

平成 31 年度省 CO2 型リサイクル等設備技術実証事業

電子基板及び自動車部品の未回収白金族
リサイクルシステム実証事業

報告書

令和元年 2 月

リバーホールディングス株式会社

要約

低炭素製品をはじめとする工業製品の性能向上や新規機能等のためには、PGM は必要不可欠な鉱種であり、低炭素製品等の普及に伴って PGM 需要量は増大することが見込みである。一方で、PGM の供給量には限りがあるため、PGM の資源確保が重要な社会課題となっているが、個々の製品や部品等に含まれる PGM 量が少ないものについては、その回収・リサイクルが経済的に成立しにくい状況にある。例えば、電子・電気機器に搭載される電子部品は、使用済み製品から電子基板とともに取り外され、電子部品に含まれる付加価値の高いメタルが抽出・精製されているが、PGM の一部は精製時に回収できていない。他にも自動車部品では、排ガス触媒、着火プラグ、O₂ センサーなどに PGM が使用されており、PGM の供給源として期待されるが、排ガス触媒以外では効率的な回収・リサイクルの仕組みが未確立である。

そこで本事業では、既に構築されている電子基板の回収・リサイクルシステムに AI 画像認識選別システムを導入することで PGM が含有する電子部品の選別技術を、個別に回収が行われていない着火プラグ・O₂ センサーの回収方法・PGM 含有部位の分離方法を開発することで、PGM ターゲットのリサイクルシステムの構築を目指した。

AI 画像認識選別システムは、汎用品を組合せることで電子部品を列状にコンベアに流す機械的な仕組みを開発し、コンベア上に流れる電子部品を画像認識し、ターゲットとする電子部品をエアブローで選別するシステムである。カメラ撮影画像による部品検出/認識のアルゴリズム検証を行い、画像を AI に学習させた。電子部品別に検証を行い、IC チップとセラミックコンデンサの認識率は 70% を超え、高い割合で選別できた。PGM をターゲットにした場合、本システムを使いどの電子部品を選別することが効果的なのかを把握するために、電子部品の PGM 含有率を分析した。この結果、チップ抵抗、セラミックコンデンサにはパラジウムが、タンタルコンデンサもその名の通りタンタルが多く含まれていることがわかった。そこで、チップ抵抗・セラミックコンデンサをパラジウムターゲットグループ、タンタルコンデンサ単体をパラジウムターゲットグループ、その他の貴金属ターゲットグループに分けることが最適と判断した。選別した電子部品のリユースについては、台湾企業へのヒアリングを実施し、CPU やメモリはリユースされていることを確認したが、その他の電子部品のリユース市場は確認できていない。

着火プラグ・O₂ センサーでは、全国 6 整備工場にヒアリングを行い、市場規模、保管・分別・輸送方法・輸送コストを把握した。この結果、着火プラグと O₂ センサーの年間発生量はそれぞれ約 280 万個、9 万個と推定した。回収可能性については、整備工場で分別保管することは簡単にできることを確認した。レターパックライトでの回収により、着火プラグ 6.2 円/個、O₂ センサー 12.3 円/個の輸送コストとなることを確認できた。回収した着火プラグから PGM の含有部位を分離する方法は、プラチナを含む外側電極を金属バサミで切断でき、その後、イリジウムを含む中心電極は金属やすりで粉上に削れることを確認し、それぞれに要する時間は 10 秒/本、50 秒/本であり、1 時間あたり約 60 本の処理ができることを確認した。一方の O₂ センサーは、低コストで、保有している企業も多い高速回転切断機の活

用を想定し、切断実験を実施し、30秒あたり1本のO2センサーを切断できることを確認した。

事業性については、電子部品は、選別したチップ抵抗、セラミックコンデンサ、タンタルコンデンサを精錬業者に売却できることを確認し、AI画像認識部品選別システムにより、現状よりも売上高を13%向上できることを確認した。着火プラグ・O2センサーは、高性能着火プラグの外側電極2.4g、中心電極0.2gを使って簡易XRF分析を実施したところ、外側電極のターゲットであるプラチナは4.63%、中心電極のターゲットであるイリジウムは20.2~33.4%と高い含有率であることを確認でき、着火プラグ1本あたり20~24円程度で売却できる可能性を確認した。

商用化に向けて、電子部品では、開発したAI画像認識選別システムにより部品群からアルミコンデンサやコイル等の製錬における忌避部品を選別し脱酸素剤への利用により付加価値を創出すること、選別率を向上させること、選別システムの入口・出口のビッグデータを活用したりサイクル事業のデジタルトランスフォーメーション(DX)化を想定しシステムのエッジコンピューティング化することを検討する。着火プラグ・O2センサーでは、実際に収集回収を行った場合に、価値の低いプラグの混入割合、レターパックの重量制限、プラグに残存するイリジウム・プラチナのばらつきなど詳細な確認を行う。

Summary

PGM is an indispensable mineral species in order to improve the performance of industrial products such as low carbon products and new functions, etc., and the required amount of PGM is expected to increase with the popularization of low carbon products, etc. On the other hand, because of the limited supply of PGM, securing PGM resources has become an important social issue. However, it is difficult to economically recover and recycle PGM contained in individual products, parts, etc. in small amounts. For example, electronic components mounted on electronic and electrical equipment are removed from used products together with electronic substrates, and high-value-added metals contained in the electronic components are extracted and purified, but some of the PGM cannot be recovered at the time of purification. In addition, in automobile parts, PGM is used for exhaust gas catalyst, ignition plug, O₂ sensor, etc., and it is expected to be a supply source of PGM, but a mechanism for efficient recovery and recycling has not been established except for exhaust gas catalyst.

Therefore, this project aimed at constructing a recycling system for PGM targets by introducing an AI image recognition and sorting system into the collection and recycling system for electronic substrates that has already been constructed, thereby developing a technology for sorting electronic components contained in PGM, a method for collecting ignition plugs and O₂ sensors that have not been individually collected, and a method for separating PGM-containing parts.

The AI image recognition and sorting system is a system that develops a mechanical mechanism for flowing electronic components in a row to a conveyor by combining general-purpose products, recognizes images of electronic components flowing on the conveyor, and sorts target electronic components by air blowing. Algorithm verification of component detection/recognition using camera-captured images was performed, and the images were learned to AI. Verification was carried out for each electronic component, and the recognition rate of IC chip and ceramic capacitor exceeded 70%, and it was possible to select them at a high rate. When targeting PGM, we analyzed the PGM content of electronic components in order to understand which electronic components are effectively selected using this system. As a result, it was found that the chip resistor and the ceramic capacitor contained a large amount of palladium, and the tantalum capacitor contained a large amount of tantalum as the name indicates. Therefore, it was judged that it is optimal to divide the chip resistance/ceramic capacitor into the palladium target group, and the tantalum capacitor alone into the tantalum target group and other noble metal target groups. Regarding the reuse of selected electronic components, interviews were conducted with Taiwanese companies to confirm that CPUs and memories are being reused, but the market for reuse of other electronic components has not been confirmed.

For the ignition plug and O2 sensor, interviews were conducted with 6 maintenance plants nationwide, and the market size, storage, sorting, transportation method, and transportation cost were grasped. As a result, the annual generation of ignition plugs and O2 sensors were estimated to be about 2.8 million and 90,000, respectively. Regarding recoverability, it was confirmed that high-performance plugs containing iridium and platinum can be easily visually distinguished, and can be easily separated and stored in the maintenance factory. The recovery with letter pack lights resulted in a transportation cost of 6.2 yen/unit of ignition plugs and 12.3 yen/unit of O2 sensor. In the method of separating the PGM-containing part from the recovered spark plug, it was confirmed that the outer electrode containing platinum could be cut with metal spatula, and then the center electrode containing iridium could be scraped onto the powder with a metal file, and it was confirmed that the time required for each was 10 seconds/line and 50 seconds/line, and about 60 pieces could be processed per hour. On the other hand, assuming the use of a high-speed rotary cutting machine that many companies own at low cost, the cutting experiment was carried out, and it was confirmed that one O2 sensor could be cut per 30 seconds.

Business feasibility was examined. For electronic components, it was confirmed that selected chip resistors, thalamic capacitors, and tantalum capacitors could be sold to refiners, and it was confirmed that sales could be improved by 13% compared with the current situation by the AI image recognition component selection system. As for spark plug and O2 sensors, simple XRF analyses of the outer electrode 2.4g and the center electrode 0.2g of high-performance unit-price plugs confirmed that platinum, the target of the outer electrode, and iridium, the target of the center electrode, contained as high as 4.8% and 20.2-33.4%, respectively, and confirmed the possibility of selling them at around 20-24 yen per spark plug.

For commercialization of electronic components, the following are examined : Creation of added value after selecting repellent elements in smelting such as aluminum condenser and coil from the component group by the developed AI image recognition and selection system, verification of use case to oxygen scavenger, improvement of selection rate, DX conversion of recycling business using big data of inlet and outlet of selection system, edge computing of the system. In the case of the ignition plug and O2 sensor, when actually collected and collected, detailed confirmation such as mixing ratio of the plug of low value, weight limitation of the letterpack, variation of iridium and platinum remaining in the plug, etc. is carried out.

目次

I. 背景と目的.....	1
II. 事業実施内容.....	2
1. 電子基板・自動車部品から PGM 等の貴金属リサイクルの仕組み構築に向けた検討.....	2
1.1. 電子基板から蒸気による電子部品分離と部品の自動選別技術の検証.....	2
1.1.1. 技術概要・実証概要.....	2
1.1.2. 対象とする電子基板の概要.....	7
1.1.3. 対象とする電子部品の検討.....	8
1.1.4. 手選別した電子部品の各電子基板における含有量.....	12
1.1.5. 既存文献の調査に基づく選別対象部品の検討.....	13
1.1.6. ターゲットとした電子部品の PGM 等含有量の分析結果.....	15
1.1.7. AI 画像認識選別システムの開発.....	15
1.1.8. 選別機との AI 画像認識システムの組み合わせ効果の検討.....	22
1.1.9. PGM としての精錬業者への売却から見た電子部品のグルーピングの検討.....	23
1.1.10. 部品リユースの可能性の検討.....	24
1.1.11. 事業化に向けた課題・対応策.....	24
1.2. 自動車整備ルートからの部品回収と PGM 含有部位の効率的な分離技術の検証.....	27
1.2.1. 前提条件.....	27
1.2.2. 市場規模の推定と分別回収方法の検討に向けたヒアリングの実施.....	28
1.2.3. 市場規模の推定.....	38
1.2.4. 回収方法の検討.....	39
1.2.5. 解体工場等との連携可能性.....	44
1.2.6. PGM 含有部位の効率的な分離方法の検討.....	49
1.2.7. PGM 含有量の分析結果.....	56
1.2.8. 事業化に向けた課題・対応策.....	57
2. 環境影響評価.....	60
2.1. インベントリ・バウンダリの考え方.....	60
2.1.1. 着火プラグ・O ₂ センサーのインベントリ・バウンダリ (図 59 参照).....	60
2.1.2. 電子基板のインベントリ・バウンダリ (図 60 参照).....	61
2.2. CO ₂ 削減効果の試算.....	62
2.2.1. 着火プラグ・O ₂ センサー (図 61 参照).....	62
2.2.2. 電子基板.....	65
3. 事業化可能性の検討.....	67
3.1. 既存技術との比較.....	67

3.1.1.	着火プラグ・O2 センサー	67
3.1.2.	電子部品.....	67
3.2.	採算性の評価.....	67
3.2.1.	着火プラグ・O2 センサー	67
3.2.2.	電子部品.....	70
3.3.	事業化に向けた課題.....	71
3.3.1.	着火プラグ・O2 センサー	71
3.3.2.	電子部品.....	73
3.3.3.	事業性について.....	77
3.4.	今後の普及見通し	78
3.4.1.	本実証技術の将来展開イメージ	78
3.4.2.	普及見通し	78
III .	おわりに	81

1. 背景と目的

低炭素製品をはじめとする工業製品の性能向上や新規機能等のためには、PGM は必要不可欠な鉱種であり、低炭素製品等の普及に伴って PGM 需要量は増大する見込みである。

一方で PGM の供給量には限りがあるため、PGM の資源確保が重要な社会課題となっているが、個々の製品や部品等に含まれる PGM 量が少ないものについては、その回収・リサイクルが経済的に成立しにくい状況にある。

様々な電子・電気機器に搭載される電子部品は、使用済み製品から電子基板とともに取り外され、電子部品に含まれる付加価値の高いメタルが抽出・精製されているが、PGM の一部は精製時に回収できていない。

また自動車部品では、排ガス触媒、着火プラグ、O₂ センサーなどに PGM が使用されており、PGM の供給源として期待されるが、排ガス触媒以外では効率的な回収・リサイクルの仕組みが未確立である。

本実証は、PGM 等の貴金属の供給源確保に向けて、電子部品と自動車部品を対象に、回収・選別・濃縮等の技術・システムに関わる検証を目的とする。本目的の達成に向け、図 1 に示す通り、本事業では以下の項目を実施する。

- (1) 電子部品からのPGM等貴金属の含有部品の選別・濃縮
 - 選別対象とする部品分類の明確化
 - 効果的な部品選別方法の検討
 - リユース可能性の検討
- (2) 自動車部品（着火プラグ、O₂センサー）の回収とPGM含有部位の分離
 - 回収可能性の検討
 - 効果的な分離技術の検討
- (3) 事業性評価（売却可能性、事業スキーム、事業規模、収益性等）

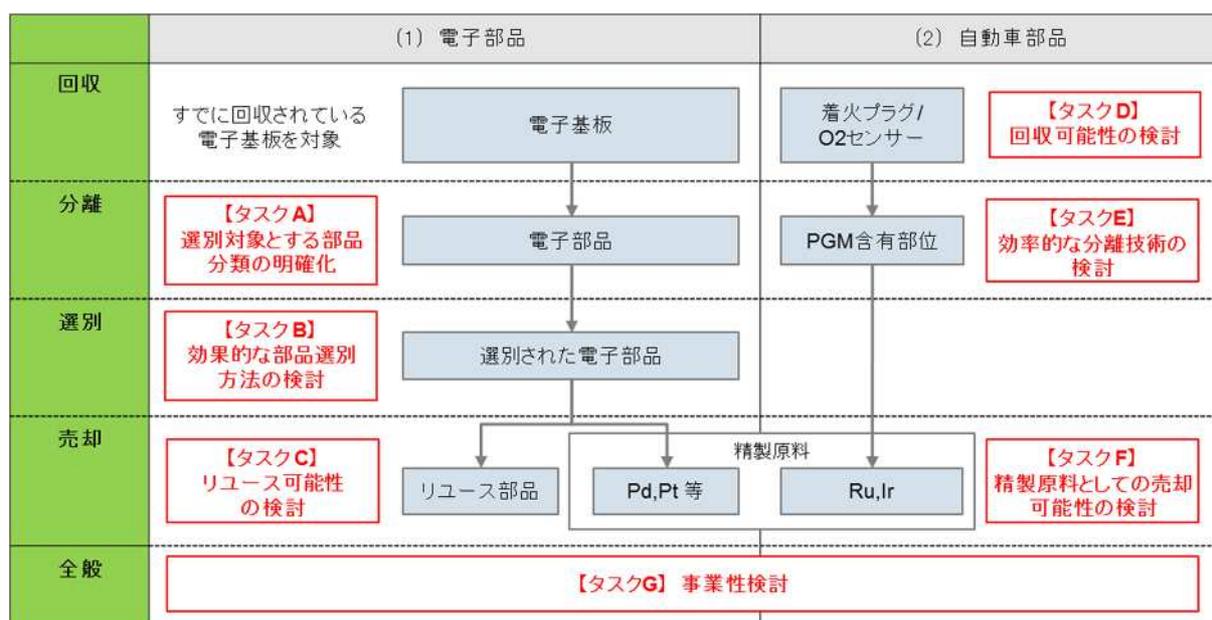


図 1 本実証事業の実施項目

II. 事業実施内容

1. 電子基板・自動車部品から PGM 等の貴金属リサイクルの仕組み構築に向けた検討

1.1. 電子基板から蒸気による電子部品分離と部品の自動選別技術の検証

1.1.1. 技術概要・実証概要

1) 技術概要

パソコン等の種々の電子機器に含まれる電子基板の一般的なリサイクルは、前処理として破碎した後、金や銀の原料として乾式精錬所に出荷されるものである。このとき、電子基板に含まれる PGM は、含有濃度が低いために、資源性、経済性の両面からリサイクルされていない現状がある。こうした状況を打開するため、一般的な電子基板リサイクル業者では、PGM として評価してもらうための破碎の仕方や基板選別の仕方を色々と試みてはいるが、PGM を資源として評価してもらえるまでには至っていない現状がある。

