

建設混合廃棄物処理の効率化に向けた
AI・ロボティクス導入の検討

報告書

令和4年3月

株式会社イーアイアイ

内容

1. 事業の背景と目的.....	1
1-1 事業の背景.....	1
1-2 事業の目的.....	1
1-3 事業の内容.....	1
1-4 検討体制.....	2
1-5 検討スケジュール.....	3
2. 建設混合廃棄物の処理・リサイクルにおける課題の検討.....	4
2-1 建設廃棄物中の建設混合廃棄物の概要.....	4
2-2 建設混合廃棄物の処理・リサイクルの現状と課題.....	6
(1) 排出段階における現状と課題.....	6
(2) 処理段階における現状と課題.....	9
(3) リサイクル利用需要先の課題.....	10
(4) 将来新たに想定される課題.....	10
3. 建設混合廃棄物の処理・リサイクルにおけるAI・ロボティクスの利用ニーズの検討.....	12
3-1 建設混合廃棄物の処理方法と選別の状況.....	13
3-2 手選別等に係る対応と課題.....	17
(1) 土間選別.....	17
(2) 手選別.....	18
(3) 一次選別（土間選別＋手選別）.....	18
3-3 AI・ロボティクスの利用状況.....	21
(1) AI・ロボティクスの利用事例.....	21
(2) ヒアリング調査結果.....	41
3-4 手選別に代わるロボット選別システムの導入課題.....	44
4. 建設混合廃棄物リサイクル事業者と連携したAI・ロボティクス利用の検討・実証.....	46
4-1 AI・ロボティクスのプロトタイプモデルの開発.....	46

4-2	試験設備における選別実証	56
	(1) 目的.....	56
	(2) 実施概要.....	56
4-3	実証結果のまとめ.....	57
	(1) 単体選別.....	57
	(2) 複合選別.....	57
	(3) 今後の技術開発の課題.....	59
5.	建設混合廃棄物処理の効率化に向けた AI・ロボティクス導入ロードマップの検討 ..	61
5-1	AI・ロボティクスにおける今後の開発テーマの明確化	61
	(1) 手選別支援システムの開発	62
	(2) AI 自動選別ロボットの開発	63
5-2	AI・ロボティクスシステムの実装と普及拡大.....	64
	(1) ロボット導入に伴う処理フロー見直し（ヒト共存型システム）	65
	(2) 施設整備の留意事項	67
	(3) 普及・啓発・評価.....	68
5-3	ロードマップの検討	70

1. 事業の背景と目的

1-1 事業の背景

建設混合廃棄物は、平成30年度発生量228万tであり、全建設廃棄物7,440万トンの3%程度となるが、特定建設資材廃棄物3品目を除いた1,109万トンの20%を占めている。建設混合廃棄物の発生量自体は485万t（平成7年度）と比べて1/2に低減したが、リサイクル率は63%程度にとどまっており、特定建設資材廃棄物のリサイクル率95%以上と比べて低い。

建設混合廃棄物は、発生工種（新築、解体、改修）、工事区分（非木造、木造）、発生現場の制約条件がある中で発生する。内容は、引火性や有害性のあるものを含み、大きさ・形が多様で、がれき、金属くず、木くずなどの重量物や廃プラ、紙くずなどの軽量物が混合して排出され、さらに、複合建材の存在や、表面の土砂分の付着等のため、分別排出や、選別などの取扱いが難しい。

建設混合廃棄物処理施設では、リサイクルや処理の安心・安全を目的に、手選別、機械選別を組み合わせた対応として、危険物、リサイクル対象物の回収と、破碎・選別などの機械処理が行われ、利用先向けに品質管理後に出荷される。このうち、処理の大きな役割を担う土間選別、手選別では、作業人員の確保や労働環境の改善という課題を抱えており、省人化、省力化による作業効率化や、リサイクル率の向上、労働環境の改善等が喫緊のテーマとなっている。

近年、急速にAI・IoTを活用したロボットシステムの発展を背景として、廃棄物処理分野においても、手選別に係る負担軽減や、リサイクル需要先の受入基準の強化への対応等に向けて、AI・IoTを活用した光学選別、ロボット選別による個体識別や、高精度な選別システムの導入が必要となっている。

1-2 事業の目的

建設混合廃棄物の処理における手選別に係る負担軽減や、リサイクル需要先の受入基準の強化への対応等を踏まえて、望ましい選別処理のあり方を検討し、人と共存した機械化（AIロボット選別）の可能性について具体的な実証事業を含めた検討を行うとともに、それらを実現するためのロードマップの検討を行う。

1-3 事業の内容

① 建設混合廃棄物の処理・リサイクルにおける課題の検討

建設混合廃棄物の発生から再生利用までの処理プロセスにおいて、排出段階、処理段階等における現状の課題及び、将来新たに想定される課題を抽出し、解決すべき事項を整理する。

具体的には、既存文献や、処理業者へのヒアリング結果をもとにとりまとめを行う。

② 建設混合廃棄物の処理・リサイクルにおける AI・ロボティクスの利用ニーズの検討

建設混合廃棄物の処理現場における光学選別機、AI・ロボティクスなどの利用ニーズを把握するため、処理対象物の特徴、品目ごとの機械選別の適用可能性、処理後物の需要先が求める品質基準等を把握する。

具体的には、首都圏の5か所の処理業者へのヒアリングを通じて、情報収集を行う。

③ 建設混合廃棄物リサイクル事業者と連携した AI・ロボティクス利用の検討・実証

建設混合廃棄物リサイクル事業者と連携し、自社で所有する AI・ロボット選別機のプロトタイプをフィールドに移設した上で、実証試験として、試行的に選別処理を行い、検討課題を明確とする。

なお、実証実験では、処理業者が実際に手選別で回収した廃棄物試料をサンプルとして、AI 画像認識による機械学習の他、自社の保有するプロトタイプモデルを用いたロボット制御システム及び、システムインテグレーションのカスタマイズによる簡易開発を行う。

④ 建設混合廃棄物処理の効率化に向けた AI・ロボティクス導入ロードマップの検討

フィールドでの実証を踏まえて、AI・ロボティクスシステムの技術的な課題及び、現場に適合させる際の課題を抽出するとともに、課題の解決に向けたポイントを整理したものをロードマップとしてとりまとめる。

1-4 検討体制

今回のロードマップの作成は、中期的な視点から建設混合廃棄物の処理が抱える現状と将来の課題を踏まえるとともに、建設混合廃棄物の処理を対象とした AI・IoT、ロボット等の技術システムの構築課題という両方の側面からの検討が必要となる。そこで、処理現場の実情に即した具体的かつ幅広い情報把握を進めるとともに、将来方向を見通した高い見地からの検討を行う必要があるため、下図のとおり、東京都、早稲田大学、高俊興業(株)、(株)イーアイアイの4社からなる産学官の連携する体制構築を進めた。

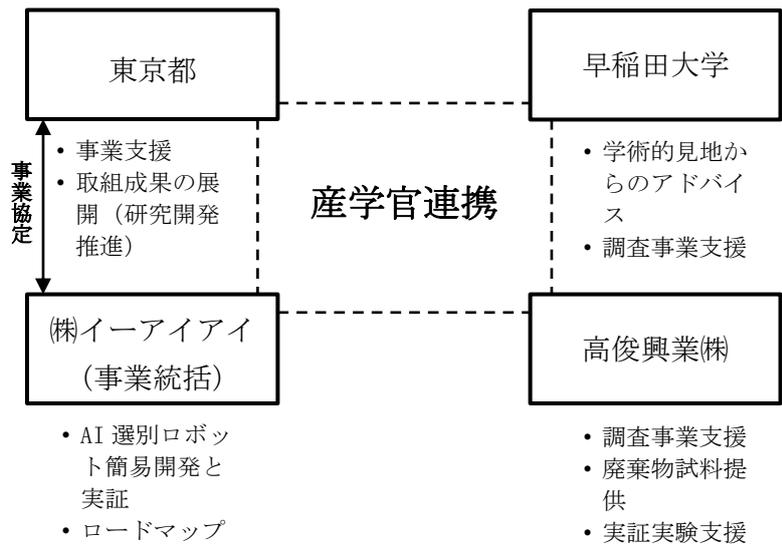


図 1-1 検討体制

1-5 検討スケジュール

検討スケジュールは、表のように、①現状把握（5社ヒアリング）、②システム開発（カスタマイズ）と実証、③ロードマップの検討を主題に、並行した取組みを進めた。

表 1-1 事業の実施スケジュール（9月末契約）

事業項目	10月	11月	12月	1月	2月	3月
1. 建設混合廃棄物の処理・リサイクルにおける課題の検討	→					
2. 建設混合廃棄物の処理・リサイクルにおけるAI・ロボットの利用ニーズの検討	5社ヒアリング・まとめ			→		
3. 建設混合廃棄物リサイクル事業者と連携したAI・ロボティクス利用の検討・実証	開発準備	→		システム開発 (AI, ロボット制御、システムインテグレーション)		
		→		実証準備・実施		
4. 建設混合廃棄物処理の効率化に向けたAI・ロボティクス導入ロードマップ検討				→		
全体会議	●			●		●

2. 建設混合廃棄物の処理・リサイクルにおける課題の検討

建設混合廃棄物の発生から再生利用までの処理プロセスにおいて、排出段階、処理段階等における現状の課題及び、将来新たに想定される課題を抽出し、解決すべき事項を整理した。

具体的には、既存文献として、環境省、国土交通省の調査事業としてとりまとめられた建設廃棄物関連のものから、建設混合廃棄物に係る記述等を抽出するとともに、処理業者へのヒアリング結果をもとにとりまとめを行った。

表 2-1 対象文献

タイトル（発行元）	内容
平成 27～令和 2 年度 建設廃棄物再資源化調査報告書（環境省）	建設リサイクルの課題と要因の把握と対応策の整理
平成 30 年度 建設廃棄物含有残留性有機汚染物質報告書（環境省）	HBCD 及び Deca - BDE の建材への使用状況と現行の処理方法
平成 30 年度 建設リサイクル制度調査報告書（国土交通省）	建設リサイクル制度の運用における実態や課題の抽出
令和 2 年度 産業廃棄物処理業における選別に係る実態調査報告書（環境省）	最新の選別施設に関する情報を収集

2-1 建設廃棄物中の建設混合廃棄物の概要

建設混合廃棄物は、引火性や有害性のあるものを含み、大きさ・形が多様で、がれき、金属くず、木くずなどの重量物や品目ごとに成分が異なる複合建材などが混合しており、その表面に土砂成分が付着している特徴がある。その発生工種も多様であり、現場条件により発生理由も異なる。

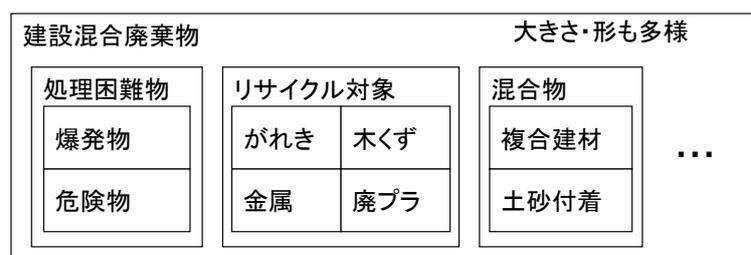
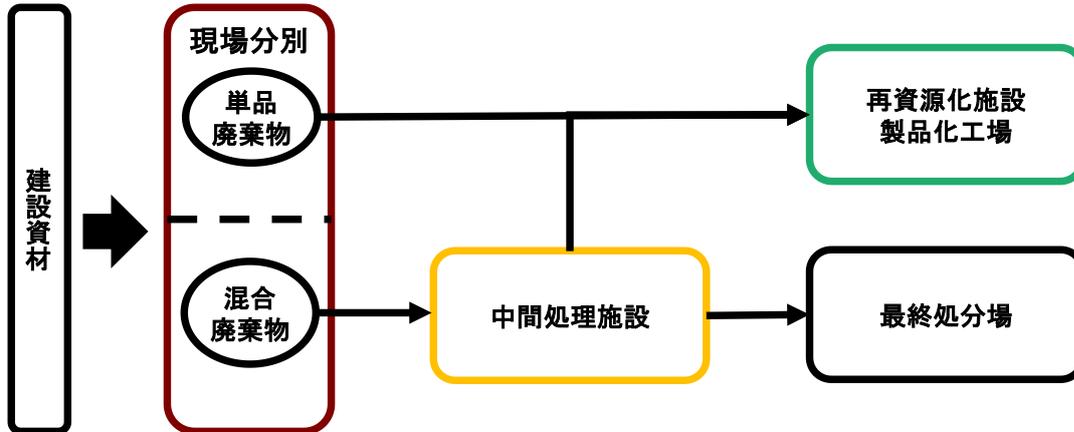


写真 2-1 建設混合廃棄物の一例

建設混合廃棄物の発生実態、処理実態を把握し、それに伴う問題点と課題を抽出するため、建設混合廃棄物の排出段階、処理段階、利用段階について調査を実施した。



各段階における課題

- 発生抑制
複合建材の使用抑制
- 現場分別の徹底
できるだけ混合廃棄物を排出しない
- 選別の高度化を推進して、最終処分物を削減する
選別高度化
作業負荷の削減
選別作業の自動化
- 利用品質の明確化
利用需要の拡大
CO2の排出量の少ない利用用途へのシフト

図 2-1 建設混合廃棄物処理・リサイクルの課題

建設混合廃棄物とは、環境省が平成 11 年度に発表した「建設工事等から生ずる廃棄物の適正処理について」によると、建設混合廃棄物の定義は「建設工事等から発生する廃棄物で、安定型産業廃棄物(がれき類、廃プラスチック類金属くず、ガラスくず及び陶磁器くず、ゴムくず)とそれ以外の廃棄物(木くず、紙くず等)が混在しているものを建設混合廃棄物という。」となる。その排出は、ほぼ全ての工事（新築工事、解体工事、改修工事）現場で発生している。

建設廃棄物の場外搬出量推移の図をみると、建設廃棄物の場外搬出量の全体量は、減少傾向にあるものの、建設混合廃棄物の場外搬出量についてはほぼ横ばいになっている。建設混合廃棄物の場外搬出量は、平成 30 年度 228 万 t で、全建設廃棄物 7,440 万トンの 3%程度となるが、特定建設資材廃棄物 3 品目（コンクリート塊、アスファルト塊、建設発生木材）を除いた 1,109 万トンの 20%を占めている。建設混合廃棄物の発生量自体は 485 万 t（平成 7 年度）と比べて 1/2 に低減したが、リサイクル率は 63%程度にとどまっており、特定建設資材廃棄物のリサイクル率 95%以上と比べて低い。

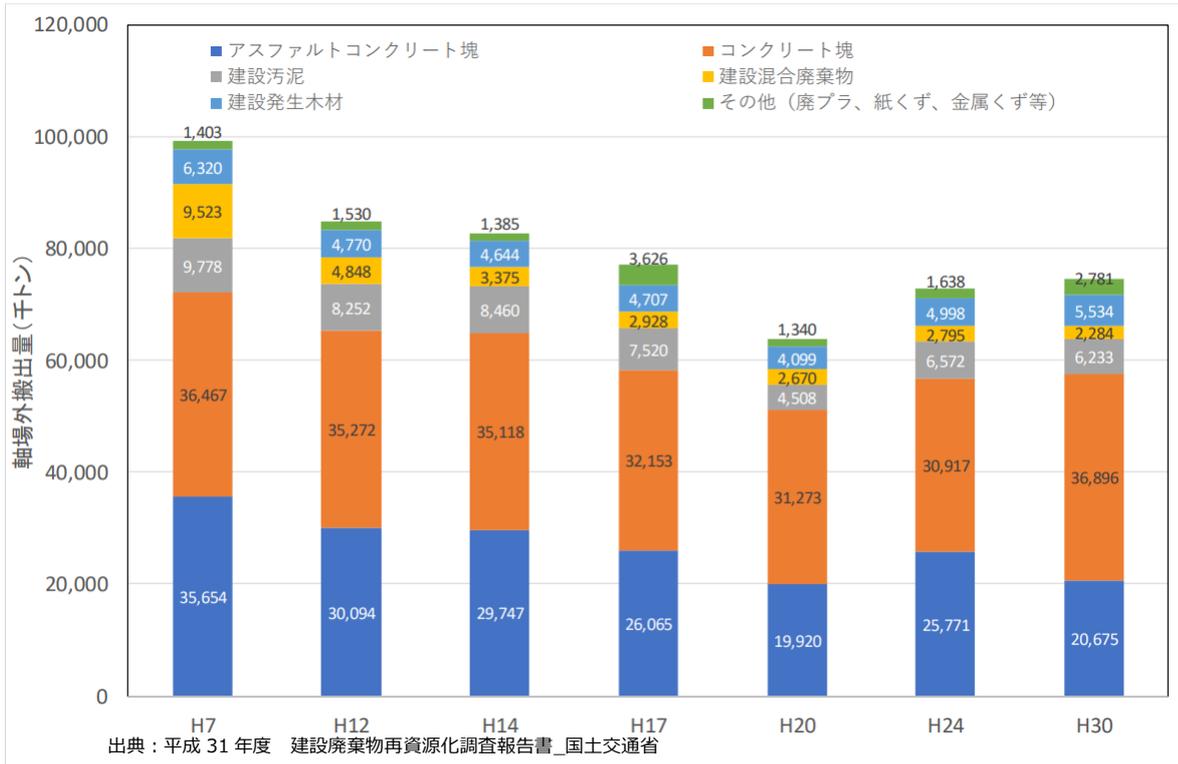


図 2-2 建設廃棄物の場外搬出量の推移

(建設混合廃棄物が発生する理由)

- ① 使用資材の形状や物性の多様化、さらに、複合建材の利用増加に伴い、分別がわかりにくく、容易に行えないことや、そもそも分別が困難である場合がある。
- ② 建設現場においては、施工に関わる協力業者の出入りも多く、分別に関する啓蒙教育の徹底が容易に行えない。
- ③ 都心部においては、施工場所の敷地面積に制限があることや、施工時間などの制約から、廃棄物の分別回収や、分別後の一次保管のためのスペースを確保することが難しい。

建設現場（解体、改修含む）では、分別回収の取組みが進む一方、現場での対応が難しく、かつ、複合建材の発生などに伴い、建設混合廃棄物の性状が変化してきた。

建設混合廃棄物の処理方法は、廃棄物の品質の悪化、法規制、需要先の要求などを踏まえて、人手や機械を組み合わせた処理システムの高度化、選別回収物の品質向上などが課題となっている。

選別回収は、土間選別、手選別により処理困難物とリサイクル対象物を選別した後、個別リサイクルや、要求品質を考慮した更なる機械選別が行われるが、人手不足や就業環境の改善などが課題となっている。

2-2 建設混合廃棄物の処理・リサイクルの現状と課題

(1) 排出段階における現状と課題

建設廃棄物が発生する現場では、常に現場分別が行われるが、建材面、分別教育

面、分別作業面の三つの課題があり、建設混合廃棄物としての排出とならざるを得ない状況がある。

① 建材面

使用資材の形状や物性の多様化、さらに、複合建材などの利用増加に伴い、現場での分別回収が容易に行えない場合がある。特に、複合建材は特別な解体方法が必要な場合もあり、現場での分別は困難である。

表 2-2 複合建材の例

	分類区分	要因	建設資材名称
1	分別解体できない	完全な分別不可能	【断熱材】 土間下の断熱補強、硬質ウレタンフォーム
2	分別解体できるが、困難	コストと時間、解体技術を要する。適正な解体・処理の情報が少ない。	【アスベスト】 押出成形セメント板、アスベスト吹付 【断熱材】 金属部材入りウレタンフォーム、フロン入り断熱材、折板二重葺き断熱工法、コンクリート躯体に挟まれた断熱材 【複合建材】 アスベスト含有建材と非アスベスト建材の複合材、アスベスト含有建材と石膏ボードの複合材、石膏ボードと他建材の複合材、コンクリートに他建材が接着したもの、管理型埋立処分対象建材又は安定型処分処理対象建材との複合、屋上防水シート 【建設資材】 スレート材、高強度コンクリート、CCA 処理木材 【工法・構法】 プレキャストコンクリート構造、CFT 造、合理化工法、ハイテンションボルト、スキップフロア、S1 工法
3	分別解体できるが、しない	コストと時間を要する。適正処理方法不明。現場状況、コストの制約	【アスベスト】 アスベスト含有塗料、アスベスト吹付け 【断熱材】 ウレタンフォーム吹付 【複合建材】 石膏ボードと他建材の複合材、OA フロア 【工法・構法】 橋脚の耐震補強
4	再資源化できない又は、困難	埋立主体。情報が少ない。実現可能な再資源化方法が未確立	【断熱材】 グラスウール 【石膏ボード】 有害物質を含入した石膏ボード、繊維強化石膏ボード 【複合建材】 アスベスト代替パルプ繊維 【建設資材】 ALC 板、ファイバーコンクリート、レジコンクリート、木質系セメント板

(参考) 環境省「平成 27 年度建設廃棄物の再資源化に関する調査・検討業務 (平成 28 年 3 月) (株)リーテム」をもとに作成

また、プラスチック建材については、新築工事、解体工事で、様々な建材が発生しており、素材も PVC、PC、PS、PU、PP、PE 等様々であるため、見た目での判別は難しく、塩ビ管、シート類等のようにマテリアルリサイクルができるもの以外は、分別回

