産							
	サンプル再生PP樹脂の提出 自動車メーカーでの物性検証							

作業項目		10月	11月	12月	1月	2月	3月	備考
水流選別装置開発	流系シミュレーションによる最適装置形状検討							
	シミュレーション結果に基づくラボ装置の設計・製造・改良							
サンプル作成設備設置	設計・製造							
	導入							
	稼働							ハリタ金属にて稼働
水流選別装置での条件検討	条件および樹脂リサイクルサンプル作成							
	樹脂評価に応じて、試験機の運転条件の見直し							早稲田大学と日本シームで検討
再生PP樹脂の評価	物性分析評価 難燃剤混入評価							協和産業で評価
	コンパウンド検討（配合等） 再生ＰＰ樹脂生産							協和産業で評価
	サンプル再生PP樹脂の提出 自動車メーカーでの物性検証							自工会の協力

出所）エコメビウス作成

2. 助成事業の報告

2.1. 助成事業の実施結果

2.1.1. 流系シミュレーションによる最適な水流選別装置の検討

最適な水流選別機の装置形状を決定することを目的に、日本シームで循環型、二次元型、自由渦型の 3 種類の水流選別装置を設計・開発した。その後、循環型と自由渦型に関して、早稲田大学と共同で流系シミュレーションを実施した。なお、二次元型については、シンプルな上昇水流を発生させるだけであり、シミュレーションから得られる知見の有益性が少ないことから、流系シミュレーションは実施していない。

シミュレーション手法としては、離散要素法（DEM）と数値流体力学（CFD）を連成させることで水流中のプラスチック粒子挙動を解析した。DEM とは、各粒子の運動方程式を解くことで粒子挙動を解析する粒子シミュレーション法の一種である。一方 CFD は流体力学の基礎方程式である連続の式とナビエ･ストークスの式を離散的に解くことで流体挙動を解析する手法である。

（1） 自由渦型のシミュレーション結果

＜自由渦型の概要＞

水流選別装置の自由渦型は、遠心力と重力を利用した比重選別装置である。装置の模式図を図 2-1 に示す。

円錐状の水槽の上部が分級場であり、整流羽根によって水流を制御する。水は分級場外部より回り込むように流入し、中心部から上方に流出する。粒子は整流羽根の内側に供給され、渦巻き状の流れによって比重ごとに選別されることが期待される。遠心力によって軽粒子が内側に、重粒子が外側に分布、さらに、重力によって軽粒子はより上方に、重粒子はより下方に分布することが期待される。この 2 種類の力によって、軽粒子が中心部上方の回収口から回収され、また、重粒子が水槽下方に沈降する。沈降した重粒子は水槽下方で循環する流れに沿って移動するため、再び上昇することはなく水槽下方に留まると考えられる。

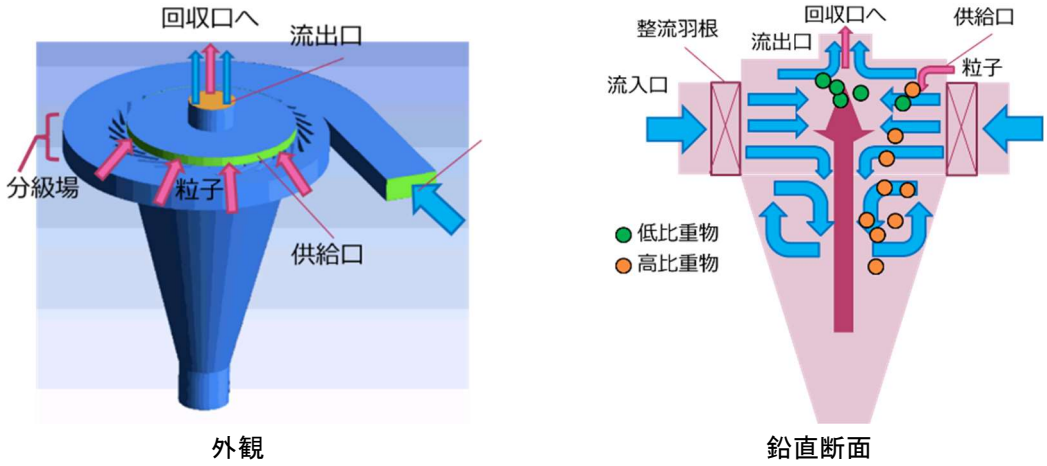


図 2-1　自由渦型概要

出所）早稲田大学作成

＜シミュレーション条件＞

自由渦型内部の流体挙動を把握するために CFD シミュレーションを行った。解析条件を表 2-1 に示す。水の流入口に加え、粒子の供給口からも水が流入するモデルとした。以下、それぞれでの流入流速を、水流入流速、供給口流入流速と呼ぶ。表 2-1 における流入流速比とは、供給口流入流速に対する水流入流速の比である。本シミュレーションでは、流量と流入流速比を変化させ、流線への影響を評価した。流量については流入流速比を固定し、それぞれの流速を増加させることで変化させた。また、流入流速比については、水流入流速を固定し、供給口流入流速を変化させた。

表 2-1　解析条件

流体モデル	標準 k-ε モデル				
水流入流速 [m/s]	0.7	7	70	0.7	0.7
供給口流入流速 [m/s]	0.07	0.7	7	0.007	0.0007
流入流速比 [-]	10	10	10	100	1000

出所）早稲田大学作成

＜シミュレーション結果＞

以下に水平断面および鉛直断面における流線を示す。ここで水平断面とは分級場の中間の高さでの断面、鉛直断面とは分級場の直径を通るような断面である。水平、鉛直断面をそれぞれ図 2-2 に示す。また、水流入流速が 7 m/s、供給口流入流速が 0.7 m/s の場合の水平断面での流線を図 2-3 に示す。図 2-3 より、分級場にて渦流が発生していることが確認された。

さらに、水流入流速と供給口流入流速の比を固定し、流量を変化させた場合の鉛直断面での流線を図 2-4 に示す。また、水流入流速を固定し、供給口流入流速を変化させた場合の鉛直断面での流線を図 2-5 に示す。図 2-4、図 2-5 より、槽内に流入後、下方に向かう流線は一度下方に潜り込んだ後に再び上昇し分級場中心に戻ることが確認された。よって、重粒子は一度下部に沈降してから再び上昇し、上方の回収口から回収されてしまう可能性が示唆された。また、流量や流入流速の比を変化させた場合も、同様の流線が見られた。

以上より、流線が下方に潜り込んだ後に再び上昇する現象は、本装置の特性であると示唆されたため、高精度な選別には適さない装置として開発を断念した。

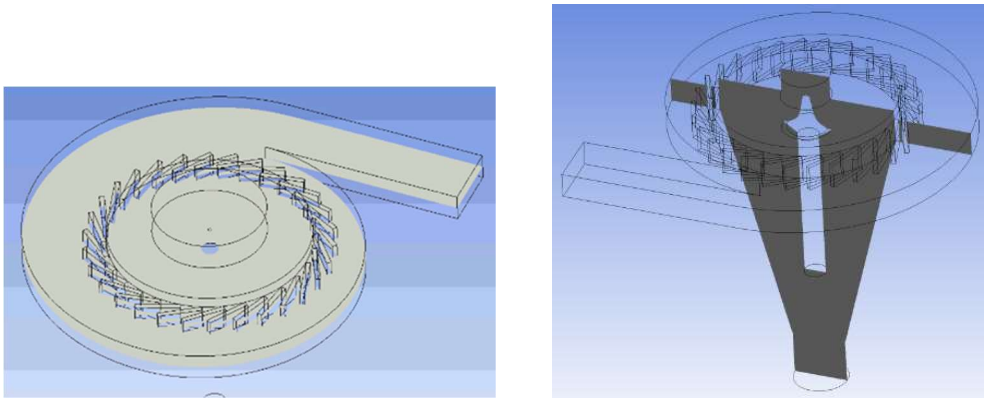


図 2-2　水平（左）、鉛直（右）断面

出所）早稲田大学作成

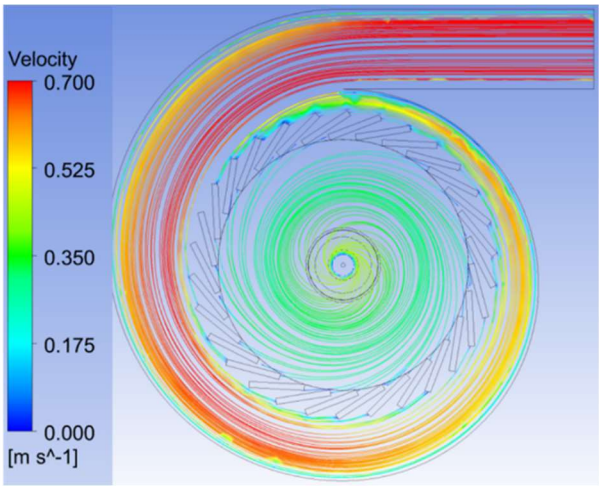
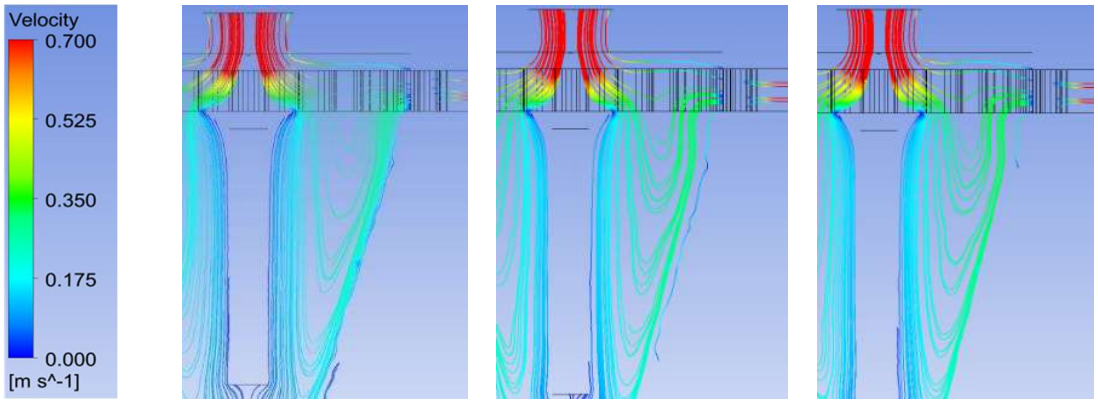


図 2-3　水平断面における流線

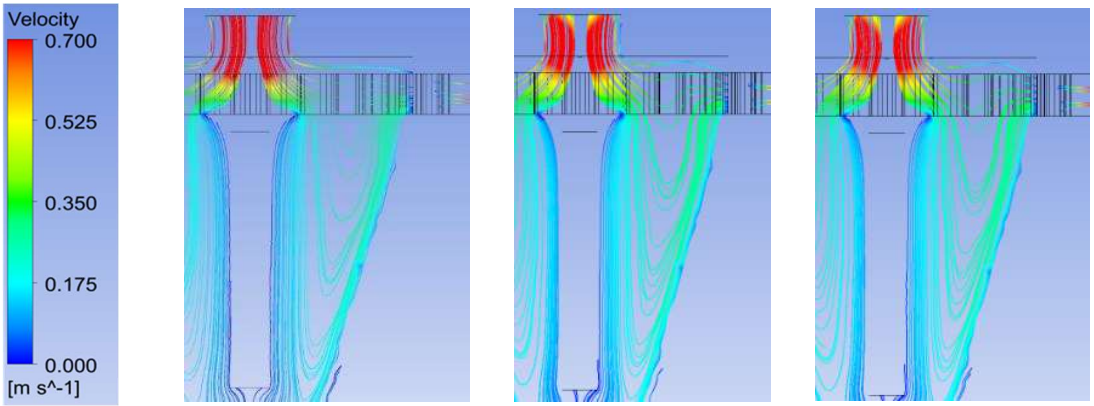
出所）早稲田大学作成



水流入流速 [m/s]	0.7	7	70
供給口流入流速 [m/s]	0.07	0.7	7

図 2-4　流量の流線への影響

出所）早稲田大学作成



流速比[-]	10	100	1000

図 2-5　流速比の流線への影響

出所）早稲田大学作成

（2） 循環型のシミュレーション結果

＜循環型の概要＞

循環型の模式図を図 2-6 に示す。図 2-6 の内壁と外壁の間に試料が供給され分離が行われる。また、図 2-7 に示す円筒部底部の二重羽根によって、装置内の水の循環を制御する。この羽根は内部の回転羽根と外部の静止羽根から構成される。まず、内部の回転羽根が回転することで水槽下部より水が流入し、内壁と外壁の間の流路を通り、上部の回収口より流出し、再び下部の流入口より流入する。試料は水槽側面から、内壁と外壁の間の流路に入るように供給され、水流に乗って低比重物が浮上し、高比重物が沈降することで比重ごとに選別される。低比重物は上部回収口から回収され、高比重物は下部回収口から回収される。各回収口の定義を図 2-8 に示す。

二重羽根について、内部の回転羽根は水流に回転成分を持たせることで、浮上した全粒子を上部回収口より回収可能とする役割が期待される。一方、外部の静止羽根は、水流の鉛直方向上向き成分を増加させる整流効果が期待される。