図 2 に(株)アステック入江における電子基板のリサイクルフローを示す。このリサイクルプロセスの特徴は、「蒸気分離による電子部品の分離」と「塩化鉄による貴金属の濃縮処理」を組み合わせている点である。ここで、それぞれの技術の概要を記載した上で、プロセス全体の特徴を記載する。

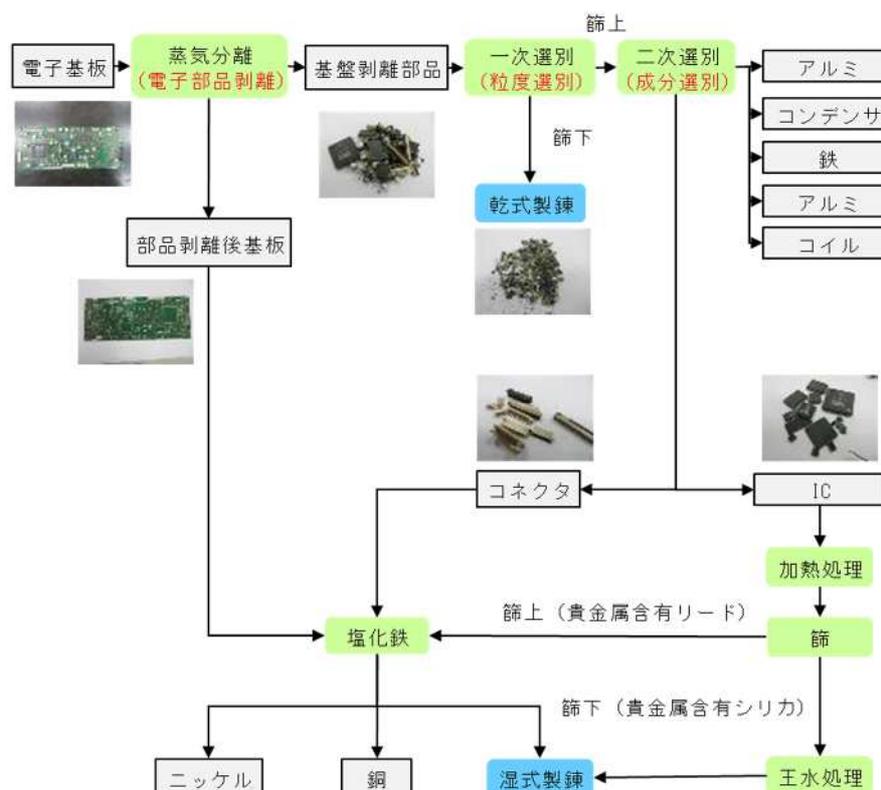


図 2 (株)アステック入江の電子基板リサイクルフロー

(1) 蒸気分離による電子部品の分離技術の概要

電子基板に搭載されている電子部品は、基板上にはんだ付けされることで搭載されているが図

3 に示す通りアステック入江では過熱水蒸気を使って、はんだを効率的に溶かし、電子部品を分離することができる。ここで使われる過熱水蒸気は、飽和水蒸気を更に 100 以上に加熱することで得られる水蒸気であり、熱効率が高く、同温度の空気雰囲気よりも 5 倍程度高いといわれているものである。

この分離技術により、図 4 に示す通り、種々の電子部品を破壊させることなく回収することができるため、選別することにより、それぞれの電子部品が持っている資源ソースを最大限に引き出せるプロセスとなっている。



図 3 蒸気分離技術による電子部品の分離



図 4 蒸気分離後の電子部品

(2) 塩化鉄による貴金属の濃縮処理技術の概要

塩化鉄は化学的に大別すると、塩化鉄(Ⅱ)と塩化鉄(Ⅲ)の 2 種類になる。このうち、塩化鉄(Ⅱ)は腐食作用の特徴を持っており、塩化鉄(Ⅲ)溶液はその腐食作用を利用した表面加工技術(以下、「エッチング」という。)の分野で、主に図 5 に示す半導体部品であるリードフレー

ムと呼ばれる部品を製造する際に使用されている。

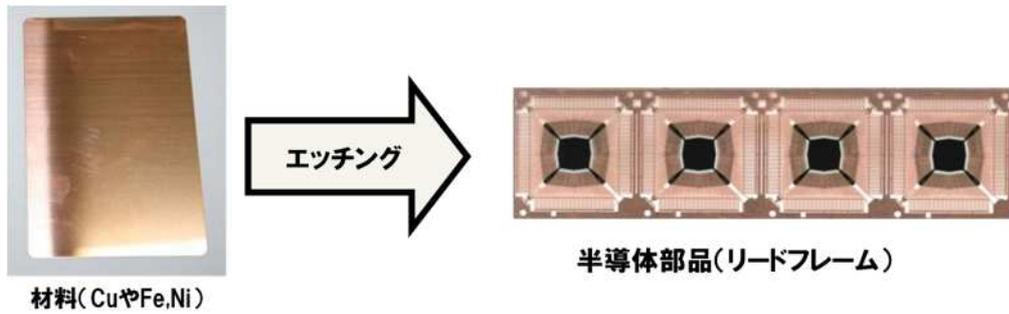


図 5 半導体部品製造におけるエッチング加工における塩化鉄溶液の使用

エッチングで使用済となった、塩化鉄(Ⅱ)溶解(以下、「エッチング廃液」という。)には材料成分の銅やニッケル、鉄がエッチング廃液中に溶け込んだ状態となっている。アステック入江では、図 6 に示す通り、そのエッチング廃液中に含まれる銅やニッケルといった金属成分を還元回収することで、エッチング廃液をリサイクルし、塩化鉄(Ⅱ)溶液や塩化鉄(Ⅲ)溶液を販売している。

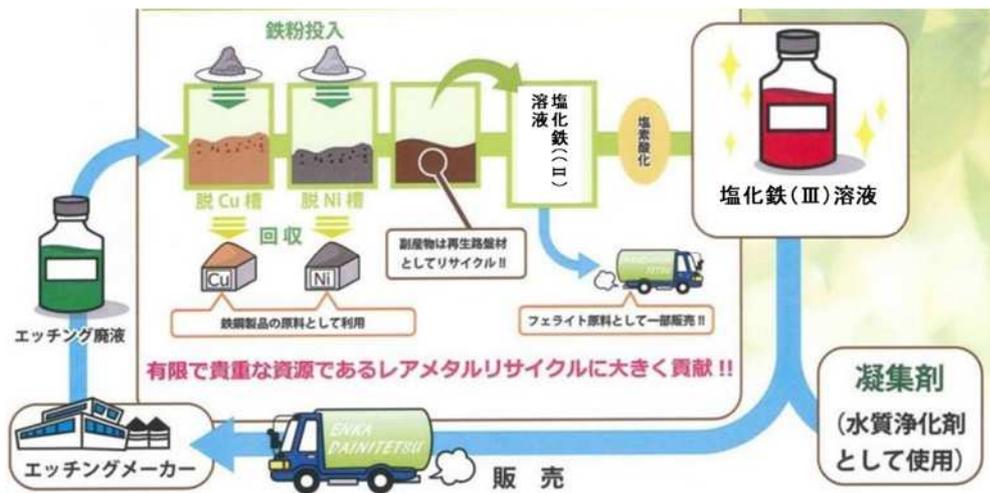


図 6 エッチング廃液のリサイクルフローの概要

アステック入江では、従来技術として保有している塩化鉄リサイクル技術を活用して、貴金属リサイクルを行っている。塩化鉄(Ⅱ)は先述したように、銅やニッケル、鉄といった金属は溶解することができるが、貴金属、特に金は溶解しない。この性質を活用して、図 7 に示す通り、蒸気分離により回収した電子部品中に含有している貴金属を、塩化鉄(Ⅱ)を使って回収している。



図 7 塩化鉄 () を使用した貴金属の回収

(3) プロセス全体の特徴

この 2 つの技術を組み合わせることで、一般的なりサイクルプロセスよりも高濃度な貴金属回収を実現している。表 1 に、一般的なりサイクルと(株)アステック入江のりサイクルプロセスの比較を示した。一般的なりサイクルでは、破碎プロセスが主流であり、発塵による飛散ロスや電子基板に対して微量な含有である PGM 含有電子部品が濃縮されているわけではないので、金、銀、銅の資源評価で留まることが殆どであり、パラジウムの様な PGM は資源評価されにくい現状がある。

一方、アステック入江のりサイクルでは、蒸気分離による種々の電子部品を破碎せずに回収することができるため、部品選別することで PGM 含有部品も回収が可能となり、現状ではパラジウムとして精錬業者が評価して売却できている。しかし、濃縮しきれていないために、微量のパラジウムが評価されているだけで、一般的なりサイクルと同じように、PGM をターゲットとしたりサイクルはできていないのが現状である。

表 1 一般的な電子基板リサイクルとの比較

一般的なリサイクル	(株)アステック入江でのリサイクル
	 <p>蒸気分離</p>
<ul style="list-style-type: none"> ・破砕処理が主流であり、資源評価は金、銀、銅、パラジウムが主である。 ・電子部品が混ざり、微量な PGM (特にルテニウム) は検出されない。 ・発塵による飛散ロスがある。 ・電子基板から部品剥離して、部品選別する研究は行われているが、対象が限定的であり、実用化までは至っていない。 ・ルテニウムの実例は確認されない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・あらゆる電子基板を対象に電子部品を破砕せずに回収することができ、実用化している。 ・電子部品として回収できることで、金、銀、銅、パラジウム以外のルテニウムといった PGM 含有部品も選択的に回収でき、新たな金属の付加価値産出が見込める。 ・リユース部品としての可能性が見込める。

2) 実証概要

前述の通り、PGM をターゲットとしたリサイクルは現状できていないが、蒸気分離により電子部品単体として基板から分離できているため、電子基板としてではなく、電子部品としてとらえることができ、PGM 含有濃度を高めることができると考えられる。また、電子部品として分離できていることから、部品リユースもできる可能性がある。そこで、PGM をターゲットとしたリサイクル、爪のないコンデンサや抵抗などの電子部品についてリユースの可能性について、以下の検討を行った。

(1) 選別対象とする部品分類の明確化

本実証で対象とする電子基板は株式会社アステック入江が現在回収しているサーバーやパソコン、複写機に搭載されているものとした。基板に使われている様々な電子部品のうち、PGM 等が多く含まれている電子部品は選別されないまま、未回収となっていることから、蒸気分離技術により電子基板から分離した電子部品を用途が近い部品グループごとに組成分析し、PGM 等の含有量を基に選別対象とする部品類を検討し、整理した。

(2) 効果的な部品選別方法の検討

基板より分離した電子部品を、(1) の検討結果を踏まえ、風力選別等既存の選別方法を用いた選別を行うとともに、更に画像認識等の新たな選別技術との組み合わせによる高度な選別プロセ

スについて検証し、整理した。

(3) リユース可能性の検討

基板より分離した電子部品（タンタルコンデンサ等の高単価・耐温性のある物を想定）のリユース可能性について検討し、整理した。

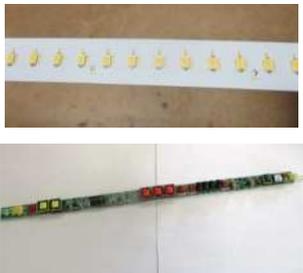
1.1.2. 対象とする電子基板の概要

アステック入江で回収している電子機器由来の電子基板を対象とした。

表 2 対象とした電子機器の電子基板と写真（その1）

電子機器名	写真
複合機（コピー機）	
デスクトップパソコン	
ノートパソコン	
ハードディスク	

表 3 対象とした電子機器の電子基板と写真（その 2）

電子機器名	写真
<p>サーバー (金低品位系)</p>	
<p>サーバー (金高品位系)</p>	
<p>車載基板</p>	
<p>遊戯機器液晶</p>	
<p>LED</p>	

1.1.3. 対象とする電子部品の検討

次に、図 8 の電子部品の分離選別フローに従い、対象とした電子機器由来の各電子基板から蒸気分離によって、電子部品を分離回収した後、篩処理を行い、各目開きで回収される電子部品を名称ごとに手選別を実施した。手選別を行うにあたっては、表 4、表 5 のとおりに部品名を定め、

電子部品ごとに回収を行った。なお、2.0mm 未満の電子部品については、IC、チップ抵抗、セラミックコンデンサの混合物のため、選別保留とした。

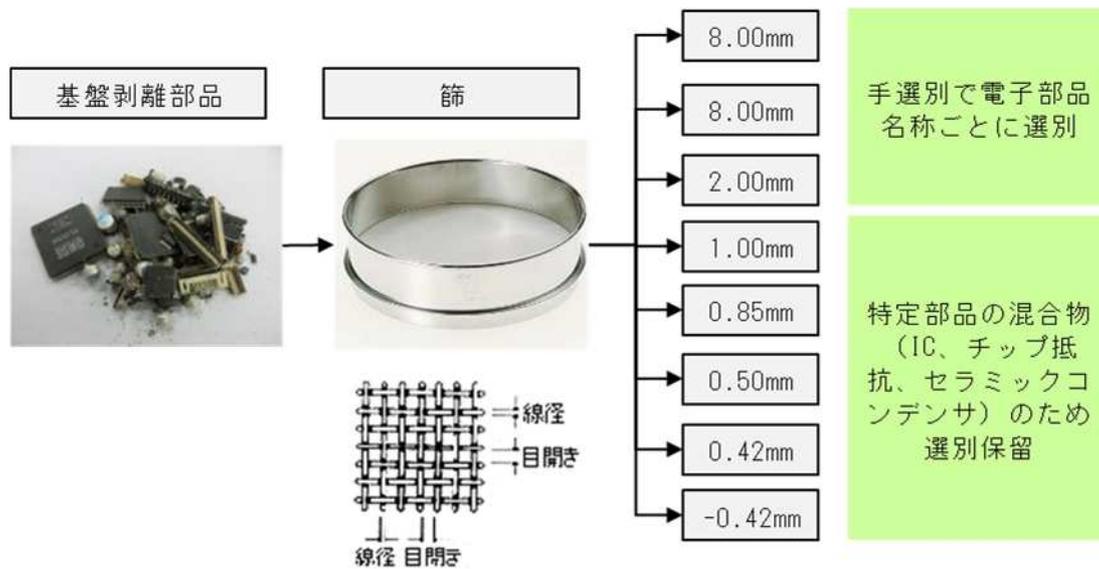
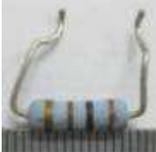


図 8 電子部品の分離選別フロー

表 4 定義した各電子部品名称 (その1)

部品名	特徴					
IC	QFP系	BGA系	DIP系	SOP系	ディスクリート系	SIP系
樹脂コネクタ						
ピン						
金属コネクタ	VGA 端子	LAN/USB 端子	オーディオ端子			
金属金具	CPU 金具	ヒートシンク	保護カバー			
アルミ コンデンサ						
タンタル コンデンサ						
セラミック コンデンサ						
インダクタ (コイル)	巻取りインダクタ	巻取りインダクタ	積層インダクタ			

表 5 定義した各電子部品名称 (その2)