収されずに混合状態のまま処理施設に搬送されている。

表 2-3 プラスチック建材の工種別の発生内容

種類	新築工事	解体工事
PVC (塩化ビニール)	養生シート、塩ビ管、雨樋、その他塩ビ建材、シート防水、バルコニー用シート防水、クッションフロア、電線被覆、塩ビ系の混合プラスチック、塩ビクロス	上下水道管・継手、雨樋、波板、サッシ、床材・Pタイル、壁紙、防水シート、ターポリン
PC		波板、プレート
PS	発泡スチロール、床パネル断熱材、設備機械緩衝材、スタイロフォーム、梱包保護発泡剤、	断熱材、畳の芯、梱包材
PU		断熱材
PP	PP バンド、PP バンドストッパー、	梱包材
PE	さや管／架橋ポリエチ管、ブルーシート、エアーカーペット、内装梱包、和室仕上げ材梱包、色付きエアーカーペット・梱包	梱包材
その他	軟質系プラスチック、カルフォーム、サーモガード、テープ類、その他硬質プラスチック、アスファルトテープ、JPF 製ビスベルト、その他ビスベルト、アスファルトルーフィング、壁クロス	床材 (P タイル、長尺シート等)、浴槽、キッチン部材、クーリングタワー、繊維強化プラスチック建材、梱包材、人工芝、ホース (耐圧等)、床材 (カーペット)、壁紙 (不織布)

② 分別教育面

工事現場においては、施工に関わる協力業者の出入りも多く、分別に関する啓発が容易に行えない。同時に、これまでの分別解体には明白な定義が無く、「対応方法が違法ではない」などの理由で十分な分別解体が行われない場合もある。

さらに、新築工事の端材については、きれいに分類でき、ラベルの確認も容易なため、分別排出されやすいものの、解体工事や改修工事では、建材の材質や成分が分かりにくく、分別回収も難しい。また、建物ごとに利用建材が異なる場合や、同一建材であっても、生産者の違いや生産時期の違いで材質が異なるなどから、教育したくてもできない状況にある。

③ 分別作業面

現場での分別作業は、一時保管のスペース確保や、分別・運搬コストによる制約にも影響される。実際に、分別回収を徹底して単品化排出ができる現場は大型現場に限られており、中小現場では、同様の分別対応は困難であるとされている。そのため、処理業者は、処理過程において混合されると困るもの (石膏ボード等) には、高い価格設定をして排出抑制を喚起することが限界となっている。

場内の保管場の運営においても、多品種少量の建材を対象とした材質ごとの区分や保管は管理コスト等の面でも適切ではない。

上記の結果、現場対応としての分別回収には限界があり、更なるリサイクル高度化には、現場分別以外での対応が必要であるといえる。

(2) 処理段階における現状と課題

建設混合廃棄物リサイクル事業者は、受入れ、土間選別、手選別、物理選別、資源化・処分の五つのステージを通じてリサイクルを行っている。作業手順に従い、処理段階における現状と課題を整理した。

① 受入段階

処理施設における混合廃棄物の受入れは、受入品目の名称、受入基準等について排出事業者と処理業者間で必ずしも統一されているわけではない。また、混合廃棄物中の品目ごとの受入重量（t）の管理は難しいため、リサイクルされたとしても品目別の処理実態については把握しにくいのが現状である。

② 土間選別と手選別段階

土間選別は、建設混合廃棄物の中間処理施設へ搬入時に行われる大まかな選別のことで、人と重機を用いて、危険物、有価物、単品化処理物に分けられる。一方、手選別は、土間選別後にベルトコンベヤ上で、同様の対象物を選別回収するものとなる。現場で分別できなかった廃棄物を対象に、手選別に頼る選別が必要となり、作業員に依存せざるを得ないのが現状である。土間選別と手選別を通じて、混合廃棄物の7割近くが選別され、単品化処理に仕向けられるケースもあるが、作業は危険が伴う上、作業環境も悪く、作業員への負荷が大きい。腰痛になる作業員も多く、解決策は見いだせていない。

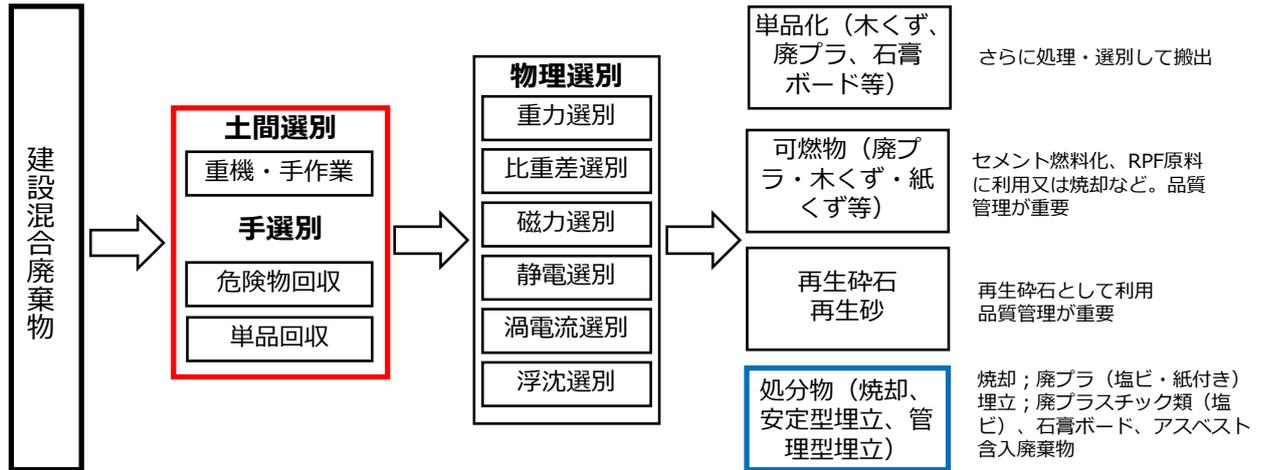
③ 物理選別

物理選別は、土間選別、手選別などの一次選別後に行われる機械選別を意味しており、破碎及び、比重差、磁力、静電などの物理性質を利用した選別などにより分別作業を行いリサイクルに向けた品質調整が行われている。こちらは、既に自動化処理がなされており、故障対策を除けば、少数の管理者を配置して運営されている。

④ 資源化・処分

資源化・処分ステージは、単品化処理施設、混合廃棄物の精選別によるリサイクル製品化（再生砕石、廃プラ等可燃物）、その他焼却・埋立処分されるものに分けられる。需要先の利用現場あるいは、利用施設側の要請で、異物の除去や、禁忌品の含有率などの管理が必要となるため、光学選別機などの高度な選別設備を導入する場合もあるが、処理の前段の土間選別や、手選別機能の強化などが求められる場合が多い。

★処理施設の主な取組



★問題点

分別解体レベルがバラバラ
受入基準が混乱
重量 (t) による適正な数量
管理できない

手選別が多く、作業員に依存
作業員への負担が高い
危険度が高い
選別困難なものもある

処分物の適切な管理と、減量化

図 2-3 建設混合廃棄物処理段階における現状と問題点

(3) リサイクル利用需要先の課題

建設混合廃棄物のリサイクルは、廃棄物の単品化处理に加えて、リサイクル先の要求する品質や利用需要量への対応も重要となる。建設混合廃棄物の基幹処理ラインを通じて回収されるものの代表的な製品には再生砕石、可燃物（廃プラスチック、紙くず、木くず、繊維くずの混合物）がある。

再生砕石はコンクリート塊から、木くず、廃プラ、金属くず、その他（タイル、レンガ、ガラス等）を除去して再生したものであり、リサイクル率が高く、道路工事によく使われてきた。しかしながら、道路に代表される再生砕石の利用需要は季節性があり、常にバランスよく利用されるわけではないため、中間処理施設に大量にストックせざるを得ない状況もあり、需給バランスの調整が課題となっている。

廃プラスチック単体については、塩ビ管はマテリアルリサイクルされ、ブルーシート、梱包材等の一部はRPF（固形燃料）化等がされ、その他の塩ビ建材は埋立処分がされている。また、可燃物については、受入基準としては、塩素濃度、金属、不燃物などを管理した後、セメント燃料化、焼却・発電利用などによるエネルギー回収がされている。今後は、カーボンニュートラルへの対応のため、可燃物の焼却・発電等の利用抑制なども求められることになるなど、カーボンニュートラルとリサイクル促進が建設混合廃棄物の処理の新たな課題となりつつある。

(4) 将来新たに想定される課題

建設混合廃棄物処理において、今後、さらに留意が必要な事項として、処理の効率化、合理化、社会的な要請への対応の観点から、図の事項が考えられる。

処理段階に係る課題として大きいのは、工事現場における複合建材の利用抑制や、

危険物の分別解体の徹底が進まない場合、中間処理施設におけるリチウムイオン電池の破碎等に伴う火災の頻発や、危険物の取扱い、選別作業の自動化等についても、より難しい対応が必要となる。さらに、頻発する災害廃棄物への対応など、災害時の活用も考慮したより柔軟かつ効率的な建設混合廃棄物の処理を考慮する必要がある。

再生材の利用については、処理段階における品質管理や、製造—利用—処理の一連のサプライチェーンの関係者が連携した新たな利用のあり方を模索するなどを通じて、サーキュラーエコノミーに対応した再生材の循環利用が図れるなどが重要となる。

また、将来的には、カーボンニュートラルへの対応など、社会全体のテーマへの協力の求めに対し、リサイクルの取組内容の見直し、収集運搬、処理に要するCO₂の削減や、少子高齢化に伴う労働力の確保を同時に進めていく必要がある。

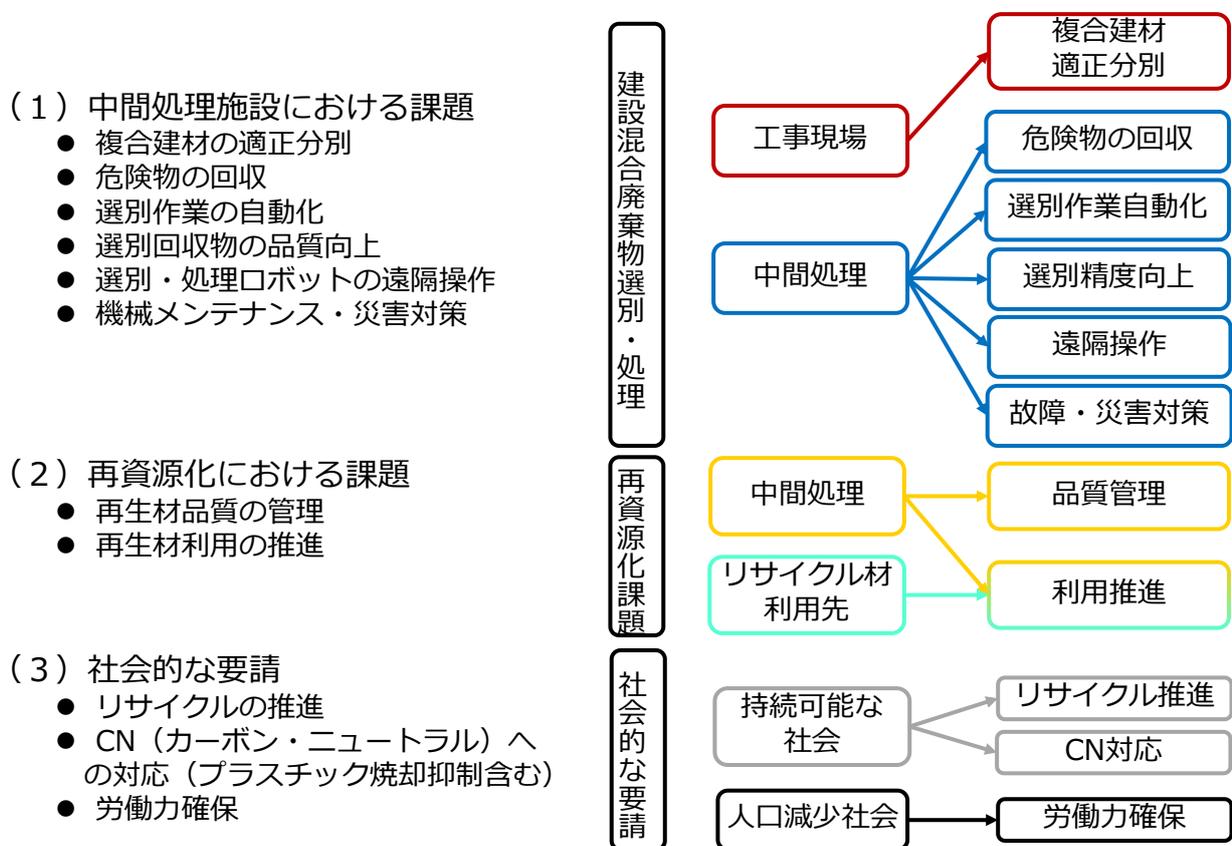


図 2-4 将来新たに想定される課題

3. 建設混合廃棄物の処理・リサイクルにおける AI・ロボティクスの利用ニーズの検討

建設混合廃棄物の処理現場における光学選別機、AI・ロボティクスなどの利用ニーズを把握するため、処理対象物の特徴、品目ごとの機械選別の適用可能性、処理後物の需要先が求める品質基準等を把握した。

具体的には、首都圏の5か所の処理業者へのヒアリングを通じて、情報収集を行った。

①調査方法

建設混合廃棄物処理は、施設の立地場所、処理の考え方等により、処理方法や設備内容が異なっている。そこで、首都圏内の5社程度を抽出し、処理特性や、処理課題の把握及び、AI・ロボティクスの利用ニーズの把握を行った。

②ヒアリング対象

今回、ヒアリング先対象とした企業の立地地域、事業概要と、特徴は表に示す。このうち、E社は、ロボット選別機の導入済企業となっている。

- ・東京都 1社
- ・神奈川県（川崎市） 1社
- ・埼玉県（所沢市） 1社、（三芳町） 1社、（深谷市） 1社

表 3-1 建設混合廃棄物処理施設の概要と特徴 (5 社)

	場所	事業概要	特徴	備考
A 社	東京都 大田区	<ul style="list-style-type: none"> ・ 都内の大型処理工場 ・ 処理・精選別後は、再生砕石、可燃物、篩下残さをリサイクル ・ 24 時間受入れ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 再生砕石の品質向上、効率化、省人化を目的に光学選別機 5 基を導入 	専業、敷地 1 万 m ²
B 社	川崎市	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大型処理工場 ・ 処理・精選別後は、再生砕石、可燃物、篩下残さをリサイクル ・ 24 時間受入れ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 敷地内に、木くずチップ化、RPF 製造、金属くず等の品目別専用棟を保有 	敷地 4 万 m ²
C 社	埼玉県 三芳町	<ul style="list-style-type: none"> ・ 土間選別、一次選別 (2 ライン) の計 3 回、人手による選別を実施 ・ 工場内に、再生砕石、RPF、木くずチップ化等の品目別専用棟を保有 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 一次選別は 2 回転させ、破碎せずに埋立処分を行う。機械選別はバリオセパレータ (重力、振動、風力) を使用 	専業、敷地 7.6 千 m ² 、市街化調整区域に立地
D 社	埼玉県 所沢市	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全量、自社車両による受入れ。現場での分別積込み、荷降ろし時の土間選別との連携を徹底 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 土間選別に力点を置いた処理を実施。機械選別 (同上) を使用 	専業、敷地 3 万 m ²
E 社	埼玉県 深谷市	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中間処理後 (他社) の篩下残さ、産廃業者の処理困難物、掘り起し産廃等の混合品、複合品を受入れ ・ 工場新設時に、AI 選別ロボットで許可再申請 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 定量供給-機械選別 (同上) 後の重量物を対象にロボット選別 (4 アーム) 	2016 年ゼンロボテイクス (フィンランド)

3-1 建設混合廃棄物の処理方法と選別の状況

建設混合廃棄物の処理は、処理フロー図のとおり、単品化処理物と、混合廃棄物に分けて行われる。混合廃棄物は、土間選別、手選別を経て、危険物と単品化処理物を回収した残りが、機械処理にかけられ、金属くず、砕石系、可燃系廃棄物、選別処理残さとなり、処理・リサイクルされる。

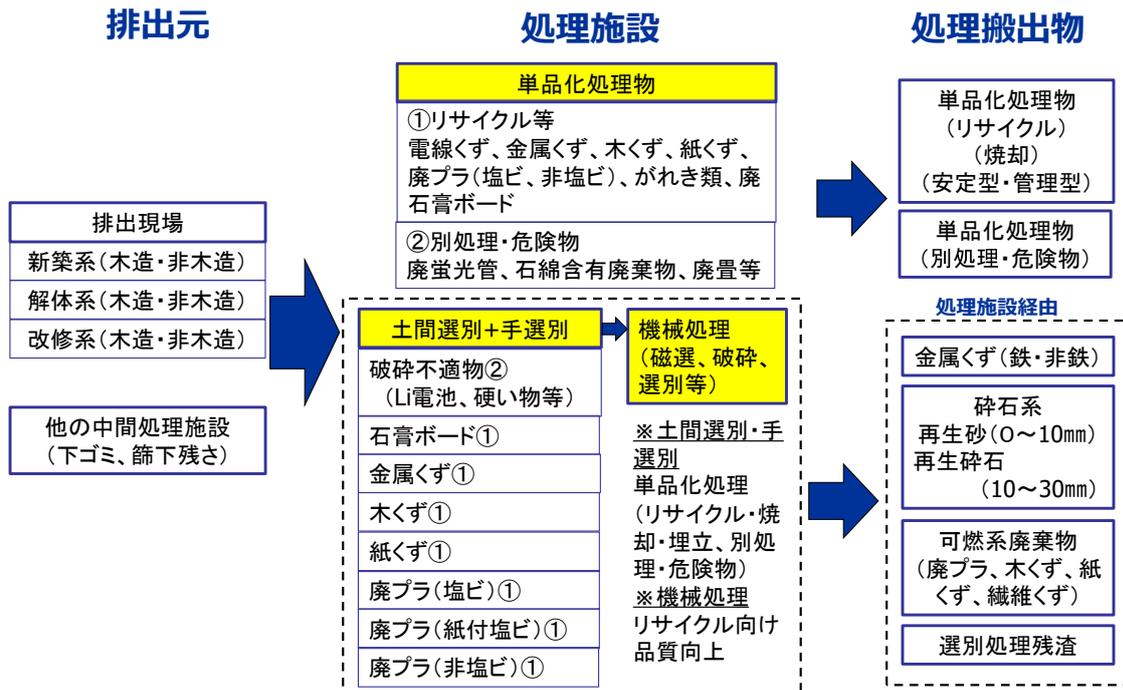


図 3-1 建設混合廃棄物の処理フロー

手選別ラインは、写真の状態のとおり、土間選別後にコンベヤ上を様々な廃棄物が層状に積み重なって流れてくるものを対象に、危険物（リチウムイオン電池、スプレー缶等）、単品化リサイクル物（紙くず、木くず、金属くず、廃プラスチック類）を回収する作業となる。



写真 3-1 手選別ラインの状況 (A社)

手選別による回収物は、図のようになっている。

このうち、コンクリート塊は、後工程の有無により選別回収の実施有無が異なる。また、廃プラスチックについても、非PVC（塩ビ）を回収してリサイクルするのみならず、リサイクルに回らない塩ビ系プラを対象に、紙の有無で選別回収し、焼却（紙あり）、埋立（紙なし）などを行う対応もされる場合がある。

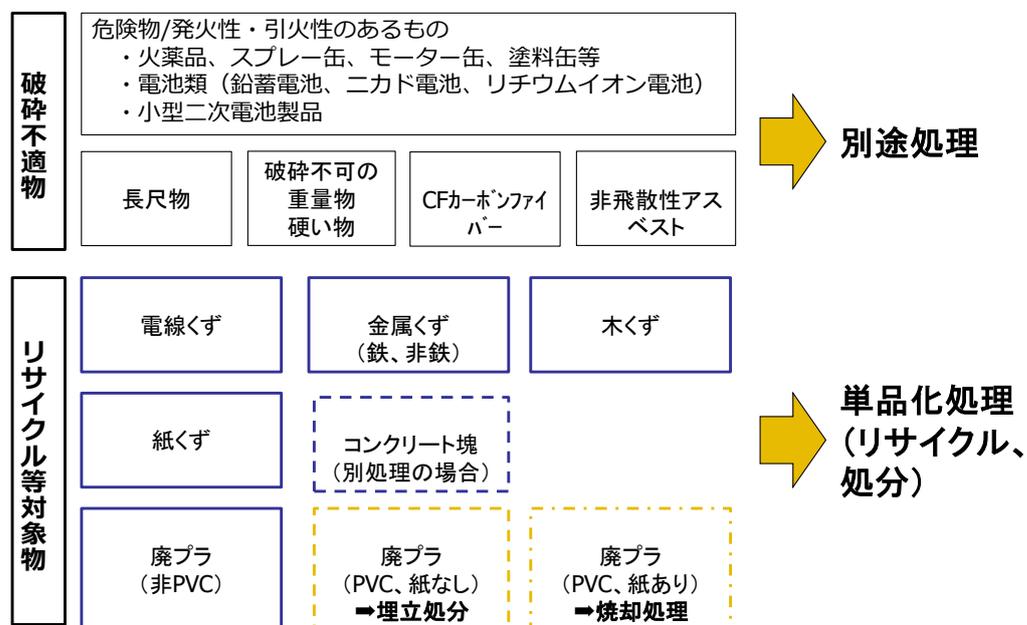


図 3-2 手選別による回収物の内容（A社）

危険物には、リチウムイオン電池等の電池類、スプレー缶、シンナー缶、発煙筒などがあり、特にリチウムイオン電池による火災が頻発するなどが課題となっている。また、単品化リサイクル等対象物としては、紙くず、木くず、金属くず、廃プラスチック等が回収されている。