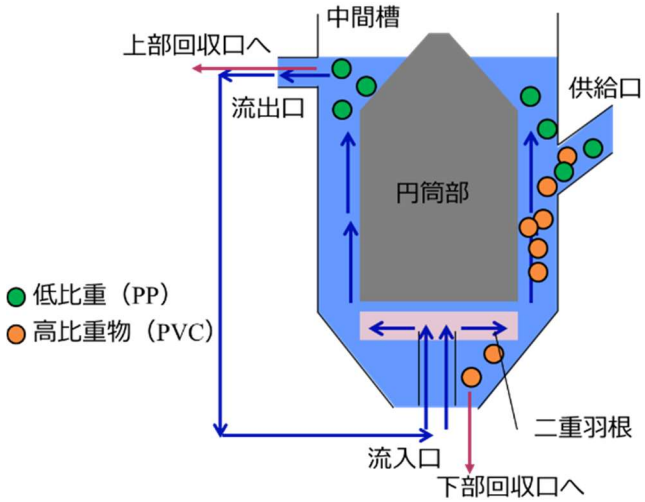


図 2-6　循環型の模式図

出所）早稲田大学作成

図 2-7　二重羽根と円筒部

出所）日本シーム作成

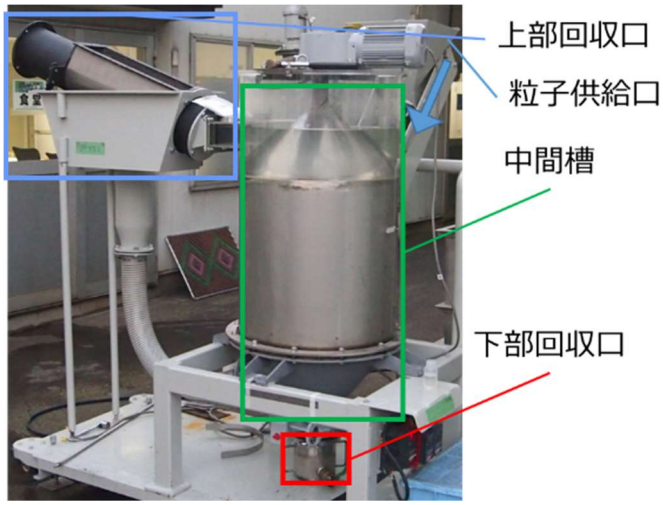


図 2-8　回収口の定義

出所）日本シーム作成

＜シミュレーション条件（妥当性の検討）＞

循環型において、回転羽根の回転数と上昇流速の関係について実験値とシミュレーション値を比較することでシミュレーションの妥当性を検討した。

ここで水の上昇流速に関して、実験値およびシミュレーション値の算出方法を式(1)、(2)に示す。図 2-9 の青部分は羽根からの高さが 487mm の断面であり、粒子を供給する高さである。粒子は供給された瞬間に受ける力に大きな影響を受けると考えられるため、この断面における上昇流速に関して比較を行った。シミュレーション条件を表 2-2 に示す。

羽根の回転数と水の上昇流速の関係を図 2-10 に示す。図 2-10 より、水の上昇流速は実験とシミュレーションで概ね一致していた。よって、羽根の回転による水流はシミュレーションで再現出来ていると確認された。

上昇流速（実験値）=実験で得られた流量/図に示す断面積　(1)

上昇流速（計算値）=図に示す断面の上昇流速平均　(2)

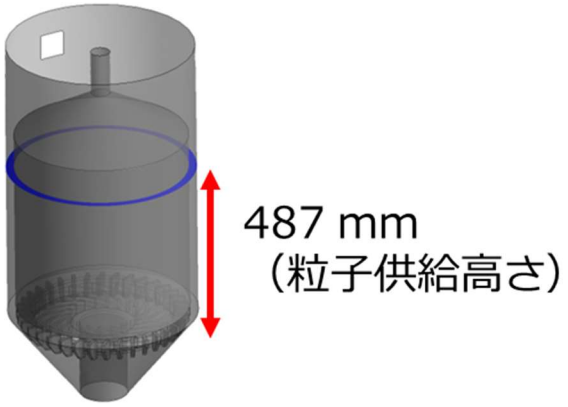


図 2-9　上昇流速の計算断面

出所）早稲田大学作成

表 2-2　解析条件

流体条件	流体モデル	層流モデル		
	流入流速［m/s］	0.159	0.223	0.343
装置条件	回転数［rpm］	50	75	100

出所）早稲田大学作成

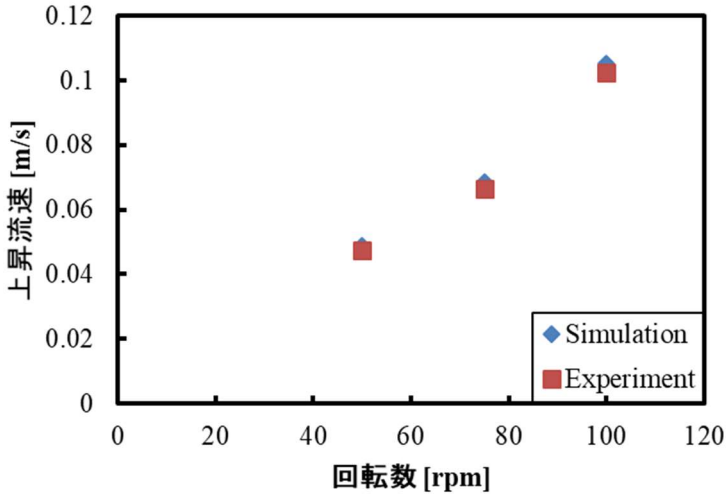


図 2-10　上昇流速と回転数の関係

出所）早稲田大学作成

＜シミュレーション結果＞

作成したシミュレーションにより各条件の選別への影響を検討した。

循環型に対し、CFD シミュレーションを用いて選別により適した装置形状を検討した。内壁が低い薄型（TypeD）と内壁が高い厚型（TypeE）の 2 種類に対して解析を行い、装置内部で生じる水流を比較した。シミュレーションより得られた水の流速分布を比較検討し、流速の鉛直上向き成分が、より支配的となる装置を選定した。本シミュレーションで使用した薄型および厚型のシミュレーションモデルを図 2-11 に示す。また、解析条件を表 2-3 に示す。

各装置に対して得られた流線を図 2-12 に示す。また解析より得られた水槽内部における羽根からの高さと流速の鉛直上向き成分との関係を図 2-13 に示す。これは図 2-12 に示した黒矢印上で観測された値である。

これらの結果より、薄型に比べ、厚型では粒子投入高さ付近において水流の鉛直上向き成分がより一定となることが確認された。よって、投入口付近において粒子が受ける流速の横向き成分による影響が少なく、比重分離が容易になることが予想されたため、厚型の開発を決定した。

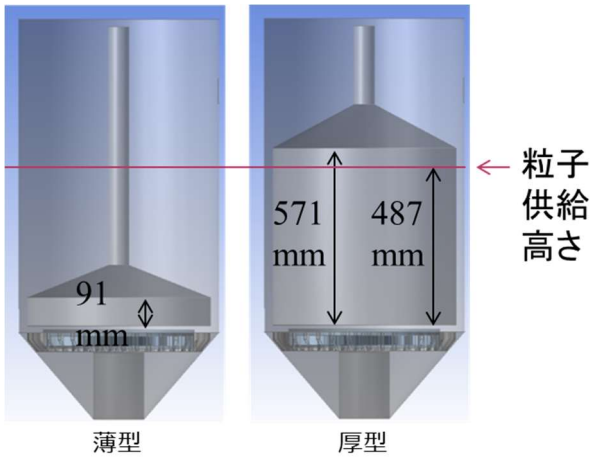


図 2-11　シミュレーションモデル

出所）早稲田大学作成

表 2-3　解析条件

流体条件	流体モデル	k-ε モデル
	流入流速(m/s)	0.07
装置条件	回転速度(rpm)	24

出所）早稲田大学作成

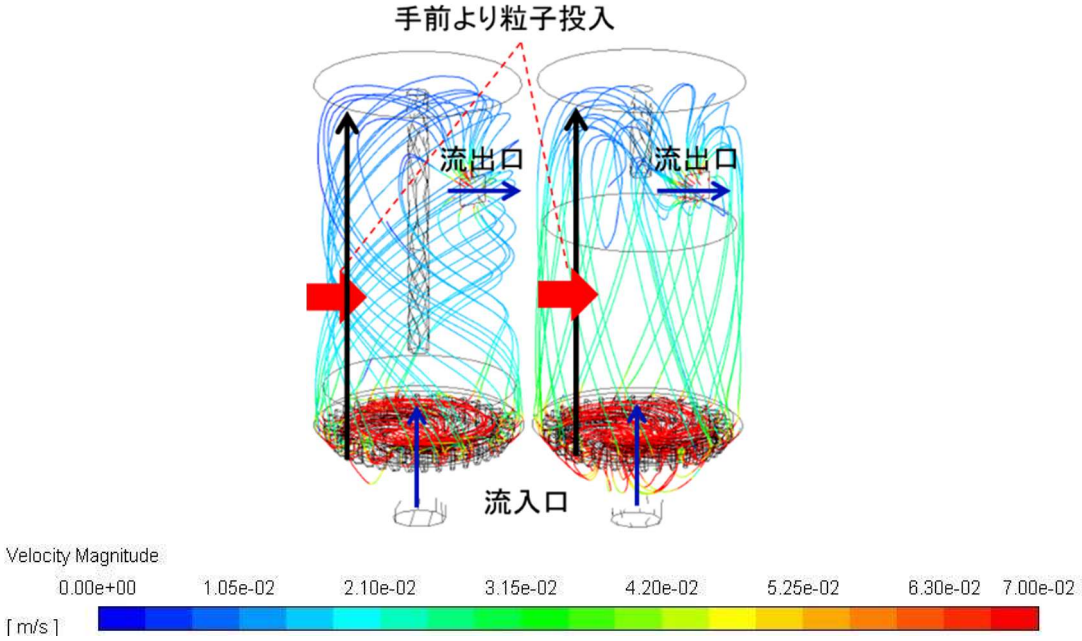


図 2-12　薄型と厚型における流線

出所）早稲田大学作成

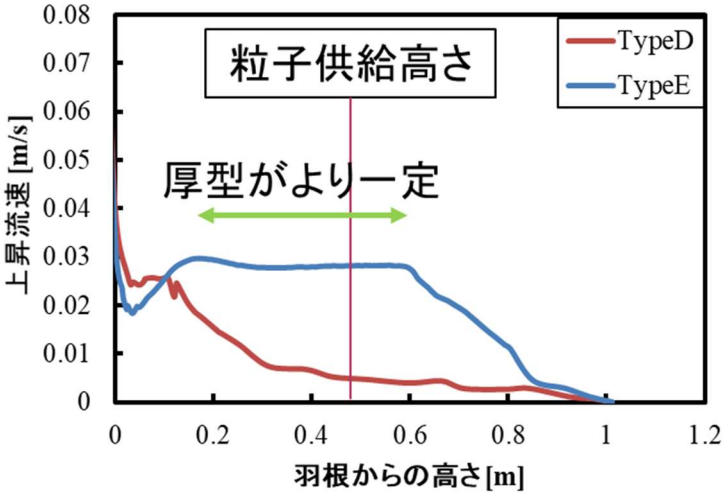


図 2-13　羽根からの高さと流速の鉛直上向き成分の関係

出所）早稲田大学作成

＜粒子の比重差への感度評価＞

選別可能な比重差を評価するため、様々な比重差を持つ粒子群を仮定し、シミュレーションを行った。解析条件を表 2-4 に示す。

供給した粒子の条件を表 2-5 に示す。表 2-5 において、基準となる粒子密度を 1020 kg/m^3 として、この密度を持つ粒子群を P0 と表す。P0、P10、P50、P100、P200、P300 の数字は P0 からの密度差を表す。すなわち本項では、P0 との密度差が、10 kg/m^3、50 kg/m^3、100 kg/m^3、200 kg/m^3、300 kg/m^3 となるような粒子群を供給した。各粒子群の密度以外の物性は P0 と同一である。

各粒子群の平均高さの時間変化を図 2-14 に示す。また、粒子供給後から 60 秒後までの 10 秒毎の粒子の様子を図 2-15 に示す。図 2-14、図 2-15 より、供給直後には混在していた粒子群が、比重ごとに分かれていく様子が観察された。さらに、P0 との密度差が 50 kg/m^3 超の粒子群は、P0 と明白に分離されることが確認された。よって、密度差 190 kg/m^3 のタルク入り PP と PVC は循環型の水流選別装置で選別可能であると示唆された。

表 2-4　解析条件

流体条件	流体モデル	層流モデル
	流入流速 [m/s]	0.343
装置条件	回転数 [rpm]	100

出所）早稲田大学作成

表 2-5　粒子条件

粒子番号	P0 (基準)	P10	P50	P100	P200	P300
密度 [kg/m³]	1020	1030	1070	1120	1220	1320
密度差 [kg/m³]	0	10	50	100	200	300
形状	球					
粒径 [mm]	6					
供給体積速度 [×10⁻⁷m³/s]	4.05					