部品名	特徴
チップ抵抗	
抵抗	
水晶振動子	<p style="text-align: center;">リード Type チップ Type</p> 
LED	<p style="text-align: center;">チップ LED 7セグメント LED LED</p> 
モジュール	
その他	

1.1.4. 手選別した電子部品の各電子基板における含有量

図 9 に各基板における+8mm の電子部品の重量を示す。LED の電子基板を除けば各基板とも樹脂コネクタ、金属コネクタが多く、資源価値が低い部品群の構成となっている。また、ハードディスク以外は、銅精錬業者にとり忌避部品とされているアルミコンデンサが多く使われていることがわかった。

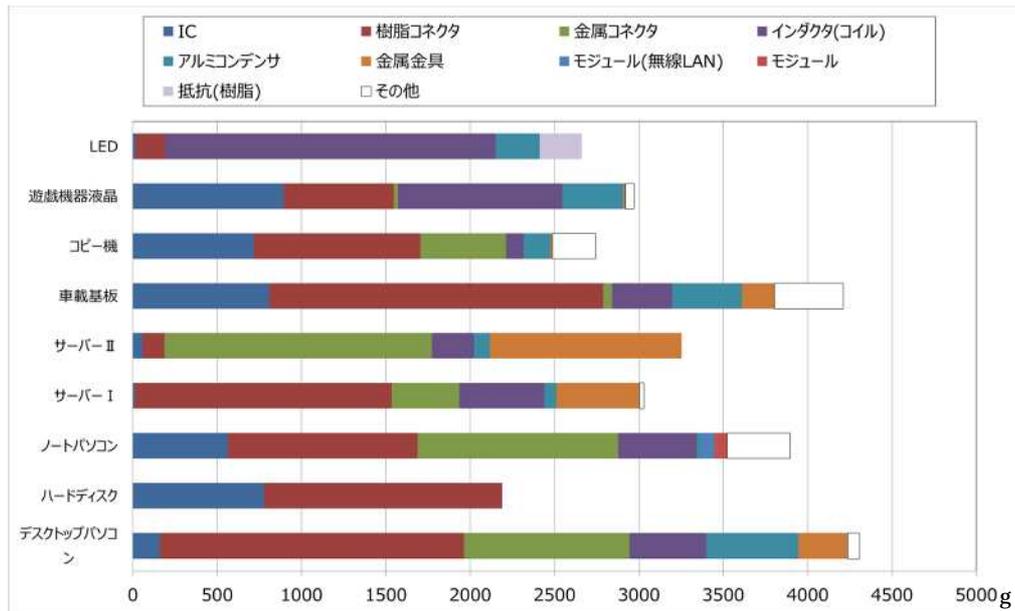


図 9 各電子基板における +8mm 電子部品種別の重量

図 10 に各基板における 2~8mm の電子部品の重量を示す。2~8mm の電子部品には、IC が使用されていることがわかった。また、サーバーやノートパソコン、ハードディスクにはタンタルコンデンサが、コピー機や車載基板にはチップ抵抗が使われていることがわかった。

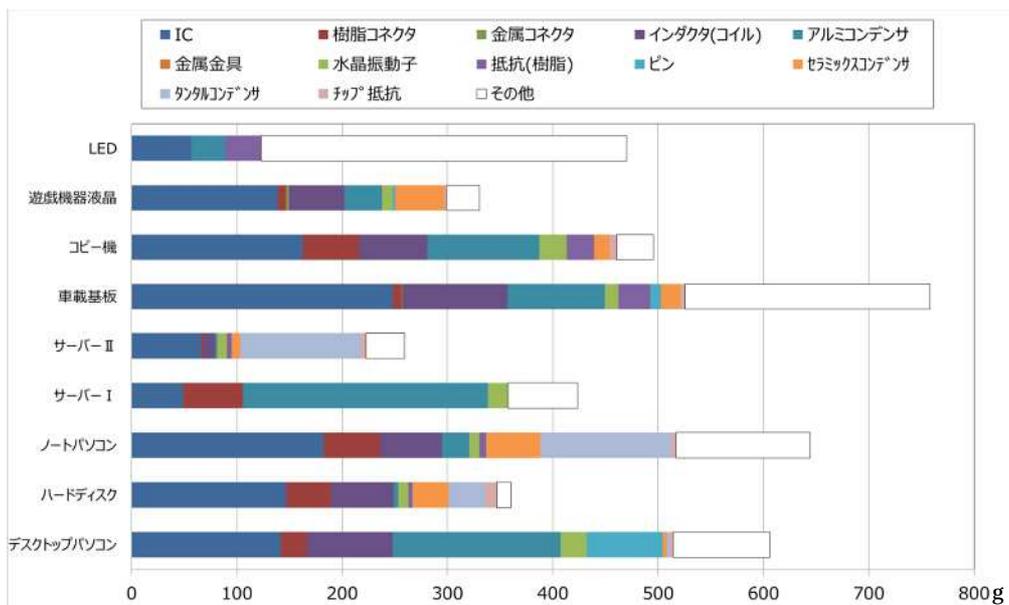


図 10 各電子基板における 2~8mm 電子部品種別の重量

1.1.5. 既存文献の調査に基づく選別対象部品の検討

既存文献での事前調査を実施し、平成 19 年度エネルギー使用合理化技術開発希少金属等効率回収システムの開発事業成果報告書から判明した部品ごとの PGM 含有量を表 6 に、各電子部品の見込み金属を表 7 にそれぞれ示した。なお、表 6 の 印の含有量は百分率(%)から mg/kg(ppm)に換算したものである。表 7 の通り、IC、樹脂コネクタ、セラミックコンデンサにパラジウムが、チップ抵抗にルテニウムの PGM が含有していることが確認された。一方で、本実証にて手選別回収した電子部品と照合したところ、PGM 含有電子部品は 2~8mm の粒度帯に存在していることが分かったため、この粒度帯に注目した、部品分析と選別システム構築を行うこととした。

表 6 部品ごとの PGM 含有量

単位：ppm

部品名	金	銀	パラジウム	ルテニウム	タンタル
セラミックスコンデンサ		147,200	3,700		
セラミックスコンデンサ		30,500	5,500		
タンタルコンデンサ		19,500			329,800
セラミックスコンデンサ		200	200		
チップ抵抗		34,800	0	490	
IC	2,600	5,200	0		

表 7 既存文献調査にもとづく各電子部品含有見込み金属

部品名	特徴	金	銀	銅	ニッケル	鉄	Al	タンタル	パラジウム	ルテニウム
IC	半導体部品で、既存プロセスで特に弊社にて金回収できている部品									
樹脂コネクタ	母体が樹脂、接点部分の金属に金メッキが施されている。									
ピン	コネクタピン									
金属コネクタ	母体が樹脂、接点部分の金属に金メッキが施されている。外周に金属を使用している。									
金属金具	CPU 金具 = 鉄系、ヒートシンク = アルミ or 銅、カバー = 鉄系									
アルミコンデンサ	アルミコンデンサ									
タンタルコンデンサ	タンタルコンデンサ									
セラミックコンデンサ	セラミックコンデンサ									
インダクタ(コイル)	コイル									
チップ抵抗	表面実装タイプ(SMD)									
抵抗	ピン挿入タイプ(THD)									
水晶振動子	水晶振動子									
LED										
モジュール	電子部品が小型基盤に搭載され、更に基盤に実装されている。									
その他	主にブラクズ									

1.1.6. ターゲットとした電子部品の PGM 等含有量の分析結果

ターゲットとした、2～8mm の電子部品について、セラミックコンデンサ・チップ抵抗・IC・水晶振動子・タンタルコンデンサを対象に、電子部品の PGM 等の含有濃度を分析した。分析については、外注機関（日鉄環境株）での ICP 分析を実施した。また、選別保留としていた-2mm の電子部品についても、PGM 含有電子部品が混在していることもあり、同様の分析を実施した。表 8 にその分析結果を示す。

表 8 2～8mm のターゲットした電子部品及び-2mm 電子部品の分析結果

単位:ppm

定義部品名	金	銀	パラジウム	ルテニウム	タンタル
セラミックコンデンサ	-	20,000	3,500	-	-
チップ抵抗	-	16,400	1,000	490	-
IC チップ	2,000	6,300	-	-	-
水晶振動子	200	1,600	-	-	-
タンタルコンデンサ	-	5,000	10 未満	-	250,000
タンタルコンデンサ	-	-	-	-	410,000
-2mm	300	5,400	250	100	-

以上の分析結果より、2～8mm 及び-2mm の電子部品には PGM 含有の電子部品が存在していることを確認するとともに、選別対象とする電子部品を PGM の観点からセラミックコンデンサとチップ抵抗、金の高含有電子部品として IC チップ、部品リユースの観点からタンタルコンデンサに絞り込むこととした。

1.1.7. AI 画像認識選別システムの開発

1) AI 画像認識選別システムの概要

先の分析の前準備として、電子基板から分離された電子部品を手作業で電子部品の種類ごとに選別した。その結果、電子部品ごとの貴金属と PGM の含有率を分析することができたが、1 枚の電子基板から分離した電子部品を手作業で電子部品に選別するだけでも 100 時間以上要し、実際の業務において、電子部品を手選別することは現実的ではない。また、正確な分類という観点でも人の目に頼る限界がある。

そこで、電子部品を選別するにあたり、「人の目」の代わりにして「AI を用いた画像認識」を、「人の手」の代わりにして「エアブローによる選別」を導入した「AI 画像認識選別システム」を開発することにした。

対象とする電子部品の粒度帯や形状が揃っている特徴に着目し、電子部品製造業で汎用品として使用されているものを組み合わせ選別機とした。汎用品としては、ボールフィーダー、直進フィーダー、ベルトコンベアであり、これらの機器で搬送した電子部品を画像認識させ、認識した電子部品をエアブローにて選別する仕組みである。

選別機の写真を図 11 に、選別機による部品選別フローを図 12 にそれぞれ示した。電子部品は

まず、ボールフィーダーに供給される。ボールフィーダーに供給された電子部品は、円周方向にある一定幅のレールを進みながら、直進フィーダーからベルトコンベアへと進み、ベルトコンベア上に設置したカメラで電子部品を認識して選別対象とした電子部品をエアブローにて選別回収する。

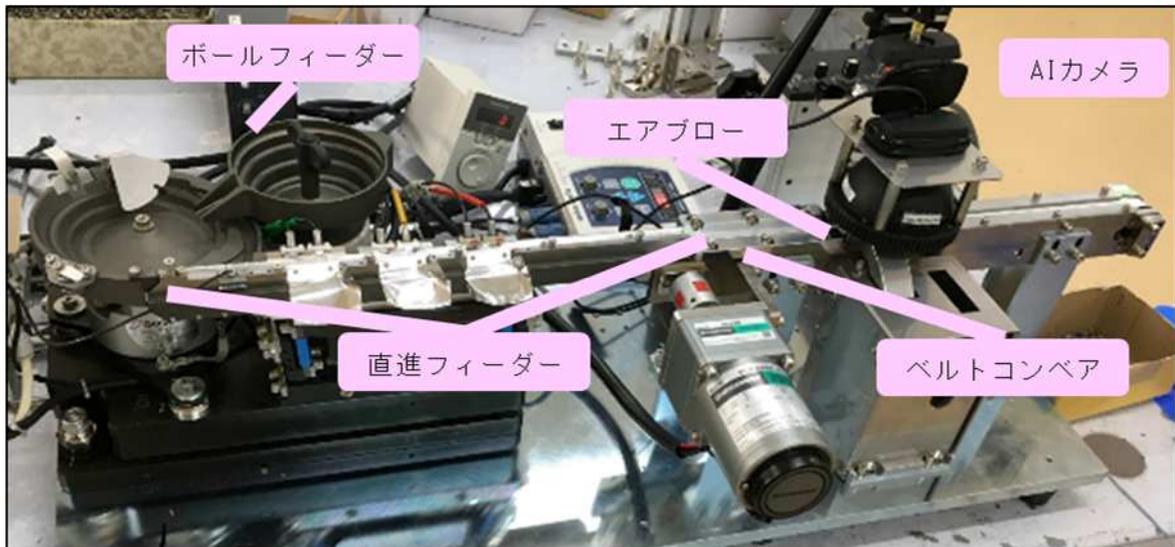


図 11 選別機の写真

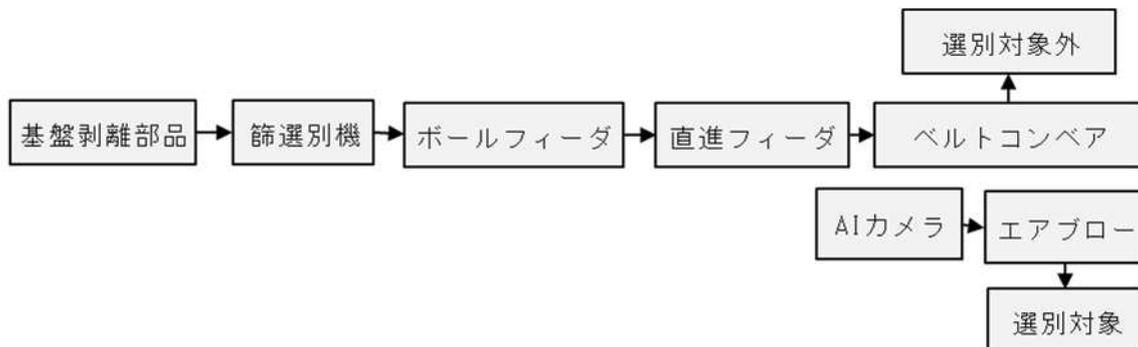


図 12 選別機による部品選別フロー

2) 画像認識するための前処理の検討

(1) 粒度帯毎に搬送する仕組み

当初は2~8mm 電子部品をまとめて選別機に流していたが、直進フィーダー上で電子部品が塊になる問題が発生したため、エアブローによる解決を図ったが、塊の解消とはならなかった。そこで、ボールフィーダーに電子部品を投入する前に、粒度帯を揃えることを目的とした篩選別を導入し、篩処理を行うことで4mm 以上、3mm 以上 4mm 未満、2mm 以上 3mm 未満の粒度帯に揃えることで、搬送時における部品の塊を解消した。