- 危険物の内容（例）
- ① リチウムイオン電池等
 - ② 小型家電（リチウムイオン電池混入）
 - ③ スプレー缶 10本程度/日
 - ④ シンナー缶、塗料缶 10缶程度/日
 - ⑤ 発煙筒 1、2本程度/日
 - ⑥ 高圧ボンベ類 2、3個程度/月

写真 3-2 危険物の内容例（C社）

		
紙くず	木くず	金属くず
		
廃プラスチック（非 PVC）	廃プラ（PVC、紙くずなし）	廃プラ（PVC、紙くずあり）

（注）廃プラ（PVC、紙くずなし）は埋立処分、廃プラ（PVC、紙くずあり）は焼却処理のため選別。

写真 3-3 リサイクル等対応物の選別例（A社）

建設混合廃棄物処理ラインでは、一次選別（主に人手）、二次選別（主に機械選別）を経て、粒度や比重の異なる「不燃物・可燃物」が成果物となる。また、単品回収された廃棄物は、それぞれ個別処理がされリサイクルされる。処理後のリサイクル用途別の品質基準は、表のとおり、精度の高い選別が求められている。近年、特に建設混合廃棄物の性状が悪化しているとされている中であって、こうした基準を満たすためには、従来の処理に加えて、光学選別機の導入や、手選別の負担増による対応がさらに求められつつある。

表 3-2 処理後のリサイクル用途別の品質基準の例

	品目	管理項目	備考
混合 廃棄 物ラ イン 排出 物	不燃物	土壌環境基準	（起源）捨てコン、ガラス陶磁器くず
	可燃物 （セメント向け）	塩素濃度 0.3%以下（塩ビ プラ他、塩素含有物全般） 金属、カーボン繊維含有物 は禁忌品 サイズ（15 cm程度）	破碎機の破損、リチウムでの火災（金属）、電気集塵機の機能低下（カーボン繊維含有物） 絡みもの（ひも、シートは破碎要）
	可燃物 （焼却向け）	塩素濃度 3%程度まで 金属、不燃物は禁忌品 サイズ（15 cm程度）	熱量 3000kcal、灰分 10%等の場合あり。 絡みもの（ひも、シート）

			は破碎要)
単品 処理 物 (一 部の み)	可燃物 (RPF 向け)	塩素濃度 0.3%以下 金属は禁忌品	JIS 規格があるため、手 選別回収プラが基本
	再生砕石	(以下は、禁忌品) コンクリート塊以外は NG 金属、プラスチック、木く ず	色物光物 (タイル、レン ガ、ガラス等)、釘など の突起物は特に NG。 ※硬質プラの塩ビ管は灰色 で比重が重いため選別が難 しい

3-2 手選別等に係る対応と課題

今回、一次選別における負担の軽減が、ロボット選別のターゲットであると考えられるため、土間選別と手選別との違いや、5社による特徴と相違などについて検討を行った。

(1) 土間選別

土間選別の対応と課題は、次のようになる。

土間選別は、混合廃棄物を対象に、人と重機を用いて、危険物、有価物、単品化処理物に分ける行為であり、手選別と合わせて混合廃棄物の7割が単品化処理に仕向けられる。

回収物は、危険物、有価物、紙屑、単品回収物(廃プラスチック、石膏ボード、木くず)である。なお、廃プラスチックは、建材の内容により、選別時点が土間選別、手選別と異なる対応を行っている事業者もある。

表 3-3 廃プラスチックの選別時点 (C社)

廃プラ種類	選別時点	処理方法
塩ビ管 (グレイ管)、フレコンパック、ブルーシート、PP・PE 容器等	土間選別	マテリアルリサイクル
壁紙	土間選別	埋立処分 (管理型)
塩素系硬質プラ	土間選別、手選別	埋立処分 (安定型)
非塩素系軟質プラ	土間選別、手選別	RPF 原料

土間選別は、作業動線、安全性、分別品目、大型コンテナの利用等を考慮して対応されているが、例えば、250~300台/日の搬入がある場合、朝10時以降のピーク時は1台/2~3分のペースで選別をこなす必要があり、大変な作業となる。作業も危険で、しゃがみ込んで、ペイロードに品目ごとに拾い上げる等の作業負担も大きく、屋外での対応の場合には作業環境も悪く、品目区分のための作業員の熟練度も必要となる。腰痛対策などの解決策も見いだしにくい。

昼間は、重機3~5台のオペレータ3~4人、選別作業員4~5人の合計10人程度で対応されている。また、夜間工事や、休日工事などの建設現場のニーズに応じて、24時間の車両搬入を行う施設では、人員シフト (早番、遅番、夜勤) で対応している。

(2) 手選別

手選別は、土間選別後の混合廃棄物を定量供給したものを、ベルトコンベヤ上で選別する行為。土間選別同様、危険物と、リサイクル対象物の選別が行われている。

手順は、始めに廃棄物の塊・山を崩した後、匂い（薬品）、危険物（発火性・引火性）をチェックして、選別回収を行う。廃棄物種類別の選別は、廃プラスチック→木屑→紙屑→鉄の順に、軽いもの（上に被さるもの）から順に回収を行う。後段の磁選機では、軽い鉄しか取れないため、コンベヤ終盤に責任者が常駐し、破碎不適物である鉄の塊や危険物の最終チェックを行う。

コンベヤ上に、紙屑が大量に入った場合や、袋の中身が確認できない場合には、コンベヤを止めて開梱等の作業を行う。また、人力で対応できない重量物の選別は、クレーンを使用して回収されることもある。投入オペレータの技量が、処理能力に影響を及ぼすとされている。

手選別ライン長は30～40m程度。人数及び配置は、10人程度を基本とし、順番に休憩をとり対応するため、最低人数5～6人で作業できるようシフトが組まれている。例えば、コンベヤ両側5名ずつ計10名配置されており、夜勤を含む3チームとする場合には、朝番（8:00-18:00/10名）、昼番（10:00-20:00/10名）、夜勤（18:00-08:00/4～6名）とされている。

A社の場合、工場内の就業者50名のうち30名（6割）が土間選別及び手選別ラインなどのいわゆる「選別系」に従事している。なお、工場運営の大きな比重を占めている。一方、人員確保難のため、募集しても人の補充ができないため、手選別ラインの配置を最低6名（通常10名）に抑えるなどの対応を余儀なくされている状況にあり、今後も運営上の支障となりうる課題である。

作業環境も悪く、ほこりの集塵、ミスト噴霧（ほこりを溜めない）、防塵マスク着用が欠かせない状況にある。なお、市街化調整区域では、手選別エリアを建屋内に設置することができず、窓のない工作物内での作業とせざるを得ないため、さらに環境条件が過酷であり、暑さ（扇風機、WBGT対策）、寒さ（電気ヒーター、重ね着）等の対策が必要となっている。

(3) 一次選別（土間選別＋手選別）

5社の処理業者別に、一次選別ライン（土間選別＋手選別）の概要を比較すると、機械選別の使用の有無や、一次選別後に二次選別を行わないなどの違いがあり、処理特性が異なる。なお、具体的な一次選別ラインのイメージは、各図に示す。

なお、E社は、ロボット選別機を導入済の企業となるが、ロボット選別と手選別の組み合わせた対応がなされている。土間選別を行わずに、機械選別が行われ、さらに、ロボット選別等が行われている。

表 3-4 一次選別ラインの処理特性（企業別）

	一次選別ラインの構成	受入対象物	処理特性	備考
A社	【土間選別】-篩選別- 【手選別】-磁選機 →破碎→二次選別	混合廃棄物 (単品回収後)	二次選別後の成果物（可燃性廃棄物、再生砕石等）は、ほぼ全量リサイクル	
B社	【土間選別】-篩選別- 【手選別】-磁選機 →破碎→二次選別	混合廃棄物 (単品回収後)	二次選別後の成果物（可燃性廃棄物、再生砕石等）は、ほぼ全量リサイクル。	
C社	【土間選別】-篩選別- 【手選別】-磁選機-機械選別-【手選別】 →埋立処分	混合廃棄物 (単品回収後)	手選別は、機械選別の前後で2回実施。一次選別後は、破碎せずに埋立処分を実施。	選別後は、埋立処分
D社	【土間選別】-機械選別- 【手選別】-磁選機 →破碎→二次選別	混合廃棄物 (単品回収後)	土間選別に人手をかけ単品化リサイクル品を回収。残りを手選別ラインにて選別回収	主として、危険物を回収
E社	機械選別-【ロボット選別；4アーム】-【手選別】 →破碎→二次選別	中間処理業者の篩下残さ等の混合物・複合物	破碎済みの廃棄物が対象のため、土間選別なしで機械選別に投入。ロボット選別後、手選別を実施。	大型のコンクリート塊、木くず、硬質プラを回収

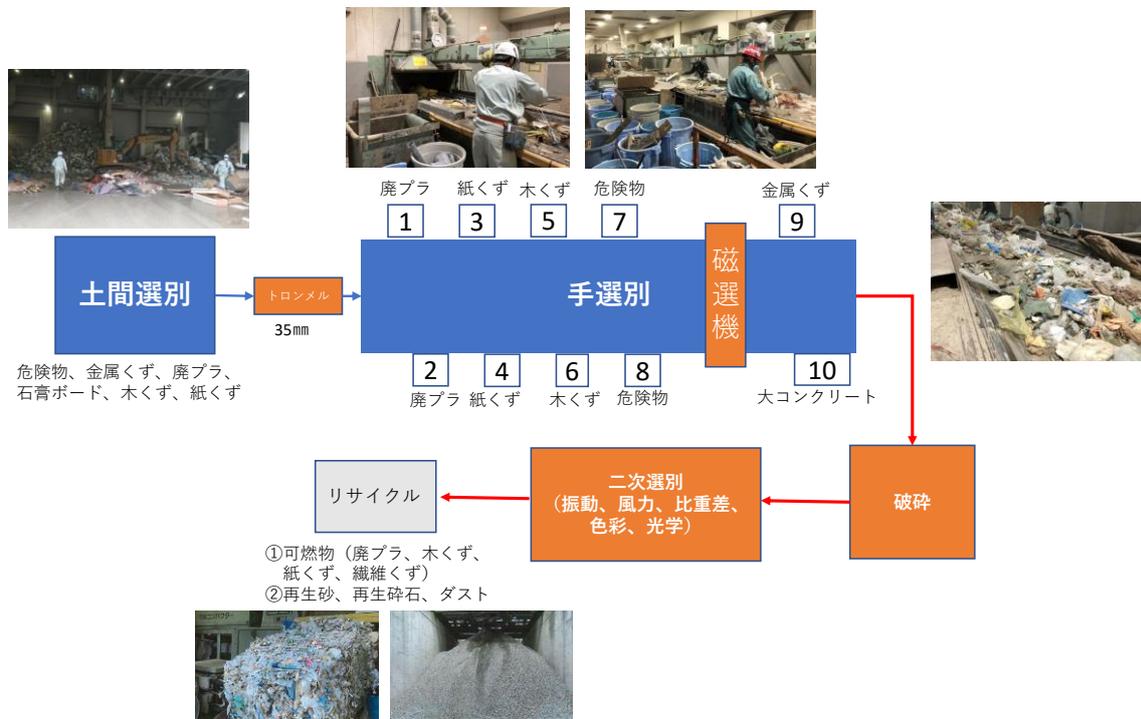


図 3-2 A社の一次選別ライン

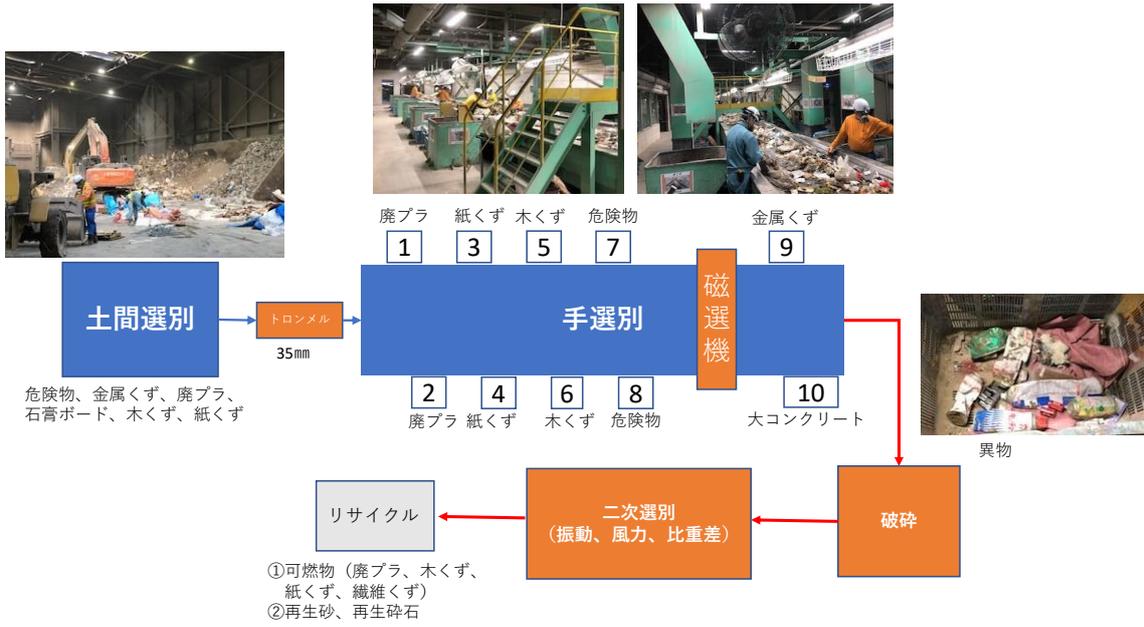


図 3-3 B社の一次選別ライン

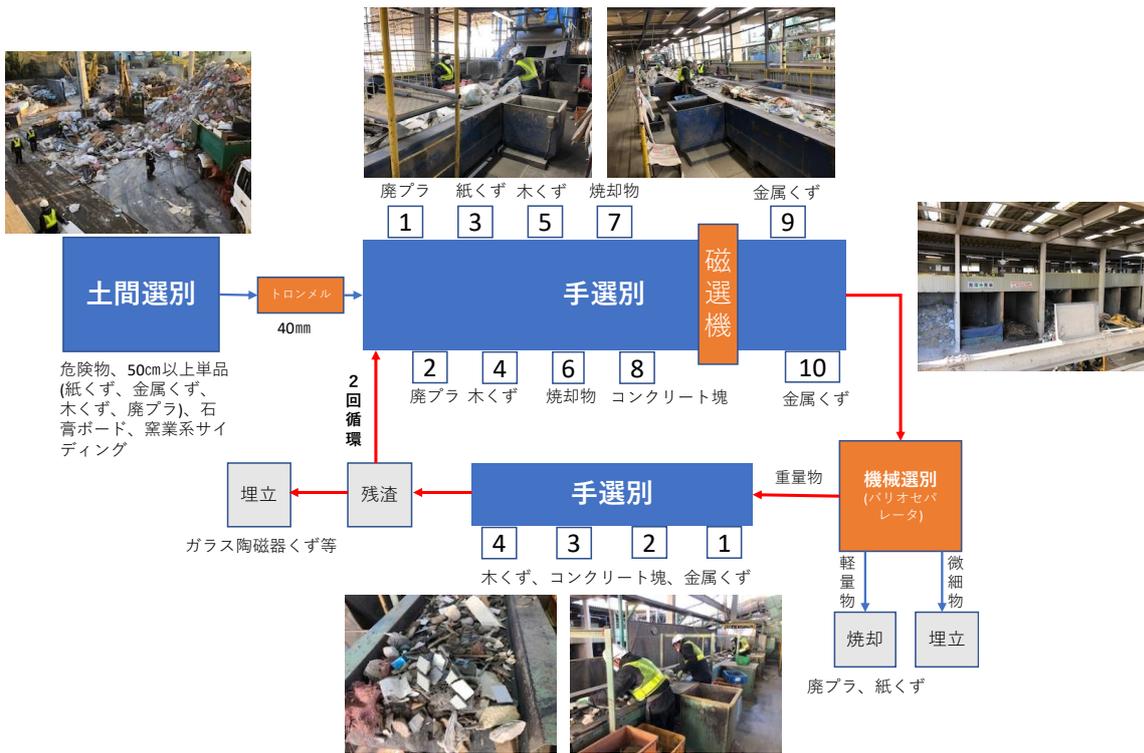


図 3-4 C社の一次選別ライン

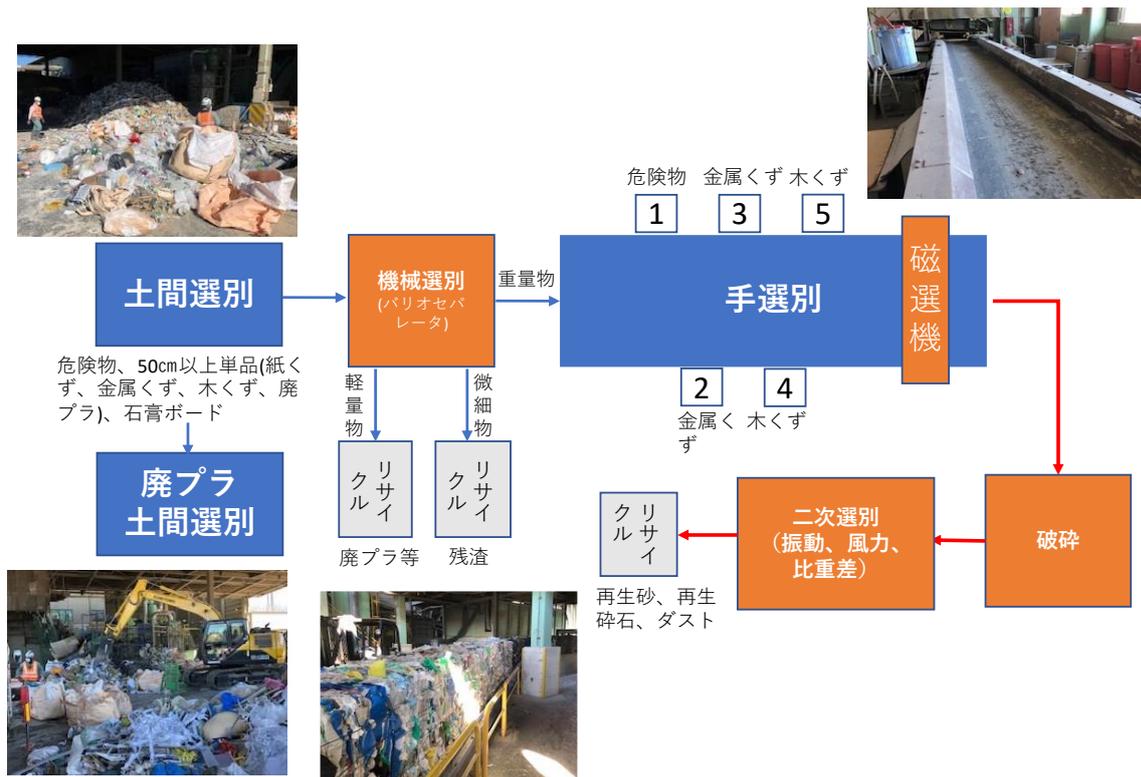


図 3-5 D社の一次選別ライン

3-3 AI・ロボティクスの利用状況

AI・ロボティクスの利用状況を把握するため、文献調査及びヒアリング調査を行った。

(1) AI・ロボティクスの利用事例

AI・ロボティクスの利用事例については、文献調査を通じて、9メーカーの利用内容と利用課題などについてとりまとめた。利用課題としては、以下の事項があげられている。文献調査の結果、ロボット導入のメリットは大きいものの、技術的には発展途上で今後の成熟を待つ段階であるとされている。また、ロボットを廃棄物処理のどの工程で活用するべきか、活用方法の試行錯誤が必要であるとされている。

- ・性能を引き出す検証
- ・設備の安定稼働
- ・危険物検知性能
- ・産業廃棄物処理業の許可の問題
- ・AI 学習システム

表 3-5 AI ロボット選別機の利用課題（別文献より抽出）

品名	課題分野	具体的な課題
ゼンロボティクス	性能を引き出す検証	設備セッティング
		ロボット選別を前提とした最適な前・後工程での処理の検証
	設備の安定稼働	故障の原因は、工場内の気温（夏場の高温、冬場の低温）、工場内を舞うほこり、振動などであり、精密機器であるゼンロボティクスリサイクラーには劣悪な環境である。
	危険物検知性能	ライターやスプレー缶等の危険物の検知性能が不十分
		ほとんどの場合は危険物の混入はないが、安全のため選別チェックに 2 人の作業員が必要である。
産業廃棄物処理業の許可の問題	手選別の場合と比較し一日の処理量が大幅に増加するため、導入に当たり処分業の許可を取り直す必要がある。	
ウエノテックス	性能を引き出す検証	建設廃材などの、より形状や素材がバラバラな廃棄物への対応。
		廃棄物を整列させる等、選別ロボットの前段階の処理技術との連携
		処理スピードの向上（アームの形状等）。
AI 学習システム	現場ごとに AI の学習は必要（大量の画像データを覚え込ませる必要）。	
リョーシン	性能を引き出す検証	対象廃棄物種に最適化したロボットハンドの開発。
近畿工業	AI 学習システム	さまざまな処理物の識別力向上のための学習データの蓄積。
		廃棄物量が多い際の選別精度向上。