出所）早稲田大学作成

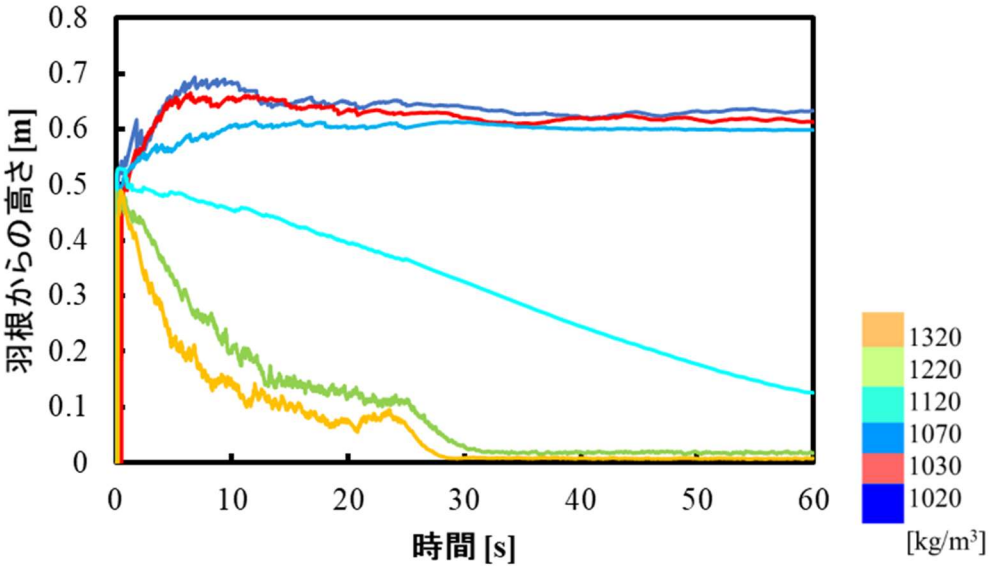


図 2-14　各粒子群の平均高さの時間変化

出所）早稲田大学作成

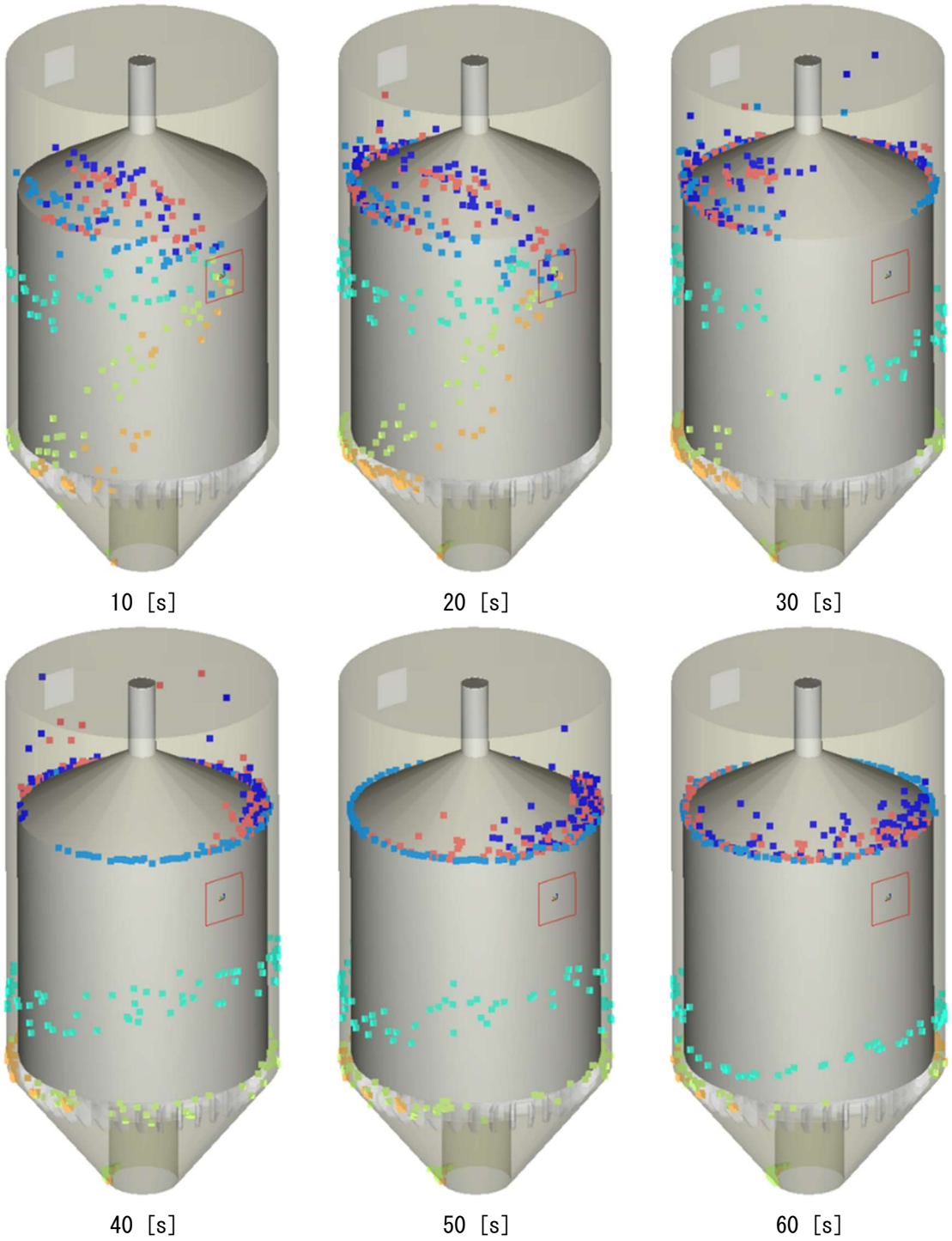


図 2-15　各粒子群の様子

出所）早稲田大学作成

2.1.2. 循環型水流選別装置中の粒子挙動に関する基礎的検討

2.1.1 で選別装置としての有効性が示された循環型水流選別装置に関して、さらに標準試料を用いて実験を行い、装置内の粒子挙動に関する種々の基礎的検討を行った。

本項実験では、試料として形状と比重が安定していることから、図 2-16 に示す BB 弾を使用した。BB 弾の直径および密度を表 2-6 に示す。各粒子の密度にばらつきがあったため、密度計を用いて粒子の平均密度及び標準偏差を計算した。

図 2-16　使用した試料

出所）早稲田大学作成

表 2-6　粒子試料の直径および密度

直径 [mm]	6
密度 [kg/m^3]	1026.7
密度の標準偏差 [kg/m^3]	0.001397

出所）早稲田大学作成

(1)　供給量と回収率の関係

図 2-14、図 2-15 で示したシミュレーション結果により、密度差が 50kg/m^3 超の粒子群は明白に分離されることが示唆されたが、処理量が増加した際には比重の異なる粒子群が混在する可能性が考えられるため、実験にて供給量ごとの回収率についての検討を行った。

本試験の実験条件を表 2-7 に示す。

表 2-7　実験条件

装置条件	回転数 [rpm]	25.1、30.0、35.4
	運転時間 [s]	270
粒子条件	単位時間当たりの供給体積 [×10^{-7}m^3/s]	15.1、59.5、119
	供給時間 [s]	150

出所）早稲田大学作成

供給重量と上部回収率、中間槽回収率、下部回収率の関係を図 2-17～図 2-19 に示す。ここで、上部回収率は上部回収口で回収された浮遊粒子の回収率、下部回収率は、下部回収口で回収された沈降粒子の回収率、中間槽回収率は、下部回収口からの粒子回収後に下部回収口の弁を開けて回収した粒子の回収率である。回収率は、式(3)を用いて求めた。

図 2-17～図 2-19 より、供給粒子体積の増加に連れて、上部回収率がほぼ一定であったのに対し、中間槽回収率は減少し、下部回収率は増加した。また、中間槽回収率の減少、下部回収率の増加は最低回転数である 25.1 rpm のときに最も顕著であった。

これは、次の 2 要因によって、中間槽に浮遊する粒子が沈み、下部での粒子回収率が上昇した結果だと考えられる。

- 粒子の体積分率の増加が水の上昇流速成分を阻害
- 粒子同士の衝突が粒子の上昇を阻害

本結果より、低回転数条件において、供給量が増加すると、軽比重物が高比重物と共に沈むため、分離効率が減少する可能性が示唆された。

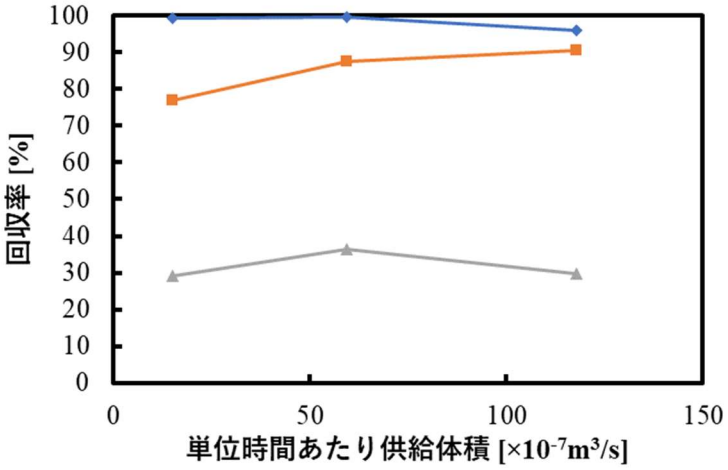


図 2-17　上部回収率

出所）早稲田大学作成

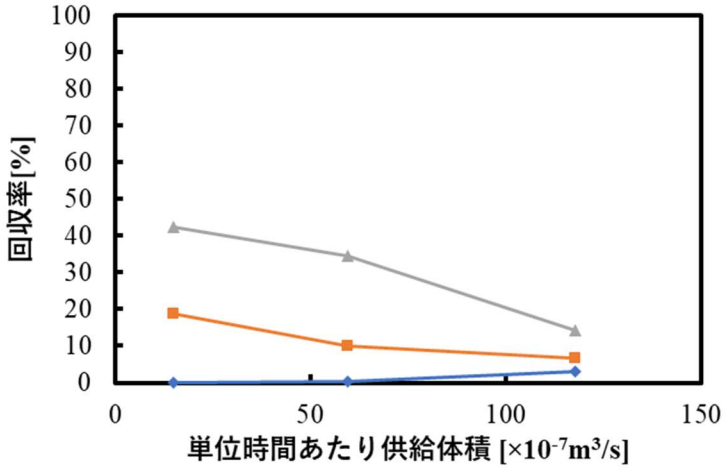


図 2-18　中間槽回収率

出所）早稲田大学作成

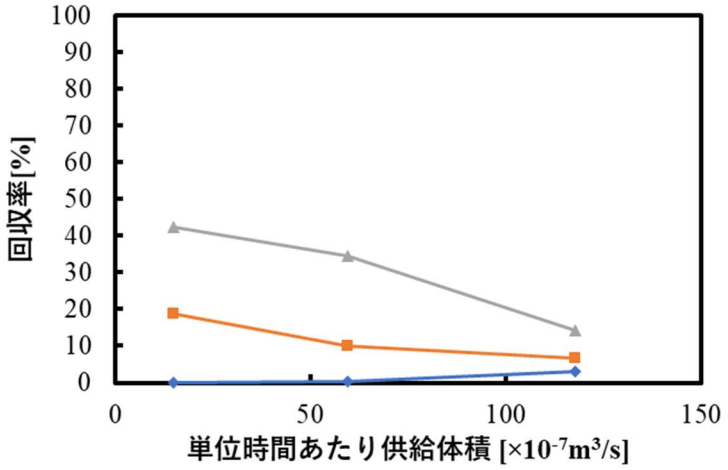


図 2-19　下部回収率

出所）早稲田大学作成

回収率 [%]=回収口からの回収重量/供給重量×100　　(3)

（2）　羽根の回転数と回収時間の関係

低回転数条件では粒子速度が遅く、処理時間が増大する可能性が考えられるため、実験にて、回転数による浮上粒子の回収時間について検討した。ここで回収時間とは、粒子が供給されてから上部回収口で回収されるまでの時間を示す。

羽根の回転数と回収時間の関係を図 2-20 に示す。図 2-20 より、回収時間は羽根の回転数が増大するに連れて線型的に減少することが確認された。また、同じ回転数でも、粒子が回収されるまでに水槽内を周回する回数にばらつきがあることが確認された。したがって、低比重物の選別条件である低回転数条件下では、処理時間が増大するが、十分な時間経過後には全量回収可能であると示唆された。

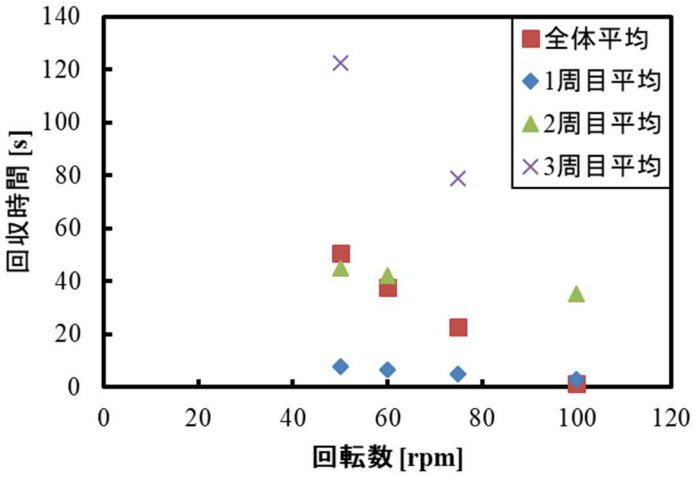


図 2-20　回転数と回収時間の関係

出所）早稲田大学作成

2.1.3. 最適な装置形状の検討

(1) 循環型

水流選別シミュレーションの結果等を踏まえて、循環型水流選別装置の最適な装置形状を検討した。分離槽の形状は現状日本シームで製造・販売している『流選なると』と同様の円筒形を採用した。主な構造としては水の循環水流、羽根の回転による上昇水流を用いて、円筒部・水槽外壁の間で分級を行うものである（図 2-21 参照）。