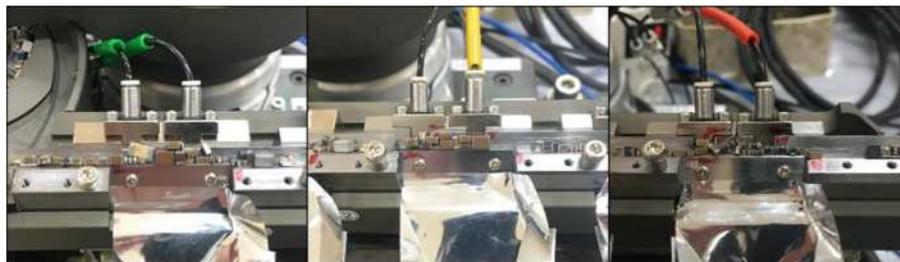


図 13 直進フィーダー上で塊となっている電子部品

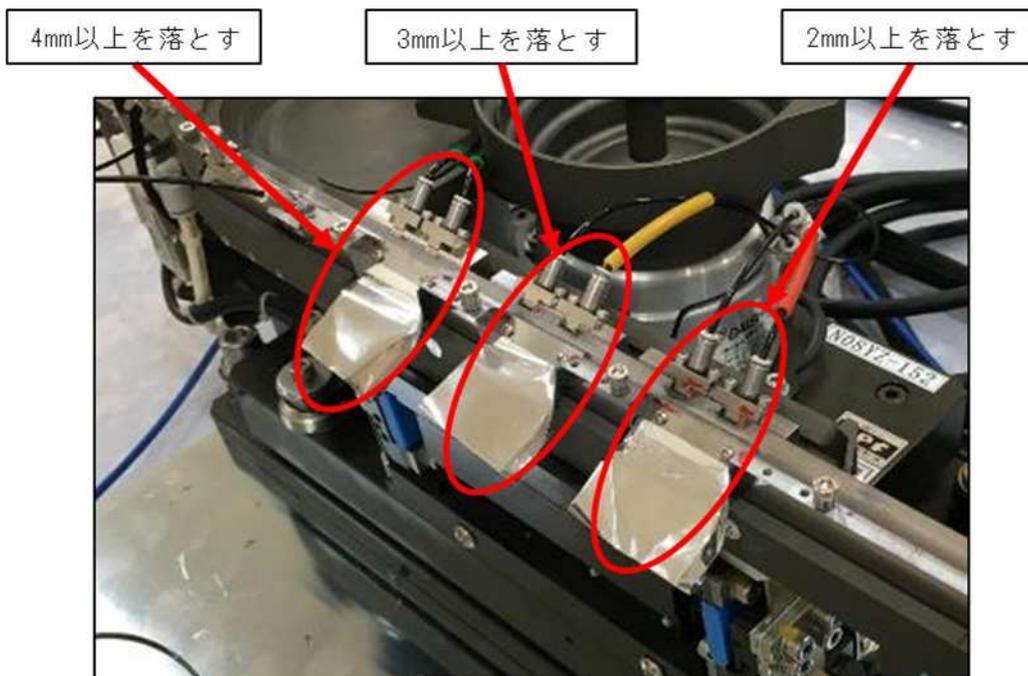


図 14 電子部品の塊を落とすための仕組み

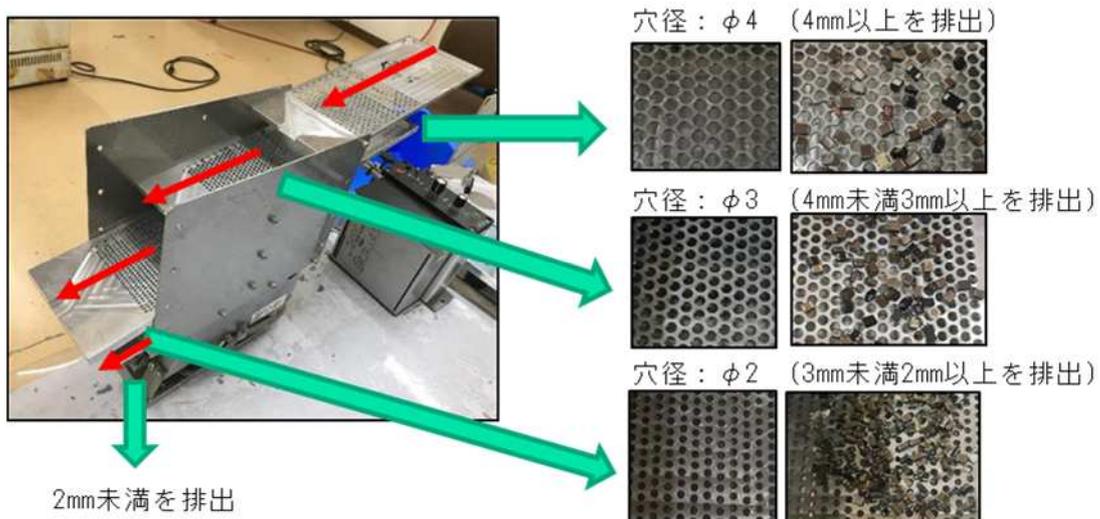


図 15 篩選別機の概要



図 16 篩選別機の構造

(2) カメラ下に列状に送り込むための仕組み

直進フィーダーと後段のベルトコンベアに速度差をつけることで、電子部品を 1 列に整列させながら、部品同士の間隔を開け、画像認識で使用するカメラ下に電子部品を 1 個ずつ搬送することを実現した。処理能力は 0.2 秒/個である。

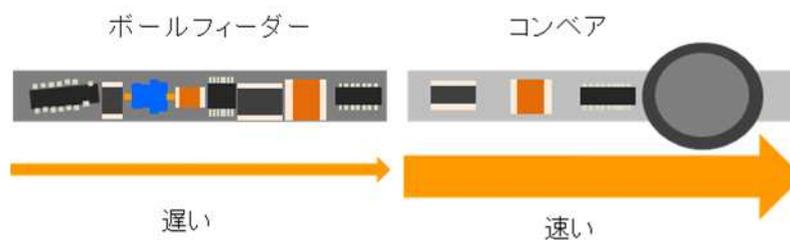


図 17 フィーダーとコンベアの速度差イメージ



図 18 パーツフィーダ・直進フィーダ コントローラ

ベルトコンベア コントローラ

- ベルトコンベア: 現在の設定値 1,000rpm



図 19 ベルトコンベア コントローラ

3) AI 画像認識システムの開発

(1) 本実証における画像認識システム概要

図 20 に部品検出のアルゴリズムを示す。ベルトコンベア上に設置したカメラ（本実証では Web カメラを使用）で撮影された電子部品画像は二値化（部品のある黒い場所と部品のない白い場所に判断する）した後に、黒い部品の場所を検出し、カメラ撮影で取得した画像と合わせて、個別に部品の切り出しが行われる。以下に、そのアルゴリズムを示す。

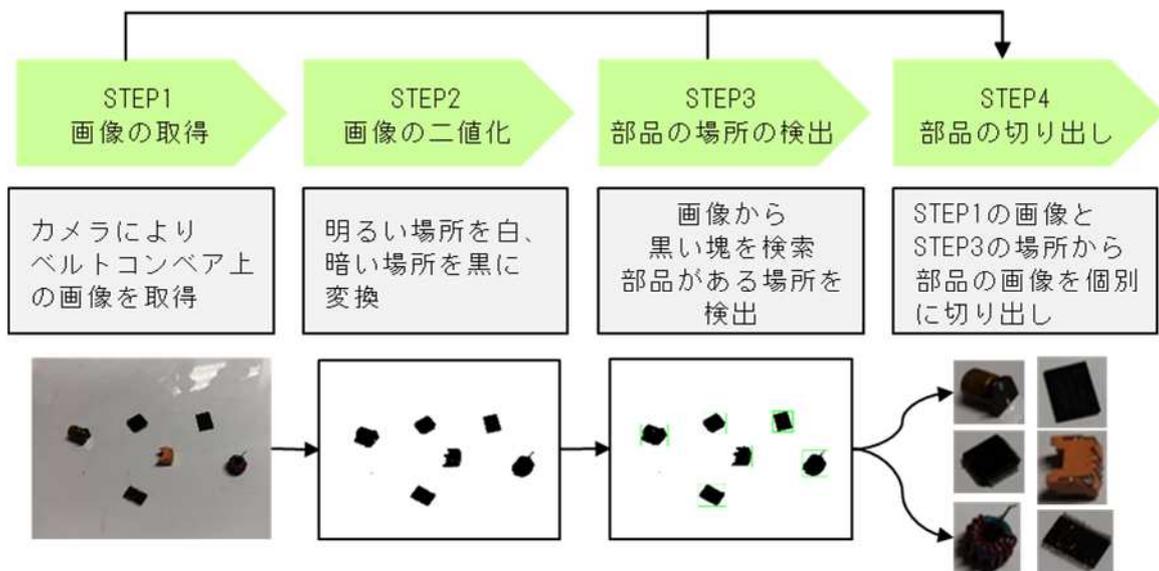


図 20 部品検出のアルゴリズム

次に、切り出した部品画像は、予め画像学習させた情報をもとに、図 21 に示す通り、AI（人工知能技術）がその部品が何であるかを推定する。

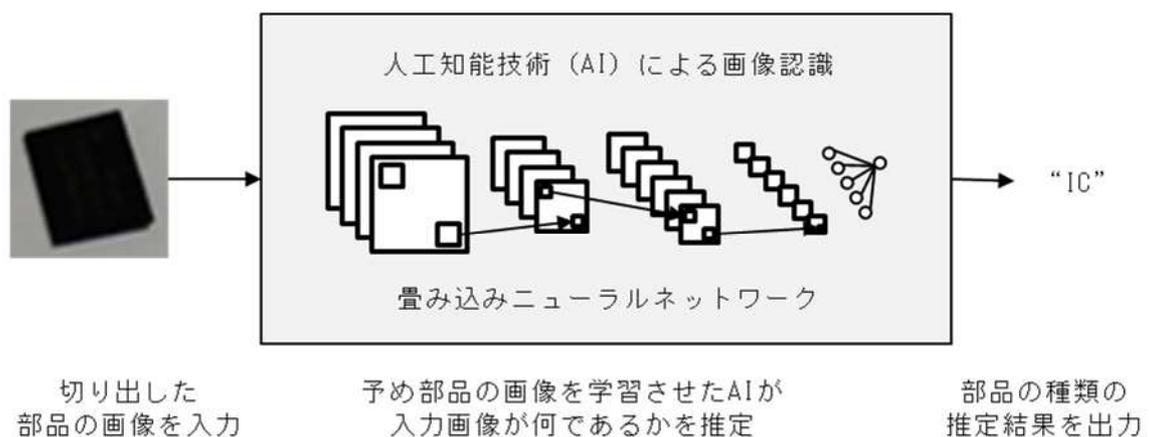
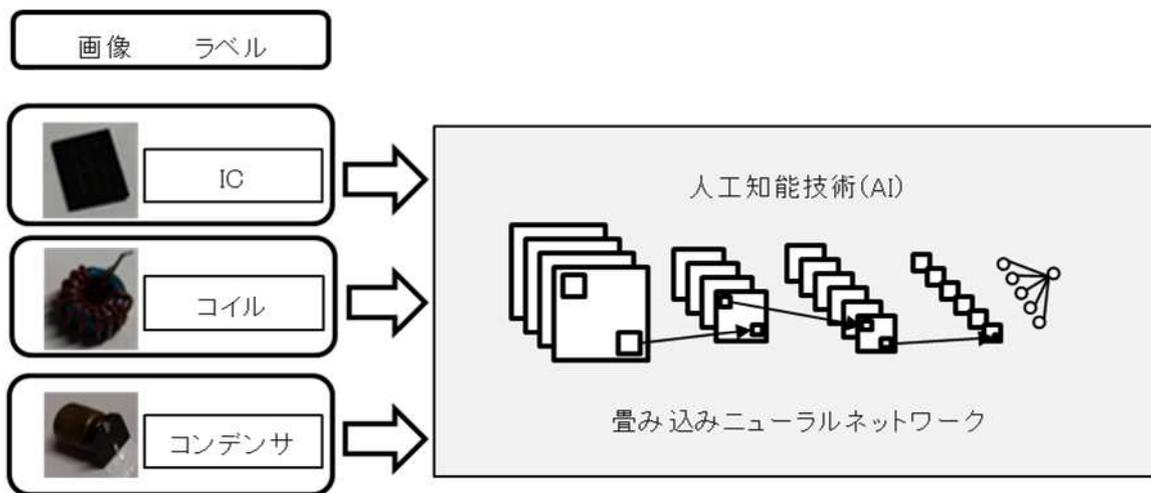


図 21 AI（人工知能技術）による部品推定

なお、図 22 に示す通り、画像学習については、各部品の画像とそれに応じたラベル情報を入力した。



学習時は 部品の 画像と
それが何であるかという
ラベル 情報をセットで入力

AIは 部品の 画像とラベル 情報を元に
画像から部品の 識別ができるように
パラメータを調整 (= 学習)

図 22 AI への学習方法

AI で、その部品が何であるかを特定し認識した時は、図 23 に示す通り、エアーの出力信号を送信し、選別機にセットしているエアブローを作動させて、認識した電子部品を吹き落として選別する仕組みである図 23。

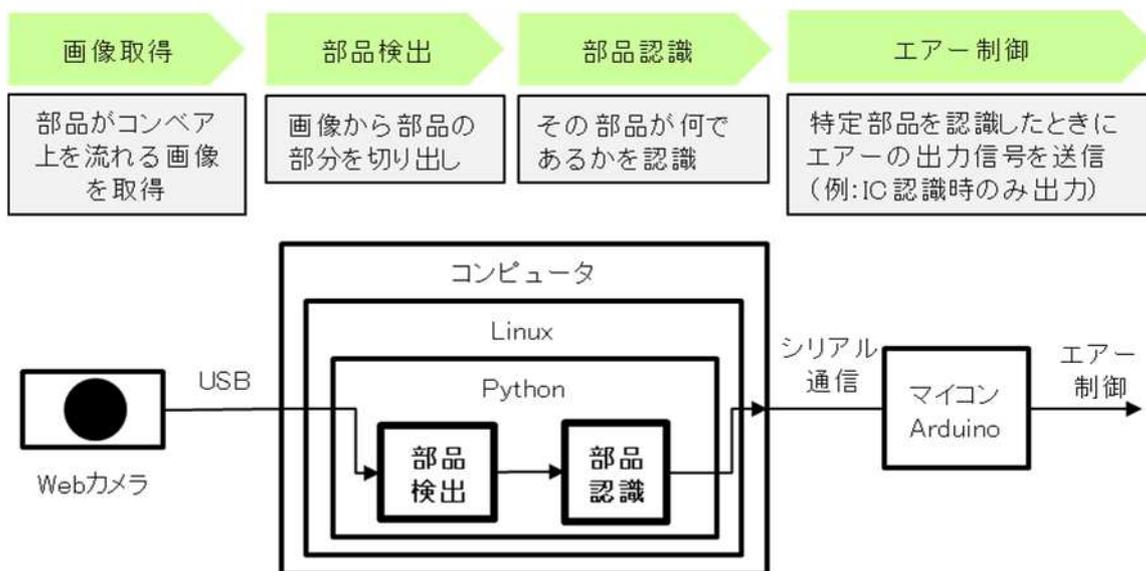


図 23 AI による部品認識とエアブローによる部品選別

OS については Linux、言語は Python を用いて、Web カメラでの取得画像から部品を検出し、AI を用いて部品を認識するとともに、シリアル通信にてマイコンを制御するシステムを開発した。本実証においては、IC、コイル、セラミックコンデンサ、チップ抵抗の電子部品を識別できるように、各電子部品を 100 ~ 1,000 枚 (合計 2,822 枚) の画像を用いて AI の学習を実施した。

1.1.8. 選別機との AI 画像認識システムの組み合わせ効果の検討

図 24 に AI 画像認識システムを組み合わせた選別機を示す。選別機と AI 画像認識システムを組合せ、部品別の選別率を検証した。IC チップ、セラミックコンデンサを対象とし、各部品をボールフィーダーに投入し、AI 画像認識システムで認識した上で、エアブローにより選別できた割合を選別率として測定した。それぞれの選別率を表 9 に示す。IC チップ 71% (N=100 個) セラミックコンデンサ 79% (N=100 個) となり、高い割合で選別できることを確認した。