また、以下にメーカーごとの特徴を整理する。

なお、表中の「技術熟度」は、表に基づき判定したもので、評価自体は公開情報に基づき、早稲田大学小野田研究室が実施したものである。

表 3-6 技術熟度 (TRL) に関する評価基準

	定義	フェーズ	成果	規模
9	商品化段階の機器・システムが、想定されうる全ての条件において動作確認済である。	投入市場	製品	フルスケール
8	商品化段階の機器・システムが、実証を通して完成、認証済である。	実証最終		
7	フルスケールの試作機器・システムが、実際の使用環境において実証されている。	実証初期		
6	パイロットスケールの試作機器・システムが、実際の使用環境において検証されている。	研究開発	試作品	パイロットスケール
5	小規模のプロトタイプ of 機器システムが、実際の使用環境において検証されている。			小型
4	各部材の性能が、実験室において検証されている。			ラボ
3	中核的な機能の実験・分析や技術の立証が完了している。		部材	プロトタイプ
2	当該技術のコンセプトや応用方法が確立されている。			論文
1	当該技術に関する基礎的な原理が確認、報告されている。			—
<ul style="list-style-type: none"> ■ TRA : Technology Readiness Assessment ■ 開発中の技術の成熟度やその開発の進捗状況を客観的に評価するために、技術の成熟度を TRL と呼ばれる指標に基づきレベル別に区分する。 ■ TRL は 9 つのレベルで構成されており、技術開発のフェーズや実験規模の違いに基づいて細分化されている。開発が進むにつれて数字が上がる構成となっている。 				

①ゼンロボティクス

品名	ゼンロボティクスリサイクラーZRR2	
選別対象物	金属、石、コンクリート、レンガ、磁器、木くず、未加工木材、廃プ	
メーカー (国)	Zenrobotics (フィンランド)	
代理店	サナース (日本)	
概要	ゼンロボティクスリサイクラー コンピュータービジョンと人工知能 (AI) を組み合わせてロボットアームと同期させ、動くベルトコンベアから資源を選別。 AI は金属センサや 3D レーザースキャナー、分光カメラなどからリアルタイムで情報を取得し、ベルトから正しい資源を選択・選別する	
特徴	アーム&ハンド	直角座標型ロボット
	画像処理	深層学習
	センシング	可視光カメラ、近赤外線カメラ、金属センサー、3D レーザースキャ
処理能力	—	

技術熟度	9
導入実績	株式会社 シタラ興産ほか
イメージ	
導入効果	10人(5.6t/日)手選別ラインを2人(500t/日可能)に生産性向上(現状:72t/日) リサイクル率20%から最終処分率20%に転換(リサイクル率40%) 労働環境改善——設備稼働チェックのみ 人件費削減(設備ランニングコスト含めても削減が達成している)
出典	https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/robot/161019handbook.pdf

②リョーシン

品名	AIBenkei / AIMusashi	
選別対象物	木くず、石膏ボード、がれき、アルミ等の金属、塩ビ管、プラス	
メーカー(国)	リョーシン(日本) AMP Robotics(US)	
代理店	—	
概要	AI選別ロボット。重量物を扱うグリッパーと軽量物を扱うグリッパー。前者は建設系廃棄物から出るがれきなどの重量物を選別。後者は2基の吸引式グリッパーで軽量物をピックアップ。	
特徴	アーム&ハンド	直角座標型ロボット/パラレルリンク
	画像処理	画像認識:ビジョンシステム(カメラ&AI)
	センシング	—
処理能力	5~15KG(20個/分) / 0~0.45KG 200個/分(2基)	
技術熟度	9	
導入実績	国内では埼玉県と栃木県の2社に8アーム稼働中(建設系廃棄物)、日本国内の数社が導入について具体的に計画中。アメリカをはじめ世界では飲料容器選別をはじめ、廃家電、廃プラ等、91アームを導入済み(2020年実績)	

イメージ	
期待効果	<ul style="list-style-type: none"> ・ 省人化（国内導入先では40%削減の例）、プラントの稼働時間増加（2～3シフトが組め、24時間稼働可）、手選別作業者の人件費を削減、新たな従業員を雇うための労力・負担を下げられる（人員募集、トレーニング、既存の従業員との調和等） ・ 選別精度向上、生産の安定性（毎日同じ方法、同じスピードで稼働可能） ・ 取得可能データ（世界中から収集されたビッグデータの活用が可能）
出典	https://www.ryohshin.co.jp/products/products223/

③ウエノテックス

品名	URANOS	
選別対象物	PET ボトル、ビン・カン（実証済み）／ 自然石、レンガ、瓦等	
メーカー（国）	ウエノテックス（日本） & Rita Technology	
代理店	—	
概要	AI 搭載 廃棄物自動選別ロボット。センサー群、垂直多関節ロボットとパラレルリンクロボットの3ユニットで構成。センサー群から得られた情報をもとに AI で材質や形状を判断。ロボットには、独自開発したハンド及びパッドを搭載。多種多様なものを選別可能。	
特徴	アーム&ハンド	垂直多関節ロボット、パラレルリンクロボット
	画像処理	画像認識
	センシング	近赤外線
処理能力	42回/m	
技術熟度	9	
導入実績	石坂グループ（熊本県）、彩源（埼玉県）	

イメージ	
期待効果	<ul style="list-style-type: none"> ・ 省人化（作業員を 80%削減可能） ・ 処理産物の品質向上（PET ボトル選別の場合、回収率 95%） ・ 取得データの活用（データを他のロボット導入先でも活用可能） ・ 労働環境衛生の向上（接触回避、労働災害リスクの低減） <p>【CO2 面の効果】 約 1 トンの廃プラを処理する電力消費量は約 50kwh。AI 選別ロボットでリサイクルすることで、廃棄物処理及び新規製造するよりも CO2 排出量を低減。</p>
出典	https://www.uenotex.co.jp/blog/product1/3804

④近畿工業

品名	V-PICKER	
選別対象物	吸着式：ミックスメタル（アルミ、銅、真鍮等）磁着式：銅がらみ鉄	
メーカー（国）	近畿工業（日本）	
代理店	—	
概要	<p>廃棄物リサイクル業界に置ける人手不足解消、作業効率やリサイクル率の向上に効果を発揮する。圧碎され、バラバラになった金属スクラップから銅や真鍮などの有価金属をピックアップ。V-PICKER は近畿工業が独自開発した AI を搭載、カメラで捉えた選別対象物の色、形、サイズなどを瞬時に解析し、その結果を基に AI が判断し、ロボットが選別する。まだ、日々の作業に捉えたデータを AI に学習させて、選別精度を高めていく。選別対象物によってロボットアームを選択する。</p>	
特徴	アーム&ハンド	吸着式、磁着式
	画像処理	【カメラ】 大きさ、形、色を識別
	センシング	—
処理能力	40 回/min	
技術熟度	7	
導入実績	複数のユーザ企業でフィールドテスト中（2021 年 2 月時点）	

イメージ	 <p style="text-align: right;">AI搭載選別ロボット V-PICKER フイビッカー</p>
期待効果	<ul style="list-style-type: none"> ・ 省人化（常時監視、労働力のロボットへの代替） ・ 健康被害・労働災害のリスク低減 ・ 連続運転による処理量UP
出典	http://www.kinkikogyo.co.jp/product/v_picker.php#catalog

⑤東急建設

品名	廃棄物選別ロボット	
選別対象物	建設混合廃棄物	
メーカー（国）	東急建設（日）	
代理店	石坂産業	
概要	<p>廃棄物選別ロボットは、既存の中間処理プラントの手選別ラインにも設置可能であり、現在、石坂産業のプラントにおいて試験的導入を開始しております。今後、実際のラインで得られたデータをもとに改良を重ね、2021年春にはロボット2台体制での実用化を目指して引き続き開発を進めてまいります。</p> <p>建設廃棄物の排出事業者である東急建設と中間処理事業者の石坂産業が連携して取り組むことで、より効率的に開発を進め、労働環境の改善と資源循環型社会の実現を目指してまいります。</p>	
特徴	アーム&ハンド	水平関節型 2基
	画像処理	深層学習
	センシング	—
処理能力	2台体制でピッキング数2,500個/時間 MAX 3Kg	
技術熟度	7	
導入実績	実証試験中	

イメージ	
期待効果	—
出典	https://ishizaka-group.co.jp/news/article/1698/

⑥大原鉄工所

品名	MAX-AI AQC	
選別対象物	プラスチック、金属缶、紙、段ボール、カートン	
メーカー（国）	BHS（Bulk Handling Systems） /Sadako Technologies	
代理店	大原鉄工所	
概要	<p>AI や画像処理システム、確率判断を使ってごみを選別する。ニューラルネットワークを基盤とする人工知能を利用してリサイクルできる資源を特定し、ロボット選別機や光学選別機などのリサイクル機器に選別判断を指示する。物体認識、黒色プラスチックの識別、素材組成分析も可能となった。光学センサーと AI 技術は相互に補完し合い、蓋つきフードパックや熱成形トレイを除いたペットボトルのみを選別することができる。AI や光学選別機器、計量器、モーター、バンカー、ベアラーなどから素材組成データやパフォーマンス指数を取得し、システム利用者がプラットフォーム上で情報を見ることもできる。</p>	
特徴	アーム&ハンド	吸着式パラレルリンク 1アーム/台
	画像処理	画像認識 多層ニューラルネットワーク
	センシング	—
処理能力	65 回/m	
技術熟度	8	
導入実績	—	

イメージ	
期待効果	<p>NRT オプティカルソーターと組み合わせた場合の完全に自律的な質量回収ソリューション。ピック率、精度、稼働時間などのすべての指標は、人間の能力を超えています。そして、それらの機能を1日の毎分維持します。1つのユニットから最大6つの個別のソート。ピックは、値、重量、またはその他のオペレーターの仕様によって優先されます。市況が変化した場合、優先順位を簡単に調整できます。高度なニューラルネットワークを再トレーニングして、廃棄物の流れの変化に応じて新しい材料を特定できます。ダウンタイムなしで既存のMRFにインストールできます。廃棄物と人間の接触を排除することにより、プラントの安全性を向上させます。</p>
出典	<p>https://www.max-ai.com/wp/wp-content/uploads/2021/12/Max-AI%C2%AE-AQC-1-spec-sheet.pdf</p>

⑦リョーシン

品名	Samur AI - RECYCLING SORTING ROBOTS	
選別対象物	colored high-density polyethylene (HDPE), natural HDPE and aseptic containers	
メーカー (国)	Machinex(カナダ)	
代理店	—	
概要	<p>Machinex は、優れた人工知能技術を採用して材料を識別し、正確で確実な製品回収または正確な品質管理機能を実現する自己認識型選別ロボットである SamurAI®を紹介します。ユニークな4アーティキュレーションロボットを備えた SamurAI®は、リカバリー施設内での手動ソートへの依存を減らすための完璧なソリューションです。</p>	
特徴	アーム&ハンド	吸着式パラレルリンク 1アーム/台
	画像処理	画像認識 AMP AI
	センシング	—
処理能力	70回/m 1.25 kgMAX	
技術熟度	9	
導入実績	カナダ イタリア	

イメージ	
期待効果	<p>労力の削減、コストと人事の課題の管理最大 70 ピック/分、人間の選別機の平均ピックレート (30~40 ピック/分) のほぼ 2 倍ターゲット製品認識の最大 95%の効率 AI 材料の継続的な進化と最適化認識ソートの可用性、生産性、パフォーマンスの向上</p>
出典	<p>https://www.machinexrecycling.com/products/samurai-sorting-robot/</p>

⑧ファナック

品名	waste robot	
選別対象物	PET、HDPE、PVC、LDPE、PP、PS PLA、アルミ(UBC)、LDPE、tin	
メーカー (国)	fanuc (美)	
代理店	—	
概要	有機廃棄物コンポスト化の前処理、建設系混合廃棄物の選別、ソーティングセンターでのソーティングに活用。	
特徴	アーム&ハンド	各種なマニピュレーターがケースごとに搭載可能
	画像処理	Continuous learning
	センシング	2d カメラ, 3d カメラ, ハイパースペクトルカメラ
処理能力	60/min 吸着 1kg 25/min 掴み 20kg	
技術熟度	8	
導入実績	—	

イメージ	
期待効果	—
出典	https://wasterobotic.com/fanuc/

⑨御池鐵工所

品名	ロボセンエース						
選別対象物	木くずや金属、異物など						
メーカー（国）	株式会社御池鐵工所(日本) 株式会社安川電機(日本)						
代理店	—						
概要	<p>AI ロボット型選別機・ロボセンエース カメラ1箇所に対しロボットを2台～3台の設置が可能、取残しが少ない 設備のIoT化によりAI機能のモデルの向上が可能で、AIで制御されるロボット選別のため、無人運転可能、人手不足解消でき、安全かつ効率、24時間7日運転可能、高い選別回答率で手戻りを減少のは特徴である。</p>						
特徴	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="274 1395 478 1485">アーム&ハンド</td> <td data-bbox="478 1395 1347 1485">日本国産（安川電機製）の6軸垂直多関節アーム</td> </tr> <tr> <td data-bbox="274 1485 478 1529">画像処理</td> <td data-bbox="478 1485 1347 1529">2D画像データ、3Dセンサー、ハイパースペクトルカメラ</td> </tr> <tr> <td data-bbox="274 1529 478 1568">センシング</td> <td data-bbox="478 1529 1347 1568">光学センサー</td> </tr> </table>	アーム&ハンド	日本国産（安川電機製）の6軸垂直多関節アーム	画像処理	2D画像データ、3Dセンサー、ハイパースペクトルカメラ	センシング	光学センサー
アーム&ハンド	日本国産（安川電機製）の6軸垂直多関節アーム						
画像処理	2D画像データ、3Dセンサー、ハイパースペクトルカメラ						
センシング	光学センサー						
処理能力	—						
技術熟度	8						
導入実績	<p>2021年9月稼働予定 光田商店 山口県 2.5億円うち5千万補助金 2022年4月稼働予定 マルシン 広島県 6億円うち3億円補助</p>						

イメージ	<p>AIロボット選別機 ロボセンエース (1ハンド 2小型吸着アーム方式)</p>
期待効果	<p>本技術により選別員の労働負荷を減らすことが可能となった。 一定の負荷を人からロボットへ移行することができる。</p>
出典	<p>INDUST：廃プラ再資源化率の向上の課題と対策</p>

その他、研究開発において、どのようなテーマで検討がなされているのか把握するため、海外事例を含めて、キーワード「waste sorting robot」で2018年以降の文献検索を行った結果、下記のような研究目的で開発がなされていることが把握できた。

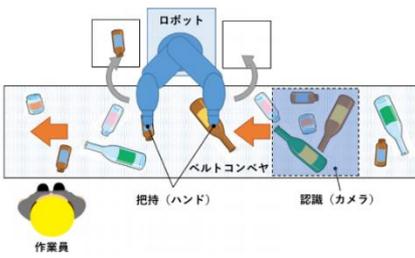
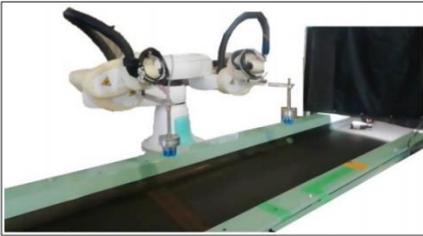
- 作業員負担削減&人関与必要業務のソリューション開発（対象：ガラスびん）
- 電気電子廃棄物の発生量の急増を考慮した対応（対象：WEEE）
- 選別された材料から異物を除去するロボット開発実験（対象：家庭ごみ）
- 労働力不足による選別自動化ニーズが高まり。特に容器包装（対象：飲料容器）
- 選別ロボットの把持姿勢を分析し、ピッキング効率を向上（対象：建設廃棄物）
- 多数の固形廃棄物が積み重なった状況での選別対応を実現（対象：建設廃棄物）

表 3-7 検索方法

検索エンジン	キーワード	出版年	言語	資料種別	アクセス状況
早稲田 WINE	waste sorting robot	2018～	英語	論文・記事	オンライン利用可

その結果、検索結果は、表にまとめた。

論文：協働ロボットを適用した資源ごみ選別作業支援システムの開発

引用元	中野裕, 川本直哉, 梅本司, & 桂木格. (2021). 協働ロボットを適用した資源ごみ選別作業支援システムの開発. In 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集 第 32 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (p. 97). 一般社団法人廃棄物資源循環学会	
研究目的	作業員負担削減&人関与必要業務のソリューション開発	
選別対象物	ガラス瓶の手選別作業	
概要	本論文では、川崎重工が既に商品化しているロボットアーム duAro2 と画像認識システムを用いて、ガラス瓶選別作業に導入する実証実験を行い、AI 選別精度と処理能力の把握し、協働ロボットとしての資源ごみ選別作業支援システムの開発を行った。	
特徴	アーム&ハンド	duAro2
	画像処理	深層学習
	センシング	—
技術熟度	5	
実験装置や 実験イメージ図	 <p>図 1 システム概要図</p>	
	 <p>図 2 システムの外観</p>	
研究結果 結論	<p>本検証に用いた AI モデルを適用した場合の作業員 1 名に対するロボット 1 台あたりの処理割合は平均で 55.9%となり、作業員の概ね半分程度の処理能力となった。AI モデル実証によるガラス瓶の色分け選別(茶色、無色、その他)は、検出率 97.2%、誤検出率 0%、未検出率 3%の結果を得られた。なお、教師データが十分であればほぼ 0 の誤検出率が得られた。AI が誤検出し易いパターンを分析し、多く学習させることで誤検出が飛躍的に低減させることができた。</p> <p>協働ロボットの導入は作業員の負担低減に繋がるが、引き続き技術開発や導入実証が必要であるとされた。</p>	
出典	https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmcwm/32/0/32_97/_pdf	

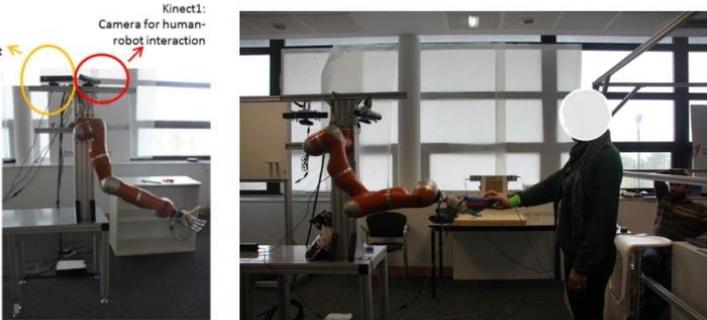
協働ロボット duAro2 は、既に商品化されているロボットアームとなる。

作業員と同じ空間で共に作業可能なロボットを使い、AI による画像認識で選別対象物と吸着ポイントを判断している。その際、吸着式ハンドを利用するのは、スピードが速いこと、対象物の大きさ・形状・向きに関係なく把持できることが理由である。

AI モデルの実証はガラス瓶の色分け選別(茶色、無色、その他)を行い、検出率 97.2%、誤検出率 0%、未検出率 3%の結果を得ている。

本技術は既存コンベヤーに設置可能な特徴を保有しているが、実験を行った選別対象物はガラス瓶に限定しているため、多種類の選別実験は引き続き必要となる。

論文：協働ロボットによる WEEE リサイクルとサーキュラーエコノミー

引用元	Álvarez-de-los-Mozos, Esther, Arantxa Rentería-Bilbao, and Fernando Díaz-Martín. "WEEE recycling and circular economy assisted by collaborative robots." <i>Applied Sciences</i> 10.14 (2020): 4800.	
研究目的	電気電子廃棄物の発生量が急速に増加していることを考慮した解決策	
選別対象物	WEEE (現在 CRTs 分解を目指して)	
概要	本論文では、電子廃棄物の回収・リサイクル率の分析を行い、循環経済に向かって可能な規制と政策を説明し、CRTs(ブラウン管)のリサイクル作業を例として人と協働ロボットの効率的なリサイクル解決案を生み出して、人とロボットの分布モデルを作成し、実験を行った。協働ロボット導入後の生産効率は 48 units/hour(手作業では 30 units/hour)。該当解決案は経済的分析からも採算が取れていた。	
特徴	アーム&ハンド	Kuka Lightweight Robot
	画像処理	-
	センシング	Kinect X360 3D camera
技術熟度	2	
実験装置や 実験イメージ図		
研究結果 結論	<ol style="list-style-type: none"> 1. 協働作業は人がロボットに簡単な作業方法を指示・教えることで、選別スキルや柔軟性が必要な作業は人が分担し、危険性があり、反復的な作業をロボットに分担し、安全かつ効率的なリサイクル作業分別を表現できた。 2. 完全自動化についての理論的な解決方法はすでに提出されているが、実験室レベルのテストしか行われていない。 3. 原子力、ケミカル、細菌施設などの危険な環境で行われる分別解体を想定した場合、遠隔操作による対応は今後の課題となっている。 	
出典	https://www.mdpi.com/2076-3417/10/14/4800/htm	

電子廃棄物とプラスチックのリサイクルに向けて、CRTs(ブラウン管)のリサイクル作業を対象に、人と協働ロボットの効率的なリサイクル解決案を検討した。

ロボットは、吸着式グリッパーを使い、CRTs を掴み、回転するノコギリでパネルとファンネルの接合線に沿ってCRT を切断し、ファンネルガラスとその他の混合部品(金属、シリコン)は容器に落とし、パネルと金属バンドのみをロボットによって次の作業に運び込む。同じ操作を繰り返して金属片は容器に落とし、残るパネルガラスはロボットにより、三つ目の容器に運び、ガラス片は最終的に洗浄する。ブラウン管解体のロボットと人の役割分担については具体的な説明はされていないものの、ロボットが作業員の指示に従う動き(指定場所への移動、指定部位の切断・修復、ネジの取り外しなど)の学習や、ロボットが危険な作業を行い、人は手作業が必要とする作業を行う様に示唆している。