円筒部上面を「平型」から「円錐型」に変更し、沈降品の滞留を防止し、静止羽根を回転羽根の外周に配置し、上昇流を強化した。また、シミュレーションの結果から内壁の厚みを上げて、原料投入が内円筒部と水槽外壁の間にくるようにし、分級力精度を向上させた。

供給装置は、当初スクリューによる供給を想定していたが、比重 1.00 以下のプラが槽内に入らず、残ってしまう現象が確認されたため、別の供給装置を検討した。結果、水流を活かして、原料を槽の内側に全周供給する装置（水流供給装置）を開発した（図 2-22 参照）。

この水流供給装置により、安定して水槽の内側に原料を供給できるようになり、処理能力向上と分級精度向上につながった。

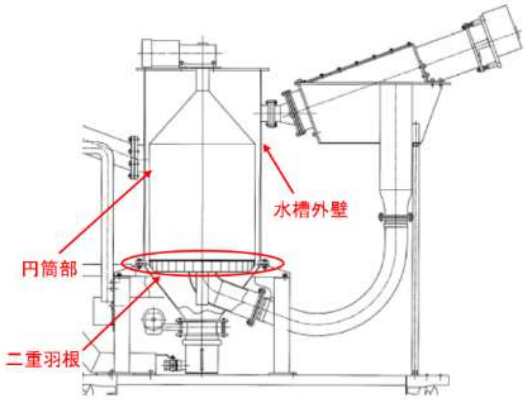


図 2-21　なると（循環型）

出所）日本シーム作成

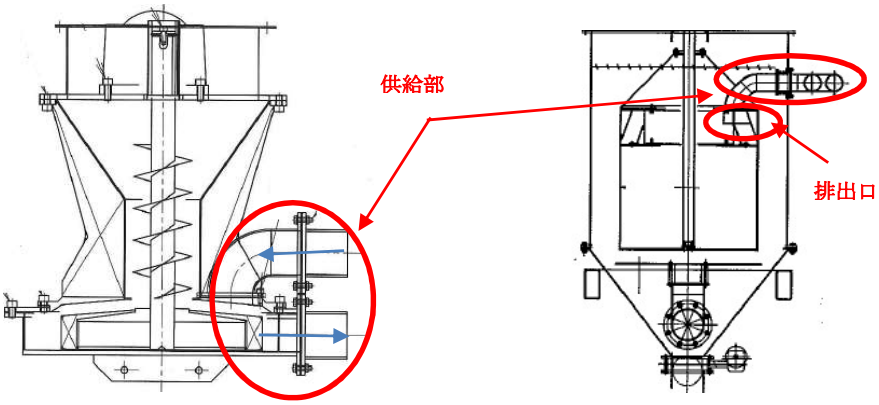


図 2-22　左：供給装置図　　右：槽と接続部

出所）日本シーム作成

浮上品の回収装置に関しては、以下の 3 方式を検討した。以下に示すように、結果として「C. レアードコレクター」を採用することとした。

A. 傾斜スクリューコンベア回収

傾斜スクリューコンベアにて連続回収試験を行った。その結果、回収はできるが、ASR に含まれる繊維がスクリュー下のパンチングを目詰まりさせ、安定した循環水流が起こせず、上昇水流の不安定さを招いた。その結果、傾斜スクリューコンベア案は不採用とした。

B. 螺旋ブラシフィルター

PP 樹脂製のブラシ型スクリューを内蔵した螺旋ブラシスクリューを開発し、連続回収試験を行った。傾斜スクリューの問題点になった繊維質もブラシで掻き取ることができ、循環型水流選別装置内の水流は安定した上昇水流になった。しかし長期的な連続運転を鑑みると、ブラシの耐久性に懸念が残り、今回のラボ装置には不採用とした。

C. レアードコレクター

コの字型の板材に 2mm ずつ隙間を開け、複数枚重ねた「固定羽根」をコの字部分の開口部を上にして固定し、コの字の内空間に、固体粒子を含んだ水が横から流入する様に流入路を設けている。さらに 2mm の隙間の間を手裏剣型の羽根が、固定羽根のスリットに沿って、下方から上方へ掻き揚げることができる回転羽根を設けた（図 2-23 参考）。

その結果、固定羽根のコの字の空間に水に伴って進入した固体粒子は、粒径が 2mm 以上であれば、コの字状の空間からケーシング外に排出され、また固定羽根と回転羽根は、一枚一枚互いにかみ合っているため、回転羽根が回転している間は、それぞれのギャップに詰まった 2mm 以下の固体流しを互いに掻き取りあい、連続的にクリーニングをすることが可能になり、繊維が詰まらず、また安定して連続運転できるものとなった。

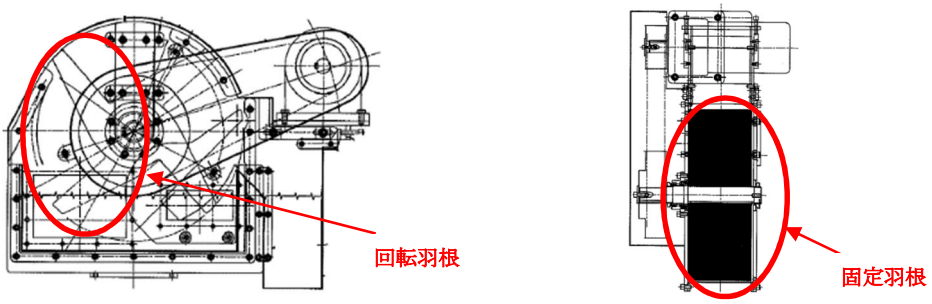


図 2-23　左：側面図　　右：上面図

出所）日本シーム作成

しかし、その後のハリタ金属での試運転の際に、レアードコレクターでは、1～2mm 程度の浮上した樹脂を噛みこんでしまい、回転羽根の一部が変形してしまった。これにより、レアードコレクターでは長時間稼働が困難であることが判明したため、本年度に検討を行った方式以外の新たな回収装置の開発が必要なことが分かった。

（2） 二次元型

二次元型の構造を図 2-24 に示す。二次元型は図 2-24 に示すように、ポンプによる循環水流をスリットプレートの間を通過させることで、均等な上昇水流をつくり、分級を行う装置である。本方式については、先述の通りシンプルな上昇水流を発生させるだけであり、シミュレーションから得られる知見の有益性が少ないことから、早稲田大学でのシミュレーションを用いず、日本シームが独自でその有効性を検証した。

二次元型の開発においては、循環水流強化のためポンプの強化を行い、より強い上昇水流を作るように改良を進めた。また、分級スリットプレートに関しては、原料の下方通過を許容しつつ、水流を水平から垂直に変更することを目指して水流変更板を改良したが、水流を流路内に均等に配分することができなかったため、均等な上昇水流ができなかった。

また、供給装置についても、循環型と同様の供給装置を利用したが、粒子の排出が上手くできず、粒子が水流とともに供給装置に戻ってしまう現象が起きた。この課題については、図 2-25 に示すように水流供給機にレアード供給機を付ければ解決可能と考えられるが、本年度は改善設備を設計・開発する時間的余裕もなく、二次元型の改良は断念した。

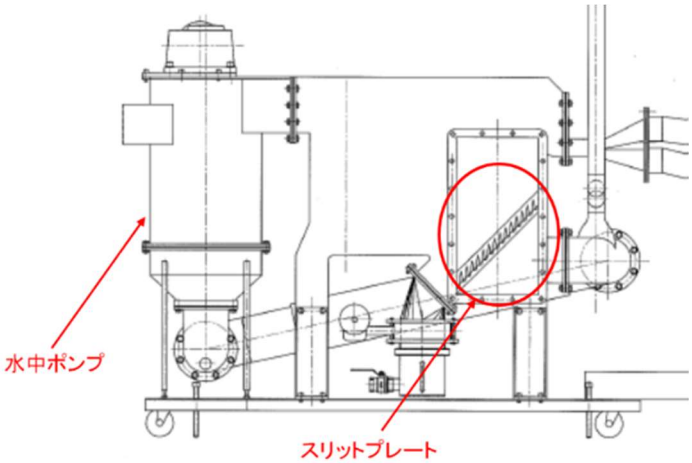


図 2-24　二次元型

出所）日本シーム作成

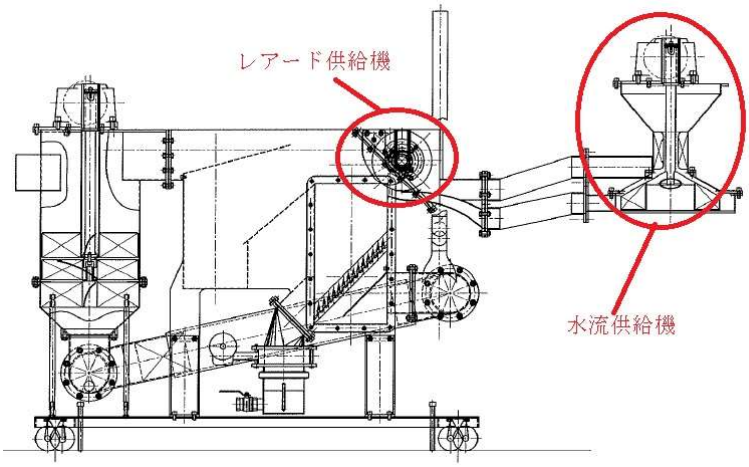


図 2-25　二次元型供給装置の改善案

出所）日本シーム作成

2.1.4. 試験設備による選別能力の評価

流系シミュレーションを踏まえて検討した装置形状の有効性を確認するため、日本シームで循環型水流選別装置の試験機を製作し、選別能力の評価を実施した。なお、前項までに示したように自由渦型、二次元型については課題が多く、開発を断念したため、循環型の試験装置のみを活用した。

(1) サンプルの作製

日本シームで原料となる ASR 約 1,700kg の粗選別を行い、10mm アンダーに洗浄粉砕・脱水したサンプル約 600kg を作製した（図 2-26 参考）。その後、サンプルが均一になるように協和産業でタンブリング（攪拌・調合）を実施した。

図 2-26　ASR の洗浄粉砕および脱水仕上げ写真

出所）日本シーム作成

(2) 選別試験

表 2-8、表 2-9 に示すように、異なる回転数を用いて、選別試験を実施した。

一方、選別試験の途中で上昇水流を生み出すポンプの力不足により、比重 1.03 より重い樹脂が浮上しないことが判明した。そのため、3 回目以降は水流の安定と強化のため、水中ポンプを強化した。

表 2-8　粉砕後の水流選別試験結果（ポンプ強化前）

	1 回目	2 回目
回転数（rpm）	42.5	31.5
投入量（kg）	1.5	1.5
投入時間（分）	8	8
浮上品重量（kg）	0.7	0.63
沈降品重量（kg）	0.8	0.83

出所）日本シーム作成

表 2-9　粉砕後の水流選別試験結果（ポンプ強化後）

	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	7 回目	8 回目
回転数（rpm）	58.7	52.8	46.9	35.2	35.2	32.2
投入量（kg）	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
投入時間（分）	10	10	10	10	10	10
浮上品重量（kg）	0.9	0.85	0.8	0.66	0.7	0.63
沈降品重量（kg）	1.1	1.15	1.2	1.34	1.3	1.37

出所）日本シーム作成

（3） 回収品の品質純度測定（比重液試験）

水に塩化ナトリウムを加え、比重 1.05 になるよう比重液を作製した。その後、前項で回収した浮上品（製品）を比重液に投入し、浮上品・沈降品の割合を測定した。表 2-10、表 2-11 に測定結果を示す。

結果として、2 回目（回転数 31.5rpm）では狙い通り比重 1.05 の値で分級することができた。さらにポンプ強化後、実験を進めたところ 6 回目（回転数 35.2rpm）で狙い通りの結果は出たものの、同回転数でもう 1 度実施したところ、沈降品があった。よって連続運転では安全策をみて 8 回目の回転数 32.2rpm で実施することとした。

なお、2 回目、6 回目、8 回目に回収した製品から無作為にサンプルを抽出し、4 分法にて 102 粒まで縮分を重ね臭気法にて樹脂の純度を測定した（簡易測定法）。この測定結果を表 2-12 に示す。いずれの分析結果においても、PP 樹脂の比率は十分に高く、一定の PP 品質を確保できたと判断した。

表 2-10　水流選別後に水での浮上、浮沈確認（ポンプ強化前）

	1 回目	2 回目
投入量（kg）	0.7	0.63
浮上製品重量（kg）	0.51	0.58
沈降品重量（kg）	0.19	0.05

出所）日本シーム作成

表 2-11　水流選別後に水での浮上、浮沈確認（ポンプ強化後）

	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目	7 回目	8 回目
投入量（kg）	0.9	0.85	0.8	0.66	0.7	0.63
浮上製品重量（kg）	0.67	0.68	0.66	0.66	0.65	0.63
沈降品重量（kg）	0.23	0.17	0.14	0	0.05	0