なお、商用化した場合には、各部品が単体ではなく混合してボールフィーダーに投入される。従って、次年度以降には混合部品を投入した場合の選別率の検証が必要である。

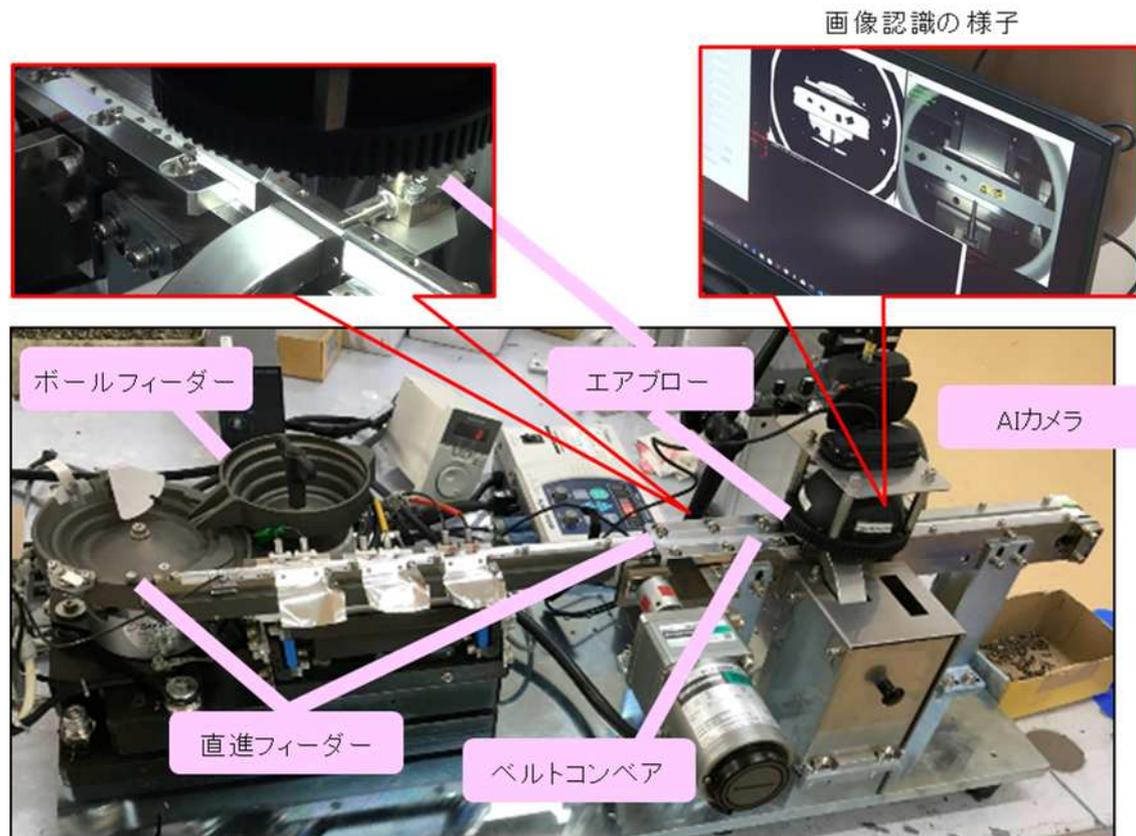


図 24 AI 画像認識を組み合わせた選別機

表 9 AI 画像認識を組み合わせた選別機の選別率

種類	サンプル No	投入数	排出数	選別率	平均
IC (大中小混 在)	1	99	76	76%	71
	2	99	67	67%	
	3	100	72	72%	
	4	100	68	68%	
	5	99	74	74%	
セラミック コンデンサ	1(小)	100	65	65%	79
	2(小)	100	64	64%	
	3(中)	100	86	86%	
	4(中)	100	88	88%	
	5(大)	100	87	87%	
	6(大)	100	85	85%	

1.1.9. PGM としての精錬業者への売却から見た電子部品のグルーピングの検討

表 8 に示す電子部品分析結果に基づき、精錬業者にヒアリングし、本実証における電子部品のグルーピングについては以下のように整理した。

1) ルテニウム原料

チップ抵抗に含有しているルテニウムについては、湿式精錬業者でのルテニウム精錬は技術的に可能であるが、難易度が高い金属であるため、チップ抵抗のルテニウム含有量(490ppm)では、ルテニウム原料としての売買は難しいことが分かった。

2) パラジウム原料

湿式精錬業者へのヒアリングによると、パラジウム含有率が 1,000ppm 以上のものについては、高い回収率での精錬が可能ということであった。チップ抵抗やセラミックコンデンサは、いずれもパラジウム濃度が 1,000ppm 以上のものであり、湿式精錬業者への売買が可能であることが分かった。そこで、ルテニウム原料としては売買要件が合わなかったチップ抵抗も、パラジウム原料としてなら湿式精錬業者へ売買することが出来ることが分かった。なお、売買要件は乾式精錬業者よりも湿式精錬業者のほうが良いことが分かった。

3) タンタル原料

タンタルコンデンサはタンタル原料として、精錬業者へ売買する。その他、タンタルコンデンサは、回収物が確実にタンタルコンデンサであることを要件に、レアメタル精錬業者との売買が可能であることが分かった。

4) 貴金属原料

その他の電子部品について、IC チップは金が高含有しているが、IC チップ以外の電子部品と

ともに乾式精錬業者へ売買することが経済的に優れていることが分かったため、混合した形で貴金属原料として取り扱うこととした。-2mm 電子部品についても同様、貴金属原料として乾式精錬業者へ売買する。

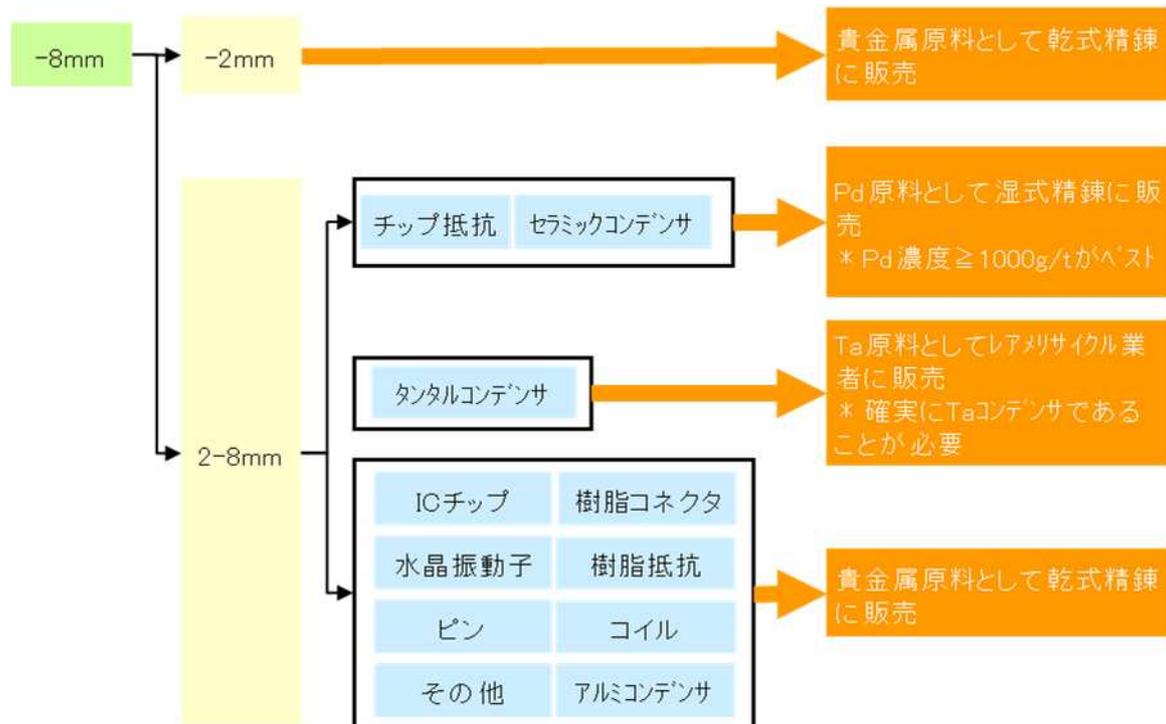


図 25 選別結果と貴金属の販売先

1.1.10. 部品リユースの可能性の検討

海外バイヤー（台湾企業他）へのヒアリングを実施し、CPU やメモリはリユースされている市場があることを確認した。しかしながら、本実証で対象としているようなタンタルコンデンサについては、リユースされている情報を得ることが出来なかった。引き続き、台湾企業等へのヒアリングを通じてリユース要件の調査を行っていく。

1.1.11. 事業化に向けた課題・対応策

1) 選別対象とする部品分類の明確化

(1) 電子部品の追加分析

今年度の実証で対象外となった電子部品の分析による新規アイテムを創出するすことが必要である。

(2) リユース要件の明確化

台湾企業をはじめとした海外バイヤーへのヒアリングによる詳細調査が必要である。

2) 画像認識部品選別システム

(1) 幅広い電子部品に対応した選別システム構築

8mm 以上、6mm 以上、4mm 以上、2mm 以上、2mm 以下に物理選別を行い、各 AI まで個別に搬送し選別を行う。各サイズに適したパーツフィーダとカメラを用いる事で、より高効率、高精度化を図っていく。特に 8mm 以上の部品は、粒度が不均一であるため、別途選別システムの構築が必要と考えている。2mm ~ 8mm の部品については、現状 1 種類の部品の選別に 1 つの AI カメラを必要としているが、1 つの AI カメラで複数の部品選別を行えるような装置を開発する事でコスト低減を図る。

(2) 大量の電子部品への対応に向けた処理能力の向上

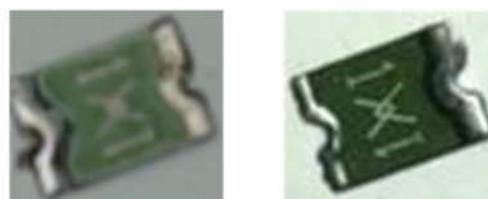
現在は、30t/月の処理を前提としたシステムであり、処理量が 30t/月を超え、大量の電子部品への対応を迫られた時には、システムを増強して賄うことも考えられるが、設備投資コストを考えると、コンベアスピードを上げる等、処理能力向上を目指した機械的な改良も必要と考える。ただし、コンベアスピードが画像認識できるスピードを超えると対象部品の識別やエアブローによる選別が出来ず、対象とする電子部品を選別できない可能性が懸念される。そこで、機械的改良にあたっては、AI 構造の高度化や PC の処理速度向上、カメラ解像度の向上などに関連させながら取り組んでいく必要がある。

(3) 対象部品拡大と画像認識・選別率の向上

試作段階では Web カメラを使っているため解像度が低く、AI の認識率低下につながっている。解像度の向上が必要であり、そのために高コスト化につながる懸念もある。



左図はチップ抵抗 右図はIC
低解像度のため識別困難



左図はWEBカメラ 右図はiPhoneで撮影
カメラ性能の向上によって識別性能の向上が見込める

図 26 カメラ解像度

(4) AI 構造の高度化

畳み込み層の層数を増やすなど AI 構造をより高度化することが必要である。

(5) PC 処理速度の向上

カメラ解像度、AI 構造の高度化に対応した PC 処理速度向上

(6) 忌避部品の選別と付加価値創出

図 9 にも示した通り、ハードディスクを除く多くの電子基板にアルミコンデンサが使われている。電子基板に使われているアルミコンデンサは精錬業者では忌避部品とされており、将来的には、精錬業者における受入制限が益々厳しくなっていくことが想定できる。一方、アルミコンデンサは脱酸剤としての用途開発が期待出来る。忌避部品であるアルミコンデンサの AI 画像選別技術並びに脱酸材としての活用技術について検討していく。

(7) デジタルトランスフォーメーション (DX) 対応を意識したシステム構成の検討

今後、事業が波及し、選別システムの入口・出口のビッグデータを活用したりサイクル事業のデジタルトランスフォーメーション (DX) 化を想定し、システムのエッジコンピューティング化を検討していく。

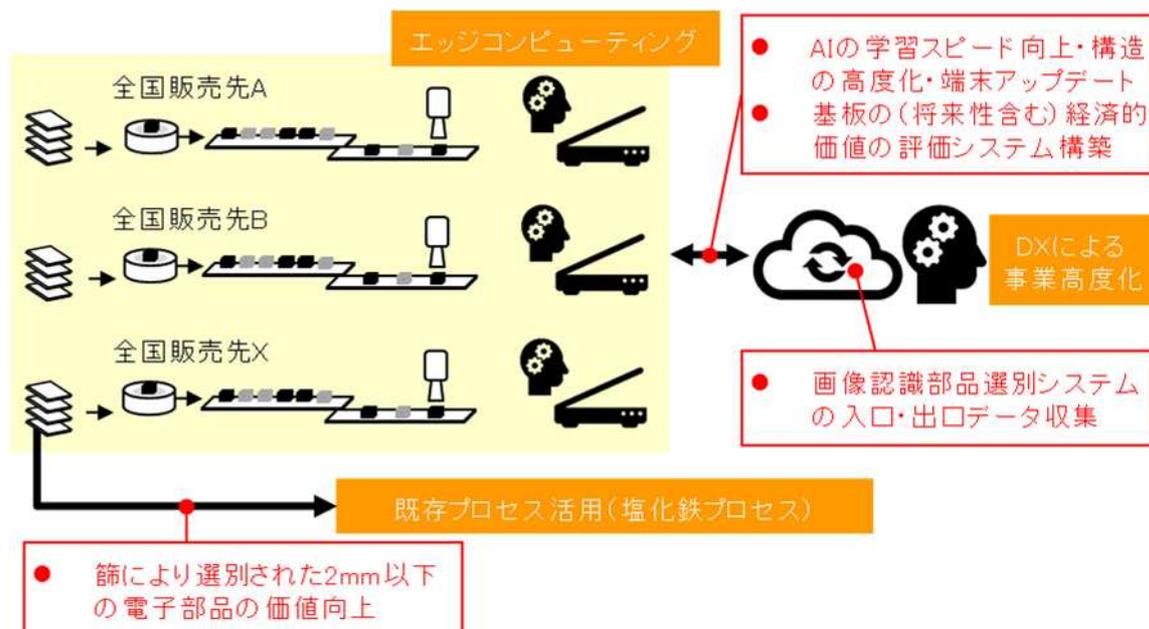


図 27 選別システムの DX 化イメージ

1.2. 自動車整備ルートからの部品回収と PGM 含有部位の効率的な分離技術の検証

1.2.1. 前提条件

1) 技術概要

地球温暖化への対応として自動車では低燃費が要請されてきた。この中で、ガソリンエンジンでは、リーンバーンなどによりエンジン内部の着火環境が厳しく、燃焼安定性の向上が求められてきた。こうした中、着火性を左右する着火プラグは、高性能・長寿命化が必要となり、材料に PGM が使われるようになってきた。具体的には、図 28 に示す通り、外側電極にプラチナが、中心電極にイリジウムが使われている。また、着火環境のみならず、燃料の噴射タイミングなど、細かなエンジン制御が行われるようになっており、O₂ センサーで測定された排気ガス中の酸素濃度データは、エンジン制御を行ううえで欠かせないものとなっている。この O₂ センサーにもプラチナが使用されている。

このように PGM が使われている着火プラグ、O₂ センサーであるが、整備工場にて交換された際に発生する廃プラグからのプラチナ、イリジウムのリサイクルは進んでおらず、ドアなどの鉄や非鉄と一緒に雑品として鉄スクラップ業者に引き渡しているのが現状である。



図 28 高性能・長寿命タイプの着火プラグの特徴

2) 実証概要

そこで、図 29 に示す通り、全国の整備工場で大規模に分散発生している着火プラグ、O₂ センサーを分別して回収するモデルを構築し、回収した製品から PGM 含有部位の分離技術を開発し、あわせて市場要件を確認することを目標に、以下の検討を行った。