人間とロボットが共存するモデルを検討した。協働ロボット導入後の生産効率は48 個/h(手作業では30 個/h)となり、経済的分析からも採算が取れた。

将来、遠隔操作ができれば、原子力、ケミカル、細菌施設などの危険な環境において分別解体を行うこともできると考えられている。

論文：混合されたリサイクル可能な家庭ごみの自動選別に関する研究

引用元	Dilan Bonello, Michael A. Saliba, Kenneth P. Camilleri. " An Exploratory Study on the Automated Sorting of Commingled Recyclable Domestic Waste" Procedia Manufacturing Volume 11, 2017, Pages 686-694	
研究目的	選別された材料から汚染物質を除去するロボット開発実験	
選別対象物	MSW 試料：paper, cardboard, LDPE, HDPE, PET, Carton, PP, PS, Ferrous	
概要	本論文では、資源回収施設 Malta を用いて、混合された一般廃棄物を対象に、プラスチック類、紙類、金属などのリサイクル可能な物を選別し、リサイクル対象外の物を異物として除外することで、純度の高い再資源化原料を得て、利益向上に寄与することを目標としている。 廃棄物自動選別の導入課題にあたる選別対象物の多様性を踏まえて、万能型グリッパーの設計開発も行われた。	
特徴	アーム&ハンド	二指と吸着の組合せ ハンド：三菱 RV-6SL 垂直多関節形
	画像処理	-
	センシング	-
技術熟度	4	

<p>実験装置や 実験イメージ図</p>	
<p>研究結果 結論</p>	<p>1. 手選別作業は機械導入することで半自動化、或いは全自動化可能である。 2. ロボットは多くの作業において手選別を代替可能であり、その精度は 3D 映像、近赤外線センサーと AI の利用によって向上できる。</p> <p>万能型グリッパーは全ての対象物(紙、段ボール、LDPE、HDPE、PET、金属、カートン、PS、PP)が掴み可能である結果を得られた。本グリッパーはハンドと吸着盤を組み合わせたもので、今後は、捕獲率向上、対象物質の大きさへの対応、捕獲時に別の物質との接触による影響、穴のある物体の把持方法などを課題としている。</p>
<p>出典</p>	<p>https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.168</p>

混合された一般廃棄物を対象に、プラスチック類、紙類、金属などのリサイクル可能な物を選別し、リサイクル対象外の物を異物として除去することで、純度の高い再資源化原料を得て、利益向上する目的としている。ロボットは、一般廃棄物の多様性に対し、機械ハンド(平行形)と吸着式ハンドを合併(グリッパーのサイズは不明)している平行形機械ハンドの移動距離は片方 4 cm(全 8 cm)、吸着盤のサイズは 2 cm で、吸着力は 74N(約 7.4 kg)となっている。

万能型グリッパーの設計・開発を行い、Mitsubishi RV-6SL ロボットと結合したことで、全ての対象物(紙、段ボール、LDPE、HDPE、PET、金属、カートン、PS、PP)を掴めるという結果を得られた。

本研究で設計したロボットアームはハンドと吸着を組み合わせたものであり、引き続き捕獲率向上、対象物体の大きさ制限、捕獲時に別の物体からの影響、穴のある物体を吸い上げる問題などが課題である。

Table 1. The chosen materials for the different parts.

Part	Chosen material
Jaws	Al 6061-T6
Telescopic tubing	Al 6061-T6
Vacuum cup	Nitrile Butadiene Rubber (NBR)
Rings in Telescopic Tubing System (Bushings)	Nylon 6/6

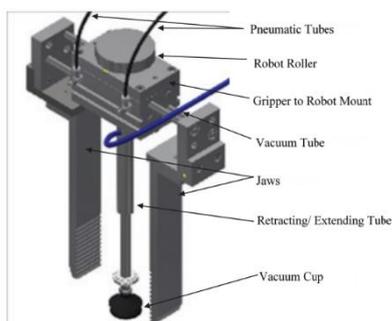


Fig. 3. A CAD model representation of the developed gripper

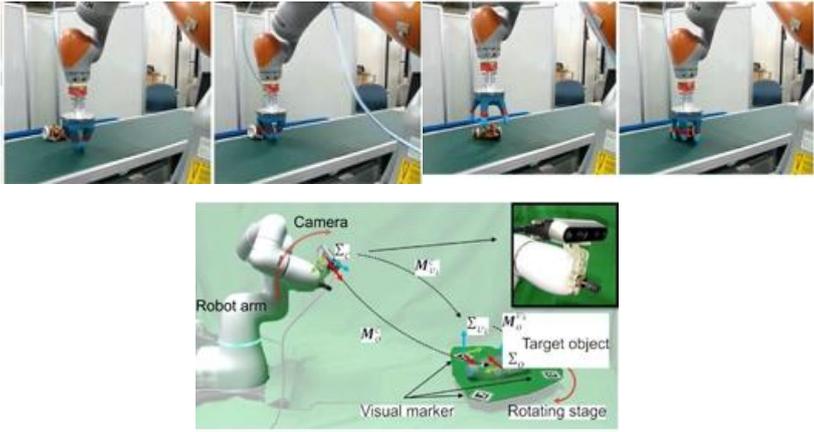


写真 3-4 万能式グリッパ

図 3-6 万能式グリッパのイメージ

論文：機敏なマニピュレーションと迅速に訓練可能な検出器を備えた廃棄物選別ロボット

引用元	TAKUYA KIYOKAWA, HIROKI KATAYAMA, YUYA TATSUTA, JUN TAKAMATSU, TSUKASA OGASAWARA” Robotic Waste Sorter With Agile Manipulation and Quickly Trainable Detector” IEEE Access (Volume: 9) Volume 11, Page(s): 124616 - 124631	
研究目的	労働力不足による選別自動化ニーズが高まって、特に容器や包装廃棄物の	
選別対象物	MSW 試料: aluminum can, glass bottle, and plastic bottle	
概要	本論文では、廃棄物分別の自動化を目的に三つの方法を提案している。 1. 対象物を押し落とす操作とピックアンドリリース操作の組み合わせで手選別を代替、2. 選別対象物に関わる全姿勢と全観察角度の教師データを自動生成し、AI に学習させるシステム提供、3. 対象廃棄物と、ベルトコンベヤー上の画像を別の教師データとして収集し、背景と外観の違いを低減させる。提案手法によりロボットが素早く操作できることを確認した。	
特徴	アーム&ハンド	アーム:LBR iiwa 14 R820 グリッパー:SOFTmatics
	画像処理	-
	センシング	RealSense D435
技術熟度	4	

<p>実験装置や 実験イメージ図</p>	
<p>研究結果 結論</p>	<p>1. ロボットトレーニングのデータセット収集システムを使用して、トレーニングセットを自動的に生成することに成功した。2. 選別ロボットは作業現場において、対象廃棄物の認識、プッシュアンドドロップ操作、ピックアンドリリース操作をそれぞれ実現できた。3. データセットの収集時間は、提案された自動データセット収集方法により、従前の1%以下に短縮できた。また、ロボットは、61%を超える成功率で2種類の操作を実証できた。</p> <p>今後の課題は、選別精度の向上とピッキング効率の上昇としている。</p>
<p>出典</p>	<p>https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3110795</p>

プッシュアンドドロップ操作とは、ロボットアームを使い、ベルトコンベヤー上の対象物を規定位置に押し出して、資源箱に落とす操作である。



(b) Push-and-drop

写真 3-5 プッシュアンドドロップ方式のロボットアーム

画像を自動収集する深層学習は小型の自動撮影ロボットを使い、対象物の全姿勢と全観察角度の画像を自動的に撮影し、捉えた画像情報をラベリング AI で処理し、選別 AI に学習させるシステムである。

教師データを収集したものとリサイクル工場からの2セット準備する事は自動収集した対象物データの他に、選別施設のベルトコンベヤを背景とした画像情報も収集し、手作業によるラベリングを実施してから AI に学習させることで、背景と外観の違いを低減させることに結びつく。

論文：建設廃棄物選別ロボットのピッキング最適化姿勢の検出ディープラーニング

引用元	Yuedong Ku, Jianhong Yang, Huaiying Fang, Wen Xiao, Jiangteng Zhuang. " Deep learning of grasping detection for a robot used in sorting construction and demolition waste" Journal of Material Cycles and Waste Management (2021) 23:84-95	
研究目的	選別ロボットの把持姿勢を分析し、ピッキング効率を向上させる	
選別対象物	CDW 試料： concrete, brick, plastic bottles, rubber, and wood	
概要	ベルトコンベヤ上に載せている複数の廃棄物は接触、畳んでいる状況があつて、この状態からロボットに選別しようと把持ミスが発生する事がある。本論文では、この様なミスを 3D カメラの利用とスナップ領域の高度な画像を用いてデータセットを構築し、最適なスナップ姿勢をリアルタイムで対応させる検証実験を行った。	
特徴	アーム&ハンド	最大負荷 50kg
	画像処理	R-CNN・Auto Encoder
	センシング	hyperspectral camera, laser beam, 3D camera
技術熟度	4	
実験装置や 実験イメージ図		
研究結果 結論	<p>本文で発表したモデルを利用した場合、利用しない時に比べて、36%の正確率向上が見られ、本来 70%の正確率を 90%以上に上昇できた。</p> <p>ピッキングモデルは認識モデルと異なり、正確に対象物をピックアップする事が目的で、今のピッキングモデルではこれを実現できていない。選別できない複雑な廃棄物は、画像処理により、複数の廃棄物に正確に区分してピッキングする事は課題となっている。</p>	
出典	https://doi.org/10.1007/s10163-020-01098-z	

選別できない複数の廃棄物を画像処理によって、複数の廃棄物に正確に分けてピッキングする事を目標としている。建設廃棄物は、ベルトコンベヤ上において、複数の廃棄物が接触、或いは重なりが見られることが多々ある。そのため、複数の廃棄物の画像認識技術による判別では、接触している廃棄物の塊を一つの個体として認識して

しまい、ロボットアームによる把持ミスが生じている。

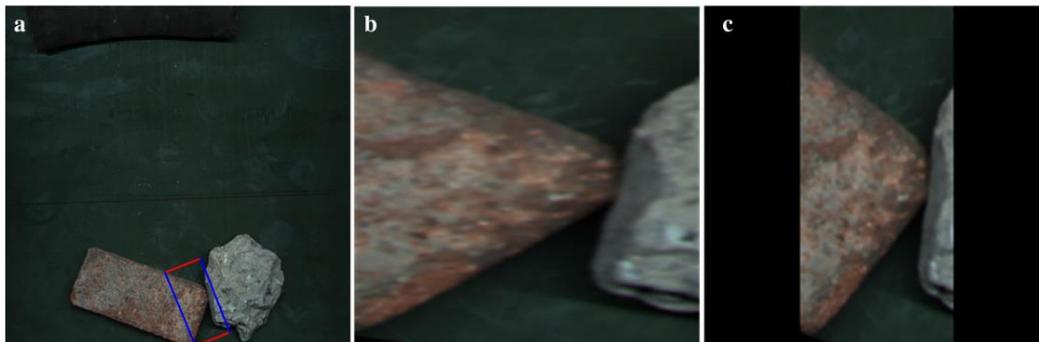


Fig. 4 Images before and after preserving the aspect ratio: **a** original images with a grasping rectangle, **b** image taken from the rectangle and rescaled to fit a square aspect ratio, and **c** image taken from the rectangle and rescaled while preserving the aspect ratio

写真 3-6 複数の廃棄物による塊

こうしたミスを 3D カメラの利用とスナップ領域の高度な画像を用いてデータセットを構築し、最適なスナップ姿勢をリアルタイムで対応させる検証実験を行ったものである。

本文のモデルの利用時には、利用しない場合と比較して正確率が 36%向上し、正確率を 90%以上に高めることができた。なお、ピッキングモデルは認識モデルと異なり、正確に対象物をピックアップする事を目的とするため、今のピッキングモデルはまだこれを実現できない。

論文：空間適応投影による固廃 3 次元物体分割

引用元	Jianhua Zhang, Yeqiang Qiu, Jiawei Chen, Jianshuang Guo, Jingbo Chen, Shengyong Chen. "Three dimensional object segmentation based on spatial adaptive projection for solid waste" Neurocomputing 328 (2019) 122-134	
研究目的	自動選別ロボットが多数の固形廃棄物が積み重なった状況への対応を実現	
選別対象物	Solid Waste	
概要	本論文では、廃棄物選別ロボットの作業時に対面する廃棄物の堆積問題に着目し、RGB-D センサーに基づく画像処理技術で、堆積した廃棄物画像を単品化させる画像処理技術を構築し、その分別効果を実験した。実験はベルトコンベヤ上で重なる廃棄物の撮影画像を対象に、画像中の複数の廃棄物を分割する画像処理を行った。	
特徴	アーム&ハンド	Kawasaki RS010L
	画像処理	-
	センシング	RGBD camera (ASUS Xtion)
技術熟度	3	

<p>実験装置や 実験イメージ図</p>	
<p>研究結果 結論</p>	<p>本論文で提案したモデルはロボットに「ここは二つの板が重なっている」事を教えることが出来て、複数回のピッキングで対象廃棄物を選別するように指示できる可能性がある。</p> <p>本手法を重ねて使用することで、重なっている複数の廃棄物を分別することも可能となる。複雑な重なり処理時間を短縮する方法は今後の課題となる。</p>
<p>出典</p>	<p>https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.03.079</p>

本実験は、複雑な廃棄物画像を分割する事で、廃棄物の正確な選別に寄与することを目指している。実験はベルトコンベヤ上で重なりのある複数の廃棄物を撮影している画像を対象に、複数の廃棄物を分割する画像処理を行っている。



写真 3-7 複数の廃棄物の重なり

本モデルでは、ロボットに「ここは二つの板が重なっている」事を教えることが出来て、複数回のピッキングで対象廃棄物を選別するように指示できる可能性がある。

(2) ヒアリング調査結果

AI・ロボティクスの利用に関するヒアリング調査を行った。E社におけるロボット選別機の利用概要は、以下のようになっている。

① ロボット選別機を有する処理施設の概要

ロボット選別機の導入は、新たな処理工場の建設時に、手選別に要する人員の定常的な確保課題を考慮し、当時アジア初となるロボット選別機の導入に踏み切って検討が進められたものである。

篩下残渣の処理が大半となるため、破碎せずに機械選別のみで、機械選別後の重量物のみを処理対象として、ロボットと手選別による一次選別が実施されている。

- ◆ 処理対象物は、中間処理業者の篩下残渣、掘り起し産廃等の混合物・複合物としている。関東では、篩下残渣を対象に処理を行える施設は、2、3か所しかないとされている。
- ◆ 処理量は、300～500t/日×300日。
- ◆ 処理物対象物（篩下残さ等）の組成（重量物：軽量物：微細物＝5:1:4）

② 一次選別（ロボット選別）の内容

ロボットの機能は、次のようになっている。

- ◆ 選別に要する画像認識等の機器は、下記で構成されている。
RGBカメラ/ハイパースペクトルカメラ（近赤外線）/金属探知機/3Dレーザースキャナ
- ◆ アクチュエーター式ロボットであり、グリップがXYZ方向に移動するうえ、グリップの回転も可能であり、大型の廃棄物も自在に掴むことができる。

ロボット選別は、ロボットアーム4本（コンベヤ幅1200mm）で3品目が回収され、手選別では、木くず、長尺物、非鉄（アルミ、銅）が回収されている。

- ◆ コンクリート塊 高さ5cm以上のもの ※重量20kg（最大）
- ◆ 木くず 高さ10cm以上
- ◆ 硬質プラ

※選別要員（人）が休んでも、ラインが成立するような設計とされている。

※ロボット選別エリアと、他のエリアは連動しておらず、それぞれ独立して処理ができるよう区分されている（3年目以降に実施）。

※従来は、コンベヤへの定量供給のため人手を要したが、現在は、定量供給機（投入頻度1回/40分）を導入して代替させている。

③ ロボット選別の導入費用と導入効果

ロボット導入費用は、1億円/アームでかつ、改造費を要するため高いが、手選別人員の削減効果は高いとされている。

- ◆ ロボット導入設備費4億円（補助金5千万円、7年償却）、設備改造費8億円（合計12億円、全体事業費20億円）。

- ◆ 選別施設の手選別人員は、24名近い削減ができた。
28名（24h稼働時、当初予定）➡4名（16h稼働、2名/8h）（24名減）

④ ロボット選別機の運用

ロボット選別機の管理として、メンテナンスが重要となる。

- ◆ 社内メンテナンス体制は、メカニック6名を配置し対応を行っている。
- ◆ 設備上の変更は、アクチュエータ式ロボットを支える枠組を、対荷重に弱いアルミから鉄製枠への変更や、ベアリングの摩耗防止のため自動給油装置の装着などの対応を実施。

⑤ ロボット選別機の利用までのステップ

ロボット選別機の導入当初は、様々な課題があり、運営上の課題も生じたが、時間をかけて解消し、現在は9割の稼働を達成している。

- ◆ 1-2年目 ゼンロボ社とweb連携し、機械学習の強化や、設備調整を実施
- ◆ 3年目 消耗品関係のアップグレード、部品の入れ替え・付け替え
- ◆ 4年目 基本稼働の9割を達成

※修理体制；機器類は、代理店が木更津市内に設けた部品倉庫に保管されており、注文から3日以内の修理が可能。また、コンベヤ張り替え業者は近隣に立地。

⑥ ロボット選別機の導入に係る許認可対応

ロボット選別機の導入に向けては、設備改造とともに、許認可の取得が必要となる場合がある。

当時、埼玉県では、「選別」の許可カテゴリーを設けておらず、結果として軽微な変更での取扱いができ、4か月程度で調整が終了している。



図 3-7 E 社のロボット選別概要

3-4 手選別に代わるロボット選別システムの導入課題

施設ヒアリングの結果、手選別に代わるロボット選別システムの導入課題は、次のようにまとめられる。

- ① 土間選別及び手選別ラインにおいて、AI・ロボティクスによる自動化ニーズがある。ロボット選別の機能は、危険物の除去（破碎等の処理設備への影響回避）及び、単品化リサイクル（マテリアルリサイクル率の向上）に向けた手選別の代替となる。
- ② 人と機械の機能分担をどのように考えるのかについて検討が必要である。現状のロボット選別は物体認識、選別回収（成功率）、選別スピード等において、完璧な精度を誇るには至らないため、一次選別後の破碎や二次選別に悪影響を及ぼす破碎不適物や危険物等の最終確認が必要となる。そのため、人とAIロボット選別が共存するシステムの検討や、それに伴うロボット導入に係る投資対効果などの検証が必要となると考えられる。
- ③ 新たな機械設備の導入は、新設時又は、前後の設備を含めた大規模改造時が考えられるが、それらは従来型の施設整備と比べた期間、費用について、導入に要する期間が遜色なく、かつ、改造を含めたトータルの経費負担ができるだけ抑制できることが望ましい。

※既存のロボット選別機は、設備改造、処理フローの見直しが必要で、全体事業

費もロボット1基あたり数億円程度と高いことから、費用逡減が大きな課題となっている。

- ④ ロボット選別システムの導入に伴う行政手続きについては、ロボット選別システムに関する「選別」許可の考え方が自治体により異なることが考えられるため、処分業の許可の新規取得や、変更にあたっては、自治体の理解と連携も重要となる。
- ⑤ なお、選別ロボットに求められる導入効果として、人員削減、選別量の増加、選別精度（品質）アップがあげられる一方、ロボット技術システムの現場導入には、現在のコンベヤ上の廃棄物の層状による重なりや、土砂汚れ、大きさ・形が多様なものの中から危険物やリサイクル対象物などを正確に画像認識（物体認識）し、精度よく回収し、かつ、選別スピードを向上できることが求められる。これらは、ロボット側の技術進化のみに依存して解決を見出すのではなく、処理の方法の工夫などによりロボットシステムとの連携を図ることも重要であると考えられる。

4. 建設混合廃棄物リサイクル事業者と連携したAI・ロボティクス利用の検討・実証

建設混合廃棄物リサイクル事業者と連携し、自社で所有するAI・ロボット選別機のプロトタイプをフィールドに移設した上で、実証試験として試行的に選別処理を行い、検討課題を明確化した。

なお、実証実験では、処理業者が実際に手選別で回収した廃棄物試料をサンプルとして、AI画像認識による機械学習の他、自社の保有するプロトタイプモデルを用いたロボット制御システム及び、システムインテグレーションのカスタマイズによる簡易開発を行った。

実証実験は、以下の条件のもとに行った。

- ① ロボット選別の検討は、手選別ラインを対象とした。

※土間選別は、手選別と比べて難易度が高いことから今回は対象に含めなかった。

- ② 実証実験は、高俊興業(株)の協力のもとで、建設混合廃棄物処理施設の手選別ラインにおいて、実際に選別回収したコンクリート塊他、廃棄物試料を対象とした。また、実証場所は、高俊興業中央技術研究所内に実験スペースを確保した。

- ③ 選別回収のターゲットは、コンクリート塊、ペットボトル（飲料容器）の2種類に限定した。

※選別回収が必要な対象物は、危険物、破碎不適物、リサイクル上の支障物（CFRP等）や、リサイクル対象物と様々であるが、今回の実証では、機械学習が比較的容易に行えるリサイクル対象物の2種類を選定した。