出所）日本シーム作成

表 2-12　選別品の臭気分析結果

	2 回目	6 回目	8 回目
PP 樹脂（粒）	95	94	98

ABS 及びその他樹脂（粒）	7	8	4

出所）協和産業作成

また、水流選別による浮上品の回収率を表 2-13 に示す。浮上品の回収量は、途中の工程で 50kg をサンプル材料として使用したものの、1,700kg の投入量に対して 200kg であり、回収率は 11.8%であった。

表 2-13　水流選別による浮上品回収率

	原料 ASR	洗浄粉砕後	水流選別投入量	浮上品回収率
重量（kg）	1,700	600	550	200
比率（%）	100.0	35.3	32.4	11.8

※洗浄粉砕後のサンプル 50kg は検証試験等で使用

出所）協和産業作成

（4） 回収品の組成検証

本検討で使用した原料 ASR、浮上品、沈降品に関して、協和産業で組成検証を行った。各原料の検証結果は表 2-14～表 2-16 の通りである。循環型浮上品の組成検証結果から、比重 1.05 より軽い物質（PP・PE・PU・発砲ゴム類・木くず）が全体の 95.7%を占めており、循環型水流選別装置による比重分離は目的を達成していると判断する。

表 2-14　原料 ASR 組成（循環型投入前サンプル）

	重量（g）	割合（%）
硬質プラ	12.291	52.5
銅線	0.102	0.4
電線被覆	0.203	0.9
わた類	0.127	0.5
金属類・基板	0.363	1.6
ゴム	6.088	26.0
その他	4.239	18.1
合計	23.413	100

出所）協和産業作成

表 2-15　循環型浮上品の組成（縮分を行い FT-IR にて分析）

	割合（%）
PP	62.3
PE	6.2
ABS	0.8
PA	0.4
PU	0.4
PVC（銅線含む）	3.1
ゴム類	21.0

木片	5.8

出所）協和産業作成

表 2-16　循環型沈降品の組成（縮分を行い FT-IR にて分析）

	割合（%）
PP	7.4
ABS	3.3
PBT	0.7
PC/PBT	0.4
PMMA	1.1
PA	7.8
PC	3.3
POM	3.7
金属類	11.1
基板	1.1
PVC	5.2
木片	4.1
ゴム類	50.7

出所）協和産業作成

（5） 押出試験

協和産業では循環型浮上品に関して、押出試験も実施した。その結果、浮上品には PVC 被覆や銅線、木片、ゴム等の異物の混入が多く、押出が困難であることが分かった。押出工程は通常であれば 3 時間程度の連続稼働が可能であるが、今回のサンプルを使用した場合には、図 2-27 に示すように押出工程開始後 10 分程度でメッシュ詰まりが発生した。

また、製造されたストランド（押出機から排出される細長いプラスチック原料）も、表面にザラザラ感が残るなど形状が悪く、浮上品を再生材原料とするためにはさらなる異物除去が必要と判断された（図 2-28 参考）。

図 2-27　押出機メッシュ

出所）協和産業作成

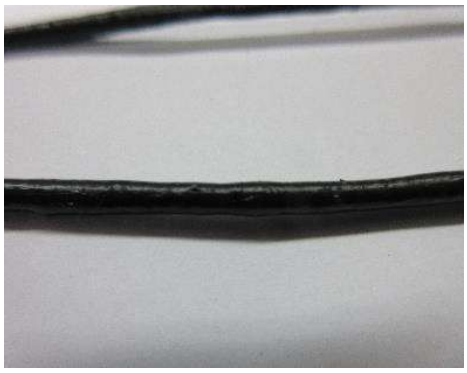


図 2-28　ストランド状況

出所）協和産業作成

（6） 浮上品からの異物除去

押出試験の結果を踏まえ、協和産業で浮上サンプル品からのゴム、綿等の除去工程を追加した（図 2-29、図 2-30 参考）。さらに、協和産業の静電分離装置を用いて、木片の除去も試みた（図 2-31、図 2-32 参考）。その結果、図 2-33 に示すようにストランドに多少のざらつきは残るものの押出が可能となり、試験片の作製に至った（図 2-34 参考）。

なお、本試験は物性測定を目的としたため参考データであるが、図 2-35 に示すように元材 23kg に対して約 5kg のペレットが製造できたことから、歩留りは 21.7%であった。

図 2-29　ゴム・綿除去前

出所）協和産業作成

図 2-30　ゴム・綿除去後

出所）協和産業作成

図 2-31　静電分離機 全体図

出所）協和産業作成

図 2-32　静電分離機 異物除去後品（良品）

出所）協和産業作成

図 2-33　異物除去後ペレット

出所）協和産業作成

図 2-34　異物除去ペレットの試験片

出所）協和産業作成

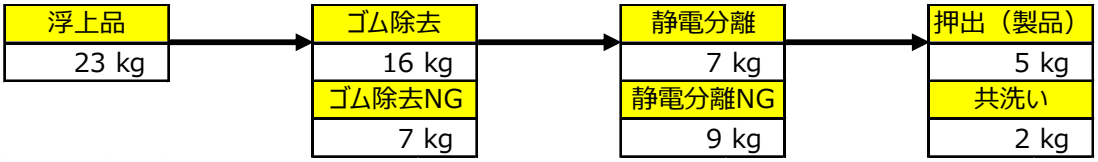


図 2-35　循環型浮上品の歩留り

出所）協和産業作成

2.1.5. 回収製品の物性評価

循環型で回収したPP製品の物性を確認するため、協和産業で物性評価を行った。なお、浮上品では押出が困難でペレットの作製ができないことから、協和産業でゴム・綿を除去した後、静電分離によって木片等も除去したサンプルを測定に用いた。

測定結果を表2-17に示す。測定結果には目標物性となる参考値も併記した。目標物性はともに自動車での再利用を想定し、アンダーカバーやディフューザー等での活用が想定される物性と、バッテリートレーやエンジンオイルパン等での活用が想定される物性の2つを参考値として記載している。

その結果、アイゾット衝撃強度が目標物性には満たないほか、バッテリートレー等向けでは引張破壊伸び等の数値も不足していることが分かった。

そこで、目標物性を満たすためにコンパウンドの検討を行った。循環型で回収したペレットは硬く粘りが無いため、耐衝撃性と伸びの改善に狙いを定めることにした。具体的には循環型での浮上品に、自動車バンパーの粉砕品およびパレット粉砕品の3種類をコンパウンドし、配合比率の異なる2グレードの試作品を作製した（図2-36、図2-37参考）。

表2-17 浮上品物性および目標物性

項目	単位	試験方法	浮上品物性	目標物性	
				アンダーカバー等	バッテリートレー等
MFR	g/10min	JIS K7210	21.62	15～25程度	15～25程度
比重	g/cm3	JIS K7112	0.99	1.07以下	1.0以下
引張弾性率	Mpa	JIS K7161 JIS K7162	1187.3	－	－
引張降伏強度	Mpa		27.53	18以上	18以上
引張破壊伸び	%		11.7	10前後	15前後
引張伸び率	%		3.7	N/A	N/A
曲げ弾性率	Mpa	JIS K7171	2643	1300以上	900以上
曲げ強さ	Mpa		47.7	20以上	25以上
アイゾット衝撃強度	KJ/m2	JIS K7110	5.46	15以上	5以上

出所）協和産業作成

図2-36　コンパウンドNo.1プレート

出所）協和産業作成

図2-37　コンパウンドNo.2プレート

出所）協和産業作成

アンダーカバーやディフューザー等での使用を想定してコンパウンドを行った No.1 プレート、バッテリートレーやエンジンオイルパン等での使用を想定してコンパウンドを行った No.2 プレートについて、それぞれコンパウンド後の物性を表 2-18 に示す。

2 グレードともに耐衝撃性と伸びを大きく改善したことで、それぞれ目標物性を満たすことに成功した。

表 2-18 コンパウンド後の物性

項目	単位	試験方法	浮上品物性	コンパウンド品	
				No.1ペレット	No.2ペレット
MFR	g/10min	JIS K7210	21.62	16.95	16.43
比重	g/cm3	JIS K7112	0.99	0.97	0.97
引張弾性率	Mpa	JIS K7161 JIS K7162	1187.3	1335.7	1232.5
引張降伏強度	Mpa		27.53	22.35	22.56
引張破壊伸び	%		11.7	40.8	29.5
引張伸び率	%		3.7	5.0	4.9
曲げ弾性率	Mpa	JIS K7171	2643	2032	2037
曲げ強さ	Mpa		47.7	39.1	41.1
アイゾット衝撃強度	KJ/m2	JIS K7110	5.46	19.57	8.32

出所）協和産業作成

以上の結果から、循環型の水流選別装置によって回収した ASR 由来の材料から、コンパウンドを経ることで、自動車部品の要求物性を確保する事が可能であることが分かった。

一方で、水流選別による浮上品には PP 樹脂と比重が近い異物も多数含まれる事から、安定的な再生 PP 樹脂の生産を行う為にも、PVC 被覆や銅線、木片、ゴム等の異物除去が不可欠であり、効率的にこれらの異物を除去する方法が今後の課題である。

2.1.6. ASR 中の臭素分析

(1) 難燃剤混入評価

ASR を原料とした再生材の製造においては、物性以外にも使用規制が進んでいる有害臭素系難燃剤にも留意する必要がある。特に、デカブロモジフェニルエーテル（DeBDE）、ポリ臭化ジフェニルエーテル（PBDEs）等は過去には自動車部品にも使用されており、これらを含む材料を再生材の原料とすれば、規制物質が混入してしまう可能性がある。

こうした有害臭素系難燃剤は比重が 1.10 より重いものに含まれると予測されるため、今回の水流選別では選別工程で除外されることが予測される。実際に化学メーカーに対して有害臭素系難燃剤の比重に関してヒアリングをしたところ、2.0～2.3 程度との回答も得られた[1]。しかし、再生材の用途を広げ、その普及に万全を期すためにも、今回改めて水流選別で得られた樹脂の臭素混入評価を行った。

水流選別で得られた浮上品について、協和産業で蛍光Ｘ線分析装置を使用して全臭素測定をした結果を表 2-19 に示す。また、比較として水流選別で沈降した物質の測定結果も表 2-20 に示す。両者を比べると、浮上品の平均値が 15.8wtppm であるのに対し、沈降品の平均値は 600.9wtppm となっており、水流選別によって大幅に臭素が除去できていることが確認できた。一方で、今後は有害臭素系難燃剤の混入をゼロとすることが求められる可能性もあり、さらに除去率を高める手法についても検討を続ける。

表 2-19　循環型浮上品の全臭素測定結果

n	1	2	3	4	5	6	7
全臭素（wtppm）	7.1	20.0	9.0	33.2	15.6	11.5	13.2
n	8	9	10	11	12	13	14
全臭素（wtppm）	29.7	26.1	9.7	12.7	14.8	6.7	13.1
n	15	16	17	18	19	20	平均
全臭素（wtppm）	14.3	17.1	21.9	5.8	26.6	7.6	15.8

出所）協和産業作成

表 2-20　循環型沈降品の全臭素測定結果

n	1	2	3	4	5	6	7
全臭素（wtppm）	20.4	125.9	3674.7	16.1	15.3	5452.3	63.2
n	8	9	10	11	12	13	14
全臭素（wtppm）	64.7	13.7	1876.8	22.9	22.2	461.4	27.4
n	15	16	17	18	19	20	平均
全臭素（wtppm）	80.9	12.3	12.5	22.1	15.1	18.0	600.9

出所）協和産業作成

[1] 但し、比重は臭素含有率で大きく異なる。DeBDE は臭素含有量が高いため、比重が大きい。臭素含有量が難燃性を左右するため、DeBDE を含む難燃剤は少量で難燃性を有するが、DeBDE を用いない難燃剤の場合には、配合量が DeBDE を含むものより多くなるとされる。

（2） 新たな臭素分析手法の検討

ASR からのリサイクル樹脂回収を事業化するためには､回収されたリサイクル樹脂中の Br 分を適切に定量評価できる分析手法を確立することが必要である。

従来の臭素分析手法においては、溶媒抽出法、マイクロウエーブ法、燃焼法での前処理の後に、GC-MS/TOC 等を用いた化学分析法が主流である。しかしこの手法ではバルクとしての Br 濃度を求めることは可能であるが、個々の粒子での Br 分布を得ることは不可能である。

一方、比重選別等の物理選別法で Br 入りプラスチックを分離濃縮し、その分離性能を評価するためには、粒子ごとの Br 分布を得ることが求められる。そこで今回 MLA（Mineral liberation analyzer）に着目して新たな臭素分析法の提案を試みた。MLA は、SEM-EDS を用いて粒子中に含まれる鉱物粒界を自動的に判定する分析装置である。測定の概要を図 2-38 に示す。

ASR 全体を粉砕後、MLA により定量分析を試みたところ、図 2-39 に示すように Br が検出された。よって，MLA を ASR 中の Br 定量分析に活用できる可能性が示唆された。