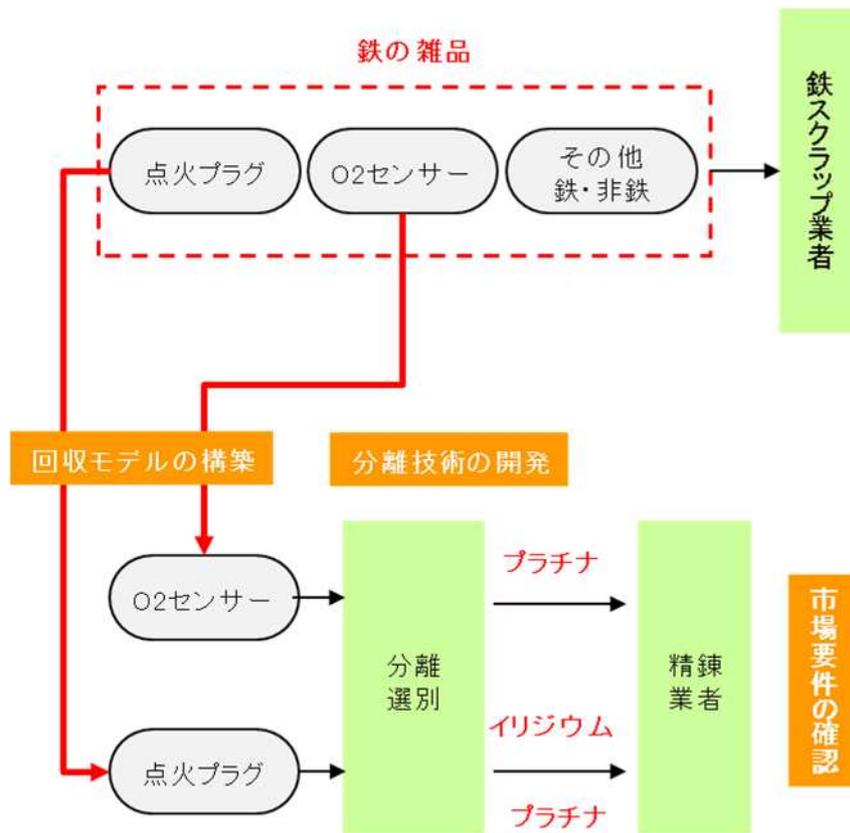


図 29 実証の概要

(1) 回収可能性の検討

整備工場へのヒアリングを行い効率的な回収の可能性及び実現性を検討した。このとき着火プラグ、O₂ センサーの年間回収量、回収の為の取引要件（価格、梱包、数量等）整備工場からの回収ルート等をヒアリングした。また、解体工場との連携についても考慮した。

(2) 効率的な分離技術の検討

着火プラグ、O₂ センサーは PGM 含有部位が限られているため、PGM 含有部位の効率的な分離・回収方法を検討した。また、イリジウム及びプラチナを含む高品位な着火プラグのみを効率的に回収できる様に、高品位な着火プラグの識別方法についても検討し、整理した。

1.2.2. 市場規模の推定と分別回収方法の検討に向けたヒアリングの実施

自動車整備工場へのヒアリング結果は表 10～表 15 に、まとめを表 16 に示す。着火プラグ・O₂ センサーは分別回収されておらず、雑品として売却されていた。そこで、雑品として処理せずに、着火プラグ・O₂ センサーを整備工場にて分別し、どのようにそれらを回収できるのか整備工場にヒアリングを実施した。ヒアリングは九州エリア、関西エリア、首都圏エリア、東北エリア、北海道エリアで実施し、合計 6 社を対象に行った。

表 10 九州エリアのヒアリング結果

日時	2019年7月24日 11時～12時
場所	福岡県福岡市内
相手先	代表者
内容	<p>1. 交換対象部品の発生状況</p> <p>(1) O2センサー・A/Fセンサー</p> <ul style="list-style-type: none"> ・O2センサーは、「エンジンチェックランプ」の点灯により不具合の発生有無を把握する。 ・チェックランプが点灯していると、車検において不合格となるため、チェックランプ点灯時に交換するのが一般的である。 ・車検台数は年間3,000～4,000台だが、月に2～3個程度の発生量である。 <p>(2) 着火プラグ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・着火プラグは車検時の交換対象部品としてユーザーには推奨するが、交換しなくても車検において不合格とならない。 ・そのため、推奨したユーザーの5%程度（それにも満たない可能性もある）しか交換せず、月に20～30個程度の発生量である。 ・なお、1台に2～3本程度の着火プラグが搭載されている。 <p>2. 整備対象車両の種別</p> <p>(1) ユーザー</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ほとんどが一般ユーザーである。 <p>(2) 燃料</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ディーゼル車は全体の10%程度で残りはガソリン自動車である。 <p>(3) 走行距離</p> <ul style="list-style-type: none"> ・走行距離は1～1.5万kmである。 <p>3. 回収ルート</p> <p>(1) 現在の処理方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・他の金属類と混合してセンサー、プラグは鉄スクラップとして売却している。 <p>(2) O2プラグの判別</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PGMが含有されるイリジウムプラグと通常プラグの判別は容易にできる。 <p>(3) 交換対象部品の分別保管</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ペール缶等に分けて保管しておくことは問題なくできる。 <p>(4) 回収方法（案）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・1本10円程の買取価格にし、社会貢献を強調する工夫が必要ではないか。 ・回収ルートとして部品商ルートも検討してはどうか。 <p>4. その他</p> <ul style="list-style-type: none"> ・交換対象部品の保守部品マーケットシェアをヒアリングしてはどうか（新車マーケットと保守マーケットの比率）

表 11 関西エリアでのヒアリング結果

日時	2019年9月6日 15時～16時
場所	大阪府八尾市内
相手先	代表者
内容	<p>1. 交換対象部品の発生状況</p> <p>(1) O2センサー・A/Fセンサー</p> <ul style="list-style-type: none"> ・当該センサーの発生個数は月1個出るか出ないか程度である。交換しなくても走行に問題ないため、交換しないケースが多い。 ・レッカー移動で入庫するケース、フロント事故のケースは交換が発生する。年間約350台の板金台数のうち、10～15台でA/Fセンサーの交換がある。 ・今後、フロント事故の発生が減少傾向になってくることを想定すると、事故による当該センサーの交換が減ると考えられるのではないかと。 <p>(2) 着火プラグ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2018年9月1日～2019年8月31日の実績で車検246台、整備270台、合計516台のうち、34台で着火プラグの交換があった(1台3～4本)。走行距離7～8万kmで交換を推奨。車検・整備台数の5～6%が交換している。 <p>2. 整備対象車両の種別</p> <p>(1) ユーザー</p> <ul style="list-style-type: none"> ・一般ユーザーがほとんどである。 <p>(2) 燃料</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ほぼガソリン自動車である。 <p>(3) 走行距離</p> <ul style="list-style-type: none"> ・走行距離は1～1.5万km <p>3. 回収ルート</p> <p>(1) 現在の処理方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・他の金属類と混合してセンサー、プラグは鉄スクラップとして売却している。逆有償分とグロスで処理しているため、明確な売却価格は不明。 <p>(2) 着火プラグの判別</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PGMが含有されるイリジウムプラグと通常プラグの判別は容易にできる。 <p>(3) 交換対象部品の分別保管</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ペール缶等に分けて保管しておくことは問題なくできる。 <p>(4) 回収方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・分別保管することは何も手間にならないので、もし分別回収するスキームを行うのであれば協力する(本日から分別しておく) ・有価で買い取ってくれるのであれば協力する会社は多いのではないかと。 <p>4. その他</p> <ul style="list-style-type: none"> ・工場が発生する廃棄物の処理費用に困っている業者は多いので、バンパーなどの処理費が低減できればいいと思う。

表 12 首都圏エリアでのヒアリング結果

日時	2019年7月25日 14時30分～16時
場所	東京都大田区内
相手先	代表者
内容	<p>1. 交換対象部品の発生状況</p> <p>(1) O2センサー・A/Fセンサー</p> <ul style="list-style-type: none"> ・チェックランプ点灯時以外の交換はなく、O2センサー・A/Fセンサーは整備からの発生はほとんどないと考えた方がいい。 <p>(2) 着火プラグ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・概ね、ヒアリング済みの情報と同じである。 ・車検時の交換対象部品としてユーザーには推奨するが、交換しなくても車検において不合格とならないため、推奨したユーザーの5%程度である。 ・年間車検台数が653台であり、うち80%がガソリン自動車であり、年間10～20台程度が車検時に着火プラグを交換する。 ・リース車両は部品の交換目安の走行距離タイミングで必ず交換するので、一般ユーザーよりもリースを多く取り扱っている工場からは発生個数が多いのではないか。 <p>2. 整備対象車両の種別</p> <p>(1) ユーザー</p> <ul style="list-style-type: none"> ・トラック、リース、一般ユーザーである(20%程度がトラック)。 <p>(2) 燃料</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ディーゼル車は全体の20%程度で残りはガソリン自動車である。 <p>(3) 走行距離</p> <ul style="list-style-type: none"> ・走行距離は一概に言えない。 <p>3. 回収ルート</p> <p>(1) 現在の処理方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ドアなどの他の金属類と混合してセンサー、プラグは鉄スクラップとして売却している(6円/kg)。 <p>(2) O2プラグの判別</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PGMが含有されるイリジウムプラグと通常プラグの判別は容易にできる。 <p>(3) 交換対象部品の分別保管</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ペール缶等に分けて保管しておくことは問題なくできる。 <p>(4) 回収方法(案)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・分別保管することは何も手間にならないので、もし分別回収するスキームを行うのであれば協力する。 <p>4. その他</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ヒアリング対象とした部品以外に、バンパー、ブレーキパッド(参考1)が多く発生しており、まだ資源として眠っている物が多くあるのではないか。

表 13 東北エリアでのヒアリング結果

日時	2019年7月26日 10時～11時30分
場所	宮城県仙台市内
相手先	代表者
内容	<p>1. 交換対象部品の発生状況</p> <p>(1) O2センサー・A/Fセンサー</p> <ul style="list-style-type: none"> ・車検時の交換はほとんどない。 ・レッカー移動で入庫するケース、フロント事故のケースは交換が発生する。 ・レッカー移動でエンジンチェックランプが点灯している場合については O2センサーの交換が一定数ある。月間2ケタ行く程度は発生している。 ・フロント事故で A/F センサーが破損している場合は、修理の際に交換が行われる。月の板金修理台数 100～150 台に対して、5 個程度の交換がある。 <p>(2) 着火プラグ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・概ね、ヒアリング済みの情報と同じである。 ・車検時の交換対象部品としてユーザーには推奨するが、交換しなくても車検は通る。推奨したユーザーの 5～10%程度が交換している。 <p>2. 整備対象車両の種別</p> <p>(1) ユーザー</p> <ul style="list-style-type: none"> ・一般ユーザーである。 <p>(2) 燃料</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ほぼガソリン自動車である。 <p>(3) 走行距離</p> <ul style="list-style-type: none"> ・走行距離は 1～1.5 万 km <p>3. 回収ルート</p> <p>(1) 現在の処理方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・他の金属類と混合してセンサー、プラグは鉄スクラップとして売却している。逆有償分とグロスで処理しているため、明確な売却価格は不明。 <p>(2) O2 プラグの判別</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PGM が含有されるイリジウムプラグと通常プラグの判別は容易にできる。 <p>(3) 交換対象部品の分別保管</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ペール缶等に分けて保管しておくことは問題なくできる。 <p>(4) 回収方法(案)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・分別保管は容易なので、分別回収するスキームを行うのであれば協力する。 ・自動車車体整備協同組合と連携するなど普及啓発及び回収のインセンティブを検討してはどうか。同組合の加盟工場数は減少傾向にあり、会議費の足しになる程度でも意義のある事業は協力体制が得られると思う。 <p>4. その他</p> <ul style="list-style-type: none"> ・板金交換部品には ABS アクチュエータも軽微なフロント事故で発生が多い。

表 14 北海道エリア（札幌）でのヒアリング結果

日時	2019年9月13日 9時～10時
場所	北海道札幌市内
相手先	代表者
内容	<p>1. 交換対象部品の発生状況</p> <p>(1) O2センサー・A/Fセンサー</p> <ul style="list-style-type: none"> ・車検と整備台数は月間 200～250 台程度であるが、その内 10%程度で交換が発生している。マフラー側もエンジン側も交換することが多いため、1台につき2個程度となる。 ・板金以外で発生が多い理由は、融雪剤による腐食である。 ・板金台数は月間 80～100 台程度であるが、その内 5%程度で交換が発生している。フロント事故におけるエンジン側についているセンサー1個が主な交換パターンになる。 <p>(2) 着火プラグ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・車検と整備台数は月間 200～250 台程度であるが、その内 15%程度で交換が発生している。1台につき3～4本の交換本数となる。 ・車歴13年以上が30～40%程度あるため、その分は長寿命・高性能プラグではない可能性もある。 <p>2. 整備対象車両の種別</p> <p>(1) ユーザー</p> <ul style="list-style-type: none"> ・一般ユーザー60%、リース40%程度である。 <p>(2) 燃料</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ほぼガソリン自動車である。 <p>(3) 走行距離</p> <ul style="list-style-type: none"> ・走行距離は1～1.5万km <p>3. 回収ルート</p> <p>(1) 現在の処理方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・NGKがプラグやセンサーを回収している。ポイント制になっており、たまる何かと交換できる。年に2～3回程度出している。 <p>(2) 着火プラグの判別</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PGMが含有されるイリジウムプラグと通常プラグの判別は容易にできる。 <p>(3) 交換対象部品の分別保管</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ペール缶等に分けて保管しておくことは問題なくできる。 <p>(4) 回収方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・レターパックなどでの配送は可能。 <p>4. その他</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ミリ波レーダー、HIDも発生量が多い。

表 15 北海道エリア（旭川）でのヒアリング結果

日時	2019年9月13日 14時～15時
場所	北海道旭川市内
相手先	常務、整備担当者
内容	<p>1. 交換対象部品の発生状況</p> <p>(1) O2センサー・A/Fセンサー</p> <ul style="list-style-type: none"> ・車検と整備台数は年間500～600台程度であるが、月に1台程度である。 ・板金台数は月間40～50台程度であるが、その内5%程度で交換が発生している。フロント事故におけるエンジン側についているセンサー1個が主な交換パターンになる。基本的に軽自動車がほとんどを占める（フロントに近い部分にセンサーがあるため）。 ・旭川では融雪剤の散布量が少ないため、塩害による交換はほとんどない。 <p>(2) 着火プラグ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・車検と整備台数は月間500～600台程度であるが、その内80本程度である ・軽自動車では6～7万km、それ以外は10万kmを目安に交換している。 <p>2. 整備対象車両の種別</p> <p>(1) ユーザー</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ほとんどが一般ユーザーである。軽自動車が全体の40%程度ある。 <p>(2) 燃料</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ほぼガソリン自動車である。 <p>(3) 走行距離</p> <ul style="list-style-type: none"> ・走行距離は1万km <p>3. 回収ルート</p> <p>(1) 現在の処理方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・鉄と一緒に売却している。 <p>(2) 着火プラグの判別</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PGMが含有されるイリジウムプラグと通常プラグの判別は容易にできる。 <p>(3) 交換対象部品の分別保管</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ペール缶等に分けて保管しておくことは問題なくできる。 <p>(4) 回収方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・レターパックなどでの配送は可能。 <p>4. その他</p> <ul style="list-style-type: none"> ・バンパー等のプラは月2回程度回収に来ており、産廃処理費は10万円/月程度である。