- ④ 実証実験に利用するAI選別ロボットのシステムは、(株)イーアイアイが研究開発室内に所有するカメラシステム、ロボットシステム（アクチュエータ式）、ベルトコンベヤを用いた。

- ⑤ 今回の実証実験は、検討の主眼が、ロボットシステムの想定課題の明確化と、ロードマップ検討への反映にあるため、実証実験に用いるロボットシステムは、弊社が既に所有するプロトタイプモデルを利用し、今回の実証実験に向けた一連のシステムのカスタマイズ（開発）を行い、システム開発課題と、実際の実証実験における検証を試みた。

4-1 AI・ロボティクスのプロトタイプモデルの開発

本事業では、指定の実証場所である高俊興業中央技術研究所において、以下に示す

3つの機能を実現し、AI 自動選別ロボットの実証を行った。

- ◆ コンベヤに流れてくる複数種類の廃棄物から対象廃棄物を選別できること
- ◆ 選別アームが2つあり、コンクリート塊とペットボトルを選別できること
- ◆ 全自動の選別システム機能を実現すること

上記目標を達成させるために、以下に示す研究開発を行った。

① 高俊興業における廃棄物のサンプリング

高俊興業東京臨海工場において、実証の際に利用する廃棄物（コンクリート塊、木くず、廃プラ、その他）のサンプリングを行った。

※選別対象；コンクリート塊、ペットボトル

② EII 実験室における実証現場の環境構築

実証試験に向けて現場の環境を実験室で再現し、開発を行った。

- ◆ 実証時に利用するコンベヤの調達・準備



写真 4-1 実験用コンベヤの搬入と設置

◆ アクチュエータ式ロボットアーム 2 本のシステム設計と組み立て



写真 4-2 アクチュエータ式ロボットアームの設置

③ AI 画像認識システムの開発

一般的な 2 次元の画像認識システムは、以下に示す 2 つのステップによって構成される。

1) 画像認識

2 次元画像から検知対象物と対象物の領域を特定する。

2) トラッキング

連続する画像フレームにある対象物が同一物かどうかを判断し、検知対象物を追跡する。

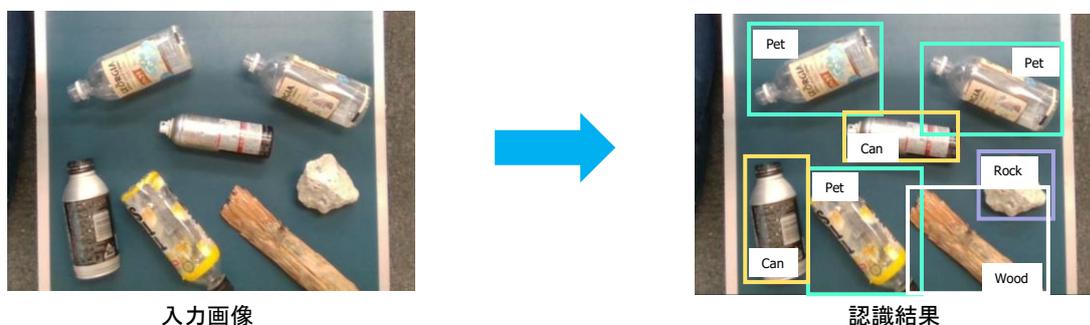
本事業における画像認識の機械学習モデルは、YOLOv5 を利用している。YOLO (You Only Look Once の造語) は、物体を検出する際に、使用される代表的なアルゴリズムの 1 つである。YOLO 以前の従来の物体検出手法は、複数の要素に分類して対象物を特定する方法が採用されていた。まずは、検知対象物の領域を定めることから始め、検知対象物と背景の領域を個別に判断する必要がある。検知対象物の領域が定まったらその領域に含まれる画像の特徴を解析し、どのような物体が映っているかを推測し、抽出される特徴をもとに検知対象物を分類する方法である。しかし、この従来の方法は処理プロセスが多く、時間がかかるデメリットがある。このような欠点を克服するために開発されたのが YOLO である。

機械学習の手法は、大きく教師あり学習と教師なし学習に分けられ、とくに教師あり学習が多く利用されてきている。教師あり学習には、線形回帰、ロジスティック回帰、ニューラルネットワーク等があり、とくに、2010 年代にニューラルネットワー

クを多層に重ね、高度な画像認識を実現するディープラーニングにより、AI が再び注目されるようになり、世界規模で AI ブームを引き起こした。

YOLO は、ニューラルネットワークを利用し、画像データをインポートするだけで画像に含まれる物体の領域を出力できるようになり、より短い時間で物体を検出できるのが特徴である。画像がインポートされると、まず、YOLO では、ニューラルネットワークを使用した分析がしやすいように画像を正方形にリサイズ作業が行われる。分割される小さい正方形はグリッド・セルと呼ばれ、グリッド・セルの特徴をもとに、物体の種類を推定し、それぞれの推定が的中する確率を考慮しながら画像解析が行われる。

本事業では、YOLOv5 を利用し、カメラからの画像を入力して、物体位置の検出および物体分類を同時に実行し、制御機能へ結果を出力する機能を実現する。具体的には、学習データを作成し、検知モデルを構築し、検知結果の評価を行った。プロトタイプモデルとして、平均的な認識精度は、約 81.36% (mAP) となった。



入力	出力
RGB画像	(x, y, width, height, 種類)

図 4-1 AI 画像認識システムの入出力

表 4-1 作成した学習データ

作成ビデオ	3本
フレーム抽出	1 out of 100
画像の切り取り	a. Height 880px from (0, 880px) - (Original height 1080px) b. Width 1450px from (200, 1650px) - (Original width 1920px)
ラベリング	a. トレーニング用 - 3100枚 b. 検証用 - 400枚
テストビデオ	2本

表 4-2 構築したモデルと精度

Yolo Model	Accuracy
YoloV5 Small	Accuracy 65-70%
YoloV5 Medium	Accuracy 75%
YoloV5 Large	Accuracy 90-92% a. Best confidence threshold 0.55 b. Image size - 640 c. Batch Size - 20 d. Time Required: 20 Hours for 500 epochs

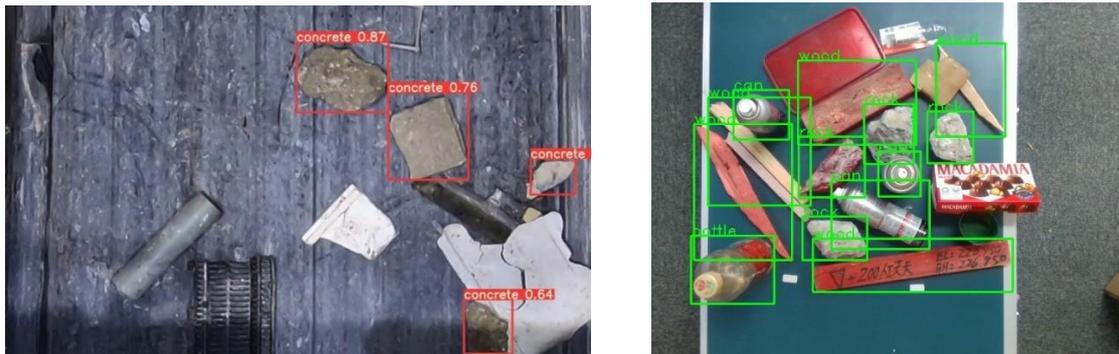


写真 4-3 検知結果の例

表 4-3 評価結果

Rock	Wood	PET	Can	mAP
97.23%	86.65%	43.19%	98.54%	81.36%

構築したモデルについて、以下の方法で評価を行う。

位置検出と分類の結果により、認識を TP（正解）か FP（不正解）に分ける。検出のボックス（位置検出）が ground-truth のボックスの IOU が閾値以上及び分類結果が正しい場合は、TP と判定され、異なる場合には FP と判定される。認識結果は正解な値との合致によって、4 種類に分けられる。認識結果が TP と FP の場合は、ロボットのピッキング対象となる。

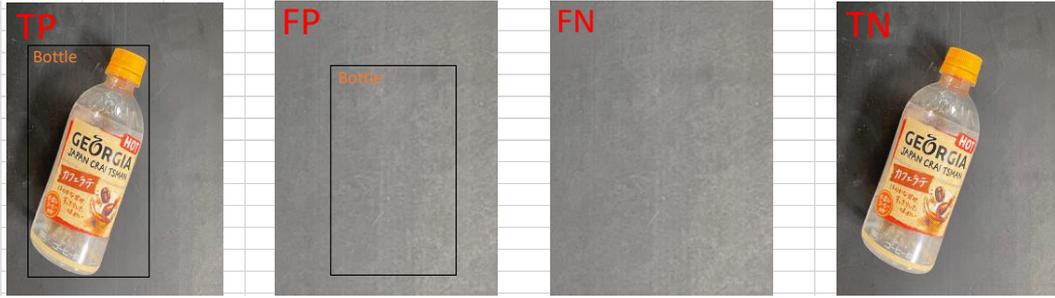


写真 4-4 認識結果の分類 1

表 4-4 認識結果の分類 2

		認識結果	
		True	False
正解な値 (ground-truth)	True	True Positive (TP)	False Negative (FN)
	False	False Positive (FP)	True Negative (TN)

クラス毎の Recall (再現性) と Precision (適合率) を計算する。Recall と Precision から各クラスの AP (平均) を計算する。Recall を 0.1 の区間で最大な Precision をとって平均値を計算すると、AP (平均適合率) が得られる全クラスの AP 値の平均値を計算すると、mAP が得られる。評価用の式を以下に示す。

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$AP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

$$mAP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AP_i$$

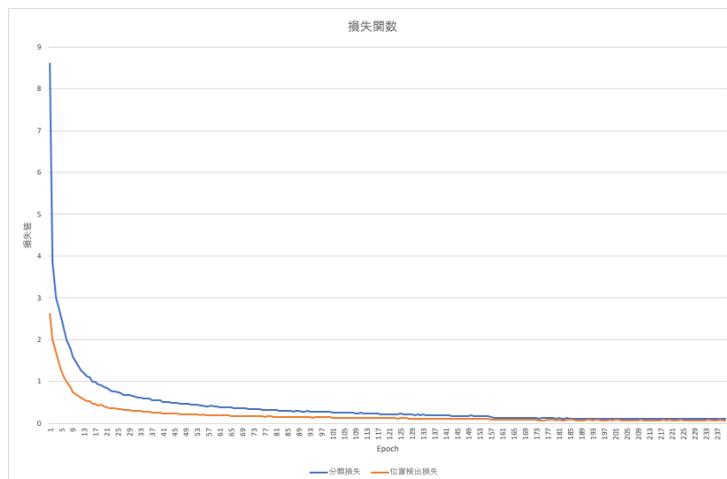


図 4-2 240 エポックでの損失関数

※エポック；学習データの全部を1回学習させること。学習過程では、数多くのエポックも繰り返す必要があるが、うまく学習させるには、多すぎず、少なすぎないエポック数を指定が重要となる。

トラッキング（追跡）に関しては、DeepSORT（Simple Online and Realtime Tracking；人物のトラッキングを行う学習モデル）アルゴリズムを利用する。

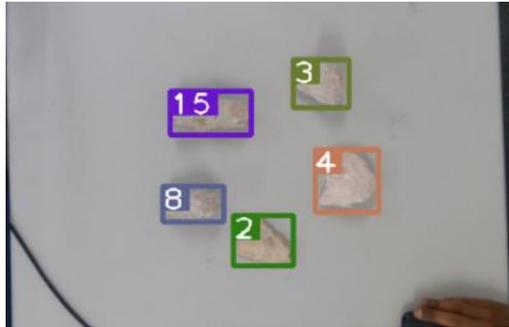


写真 4-5 コンクリート塊の検出とトラッキング

④ ロボットアーム制御システムの開発

本事業においては、AI 自動選別ロボットの有効性検証を目的に、簡易的なアクチュエータ式ロボットアームを用いて、求められる機能を実現するプロトタイプのロボットの開発を行う。

本システムは ROS（ロボット用のソフトウェアプラットフォーム）を用いて、以下のように、機能を各ノード（結び目）に割り振りを行う

a. カメラの読み取りのノード

カメラから連続にフレームを読み取って、処理した後 publish（発行）する。

b. 物体認識のノード

a. で publish されたフレームにて、物体認識を行った後、結果を publish する。

c. ピックアップ対象選択のノード

b. で publish された検出結果でアームがピックアップできるものを選択して、ピックアップアイテムとして publish する。

d. ロボット制御クライアントのノード

c. で publish されたピックアップアイテムが飛んでくれば、ロボット制御サーバーが動ける状態であることを確認したうえで、制御サーバーにピックアップ命令を出す。

e. ロボット制御サーバーのノード

d. からのピックアップ命令を受領後、ロボットアームを動かし始める。作動中は新しい命令を拒否する。

本制御システムの機能構成とハードウェアの構成を以下に示す。

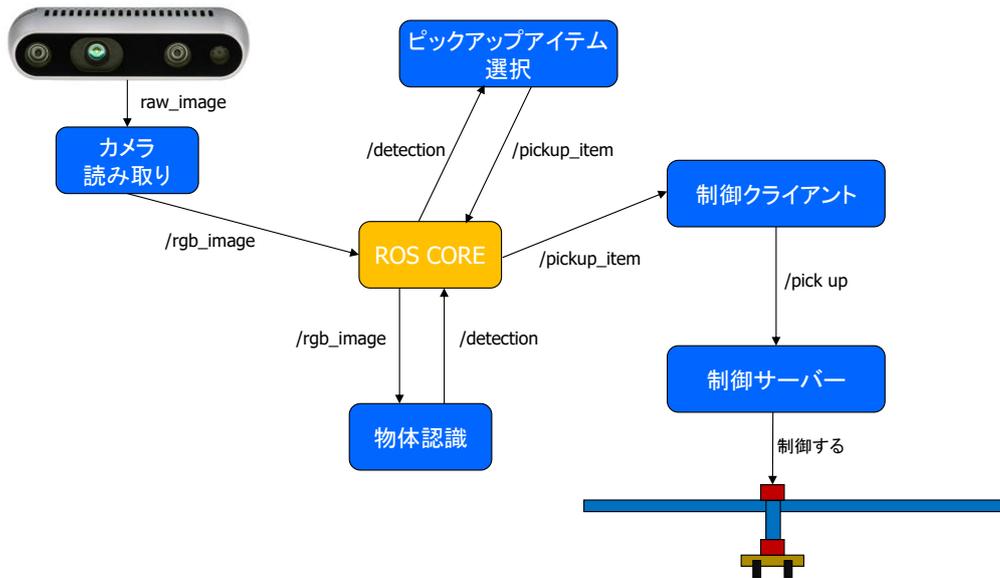


図 4-3 本制御システムの機能構成

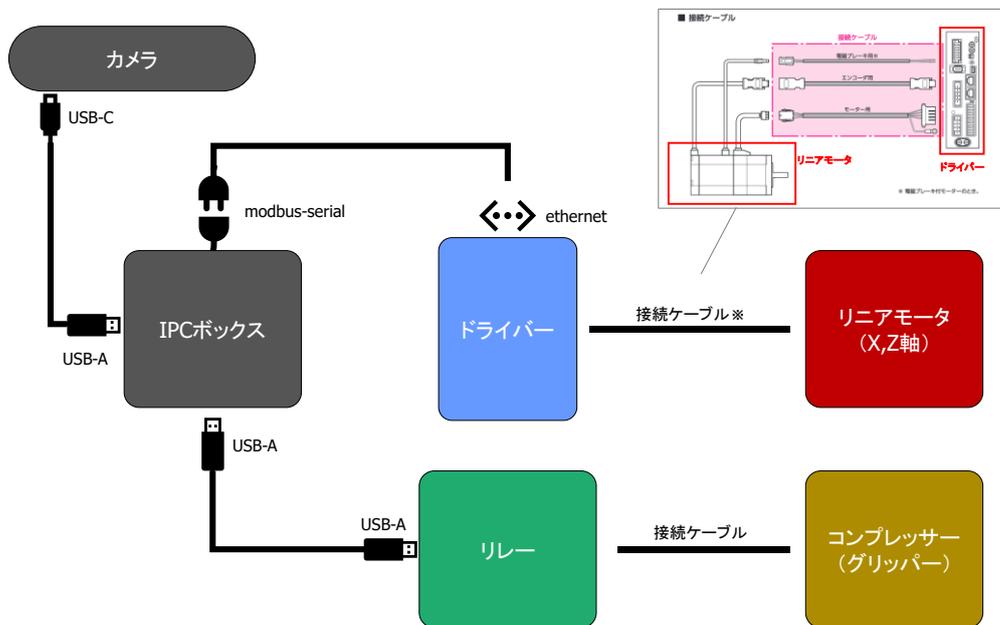


図 4-4 ハードウェアの基本構成



写真 4-6 実験室におけるピッキングテスト（コンクリート塊）

本事業におけるアクチュエータ式ロボットの稼働範囲は、X 軸と Z 軸のみである。選別対象物がカメラの検知領域に入ってから、画像データ処理、AI 認識、X, Z 軸の移動等により、ピックアップまでに時間がかかり、この時間にコンベヤが進む距離を「カメラ安全距離」として定義し、これにより対象物のピックアップの可否を判断し、システムの設定を行っている。