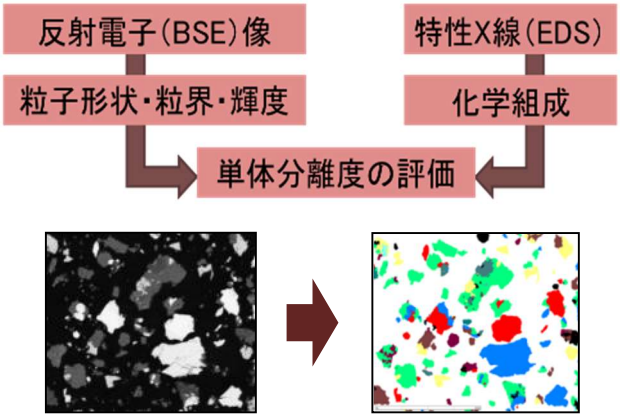


図 2-38　MLA による測定の概要

出所）早稲田大学作成

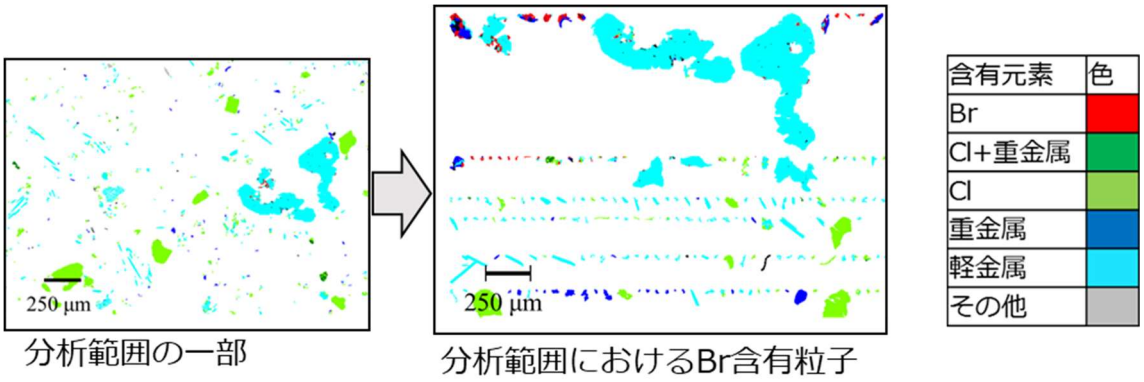


図 2-39　MLA による ASR 中 Br 分析の結果

出所）早稲田大学作成

2.2. 導入設備内容及び稼働結果

2.2.1. 試験原料供給設備の導入

これまでの試験結果等を踏まえ、本事業ではハリタ金属への実証設備の導入を進めた。水流選別によってASRからのPP回収を行うためには、原料となるASRを粉砕、洗浄、脱水し、水流選別装置へ投入する必要がある。

そのため、将来的な水流選別ラインの導入を見据えるとともに、水流選別装置のさらなる最適化を検証するためのサンプルを供給していくためにも、ハリタ金属に原料供給用の洗浄粉砕装置、洗浄脱水装置を導入した。各設備の機能および主な仕様を表 2-21、レイアウトを図2-40、導入後の写真を図2-41に示す。

昨今発生している鋼材等の入荷遅れと合わせて、加工業者の繁忙期と重なったために、当初のスケジュールより遅れが生じたものの、設備の導入は2019年3月に完了し、順調に稼働可能なことが確認できた。今後は本設備により安定的に原料を供給していくことで、次年度以降にも水流選別装置のさらなる改良を継続する予定である。また、水流選別装置の完成により量産体制が整った際には、本事業で導入した装置の処理能力等を向上させ、量産ラインとしての活用も検討していく。

表 2-21　導入設備の主な仕様

設備名	機能	主な仕様
①洗浄粉砕装置	『洗浄』と『粉砕』を同時に行い、強力な洗浄効果を発揮し、選別・加工工程に適した状態にする。	処理能力：50kg/h(10mm粉砕) サイズ：W815mm×L1,150mm×H1,970mm
②洗浄脱水装置	らせん状に本体を通過させ、強力に洗浄脱水し、残った汚れを落とす。	処理能力：50kg/h 方式：縦型遠心脱水 サイズ：W910mm×L2,425mm×H1,835mm

出所）エコメビウス作成

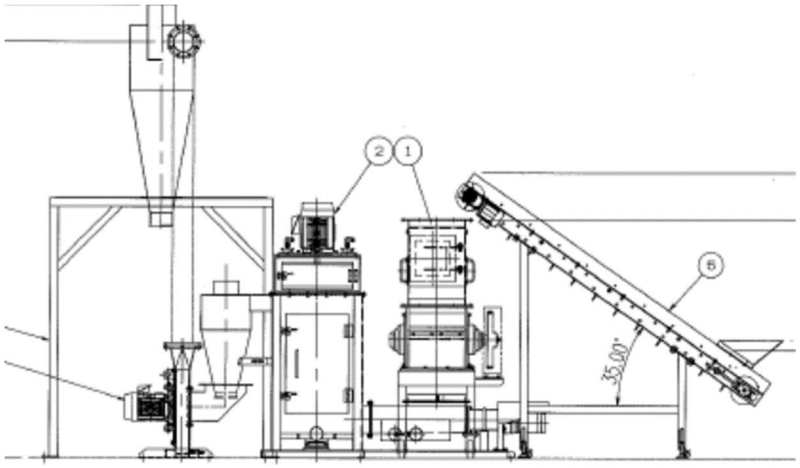


図 2-40　導入設備レイアウト図

出所）日本シーム作成

図 2-41　導入設備写真

出所）日本シーム作成

2.2.2. 水流選別装置の導入と改良

水流選別装置本体についても、本実証を踏まえ循環型試験装置の導入を進めている。本装置は、水槽部分をφ1000mm とし、供給装置は「水流供給装置」、処理能力は約 300kg/時を見込んでおり、原料投入はバッチ式になるものの、浮上品の連続回収だけでなく、沈降品も連続回収が可能である。今回導入を進めている水流選別試験装置のレイアウト図を図 2-42、装置設置の様子を図 2-43 に示す。

なお、浮上品の回収には「レアードコレクター」を採用したが、2.1.3 で示したように試運転時にレアードコレクターの不具合が発生した。そのため、今後は新たな回収装置の検討を続けて行く予定である。

現在、ハリタ金属での実地試験等も行っているものの、さらなる能力向上を目指して、次年度以降も日本シームと共同で設備改良を行っていく予定である。

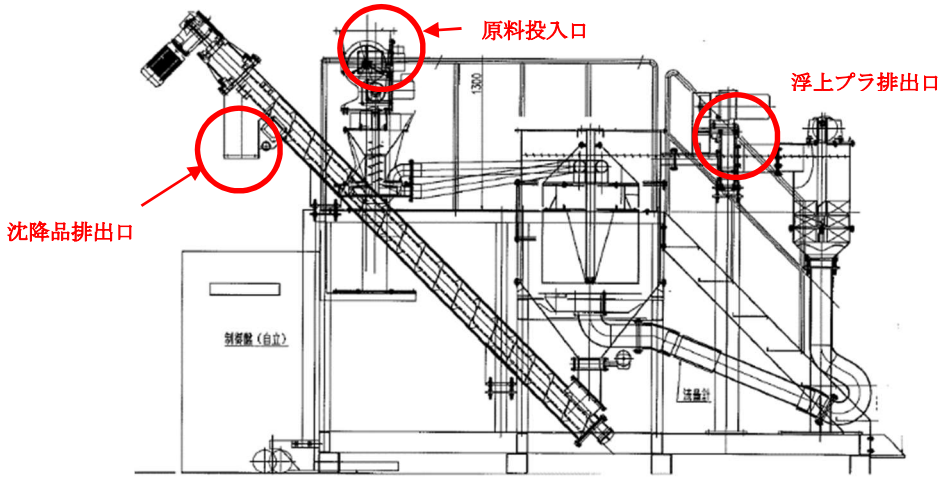


図 2-42　循環型の水流選別試験装置

出所）日本シーム作成

図 2-43　循環型の水流選別試験装置の設置

出所）日本シーム作成

2.3. 実施結果を踏まえた考察

本事業での成果について、水流選別装置の設計に大きな影響を与えた「流系シミュレーション」と、実際の装置設計および導入設備の開発に関する「装置開発」の 2 つの観点から整理したい。

＜流系シミュレーション＞

自由渦型と循環型に対するシミュレーションの結果、自由渦型では重粒子が軽粒子とともに回収されてしまう可能性を示唆することで、循環型の方が高精度な選別に適した装置として判断できたことは大きな成果であった。

また、循環型に対するシミュレーションの結果、円筒部分が高い方が高精度な比重分離が可能であること、循環型では密度差 50kg/m^3 までは明瞭に選別可能であることが分かったことは、高効率設備の設計に資する大きな成果であった。また、さらなる循環型に対する基礎的検討によって、低回転数条件において供給重量が増加すると分離効率が減少する可能性があること、低回転条件では処理時間が増大するが、十分な時間経過後には全量回収可能であること等も示唆された。

一方、今回のシミュレーションでは球形粒子を対象としており、その適用範囲は、粒子の供給量が少なく粒子間相互作用が小さい条件を想定している。そのため、粒子形状の違いが選別挙動に与える影響を評価することや、粒子の供給量が多く、粒子間相互作用が大きい条件での選別挙動を解析することができていない。また、水流選別装置の設計に対して、シミュレーションから得られた結果を十分にフィードバックできていない等の課題も残った。

詳細は後述するが、次年度以降はこうした課題を克服するシミュレーションをさらに進め、本実証で開発した循環型水流選別装置に研究成果をフィードバックしていくことで、装置の選別能力を向上させていくことが求められる。

＜装置開発＞

流系シミュレーションの結果を踏まえ、循環型の水流選別装置を開発したことは大きな成果であった。選別試験を経て最適な回転数を特定するとともに、ASR を原料とした選別品（浮上品）の組成分析でも比重 1.05 より軽い物質（PP・PE・PU・発砲ゴム類・木くず）が全体の 95.7%を占め、狙い通りの結果を得るに至っている。そのため、従来の重液選別装置に比べて歩留まりの向上が予測され、ASR の低減にも繋がると考えられる。

一方で、選別品の押出試験では異物（ゴム・綿・PVC・木くず等）過多の為、押出機のメッシュがすぐに詰まり、サンプルをペレット化できないという大きな課題が判明した。本事業では協和産業による静電分離等の別の分離方法を経ることでペレット化可能な水準にまで引き上げたが、コストを考慮するとより効率的な方法が求められ、水流選別機自体の選別能力向上も必要となる。

回収した製品の物性に関しては、コンパウンドを行うことで、自動車部品用途での目標物性を達成することができたことは成果だが、水流選別装置以外の協和産業での選別手段を活用した結果とも言えるため、こちらも選別能力の向上とさらなる物性評価が必要といえる。

なお、選別品への有害臭素系難燃剤の混入については、有害臭素系難燃剤の比重が高いため、水流選別装置での大幅な除去が可能であった。しかし、今後は混入ゼロが求められる可能性もあり、さらなる除去率向上に向けた取組みの検討が求められる。

機械的な設計に関しては、材料の供給装置、分解層は一定の成果を出せたが、選別後の回収装置に課題があった。樹脂内に繊維質が多く、浮上品回収スクリューではパンチングが詰まり、循環水流が乱れることが判明したため、循環水流を乱さず、安定した樹脂回収のため、レアードコレクターを設計・採用した。しかし、試験装置による実験の過程で、レアードコレクターでは1～2㎜程度の樹脂を噛み込んでしまい、長時間稼働が上手く行かないことが判明した。そのため、レアードコレクターに代わる回収装置を考案することが次年度以降の課題である。

3. 今後の実証事業実施における課題及び解決方法等

3.1. 現状の課題

本実証事業では、流系シミュレーションを活用することで、循環型水流選別装置の有効性を示唆し、ハリタ金属への導入を目指して試験装置の設計・開発が進められた点で大きな成果があった。また、水流選別で得られた回収品をもとに、コンパウンドを試みることで目標物性を達成する再生素材の製造が可能であることも確認できた。

一方で、各プロセスで課題も残しており、その概要を表 3-1 に整理した。各プロセスで課題はあるものの、次年度以降に量産ラインの検討を継続していく上では、特に太字部分の課題解決が不可欠といえる。

まず、今回実証した循環型の水流選別装置においても、ASR を原料とする浮上品では、多数の異物が混入しており、メッシュ詰まりによって再生材の製造が困難であった。その後に、別の選別工程を経れば、その分コスト上昇が予測されるため、選別能力を向上させる施策が必要になる。今回の実証では水流選別に最適な粉砕粒度や形状の特定ができなかったことから、シミュレーションを通じて投入原料を最適化していくことでも選別能力の向上に繋がる可能性がある。

また、設備の選別能力とは別に、設備導入の検討により明らかになった課題もある。浮上品回収装置の問題や上昇水流不足は歩留まりにも直接的な影響を与えるため、引き続き設備最適化の検討が求められる。