表 16 ヒアリング結果のまとめ

エリア	着火プラグの発生量	O2・A/F センサーの発生量	分別回収の可能性
九州	<ul style="list-style-type: none"> ・車検時の交換対象部品としてユーザーに推奨するが、交換しなくても車検が不合格とならない ・推奨したユーザーの 5%程度しか交換せず、月に 20～30 個の発生量 	<ul style="list-style-type: none"> ・エンジンチェックランプの点灯により不具合(車検不合格)の発生有無を把握するのが一般的 ・車検台数は年間 3,000～4,000 台に対して月に 2～3 個の発生量 	<ul style="list-style-type: none"> ・イリジウムプラグの判別は容易にでき、ペール缶等に分けて保管できる ・1本 10 円などの買取価格にし、社会貢献の点を強く押し出すなど工夫が必要ではないか
首都圏	<ul style="list-style-type: none"> ・九州エリアと同じ ・リース車両は交換目安の走行距離タイミングで必ず交換するので、一般ユーザーよりも発生個数が多い可能性あり 	<ul style="list-style-type: none"> ・チェックランプ点灯時以外の交換はなく、O2 センサー・A/F センサーは整備からの発生はほとんどないと考えたほうがいい 	<ul style="list-style-type: none"> ・イリジウムプラグの判別は容易にでき、分別保管は手間にならないので、分別回収するなら協力する ・他の部品もあわせて回収したらどうか
東北	<ul style="list-style-type: none"> ・車検時の交換対象部品としてユーザーには推奨するが、交換しなくても車検において不合格とならないため、推奨したユーザーの 5～10%程度 	<ul style="list-style-type: none"> ・車検時の交換はほとんどないが、レッカー移動で入ってくる車両は交換があり、月に 10 個程度 ・軽自動車のフロント事故は交換が多い 	<ul style="list-style-type: none"> ・イリジウムプラグの判別は容易に可能 ・自動車車体整備協同組合と連携するなど普及啓発及び回収のインセンティブを検討してはどうか
関西	<ul style="list-style-type: none"> ・7～8 万 km の走行距離で交換を推奨しており、車検・整備台数の 5～6%程度が交換 	<ul style="list-style-type: none"> ・交換しなくても走行に影響しないため、発生個数は月 1 個程度 ・板金台数は年間 350 台程度であるが、そのうち 10～15 台程度で交換が発生 	<ul style="list-style-type: none"> ・イリジウムプラグの判別は容易にでき、有価で買い取るのであれば協力する会社は多いのではないか ・他の部品もあわせて回収したらどうか
札幌	<ul style="list-style-type: none"> ・車検・整備台数の 15%程度で交換が発生しているが、車歴 13 年以上が 30～40%程度あり、その分は通常プラグの可能性あり 	<ul style="list-style-type: none"> ・車検・整備台数の 10%程度で 2 本交換しており、融雪剤による腐食が理由 ・板金もフロント事故では 1 本の交換が発生 	<ul style="list-style-type: none"> ・イリジウムプラグの判別は容易にできる
旭川	<ul style="list-style-type: none"> ・車検・整備台数は月間 500～600 台で 80 本程度を交換 	<ul style="list-style-type: none"> ・車検・整備ではほぼない ・軽自動車のフロント事故は交換が多い 	<ul style="list-style-type: none"> ・イリジウムプラグの判別は容易にでき、レターパックなどでの配送が可能

以上のヒアリング結果から以下のことがわかった。

着火プラグの発生量

車検・整備台数の概ね 5%程度で着火プラグの交換が行われている（着火プラグ本数は 1 台あたり 3～4 本程度）。今回ヒアリング調査した工場では車検・整備台数が月に 300～400 台規模のため、1 工場から月に 40～50 本程度発生している。札幌のエリアでは交換比率が 15%程度と高く、これは融雪剤による腐食が発生するためであり、地域性の違いを確認した。同じ北海道でも旭川では他エリアと同様の 5%程度であり、融雪剤の散布が多いか否かにより交換比率が異なることも確認した。

O₂・A/F センサーの発生量

当初、車検・整備において O₂ センサーの発生を想定していたが、車検・整備において O₂ センサーを交換するケースは稀であることを確認している。

一方で、想定していなかった板金修理において、図 30、図 31 に示すように軽自動車のフロント事故において O₂ センサーの交換が発生していることを確認した。

回収方法

O₂ センサー、着火プラグともにペール缶などに分けた保管を整備工場に依頼することは容易であることを確認した。また、一定量が溜まってから宅配便等で指定場所に送付してもらうことも容易であることを確認できたことから、両対象物を回収することは実現性が高い。

さらに、着火プラグについて、高性能・長寿命プラグと通常プラグの判別は図 33 に示す通り容易にできることを確認している。

取引要件

着火プラグ、O₂・A/F センサーともに、鉄系の資源として業者に売却をされているのが現状であるが、当該部品の重量が小さいため、別途回収とした場合に望まれる買取金額は高くない。例えば、「1 本 10 円程度」、「業界の会議費の足しになる程度」、「環境活動としての意義があれば集める」というレベル感である。



図 30 軽自動車のフロント箇所



図 31 O2 センサー設置個所の拡大写真

1.2.3. 市場規模の推定

1) 着火プラグ

ヒアリングにより、北海道（札幌エリア）を除き、車検・整備台数の5%程度で着火プラグの交換が行われていることがわかった。そこで、着火プラグは、「ガソリン自動車の車検・整備台数の5%」から発生すると想定し、また、1台あたりの着火プラグの交換個数は3個と想定し、市場規模を推定することにした。なお、整備台数は統計データが確認できなかったため、統計データがある車検台数のみで市場規模を推定した。

国土交通省「平成30年度自動車検査業務量（年報）」によれば平成30年度の継続審査台数は21,043,151台である。ここで、着火プラグはガソリンエンジン車に使われる部品であり、ディーゼルエンジン車には使われない。そのため、前述の継続審査台数の内、ディーゼルエンジン車両台数を除く必要がある。国土交通省九州運輸局が公開している燃料種別の自動車保有台数は、令和元年7月末時点でガソリンエンジン車62,542,590台、ディーゼルエンジン車6,603,462台である。そこで、このデータからガソリンエンジン車の比率を求め、継続審査台数に乗じることで、ガソリンエンジン車の継続審査台数を算出することとした。この結果、ガソリンエンジン車の比率は89.4%であることから、ガソリンエンジン車の継続審査台数は55,913,075台となる。交換率5%、1台あたりの着火プラグ交換個数を3個と設定していることから、着火プラグの発生個数は年間2,821,877個と推定される。

2) O2 センサー

ヒアリングにより、O2センサーは、当初の想定と異なり、車検・整備において交換するケースは稀であることが確認できた。そこで、車検・整備からは車検・整備台数の1%でO2センサーが交換されると想定した。一方で、想定していなかった板金修理において、軽自動車のフロント事故においてO2センサーの交換が発生していることを確認した。そこで、軽自動車のフロント事故台数を推定することで、それをO2センサーの発生個数とすることにした。

まず、着火プラグと同様に、平成30年度の継続審査台数は21,043,151台であることから、これに交換率1%を乗じた210,432個を車検・整備から発生する個数と推定した。次に、板金修理からの発生個数の推定に移る。まず、板金修理の内、軽自動車のフロント事故からO2センサーが発生すると想定していることから、フロント事故を「追突事故」と「衝突事故」に分類した。前者はフロントの損傷が1台であり、後者はフロントの損傷が2台であることから、追突事故からは件数と同じ数、衝突事故からは件数の2倍の数のO2センサーが発生すると想定した。ここで、国土交通省「事故の全体俯瞰分析」に記載されている「事故類型別事故件数の推移」から2005年データを使用すると追突事故件数は294,431件、衝突事故件数は27,373件であることがわかった。また、同資料の「車種別の事故車両台数」から2005年のデータを使用すると、軽自動車の比率は19.9%であることがわかった。以上から、追突事故件数294,431件に軽自動車比率19.9%を乗じた数値と衝突事故件数27,373件の2倍の数に軽自動車比率19.9%を乗じた数値を合算し、板金修理からのO2センサーの発生個数は年間69,486個と推定される。以上から、車検・整備と板金修理からのO2センサーの発生個数は年間279,918個と推定される。

3) 市場規模の推定結果

着火プラグ及び O2 センサーの年間発生個数を図 32 にまとめた。着火プラグの年間発生個数は約 2,820,000 個、O2 センサーの年間発生個数は約 280,000 個と推定される。

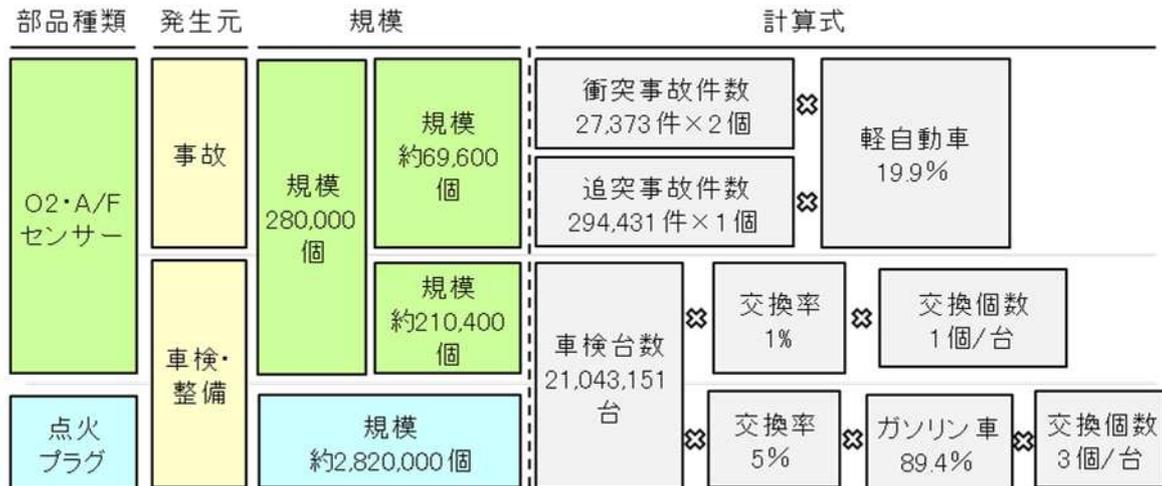


図 32 着火プラグ・O2 センサーの市場規模の推定

1.2.4. 回収方法の検討

1) 回収方法の基本的な方針

ヒアリングの結果から、整備工場において高性能・長寿命の着火プラグ、O2 センサーを分別して保管できることがわかった。具体的には、図 33 に示すように、整備工場自身で高性能・長寿命の着火プラグと通常プラグの見分け方を知っており、それを図 34 に示すペール缶に取り外した段階で仕分けすることができる。このペール缶に一定量が溜まってから指定場所に配送してもらえることも確認している。

そこで、ターゲットとする部品は整備工場にて発生段階で分別保管すること、一定量溜まった段階で整備工場から指定場所に配送してもらうことを回収の基本的な方針とした。配送方法は、さまざまな企業のサービスがあるが、本事業でターゲットにしている着火プラグ・O2 センサーは全国の整備工場からの回収を想定していることから、図 35 に示す全国一律料金かつ安価である配送方法としてレターパックライトでの回収を検討することにした。



図 33 整備工場が説明に使ったプラグの見分け方



図 34 整備工場で分別に使っているペール缶



図 35 レターパックライトの概要

2) 着火プラグ

基本方針に従い、まず着火プラグをレターパックライトで郵送できるか検討した。図 36 はレターパックライトに着火プラグ 20 本を入れた時の重量である。20 本でレターパックライトの 1/3 程度の容量を占める。この際の重量は 782g であった。レターパックライトの容量満杯に着火プラグを詰めると 60 本と想定されるが、この際の想定重量は 2.4kg 程度である。レターパックライトの重量制限が 4kg であることから、着火プラグを満杯に詰めても、厚さ制限の 3cm 以内にも納まり、配送に問題がないことがわかった。また、レターパックライトに着火プラグを満杯に詰めた場合の輸送コストは 1 本あたり 6.2 円となる。



図 36 着火プラグの重量 (20 本)

3) O₂ センサー

次に、O₂ センサーをレターパックライトで郵送できるか検討した。図 37 はレターパックライトに O₂ センサー 10 本を入れた時の重量である。10 本でレターパックライトの 1/4 程度の容量を占める。この際の重量は 1,059g であった。レターパックライトの容量満杯に O₂ センサーを詰めると 40 本と想定されるが、この際の想定重量は 4.3kg 程度である。レターパックライトの重量制限が 4kg であることから、O₂ センサーを満杯に詰めると重量制限を若干超えることが想定されるため、整備工場から出荷する際に満杯に詰めないなどオペレーションの工夫が必要であることがわかった。なお、O₂ センサーを 40 本詰めても厚さ制限 3cm に納まることを確認している。O₂ センサーが満杯にならない程度の 30 本を想定した場合、輸送コストは 1 本あたり 12.3 円となる。



図 37 O2 センサーの重量 (10 本)

4) 回収方法のまとめ

図 38 に前述の内容をまとめた。レターパックライトでの着火プラグの回収は運用上問題ないが、O2 センサーはレターパックライトに満杯まで入れると、重量制限を超える可能性があることがわかった。ここで、先の整備工場へのヒアリングを振り返ると、着火プラグ、O2 センサーの整備工場からの月間発生量は、それぞれ 30~40 本、1~2 本である。従って、着火プラグは 2 カ月に 1 回程度、O2 センサーは年に 1 回程度の回収頻度になることが想定される。図 36、図 37 に示した検討では、着火プラグ、O2 センサーを別々に回収することを想定しているが、その場合の O2 センサーの回収頻度が低いことから、着火プラグを回収する際に、同じレターパックライトに入れて出荷してもらうことで、回収コストをさらに低減できるとともに、重量制限を超える可能性を排除できる。なお、着火プラグをレターパックライトに満杯に詰めた際の重量は 2.4kg 程度で、仮に隙間に 1~2 本の O2 センサーを詰めても、重量制限の 4kg には到達しない。



図 38 着火プラグと O₂ センサーのレターバックライトでの回収の検討結果

1.2.5. 解体工場等との連携可能性

1) 解体工場へのヒアリング調査

ここまで、着火プラグと O₂ センサーを整備工場から回収できるか検討した。これは、整備等における部品としての交換需要から発生するものを対象としたものである。これ以外にも、使用済み自動車解体される段階でも回収できる可能性がある。そこで、解体工場にヒアリングを行い、解体工場からの着火プラグ、O₂ センサーの解体可能性を探った。

ヒアリング結果を表 17 に示す。着火プラグはエンジンから取り外せる可能性があるが、使用済み自動車から降ろされたエンジンは、エンジンリサイクル工場やリビルトエンジン工場に着火プラグをつけたまま売却するため、取り外しができないことがわかった。一方、O₂ センサーは、月間の解体台数 800~1,000 台に対して、月間 200~300 個回収されており、台湾のバイヤーに 1 個あたり 100 円で売却されていることがわかった。

表 17 解体工場へのヒアリング結果

日時	2019年9月5日 14時30分～16時00分
場所	埼玉県
相手先	工場長
内容	<p>1. 着火プラグ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・エンジンを ELV から降ろしても着火プラグはつけたまま売却するので未回収 ・リビルトエンジン会社ではコア入荷時点で 10%程度はプラグ付きで入荷 <p>2. O2 センサー</p> <ul style="list-style-type: none"> ・月に 200～300 個（解体台数は月間 800～1,000 台）発生しており、100 円/個で台湾のバイヤーに売却

2) エンジンリサイクル工場の現地調査

解体工場へのヒアリング調査により、エンジンは着火プラグが付いたままエンジンリサイクル工場に売却されていることがわかった。そこで、エンジンリサイクル工場から着火プラグを回収できるのか、九州にあるエンジンリサイクル工場の現地調査を行った。

図 39 は解体工場からエンジンリサイクル工場に入荷したエンジンの保管状況である。このように山積みされたエンジンは、図 40 のアルミ溶解炉に投入されアルミインゴットにリサイクルされる。このアルミ溶解炉に投入する前に手解体により不要な部品を取り外す過程が存在する。この段階で着火プラグを手選別できるか聞いたところ、1 日処理するエンジン台数が 300 台から 400 台あり、工具を使っでの取り外しになることから、難しいとの回答を得た。そこで、アルミの融点よりも鉄の融点の方が高いことに着目し、アルミ溶解炉の残渣から着火プラグを回収できないか調査した。図 41 がアルミ溶解炉から出てくる残渣である。この残渣は篩にかけられ図 42 のように鉄スクラップ向け資源に加工される。この中に着火プラグがあるかピッキングを試みたところ、図 43 に示すように、着火プラグが混入していることがわかった。この中には、通常プラグと高性能・長寿命のプラグが混在しており、本事業でターゲットとしている高性能・長寿命のプラグを回収できる可能性があることを確認した。



図 39 解体工場から入荷する廃エンジン



図 40 エンジンのアルミ溶解炉



図 41 溶解炉から出てくる残渣



図 42 残渣を篩にかけた後の鉄スクラップ向け資源



図 43 鉄スクラップ向け資源からのピックアップした着火プラグ

1.2.6. PGM 含有部位の効率的な分離方法の検討

1) 着火プラグ

(1) PGM 含有部位の特定方法

着火プラグは表 18 に示す通り、通常プラグ、高性能プラグ、長寿命プラグの 3 つに分類される。通常プラグには PGM が使われておらず、高性能プラグには中心電極にイリジウム合金が使われており、長寿命プラグには中心電極にイリジウム合金が、外側電極にプラチナが使用されている。