●処理の流れ

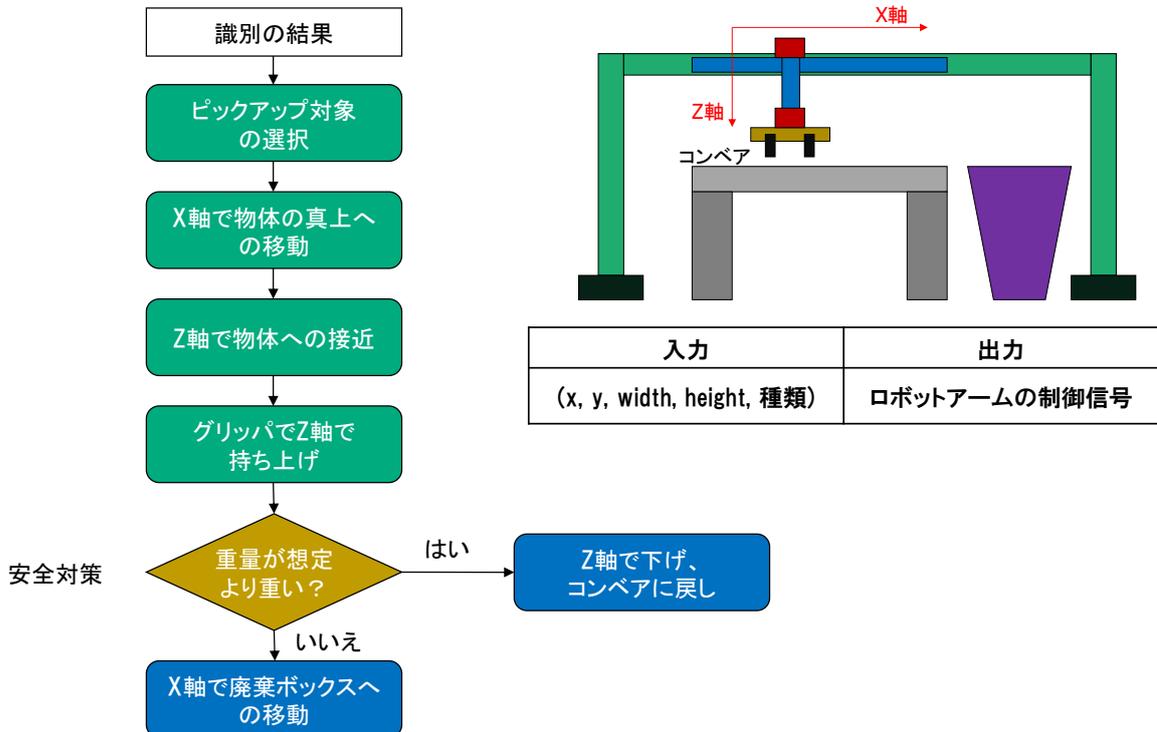


図 4-5 制御システムの処理フロー

処理の流れ

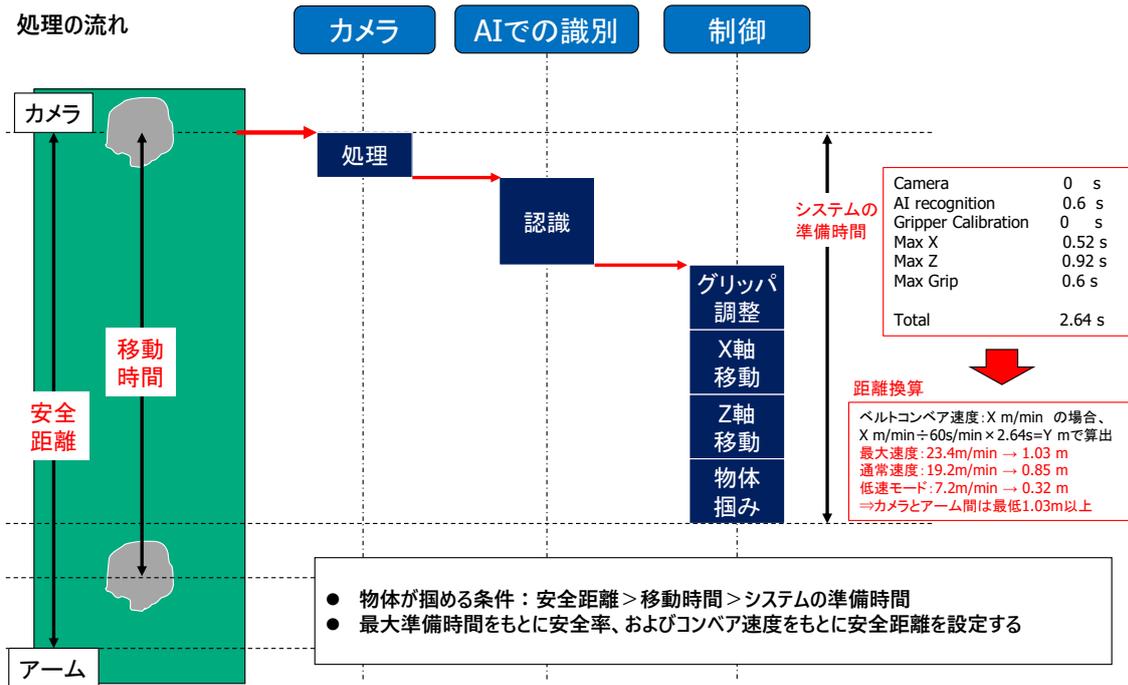


図 4-6 カメラ安全距離の算出

今回の実証に利用するロボットの稼働の仕組み、およびクラウドを活用したデータ管理とシステムの維持管理に関する考え方とシステム構成を以下に示す。

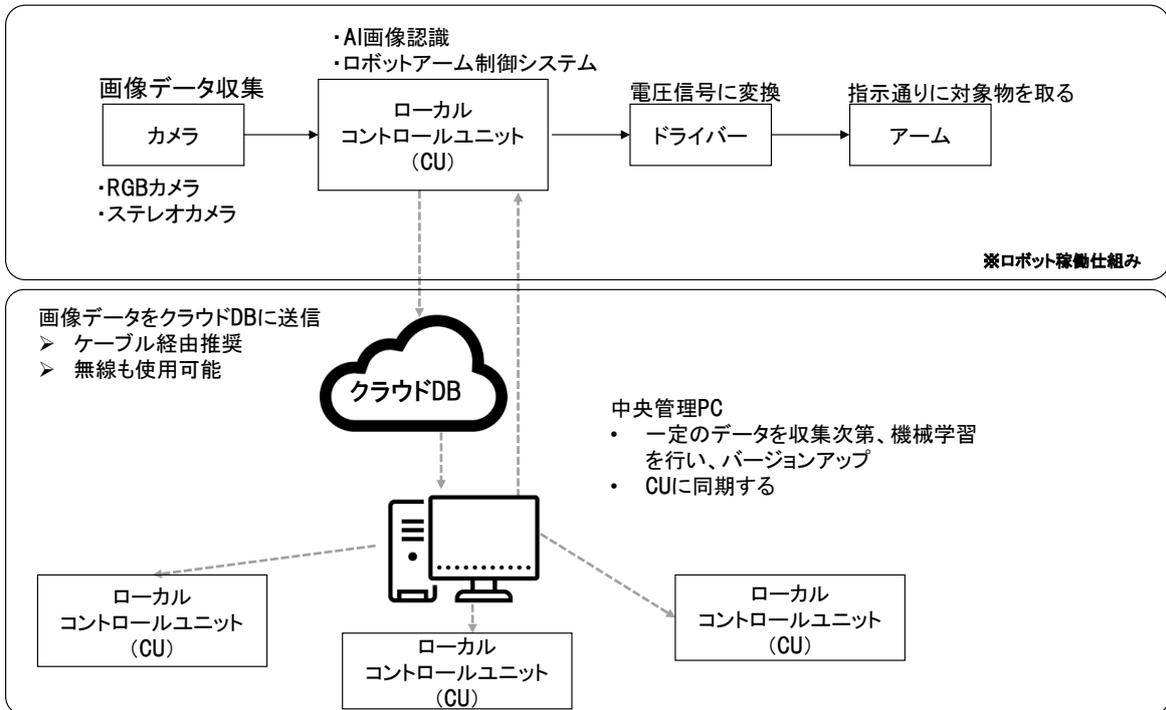


図 4-7 AI 選別ロボットのシステム構成

4-2 試験設備における選別実証

実証実験の目的と概要は、以下のようになる。

(1) 目的

- ① AI 選別ロボットのしくみと特徴の理解を行う。
- ② AI 選別ロボットの実験室レベルの開発状況を確認し、今後の開発テーマを明確とする。

※今回の選別対象；コンクリート塊、ペットボトル

(2) 実施概要

- ① 日時；2022年1月20日（木）13：30～
- ② 場所；高俊興業中央技術研究所 3階
- ③ 参加者メンバー；東京都、高俊興業(株)、学校法人早稲田大学、(株)イーアイアイ

1. 進め方の概略説明

- ・ アクチュエーター；2列、各1品目指定選別 ※グリップ回転不可
- ・ 進め方の流れ。

2. 単体選別

- ① コンクリート塊の認識、選別 ※コンベヤ 14m/分
- ② ペットボトルの認識、選別 ※コンベヤ流れ方向のみ認識
- ③ 両方選別

3. システムの説明

- ① 画像認識・物体認識—ディープラーニング（5,000枚）
※高俊興業のサンプル；建設廃棄物（コンクリート塊、木くず）/飲料容器（ペットボトル）
- ② ロボット制御
- ③ システムインテグレーション

4. 複合選別

- ① 混合処理（木くず、紙くず）の認識、選別
- ② コンベヤスピードの変更—パラメーター変更 ※コンベヤ 30m/分

5. 総括と今後の予定

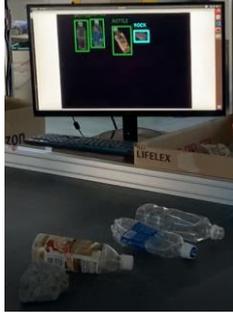
		
実験設備の設置状況	概要説明の様子	システム説明の様子
		
単体選別（手前；ペットボトル、奥；コンクリート塊）	試料投入の様子	画像認識の状況（Rock、Bottle）

写真 4-1 現場の様子

4-3 実証結果のまとめ

単体選別、複合選別の結果をまとめるとともに、それらを踏まえた今後の技術開発課題について整理を行う。

(1) 単体選別

- ◆ コンクリート塊、ペットボトル及び、両方をそれぞれ一つずつコンベヤ上に置いた上で、画像認識、選別回収の対応を把握した。

※ロボットアーム（2列）の選別機能；手前側レーン/ペットボトル用、奥側レーン/コンクリート塊

- ◆ その結果、コンクリート塊の単体認識・選別、ペットボトルの単体認識・選別、コンクリート塊、ペットボトル両方の認識・選別のいずれも、特段の支障なく選別できた。

※アクチュエータのグリップ方向が、コンベヤ流れ方向に固定されているため、ペットボトルの画像認識（機械学習）は、コンベヤの流れ方向の場合のみ物体認識させることとした。

(2) 複合選別

- ◆ 建設混合廃棄物の手選別ラインの状態の一部を再現するため、木くず、紙くず

(段ボール) を加え、複合状態とした後、コンクリート塊、ペットボトルの2種類の選別回収を行った。

- ◆ その結果、一部でコンクリート塊と木くずの誤認識が発生。対象物の重なりや物体同士の近接により、ピッキング精度が低下する。
- ◆ また、機械学習のサンプルが少ないため、コンクリート塊と木くずの区分精度があまり高くない状況も見られた。
- ◆ コンベヤスピードを速めた結果、グリップの昇降のタイミングにより、他の廃棄物とグリップがぶつかり、選別回収に支障が生じることがあった。スムーズな選別回収には、物体同士が密に接触していない状態が必要となる。

表 4-1 単体選別と複合選別の成果

	廃棄物種類	画像認識	選別回収	備考
単体選別	コンクリート塊	○	○	良好
	ペットボトル	○	○	良好。但し、コンベヤ流れ方向のみ回収。
	2品目 (コンクリート塊、ペットボトル)	○	○	同上。
複合選別	2品目+木くず、紙くず	△	△	コンクリート塊と木くずの誤認識が発生。さらに、層状の重なりは認識不良。
	2品目+木くず、紙くず (コンベヤ速度大)	△	△	同上。さらに、グリップの昇降のタイミングにより、他の廃棄物とのぶつかりなどが発生し、コンベヤ上の粗密状態の考慮も必要。

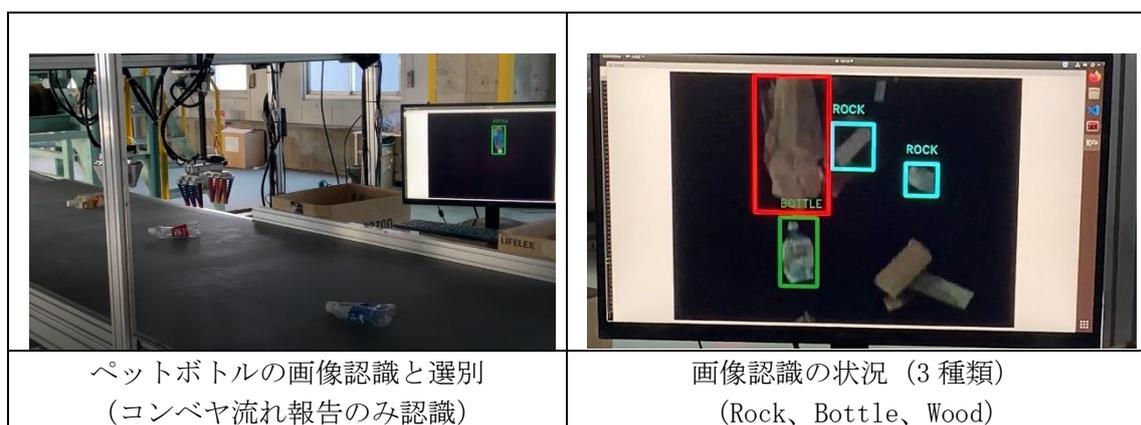


写真 4-2 現場の様子 (画像認識の状況)

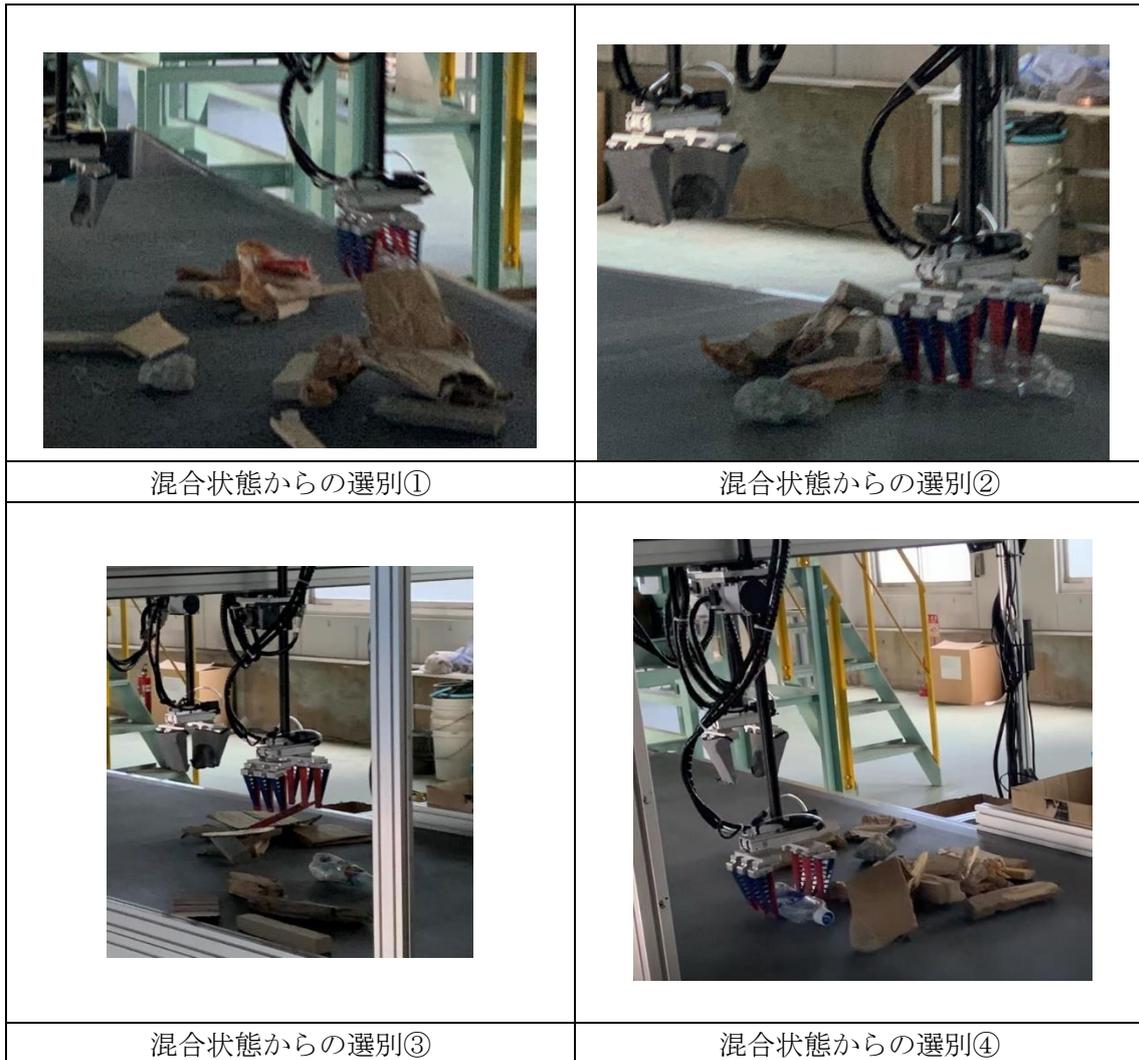


写真 4-3 現場の様子（複合選別の状況）

（3）今後の技術開発の課題

AI 自動選別ロボットは、画像認識+ロボット制御+システムインテグレーションの組み合わせ技術となる。実際の手選別の現場を想定した場合には、廃棄物の形状や、状態（層状、粗密状態）が複雑であること、危険物、廃プラ（PVC その他）の性状による分別、土砂等の汚れによる識別の困難性なども考慮する必要がある。

そのため、ロボット選別が難しいものについては、手選別を支援するシステムとし、ロボットは使用しないことなども必要となる。さらには、熟練者の画像判断も加味した遠隔操作による選別回収や、視覚的な画像認識のみならず、物性組成や、層状物の高さの正確な評価などに基づくより高度な選別回収システムの開発が必要となる。

以下の項目が、今後の技術開発の課題となると考えられる。なお、詳細は、次章で説明を行う。

- ① 手選別支援システムの開発
 - ◆ 対象物の自動検知・通知システムの開発
 - ◆ 遠隔操作型選別ロボットの開発
- ② AI 自動選別ロボットの開発
 - ◆ 不規則物の3Dおよび画像データ取得センサー等の開発
 - ◆ AI 画像認識システムの開発
 - ◆ ロボット制御システムの開発
 - ◆ ロボットのオペレーションシステムの開発
 - ◆ ロボットのメンテナンス

5. 建設混合廃棄物処理の効率化に向けた AI・ロボティクス導入ロードマップの検討

フィールドでの実証を踏まえて、AI・ロボティクスシステムの技術的な課題及び、現場に適合させる際の課題を抽出するとともに、課題の解決に向けたポイントを整理したものをロードマップとしてとりまとめた。

5-1 AI・ロボティクスにおける今後の開発テーマの明確化

建設混合廃棄物の処理プロセスは、土間選別、機械選別（バリオセパレーター、トロンメル、磁選機等）と手選別の組み合わせにより、手選別処理ラインの対象物のサイズとコンベヤ状態が決められる。選別対象物のサイズ、種類、コンベヤの状態、求められる速度等、選別環境や目的によって、適切なロボットを選定することが重要である。これまでの先行事例を調査し、廃棄物を対象とした自動選別に利用されるロボットの種類と特徴を下表に整理した。スカラ式ロボットは、コンパクトであり、設置や撤去が簡単に行える特長がある。一方で、比較的に大きいサイズや重量の対象物には適していないため、対象物のサイズがある程度整えられるコンベヤに適用できると考えられる。10kg以上のコンクリート塊や金属類をピッキングの対象にする際には、耐荷重の強いステーション式のロボットが有効であると考えられる。ステーション式ロボットは、現場の状況に応じて特注が必要で、リードタイムが長い場合が多いが、現場の状況に応じてオーダーメイドで製作できるメリットもある。2kg以下の軽量物を対象に高速に選別を行いたい場合には、パラレルリンク式のロボットが有効である。6軸のアーム型ロボットは、スカラ式と比べ、多少高価であるが、動きの自由度が最も高く、多様な動きが求められる場合には効果が発揮できると考えられる。

表 5-1 ロボットの種類と特徴

タイプ	スカラ（4軸）	ステーション型（5軸）	アーム型（6軸）	パラレルリンク型（4軸）
画像				
対象物	コンクリート塊、木くず、金属類、プラ、等	コンクリート塊、木くず、金属類、プラ、等	コンクリート塊、木くず、金属類、プラ、等	プラ、飲料容器（瓶、缶、PETボトル）
速度	1.3sec/pick	スカラ型より早い	0.5sec/pick	0.3sec/pick
負荷	～10kg	～30kg	～20kg	～2kg
重量	約20～40kg	100kg～	45kg～	100kg～
サイズ	・コンパクト	・小型～大型	・小型～大型	・中型～大型
設置性	・門型フレーム不要	・門型フレームが必要	・門型フレーム不要	・門型フレームが必要
開発性	・制御が容易	・制御が容易	・軸が多く制御が複雑	・制御が容易
コスト	・安価	・高価	・高価	・高価
LT	・標準品のためLT短い	・特注品のためLT長	・標準品のためLT短い	・標準品のためLT短い
サイズ	・コンパクト	・小型～大型	・小型～大型	・中型～大型

※速度：すべて上下方向250mm往復＋水平方向300mm往復時の時間 LT：リードタイムの略

また、ピックアップする対象物の特性により、物体を把持するグリップを選定することが重要である。グリップの動力には、主として気圧式と電動式で開閉するものがある。気圧式は、コンプレッサ等を利用し、安価で耐久性の高い構造となっている。電気式の場合は、モーターを内蔵し、その回転を開閉動作へと変換する。これにより、把持する圧力を電気信号で把握することが可能なメリットがある。グリップには様々な形状があるが、大きく多指グリップと吸着グリップの2種類がもっとも多く使われている。多指グリップは、単純開閉する2本ないし3本の爪によって対象物をつかむグリップである。吸着グリップは、バキュームと吸着パッドで構成される。ピックアップ対象物の形状や表面の物理特性により、多指グリップ、または吸着グリップの選定を行う。さらに、指の材質や本数、形状等の設計を行う。



写真 5-1 多指グリップ（左）と吸着グリップ（右）（例）

上記を踏まえ、AI・ロボティクスにおける開発目標は、次のようになる。これをクリアするための今後の開発テーマは、次のようになる。

(開発目標)

建設混合廃棄物の物性特性を踏まえて、適正に危険物、リサイクル物を選別回収ができること。

(1) 手選別支援システムの開発

① 対象物の自動検知・通知システムの開発

※上記①は、AI 画像認識はできるが、ロボットでのピックアップには課題があると考えられるもの。

1) 検知機能の開発

- a. AI 画像認識システム（対象物：コンクリート塊、木くず、スプレー缶など）
- b. ハイパースペクトルカメラ（対象物：塩ビ）

c. 各種センサー等（対象物：金属類など）

2) 通知機能の開発

- a. スマート眼鏡（メリット：作業員の目の前に表示するためわかりやすい。デメリット：常時の装着は疲れやすい。）
- b. プロジェクター投影（メリット：作業員にはストレスを感じない。デメリット：コンベヤ上では多少わかりにくい。）
- c. モニター表示や警報等（メリット：作業員にはストレスを感じない。デメリット：モニターへ視線を移す必要がある。）

② 遠隔操作型選別ロボットの開発

※上記②は、ロボットでピックアップできるが、正確に検知するには課題があると考えられるもの。

1) 遠隔操作ロボットの開発

手選別現場の作業環境としては、粉塵の飛散、夏冬による暑さ・寒さ、さらにコロナ時代では非接触が求められる。そこで、作業環境を改善するためには、遠隔操作ロボットが有効であると考えられる。

2) ユーザーインターフェースの設計と開発

現場や作業員の利用状況に応じて、システムのインターフェースの設計と開発が重要である。

(2) AI 自動選別ロボットの開発

一気通貫した AI 自動選別ロボットを実現させるためには、以下に示す 5 つの開発項目が挙げられる。

① 不規則物の 3D および画像データ取得センサー等の開発

自動選別を実現するためには、対象物を正確に検知し、さらに対象物の位置情報を認識し、正確にピックアップする必要がある。建設混合廃棄物を対象にする場合、廃棄物の量によりコンベヤの層厚が異なり、対象物の高さ（位置）が異なるため、通常の 2 次元の画像データでは、高さ情報の収集ができないため、正確なピッキングができないことになる。また、採用する対象物の判別手法によるが、3D の形状により、対象物を特定する場合には、高さ情報のみではなく、形状の特定が必要である。

このために、目的に応じて、複数のセンサーによって必要なデータを収集する必要があり、RGB カメラ、LiDAR、近赤外線センサー等を活用したデータ収集装置の開発が必要である。且つ、ロボット制御システムと一体化した処理を実現でき