表 3-1　本実証事業で明確化したプロセスごとの課題

実証プロセス	課題
流系シミュレーション	✓ 今回のシミュレーションでは球形粒子を対象としたほか、粒子間相互作用が小さい条件を想定しているため、粒子形状や、粒子間相互作用が大きい条件下での選別挙動の解析には至らなかった。 ✓ 水流選別装置設計に対して、シミュレーションから得られた結果を十分にフィードバックできなかった。
装置開発	✓ **浮上品に PP 樹脂と比重が近い異物が多数含まれ、これら異物が押出機のメッシュの詰まりの原因となった。** ✓ **水流選別に最適な粉砕粒度、形状による樹脂の実挙動等の分析ができず、大まかな結果しか得られなかった。** ✓ **浮上品回収装置にレアードコレクターを採用したが、1～2 ㎜程度の樹脂を噛みこんでしまい、長時間稼働が上手くいかないことが判明した。** ✓ **上昇水流を生み出すポンプの力不足により、比重 1.03 より重い樹脂が浮上しなかった。**
その他	✓ 水流選別装置による大幅な有害臭素系難燃剤の削減効果が確認できたが、確実な選別を達成するには至らなかった。

出所）エコメビウス作成

3.2. 課題の解決方法

表 3-1 で示した課題の解決に向けて、次年度以降は次のような施策を予定している。

＜流系シミュレーション＞

まず、流系シミュレーションについては、非球形粒子も対象とした解析や、粒子の供給量が多く、粒子間相互作用が大きい条件での解析をするために、今年度開発した水流選別シミュレーションを改良した新規シミュレータの開発に取り組む。

具体的には、非球形粒子のモデルや粒子−流体間の相互作用力を考慮したモデルをシミュレーションに導入する。基礎的な実験と比較することで、これらのモデルを導入したシミュレーションの妥当性を検証する。

シミュレーションから得られた結果を水流選別装置設計にフィードバックするために、種々のパラメータが分離挙動に与える影響を系統的に評価する。具体的には、装置の運転条件（流速、回転速度等）や粒子の物性（大きさ、形状、密度等）を個別に変化させたシミュレーションを実施し、得られたデータから各種パラメータが分離挙動に与える影響を系統的にまとめる。

＜装置開発＞

今回の検証から異物（特に PVC 被覆・銅線・木片・ゴム）の除去が必須となった。2019 年度は、それら異物除去方法の確立を研究し装置の開発につなげる。

既存の異物除去技術（エアテーブルによる振動分離や帯電分離等）を活用し基礎研究を行い、それら要素を複合した新たな異物分離・除去技術を確立する。基礎技術を基に生産性・ランニングコストをも加味した装置の新規開発を行っていく。

浮上品の回収装置については、新規開発を検討する。現状具体的な装置形状は開発できていないが、日本シームのみでの設計・開発に拘らず、他社製機械を活用した装置形状にすることも視野に入れて開発を進めていく。また、上昇水流不足については、本事業内で既にポンプの強化等を行っているため、引き続き試験運転を続ける中で経過を観察していく。

その他、機械的な部分では水流供給機の大型化、シミュレーションも活用し、金属粒子等が残留しない流路形状への変更等を進める。粉砕粒度、形状の最適解を検証するため、早稲田大学での非球形粒子を対象にしたシミュレーションを活かしながら日本シームにて試験を進める。具体的には日本シームの洗浄粉砕・脱水試験機にて、同一樹脂で粒度の違う粉砕物を製作し、シミュレーションの結果と実試験結果を照らし合わせながら検討を進める。

＜その他＞

有害臭素系難燃剤である DeBDE を含有した自動車部品を入手し、実際の除去プロセスを再現して選別試験を行う。DeBDE 含有部品を使用して選別状況を確認した事例は過去に確認できず、設備開発に資する有用な知見が得られると考える。これにより、水流選別方式で対象物質の選別に繋がる改良の可能性を検討する。

3.3. 次年度以降の助成事業展開

3.3.1. 想定する事業の内容

（1） 流系シミュレーション

水流選別機の比重選別精度向上のために、引き続きシミュレーションを行う。特に、2019年度は主に粒子の供給量が多く、粒子間相互作用が大きい条件での解析をするためのシミュレーションの改良を実施し、種々の粒子密度や供給量の条件での解析をすすめる。また、本プロジェクト期間内に水流選別装置の設計に資する比重選別の機構に対する一連の考察を実施する予定である。

そのほか、水流選別後の産物におけるゴム等の異物を除去するための振動テーブル等の分離プロセスの予察的検討を実施する。粒子シミュレーションを用いて、振動テーブル上のゴム/樹脂等の挙動を解析することで、分離挙動に対する各種パラメータの影響の評価を行う。

（2） 装置開発

商品として量産可能な水準にまで本年度に開発した試験装置を改良することを目的として、水流選別前後での異物除去開発を実施する。まずは混入した各異物の特性を把握し、異物特性に合わせて色選別や帯電分離等の選別技術との組み合わせ可否を検討する。特に、ゴム類には振動テーブル等を用いた除去プロセスが有効と考えられ、シミュレーションデータも用いて検討を行う予定である。

また、各異物特性を利用し、前処理段階での異物除去の可能性も検討する。本事業内でも洗浄・粉砕機投入前に金属類と粗選別する日本シーム製選別機「なるとハリケーン型」の活用を試みたが、沈降品が多く排出部分に詰まってしまうという課題があった。そこで、新たな粗選別機の開発を試みる。

機械的な課題としては、レアードコレクターに代わる浮上品回収装置の開発が最優先となる。その他にも水筒部と外壁クリアランスの再検討等も行うことで、より回収効率の高い設備設計を目指す。また、異物除去装置の研究開発と並行して、後述するオートチェンジャー（メッシュに異物が詰まった際のメッシュ交換を容易にする装置）を活用して、十分に異物除去を行わなくても連続生産が可能かを検証する。

以上のように水流選別装置及びその前後の設備を含めたライン全体で異物除去能力を向上させ、回収したPP樹脂の物性を確認する。

（3） 有害臭素系難燃剤の除去可能性検討

本事業でも水流選別装置による大幅な臭素の除去は確認できたが、さらなる確実な選別を目指して、FT-IR、蛍光X線分析、溶媒抽出等の臭素系難燃剤の分析手法を検討する。また、樹脂表面に付着した異物、特に有害臭素系難燃剤の除去を目的として、樹脂の塗膜除去装置の活用も検討する。なお、サンプルにはDeBDEが実際に含有された部品を使用することで、事業化時の選別工程を再現し、有効性の高いデータを得ることを目指す。

3.3.2. 設備導入内容

3.1 でも言及したように、本事業の水流選別機において、異物（ゴム・フィルム・木屑・ウレタン・シリコン等）がメッシュに詰まってしまう為に安定した連続押出工程が出来ないことは大きな課題である。そこで、異物除去装置の研究開発と並行して、一定の異物が混入したままの材料を押出機に投入し、装着したオートチェンジャーを活用することで、連続生産が可能かを検証する。異物除去の工程を必要としない為にコスト削減が達成できる可能性があるが、その後の最終製品の品質に影響を与えることも懸念されるため、その物性についても検証を行う。

3.3.3. 事業の実施体制

ハリタ金属を代表事業者として、本年度と同様の 4 社と共同で事業を実施する。次年度の実施体制及び役割を図 3-1 に示す。

樹脂リサイクル装置のトップメーカーである日本シームでは、引き続き水流選別装置の改良と、量産に繋がる研究開発を行う。また、自動車業界以外でも樹脂リサイクルに関わる実績・樹脂コンパウンド技術をもつ協和産業では、リサイクル樹脂の製品化および水流選別後の異物の除去技術を開発する。今年度に流系シミュレーションを担当した早稲田大学理工学術院所千晴教授は、水流選別の精度向上のためのシミュレーションを引き続き実施し、また水流選別後の異物を除去する選別技術開発へのシミュレーションを新たに行う。

そして、今年度同様に事務局との窓口として報告書等の取りまとめを行うとともに、各社の技術をつなぎ発展させるパイプ役を担うエコメビウスと、自動車工業会のアドバイスを受けて、次年度も実証事業を推進する。

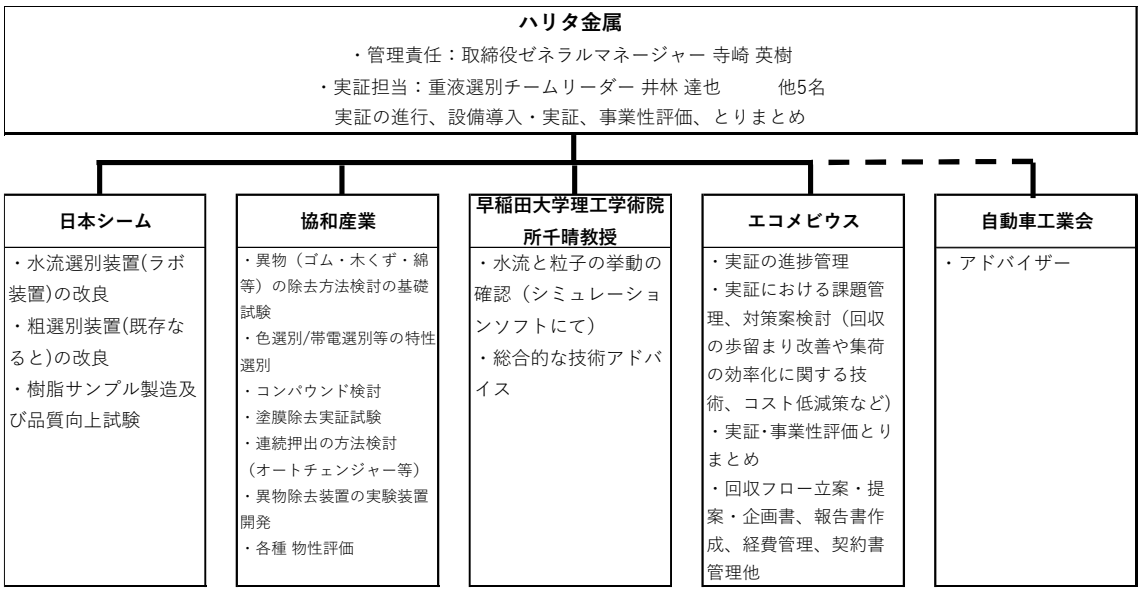


図 3-1　2019 年度実証体制

出所）エコメビウス作成

3.3.4. 事業スケジュール（工程表を含む）

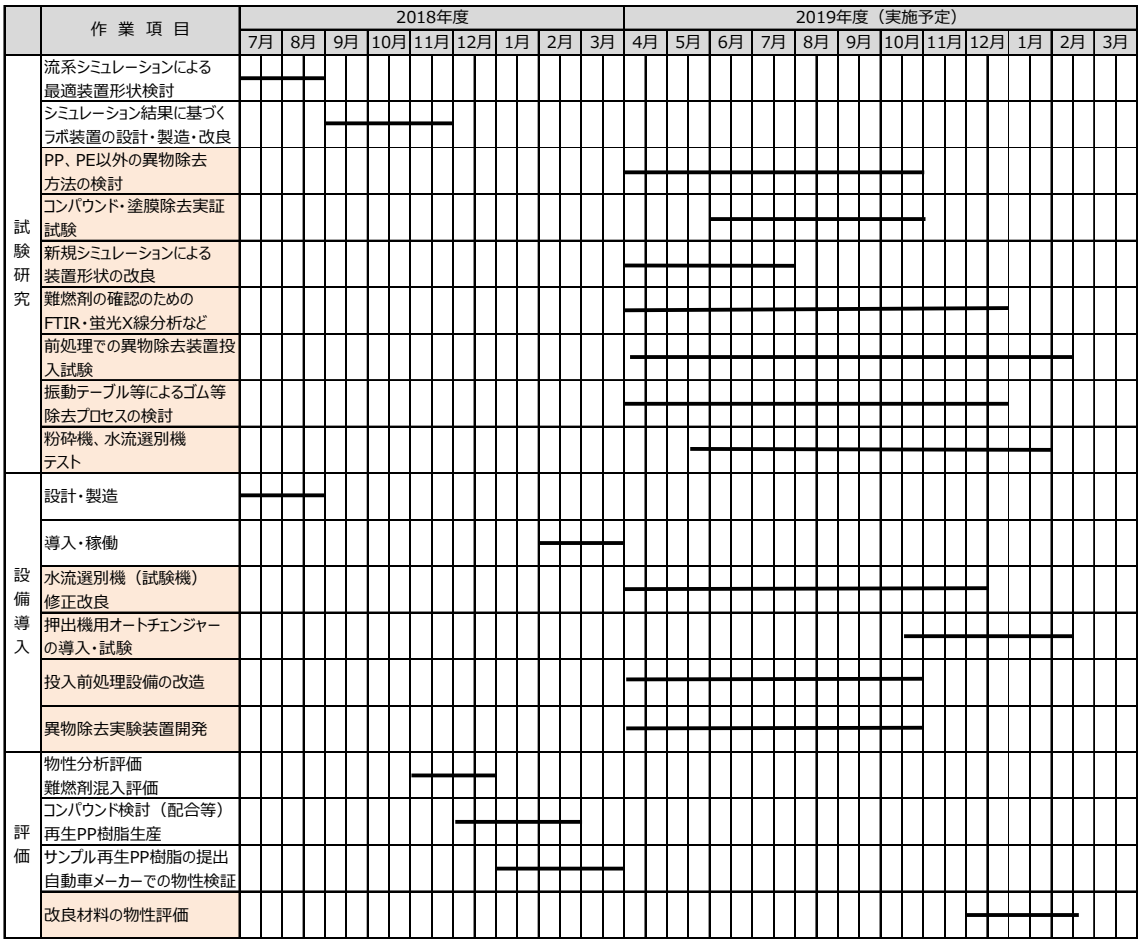
本年度の実施項目および次年度のスケジュールを表 3-2 に示す。3.3.1 で示した実施内容に関して、以下のように工程別に整理した。