るように、データ収集および処理速度を考慮した開発がポイントであると考えられる。

② AI 画像認識システムの開発

AI による自動認識を実現するためには、選別対象物および周辺環境を考慮し、ニューラルネットワークのモデルの選定および機械学習方法論を確立する必要がある。データ収集、アノテーション（教師データ作成）、トレーニング（機械学習モデルのパラメーターの自動調整）等を通して AI 画像認識システムを開発する。

③ ロボット制御システムの開発

選別ロボットにはスカラ式、パラレルリンク式、およびアクチュエータ式等のロボットがある。選別の目的に応じて、ロボットの方式を選定する。異なるメーカーのロボットには制御システムに対する制約等が異なり、開発状況に応じて適切なメーカーを選定することが重要である。ロボット制御システムの開発に関して、ROS (Robot Operation System) を用いて開発するケースが多い。ロボット・アプリケーションの作成を支援するライブラリやツール、メッセージ通信、パッケージ管理等の機能を提供している。ただし、ROS を利用する開発にはある程度の専門性が求められる。開発するロボットに求められる機能によるが、ロボットメーカーが提供するドライバーを利用して開発することも可能である。

④ ロボットのオペレーションシステムの開発

運用段階においては、現場オペレーションの視点から運用しやすいインターフェースの設計と開発が必要である。また、通常のオペレーションにより、ロボットの選別精度を自動向上できる AI 自動学習機能を開発することが望ましい。また、必要に応じて、オペレーションデータを管理するクラウド型システムの開発検討が必要である。

⑤ ロボットのメンテナンス

ロボットのメンテナンスには、①機械のメンテナンスと②ソフトウェアのメンテナンスがある。①機械のメンテナンスは、通常ロボットメーカーと連携して行う。②ソフトウェアのメンテナンスは、a. 維持管理と b. 精度向上の 2 点があり、クラウド型の維持管理システムの開発が望ましいと考えられる。

5-2 AI・ロボティクスシステムの実装と普及拡大

AI・ロボティクスシステムの実装と普及拡大に向けた開発目標は、次のようになる。これをクリアするための今後の開発テーマは、次のようになる。

(開発目標)

次世代の処理システムとして、ヒトとロボットが共存し、最適な処理システムの普及がされる。

(1) ロボット導入に伴う処理フロー見直し（ヒト共存型システム）

AI ロボットの導入に伴い、処理フローの見直し（ヒト共存型システム）が必要であり、現状の処理業者において困っている事項を対象に検討を行うとした場合、下記の3ケースによる処理のあり方が考えられる。これは、ロボットの機械特性を踏まえた見直しであり、そのため、安全かつ、ロボットが十分な機能を発揮しうる処理環境を整える必要がある。

AI ロボットの得意分野は、形状、色、大きさが一定の範囲内にあり、機械学習・深層学習が容易に行え、かつ、グリップ（吸引式サクション含む）で掴めるものである一方、ベルトコンベヤ上の仕事環境によっては、一定の認識不良、掴み損ねなども生じることの考慮が必要となる。それに対し、一次選別には、危険物、破碎不適物のように確実な選別回収が求められるものや、廃プラのように色、形状、大きさが様々で画像認識や、ロボットアームによる回収がしにくいものも多い。つまり、全てをAI ロボットを利用した回収システムを構築するのではなく、廃棄物の内容や、ベルトコンベヤの環境に応じて、手選別とロボット選別の組み合わせを考慮する必要があるといえる。つまり、AI 画像認識で物体検出はできるが、ロボットアームでの選別回収では確実性が伴わないものについては、引き続き人による選別回収が望まれる場合がある。その場合は、AI 画像認識が手選別を支援するようなツールを利用するなどが考えられる。なお、人の目で判断のつかない廃プラスチックの素材（塩ビ）別回収などについては、光学式カメラなどを用いることで手選別支援を行うことが可能となる。

上記を考慮した上で、①手選別支援、②ロボット選別の2通りの回収方法の組み合わせでの選別回収を検討する必要がある。また、当面は、AI ロボットの選別効率（スピード、精度）は、人の選別能力には到底追いつけない状況を考慮すると、ロボットエリアのみ24時間稼働な場合には処理方法の工夫を行うなど、処理フロー検討時には考慮が必要となる。

① 「従来型ケース」；選別回収ライン（1ライン）の配置構成見直し（重量物、軽量物混合）

既存の手選別ライン（1ライン）の構成とし、ロボットの機械特性を踏まえて、手選別支援エリアとロボット選別エリアを組み合わせたシステムである。処理は、ベルトコンベヤ上の層状を解消し、AI 画像認識がしやすいコンディションに整えたのち、危険物、特定の廃プラ（塩ビ）を手選別支援で回収し、その後、木くず、コンクリート塊、非鉄金属などをAI ロボット選別機で回収し、最後に人により再度、危険物、破碎不適物の確実な選別回収を行う。

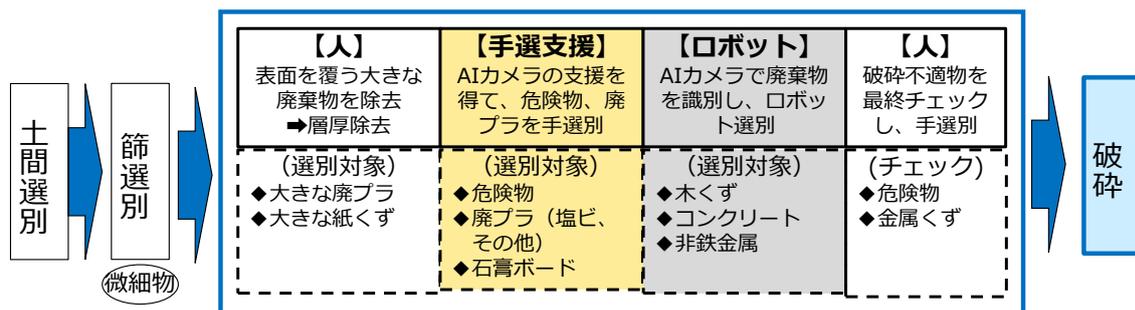


図 5-1 従来型ケース

- ② 「事前破碎+機械選別」；事前破碎—機械選別（重量物、軽量物、微細物）—選別回収ライン（2ライン；重量物/軽量物）

ロボットの機械特性を考慮の上で、破碎による形状調整、機械選別による重量物と軽量物の2ラインでの選別とする。選別対象は、破碎後の形状（50 cm以下かつ、形状調整可）が基本となる。重量物には、木くず、コンクリート塊、非鉄金属が流れるため、それらをAIロボット選別機が回収し、最後に人により再度、危険物、破碎不適物の確実な選別回収を行う。軽量物には、廃プラ、紙くず等が流れるため、廃プラ（塩ビ）の選別回収を行う。

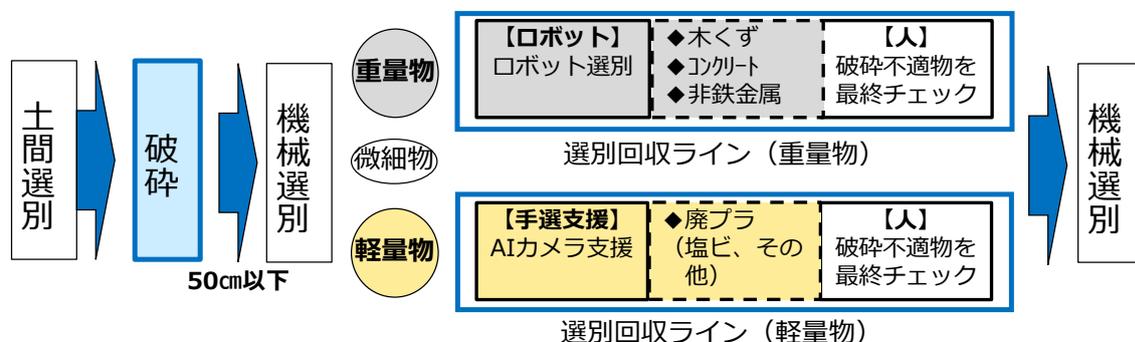


図 5-2 事前破碎+機械選別ケース

- ③ 「事前機械選別のみ」；事前機械選別（重量物、軽量物、微細物）—選別回収ライン（2ライン；重量物/軽量物）

ロボットの機械特性を考慮の上で、機械選別による重量物と軽量物の2ラインでの選別とする。選別対象は、機械選別機に入る50 cm以下のものが対象となる。重量物には、木くず、コンクリート塊、非鉄金属が流れるため、それらをAIロボット選別機が回収し、最後に人により再度、危険物、破碎不適物の確実な選別回収を行う。軽量物には、廃プラ、紙くず等が流れるため、廃プラ（塩ビ）の選別回収を

行う。②との違いは、土間選別では 50 cm 以上のものは全て回収する必要がある点である。



図 5-3 事前機械選別のみケース

表 5-2 ケース別の特徴と課題

ケース	特徴	課題	備考
(1) 従来型ケース	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1 ライン ・ 篩選別のみ ・ 選別回収ラインの大きな変更は不要 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 廃棄物の層状の解消が必須 ・ 混合状態のため、ロボットによる選別回収の難易度は大 	ヒトとの共存が前提（効率性；小）
(2) 事前破碎+機械選別	<ul style="list-style-type: none"> ・ 重量物、軽量物の 2 ライン化 ・ 破碎後は形状が安定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2 ラインへの改造要 ・ 土間選別への負担大（破碎前に危険物除去が必要） 	ロボットによる選別回収は容易（効率性；大）
(3) 事前機械選別のみ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 重量物、軽量物の 2 ライン化 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2 ラインへの改造要 ・ 土間選別への負担中（50 cm 大は、事前選別要） 	ロボットによる選別回収は容易（効率化；大）

(2) 施設整備の留意事項

手選別エリア、ロボット選別エリアなどの整備は、一次選別エリアの見直しのみならず、施設全体の設計や、処理フローの見直しが必要となることが多い。そのため、ロボット開発及び設備設置には、施設全体のエンジニアリングとの連携が重要となる。そのため、ロボット開発メーカーは、エンジニアリング会社と連携の上で、施設全体のバランス、管理方法などについての調整を行う必要がある。

ロボット設備の導入は、施設全体のバランス調整、設備改造に伴う休止の必要性、許認可取得を含めた工事期間の調整を考慮すると、工場新設、設備更新などの機会を捉えた設置が望ましい。

なお、許認可については、廃棄物処理法において、選別行為の概念や許可上の位置付けが不明確であり、表に示すとおり、自治体ごとに選別許可の位置付け、要件、処理能力算定方法などを独自に判断しているという実情がある。その上、AI 自動選別ロボットの導入についての許可上の取扱いは、事例も少ないため、各自治体の運用には、選別処理施設の要件として適切な選別行為が行える機械として判断されるケース、独自の指針や指導要綱で施設の構造基準等の規定を設けて対応を求めるケース、申請内容や現地確認により個別に判断されるケースなど、様々であるとの認識を持って許可等の取得を進める必要がある。つまり、AI 選別ロボットの導入にあたっては、所管する自治体との個別協議が重要となる。

表 5-3 産業廃棄物処理業における選別に係る許可等の取扱状況

項目	自治体の取扱状況
1. 許可制度の有無	127 自治体中、108 自治体（85%）で選別許可の認可済 関東ブロック 67%、近畿ブロック 79% ※処理業の許認可権を保有する総自治体数（127；都道府県、政令市、中核市等）
2. 選別許可の名称	「選別」、「破碎・選別」、「選別・破碎」、「選別・圧縮」など自治体で異なる。
3. 選別処理施設の要件	<ul style="list-style-type: none"> 適切な選別行為が行われる機械の設置 独自の指針や指導要綱で施設の構造基準等を規定 申請内容や、現地確認により個別に判断
4. 処理能力の算定	<ul style="list-style-type: none"> メーカーのカタログ値、処理能力計算書から算定 処理全体で律速段階となる工程の処理能力を採用 選別単独での算定はせず選別後の中間処理や施設全体で算定

（出典）環境省「令和 2 年度産業廃棄物処理業における選別に係る実態調査業務報告書」（令和 3 年 3 月）（株）リーテム

（3）普及・啓発・評価

AI ロボット選別の導入は、未だ実績が少ないことから、今後、幅広く普及を進めるためには、下記事項についての情報の蓄積、共有が重要となる。

① ヒトと共存したロボットの設置方法（事業経営のあり方含む）

手選別エリア、ロボット選別エリアにおける設備設置を含め、一次選別におけるヒトと共存したライン構成と、事業コンセプトについては、様々な方法論の組み合わせが考えられる。事業経営のあり方にも係る事項となるため、共通化できる情報の蓄積が重要となる。

② 設備設置の手順と工程

手選別エリア、ロボット選別エリアにおける関係設備については、設置目的、設置内容、設置手順、工程が様々考えられる。効率的な一次選別の見直しに

向けて方法論の共有を進めることが重要である。

③ 設備設置に係る許認可の取得方法

AI ロボット選別の許認可上の取扱いは、自治体ごとに確定した概念はない。そのため、手選別支援エリア、ロボット選別エリア、一次選別エリア全体の改造、新設時の許可の概念については、自治体の判断の条件や結果などの情報の蓄積が今後、必要となる。

④ システムの構築、選別精度の向上（機械学習、深層学習）

ロボット選別システムの構築は、画像認識+アルゴリズム学習+ロボット制御+システムインテグレーションの組み合わせにより構成される。廃棄物処理の現場は、各社、各メーカーにより特異性があり、各開発現場では、個別の現場条件を踏まえて異なったシステムの構築がなされており、今後とも個別最適化されることが想定され、効率的な普及の課題となる。そのため、将来は、AI 学習データの共通利用や、それを利用した選別精度の向上等も含め、システムの管理、更新、性能向上が統一して図られるよう共通化されることが望ましい。

⑤ 設備のメンテナンスの方法や管理体制（社内教育含む）

手選別エリア、ロボット選別エリアともに、施設稼働後は、設備の安定稼働、AI 学習システムなどを考慮した設備のメンテナンス、安全・管理体制などが重要となる。

⑥ ロボット選別の導入の評価（経済性、省人化、効率化など）

一次選別の効率的な見直しに向けては、手選別エリア、ロボット選別エリアの見直しに関する経済性、省人化、効率化などに関する効果評価が重要となる。そのため、評価方法の標準化を図り、ロボット選別の導入の評価が行えるようにすることが重要となる。

上記に加えて、普及拡大に向けては、短期間でのシステム構築が最も重要となる。そのため、今後は、システム構築、選別精度の向上に向けた機械学習、深層学習データの共通化も含め、ロボット導入方法、課題、導入効果の情報収集と、同一指標による分析フォーマットの構築なども重要となる。

5-3 ロードマップの検討

前記した「AI・ロボティクスにおける今後の開発テーマ」と、「AI・ロボティクスシステムの実装と普及拡大」に向けた検討テーマと取組目標を踏まえて、建設混合廃棄物処理の効率化に向けたAI・ロボティクス導入ロードマップのとりまとめを行った。

以下に、建設混合廃棄物処理の効率化に向けたAI・ロボティクス導入ロードマップと、AI・ロボティクスにおける今後の開発ロードマップをとりまとめる。

	項目	内容	1-2年目	3-4年目	取組目標
AI・ロボティクスにおける今後の開発テーマ	手選別支援システムの開発	対象物の自動検知・通知システムの開発	→	→	<div style="border: 1px solid blue; padding: 5px;"> 建設混合廃棄物の物性特性を踏まえて、適正に危険物、リサイクル物を選別回収ができること。 </div> ① 1-2年目；プロトタイプ開発 ② 3-4年目；商品化・実用化開発
		遠隔操作型選別ロボットの開発	→	→	
	AI自動選別ロボットの開発	不規則物の3Dおよび画像データ取得センサー等の開発	→	→	
		AI画像認識システムの開発	→	→	
		ロボット制御システムの開発	→	→	
		ロボットのオペレーションシステムの開発		→	
		ロボットのメンテナンス		→	
実装と普及拡大 AI・ロボティクスシステムの	ロボット導入に伴う処理フロー見直し（ヒト共存型システム）	「従来型ケース」	→	→	<div style="border: 1px solid blue; padding: 5px;"> 次世代の処理システムとして、ヒトとロボットが共存し、最適な処理システムの普及がされる。 </div>
		「事前破砕+機械選別」	→	→	
		「事前機械選別のみ」	→	→	
	施設整備の留意事項		→		
	普及・啓発・評価	データ共有、情報公開		→	

図 5-4 建設混合廃棄物処理の効率化に向けた AI・ロボティクス導入ロードマップ

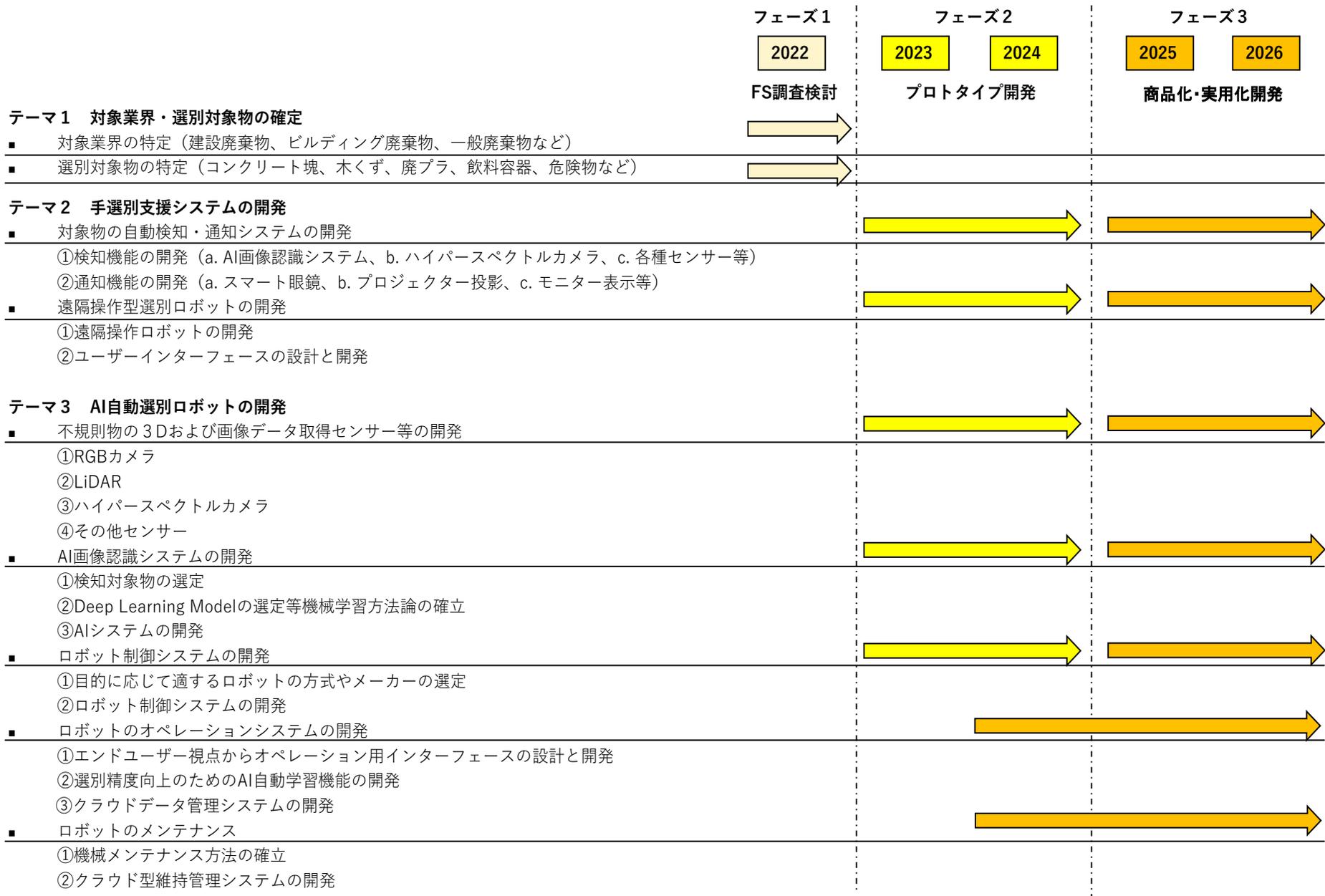


図 5-5 AI・ロボティクスにおける今後の開発ロードマップ

ロードマップを踏まえて、実際にAI・ロボティクスの導入を進めるための事業経営計画を作成する場合には、下記の視点が重要となると考えられる。

(重要な視点)

- ① AI・ロボティクスを処理事業に取り入れることに伴い、事業経営のあり方や施設的设计思想において、ヒトとロボットが共存するための概念が明確であること。
- ② 事業リスクに対する管理レベルが高いこと。
 - ◆ ロボット導入により生産設備と同様の管理が求められることになる。(安全管理、メンテナンス)
 - ◆ ロボットシステムが安定的に機能するためには、処理前、処理後の成果物の物理性状の管理及び成果物の品質管理、安定的な出荷等が重要となる。
- ③ 災害時の対応など、対象とする廃棄物への柔軟な対応がしうること
 - ◆ 建設混合廃棄物の処理施設では、天災(地震、豪雨、津波等)に伴う災害廃棄物の対応も求められている。そのため、粗大ごみを含む混合物や、土砂系の混入も含めて、ロボット選別の前後の機械処理で対応ができるような処理フローの工夫も求められる。

今後、次世代の処理システムとしてのAI・ロボティクスの技術開発には、産官学連携を推進できる体制を構築した上で、各種の技術課題(AI画像認識、アルゴリズム設計、ハード・ソフト設計、ロボット制御システム、システムインテグレーション)を一気通貫の開発として合理的に行い、かつ、コスト低減を図ることも重要な視点となる。