試験研究については、事業開始当初から PP、PE 以外の異物の特性を活用した除去方法の検討を中心に、新規シミュレーションによる装置形状の改良、有害臭素系難燃剤確認のための分析方法検討や、前処理、水流選別以外の方法を用いた異物除去方法の検討を進める予定である。

また、設備導入についても、本年度の事業を通じて基本設備一式は導入済みであるため、事業当初からこの導入設備の改良を中心にライン全体の最適化を含めて検討を進める。

最後に、異物除去方法や水流選別機の最適化によって回収できた樹脂の物性について、コンパウンドも含めて評価を行う。

表 3-2　次年度事業スケジュール工程表



*色塗の項目が 2019 年度実証予定の項目

出所）エコメビウス作成

3.3.5. 資金計画

次年度の実証事業では、総額で約 8,370 万円の資金を要する計画である。

4. 事業化の計画

本事業では、水流選別装置について次年度以降も引き続き改良を進め、2020 年度までに製品化が可能な水準にまで完成度を高めることを目指している。

本事業で、ハリタ金属は原料供給用設備を導入し、水流選別装置も日本シームと検証を進めながら試験装置の導入を進めている。そのため、装置開発が完了する 2020 年度までには、ASR からの再生樹脂の回収を開始し、事業として確立することを目指している。なお、原料供給用設備や本事業で開発している水流選別装置は試験用に小規模なもので検討を進めているため、事業性が確認できた 2020 年度以降にはより処理能力の大きい量産装置への改良を検討し、年間 600t～700t 程度の再生樹脂回収を目指す。設備導入当初は各種トラブルや調整なども予想されるため、設備稼働率を 10%程度と仮定しているが、徐々に稼働率が上がるとともに運転の最適化による歩留まり向上なども期待できるため、2025 年度までに 627t の再生樹脂回収を目指す計画である。

また、将来的には自動車以外の家電や小型家電等の廃プラスチックについてもマテリアルリサイクルを進めることも視野に入れているほか、ASR 処理を行う他の企業への技術提供や知見共有を通じて再資源化技術の普及に努めることで、国内の循環型社会構築にも貢献できると考えている。

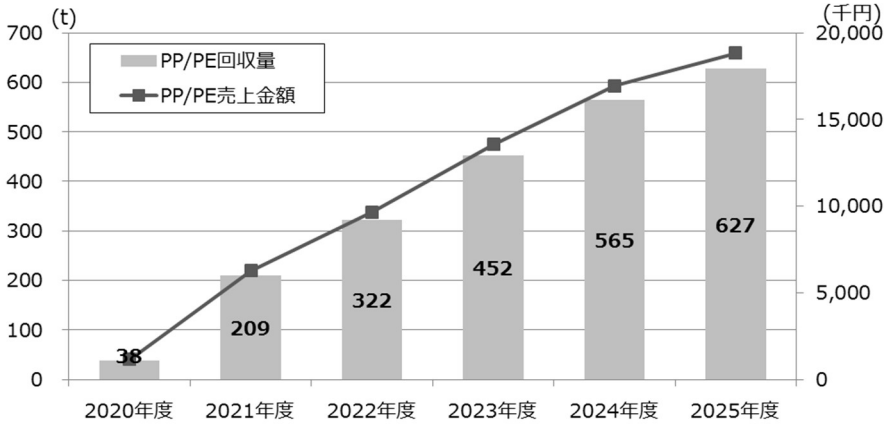


図 4-1　ハリタ金属での水流選別装置を用いた再生素材回収計画

出所）ハリタ金属作成

一方、日本シームは、循環型水流選別装置の有効性が確認できれば、自動車リサイクル業者はもちろんのこと、家電リサイクル業者、容器リサイクル業者等、全国の多様なリサイクル業者に積極的に販売・導入を進めていく予定である。そのため、ASR 削減だけでなく、リサイクルが困難なミックスプラスチックのマテリアルリサイクルにも大きく貢献できると考える。また、本設備の導入は日本国内だけでなく、他国にも展開可能と考えており、日本の高度なリサイクルインフラ技術を輸出することで、海外のマテリアルリサイクル促進にも寄与できる可能性がある。

さらに、協和産業では、本事業で得られた異物処理、コンパウンド技術、各種試験データ等をもとに、全国で発生する ASR からの樹脂回収を推進し、再生材の製造事業を展開できる可能性がある。ASR から製造した再生材の物性が確立し、安定的な材料供給が実現すれば、自動車業界を含めた各業界への販売展開が進められる可能性がある。

5.　事業の評価

5.1. ASR からの樹脂回収可能量

本実証事業期間中に、ハリタ金属で破砕した自動車破砕物の鉄、非鉄金属、ASR のマテリアルバランスを表 5-1 に示す。209,850kg の自動車を破砕した結果、ASR の構成比率は 31.1%（65,304kg）であった。また、その中で今回サンプル対象とした重質ダスト（13-25mm）は 3.3%（6,840kg）、ASR 中の比率にすると 10.4%であることが分かった。

なお、本試験では重質ダスト(13-25mm)を使用したが、軽質ダストや重質ダスト(25-100mm)でも同程度の回収樹脂が含有されている可能性がある。一方で、13mm-ダストには異物が多く、回収が見込みにくいことから対象に含まなかった（図 5-1、図 5-2 参考）。

表 5-1　廃自動車破砕物のマテリアルバランス（鉄、非鉄、ASR）

カテゴリー	回収品名	備考欄	重量（kg）	破砕全体での比率（%）	
鉄	鉄①	シュレッダー鉄製品	137,440	65.5%	65.6%
	鉄②	ASR（軽質）から回収	149	0.1%	
	鉄③	ピッキング回収	338	0.2%	
非鉄金属（MIX含む）	アルミMIX①	ECS回収品（軽量物）	195	0.1%	3.2%
	アルミMIX②	ECS回収品（重量物）	2,873	1.4%	
	ファインダーMIX	メタルソーター回収品	2,593	1.2%	
	金銀銅滓（13mm－）	エアテーブル回収品	138	0.1%	
	鉄付MIX	磁着物（非鉄ライン）	167	0.1%	
	大物MIX	100mm+（非鉄ライン）	493	0.2%	
	モーターコア	ピッキング回収品（鉄ライン）	160	0.1%	
ASR	①軽質ダスト		50,100	23.9%	31.1%
	②重質ダスト（13－25mm）	スクリーン選別（アンダーサイズ）	6,840	3.3%	
	③重質ダスト（25-100mm）	スクリーン選別（中間サイズ）	6,840	3.3%	
	④13mm－ダスト	エアテーブルダスト	2,094	1.0%	
	目切れ		-570	-0.3%	
	合計		209,850	100.0%	

出所）ハリタ金属作成

図 5-1　重質ダスト（13-25mm）

出所）ハリタ金属作成

図 5-2　重質ダスト（25-100mm）

出所）ハリタ金属作成

一方、表 2-13 で示したように、日本シームで水流選別試験を行った ASR 試料からの浮上品回収率が 11.8%であった。また、表 2-15 に示した協和産業による浮上品の組成分析によれば、再生材の素材となる PP と PE の比率[2]は 68.5%（PP：62.3%、PE：6.3%）であった。これらの比率を掛け合わせると約 8.1%であり、ASR 発生量の 8.1%が再生素材の原料として回収できると考えられる。

今回サンプルに用いたのは重質ダスト（13-25mm）であるが、他の軽質ダスト、重質ダスト（25-100mm）にも 8.1%の比率で再生素材が回収できると仮定すると、表 5-2 に示すように ASR 全体のうち 7.9%が回収できる可能性があることが分かった。

一方で、過去の調査では ASR 中のミックスプラスチックの比率は 30%超とされており[3]、今回の ASR 中のマテリアル樹脂の推定回収比率は 7.9%に留まっていることから、まだまだ PP や PE の回収余地が高いとも考えられるほか、推計精度の正確性にも疑問が残る。

次年度は、水流選別のマテリアル回収率向上と並行して、軽質ダスト及び重質ダスト中のマテリアル樹脂の含有比率についても引き続き調査し、再生素材の回収率試算の確度向上にも取組む必要がある。

表 5-2　今年度実証結果からの回収可能性

マテリアル樹脂回収可能品名	マテリアル樹脂比率（%）	回収品名重量（kg）	マテリアル樹脂回収可能想定重量（kg）	**ＡＳＲ中からの回収比率（%）**	破砕品全体からの回収比率（%）
①軽質ダスト	8.1%	50,100	4,037	**7.9%**	2.4%
②重質ダスト（13－25mm）		6,840	551		
③重質ダスト（25-100mm）		6,840	551		
		63,780	5,140		

[2] 最終的には PP のコンパウンド製品を目指しているが、PE についても再生材原料として活用可能であるため、ここでは PP と PE の比率として算出している。

[3] ASR の組成分析の結果として、平成 25 年度自動車リサイクル連携高度化等支援事業「光学選別機を利用した ASR 由来のプラの材料リサイクル及び油化事業」（株式会社レノバ、2014 年 3 月）では ASR 中のミックスプラは 32.9%、「平成 22 年度環境省請負業務結果報告書「自動車破砕残渣における性状把握調査業務」（株式会社環境管理センター、平成 23 年 3 月）では、ASR 中のミックスプラは 38.5%とされている。

5.2. 有効性の評価

本実証事業は、自動車のマテリアルリサイクルの促進と、それに伴う ASR の削減において、高い有効性があると考えられる。

表 5-3 に示すように 2017 年度の ASR 発生量は 55 万 t を超えており、1 台あたりの ASR 量は 185.1kg となっている。図 5-3 に ASR 発生量の推移を示す。日本は高い ASR リサイクル率を誇っており、2017 年度の比率は 98.2%にも達しているが、ASR 発生量および 1 台あたりの ASR 量については、改善の余地が少ないこともあり横ばいで推移している。

こうした中、本事業の ASR から PP、PE 樹脂を選別して再生素材に活用する試みによって、7.9%の素材がマテリアルリサイクルできる可能性が示された。これにより ASR の削減が実現すれば、横ばい状態が続く自動車リサイクル率の向上に繋がり、最終処分量の低減にも貢献できると考えられる。

また、ASR の低減については経済的な恩恵も大きい。現在 ASR 処理に要するユーザー負担は約 7,000 円/台に達しているが、ASR の削減が実現すればリサイクル料金の低減にも繋がる。7.9%の ASR がマテリアルリサイクルされると仮定すれば、約 550 円のリサイクル料金低減に繋がる計算になる。1 台あたりにすると低減は限定的だが、2017 年度の使用済自動車の引取台数が約 290 万台であることを考慮すれば、全体では 16.4 億円の ASR 処理費用低減にも繋がる。

また、自動車全体では 1 台あたり約 50kg の PP が使用されているとされており、本実証事業で回収が見込まれた 14.6kg（185.1kg の 7.9%）と比較すると、回収余地は大きい。水流選別装置の普及等により、将来的に約 50kg の PP がすべてマテリアルリサイクルできると仮定すれば、ASR 処理費用の大幅な低減にも繋がるほか、自動車リサイクル率へと与えるインパクトも大きい。

近年では軽量化の進展により自動車への樹脂使用量は増加傾向にあり、本事業が循環型社会に貢献できる余地は大きいと考える。

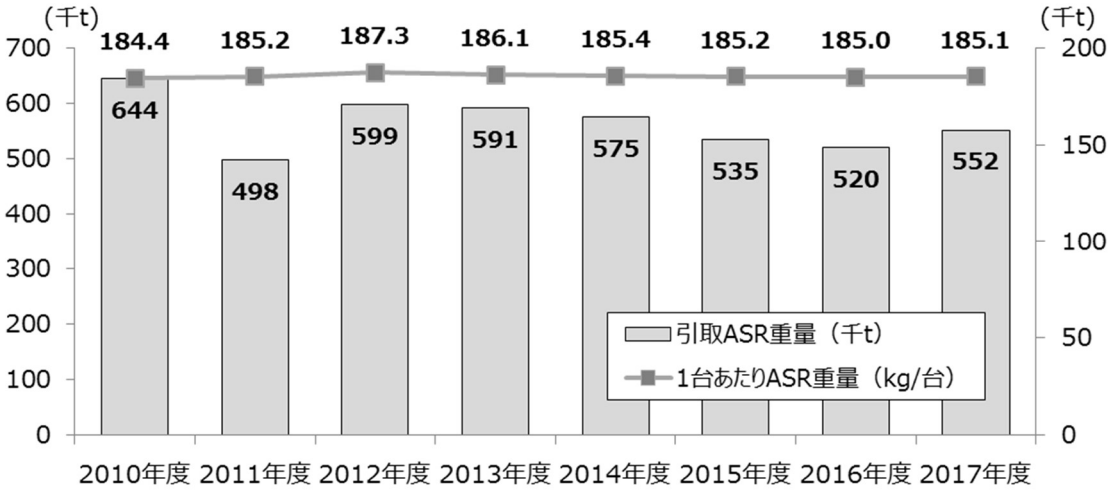


図 5-3　ASR 発生量の推移

出所）経済産業省資料を基にエコメビウス作成

以上