表 18 着火プラグの種類

種類	中心電極がイリジウム合金	外側電極がプラチナ
通常プラグ	×	×
高性能プラグ		×
長寿命プラグ		

本事業では、着火プラグからイリジウム合金とプラチナを分離することを目的としていることから、通常プラグ、高性能プラグ、長寿命プラグを見分けることが必要である。図 44 は通常プラグの写真である。中心電極は円柱型で、外側電極は平坦な構造をしている。一方、図 45 は長寿命プラグである。中心電極は円錐型で、外側電極は中心電極に向かい突起が付いていることが目で見てわかる。このように、通常プラグ、高性能プラグ、長寿命プラグは誰が見ても簡単に見分けることができることがわかった。



図 44 通常プラグの写真



図 45 長寿命プラグの写真

(2) PGM 含有部位の分離方法

外側電極部分（ターゲット元素：プラチナ）の分離方法

中心電極にアプローチするためには、外側電極をはじめに分離することが必要であるため、初めに外側電極部分の分離方法を検討した。図 46 に示すホームセンターなどで売っている一般的な金属バサミにより外側電極部分を分離できないか試したところ、容易に切断でき、1本あたり10秒のペースで切断できた。180本を継続的に切断し、金属バサミの劣化を調査したが、特に切断に影響がないことを確認した。以上から、外側電極の分離は金属バサミによる切断が有効であることがわかった。



図 46 外側電極の分離に使用した金属バサミ

中心電極部分（ターゲット元素：イリジウム）の分離方法

外側電極部分の分離ができたので、次に、中心電極部分の分離方法を検討した。中心電力部分は細長い構造のため、ステンレス用ヤスリ（図 47）、ダイヤモンドヤスリ（図 48）および線材用ニッパー（図 49）の3種類の工具を用意した。

まず、ステンレス用ヤスリを使い、先端部分を削る分離方法を試した。削り始めは中心電極の先鋭部分がステンレス用ヤスリの大きな目に引っかかるが、削り出せば大きな力も必要なく削れ、削り出た金属片も肉眼で視認できる程度の大きさなので、回収も容易であった。削る時間は1本あたり30秒～50秒程度である。

次に、ダイヤモンドヤスリを使い、先端部分の分離を試みた。ステンレス用ヤスリよりも目が

細かいので、中心電極の先鋭がつまることはないが、削り出た金属片も細かく、肉眼で視認するのが困難なほどであった。削りやすさはステンレス用ヤスリと同等であるが、回収はダイヤモンドヤスリの方が難しい。

最後に、線材用ニッパーを使い、先端部分を切断する分離方法を試した。人力で容易に切断できるが、先鋭部分が飛んでいってしまうため、紛失しやすい。また、線材用ニッパーは刃が脆く、1回切断ただけで刃が曲がり使えなくなってしまった。

以上の3種類の工具を用いた検討から、中心電極の分離および分離後の回収には、ステンレスヤスリが最適であることがわかった。外側電極を金属バサミで、中心電極をステンレス用ヤスリで分離した長寿命プラグ分離前後の写真を図 50、図 51 に示す。このように、外側電極のプラチナ部分を切断でき（切断後の当該箇所は図 52）、濃縮できていることが分かる。また、中心電極の先端は綺麗に粉状分離できており（切断後の当該箇所は図 53）、イリジウムが濃縮できていることが分かる。



図 47 中心電極の分離に使用したステンレス用ヤスリ



図 48 中心電極の分離に使用したダイヤモンドヤスリ



図 49 中心電極の分離に使用した線材用ニッパー



図 50 分離前の着火プラグ



図 51 分離後の着火プラグ



図 52 分離後の外側電極部分



図 53 分離後の中心電極部分

2) O₂ センサー

(1) PGM 含有部位の特定方法

今回調査した O₂ センサーは一部形状の違う物が見受けられたものの、内部構造は同じであり、金属性のカバー内部にセラミックス製の部品があり、その内側に白金が使用されている。

O₂ センサーの内部構造は概ね図 54 に示す通り、ヒーターを中心とし、その外側がセラミックス製の筒状の部品となっており、一番外側に金属製のカバーがついている。

そして PGM (プラチナ) は O₂ センサー内部のセラミックス製の筒状の部品の内側に薄く塗布してある。一部、自動二輪車用などのヒーターが無いものもあったが、セラミックス製の部品に PGM (プラチナ) が塗布してあるのは同じであった。つまり外形的な差異に関係なく、O₂ センサー内のセラミックス製部品に PGM (プラチナ) が使用されており、セラミックス製部品以外の部分には PGM (プラチナ) 白金が使用されていないことを確認した。

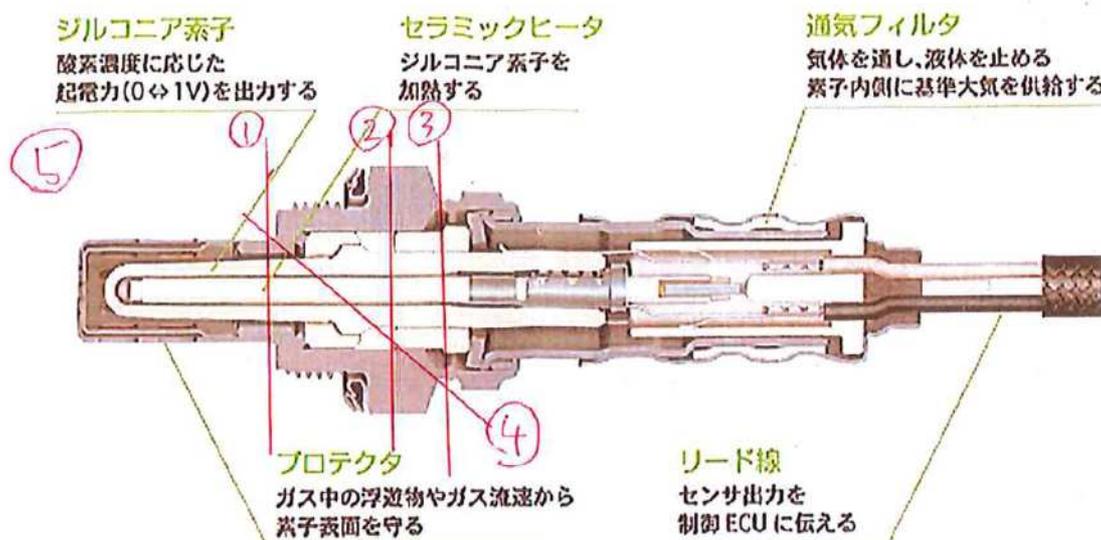


図 54 プラチナをターゲットとした場合の O₂ センサーの切断箇所

(2) PGM 含有部位の分離方法

O₂ センサーからセラミックス部品のみを分離すれば、効率良く PGM (プラチナ) を回収することが出来ると考えられるため、図 54 に示す ~ の断面による切断を以下の 3 つの方法で試みた。

ウォータージェットによる物理的な分離方法

水に高い圧力をかけ、細いノズルから噴射することで対象物を切断する方法。切断時に熱が発生せず、粉じんが飛び散らないうえ、精密に切断できる点にメリットがある。本実証では対象物がモース硬度 8.5 (鉄で 4~5) と非常に硬いため、研磨剤としてアメジスト粉末を水に混入させて行った (アブレイブジェット加工)。

切断によって削れてしまう幅 (カーフ幅) は約 1mm~1.5mm と多めだが、切断面は凹凸が少なくきれいであり、PGM 含有部位を容易に取り出すことが出来た。

ただ、1 個切断するのに 90 秒かかり、同時に複数本切断する等の効率化も難しいこと、またウォータージェットカッターの設備自体が大がかりなものであり、費用的にもスペース的にも導入が容易ではないこと、切断を外部機関に依頼すると 1500 円/1 個 (平均) と高額なことから、O₂ センサー内部にある PGM 含有部位の分離方法としては、経済的でないことがわかった。



図 55 ウォータージェットの切断風景

塩化鉄 () による化学的な分離方法

塩化鉄 () 液の入った容器に O₂ センサーをそのまま漬け込み化学的に分離する方法を試した。塩化鉄 () 液の強酸性による腐食作用を利用して、O₂ センサー外部の金属部分を腐食させることによって除去し、内部の PGM 含有部位 (セラミックス製) を取り出す方法である。塩化

鉄()液の入った容器を大きくする事によって、1度に大量の PGM 含有部位を取り出すこともできる。

本実証では 1/2 にカットした O2 センサーを用いて行った。金属部分を完全に除去するのに 3 日間を要した。時間短縮には、塩化鉄()液の温度を上げる、又は攪乱することによって、完全除去に要する時間を短縮できるが、強酸性の塩化鉄()液を使用するため、作業環境の整備も必要となることがわかった。



図 56 塩化鉄による溶解実験

高速回転切断機による物理的な分離方法

市販の高速回転切断機(図 57 参照。)を用いて O2 センサーを切断する方法。高速回転切断機(砥石方式)は 2 万円~3 万円ほどと、比較的安価で購入できる。また広く流通しており、既に所有している作業場も見受けられた。O2 センサー1 個をカットするのに要する時間は 30 秒ほどであるが、熟練工であればもう少し短縮できると思われる。また、O2 センサー20 個の切断で直径 355 mmの砥石を使い切ってしまった。1 個当たりの切断コストは約 60 円となり、経済的でないことがわかった。そこで、後述の専用治具を開発し、1 度に 10 個の O2 センサーを切断することで、大幅な作業効率の向上を図るとともに、均等な力で切断することで砥石の消耗軽減を図り、強いては経済的課題解消につなげられないか検討する。



図 57 高速回転機での切断風景

1.2.7. PGM 含有量の分析結果

1) 着火プラグ

分析用検体

整備工場からサンプル提供をしてもらい、1.2.1.2)(2)に示した方法で外側電極と中心電極を分離し分析用検体を作った。

分析方法

精錬業者に分析を依頼し、外側電極 2.4g、中心電極 0.2g を検体に、簡易的な XRF 分析を実施した。また、イリジウムについては、ICP 分析も実施した。

分析結果

簡易的な XRF 分析の結果、外側電極にはターゲットとするプラチナの含有率が 4.83%、中心電極にはターゲットとするイリジウムの割合が 20.17%と高純度で含まれていることがわかった。また、ICP 分析の結果、中心電極にはイリジウムが 33.41%含有していることがわかった。

2) O₂ センサー

を分析用検体

整備工場では発生量が少なかったことから、解体工場で回収されている O₂ センサーを提供してもらい、分析用検体を作った。

分析方法

精錬業者に分析を依頼し、PGM 含有部位（セラミック製）3.7g を検体に、ICP 分析を実施した。

分析結果

ICP 分析の結果、PGM 含有部位(セラミック製)に塗布されている、プラチナの含有率は 0.64% であることがわかった。

1.2.8. 事業化に向けた課題・対応策

1) 着火プラグ

(1) レターパックでの回収運用時の課題検証

重量制限超過の発生有無

着火プラグをレターパックライトに満杯まで詰めた場合、60 本程度を充填できるが、その際の想定重量は 2.5kg 程度である。一方で、O2 センサーの場合、40 本程度を充填できるが、その際の想定重量が 4.3kg 程度で、レターパックライトの重量制限である 4kg を超過するため、出荷時に重量制限を超過するケースが発生しないかパイロット実証を通じて検証が必要である。

通常プラグ混入の発生有無

ヒアリング調査により、整備工場通常プラグと高性能・長寿命プラグを見分けること、またそれをペール缶に分別して保管できることを確認している。ヒアリング調査先以外の整備工場に対象を広げて運用した際、通常プラグが混入することがないかパイロット実証を通じて検証が必要である。後述の通り、着火プラグからプラチナ、イリジウムを分離して精錬業者に売却した際に得られる収益は 1 時間あたりの処理量 120 本ベースで 1,500 円程度であり、利益は出るが、十分な利益が出るとは言えない状況である。ここに通常プラグが混入することで、回収コストが上がるため、通常プラグがどの程度混入してくるのかが重要な検証項目となる。

着火プラグと O2 センサーの混合回収の検討

前述の通り、O2 センサーは整備工場からの発生個数は月に 1~2 個程度であり、O2 センサーのみで回収する場合は回収頻度が年に 1 回程度が想定される。この際、に記載した通り、O2 センサーの場合はレターパックライトでの回収において重量制限 4kg を超える可能性がある。そこで、重量制限に余裕がある着火プラグと混合で回収する方法が考えられるが、整備台数よりも板金台数が多い整備工場の場合は O2 センサーの混合割合が高くなることも想定され、この場合に重量制限を超えることがないのか、パイロット実証を通じて検証が必要である。

(2) 着火プラグに残る残存価値のバラツキの検証

着火プラグは消耗品である。整備工場において着火プラグが交換されるのは、何かしら着火プラグを起因とする不具合が発生しているからである。着火プラグの不具合は着火プラグの消耗に起因する。そのため、着火プラグにより外側電極のプラチナと中心電極のイリジウムの残存量が異なることが予想される。実際、先に示した分析値でもイリジウムの含有率が検体により 20.17、

33.41%と大幅に異なっている。後述の採算性評価で詳細は記載するが、プラチナとイリジウムの含有率は採算性に大きく影響するため、着火プラグに残存する両元素の量のばらつきの確認を、パイロット実証を通じて検証が必要である。

(3) エンジンリサイクル工場へのバリューチェーンの拡大

解体工場へのヒアリング調査により、エンジンは着火プラグが付いたままエンジンリサイクル工場に売却されていることがわかっており、エンジンリサイクル工場の現地調査により、アルミ溶解炉の残渣から事業でターゲットとしている高性能・長寿命プラグを回収できる可能性があることを確認したのは前述の通りである。エンジンリサイクル工場へとバリューチェーンを拡大するにあたり、次の課題がある。

残渣からの着火プラグのピックアップ

図 42 に示した鉄スクラップ向け出荷用に篩にかけられた後の残渣から着火プラグをピックアップすることができる。実際に、現地調査の際にもピックアップ回収を試験的に行った。この際、2日分の残渣を対象に着火プラグをピックアップ回収した。ピックアップに要した時間は合計 2 時間である。回収した着火プラグは合計 174 本で、そのうち高性能・長寿命プラグは 72 本あり、全体の 41.4%であった。本事業で対象とする高性能・長寿命プラグを考えると、1 本あたりのピックアップ時間は 1.7 分、1 時間あたり 36 本であった。採算性評価に記載するが、高性能・長寿命プラグ 1 本が産み出す収益は 25 円程度あることから、仮にピックアップの人件費を時給 1,000 円と想定した場合、ピックアップに要する人件費は 27.8 円で赤字になる可能性がある。この度のピックアップ回収は図 42 に示す通り、山積みされた中からのピックアップ作業であったため作業効率が著しく悪かったように思われる。分別作業台を用意し少しずつ平積みにしながら作業を行うなど、ちょっとした工夫を行うことで作業効率はかなり向上出来るものと考えられる。また、エンジンリサイクル工場に入荷するエンジンは、解体工場からの入荷が大半であることから、使用済み自動車由来のエンジンが主である。従って、車歴の長いエンジンが入荷してくることから、高性能・長寿命プラグよりも通常プラグが多いと考えられ、エンジンリサイクル工場に高性能・長寿命プラグが入荷してくる時期も考慮する必要がある。

エンジンリサイクル工場由来の着火プラグの残存価値

エンジンリサイクル工場由来の着火プラグは、アルミ溶解炉の残渣から回収されるものであることから、600～700 の高温にさらされている。この温度帯はプラチナ、イリジウムの融点よりも低いですが、外側電極のプラチナと中心電極のイリジウムの残存量に影響がある可能性は否定できない。また、使用済み自動車由来のエンジンから回収されるため、走行距離が長く、これも残存量に影響することが想定される。従って、着火プラグに残存する両元素の量のばらつきを確認する必要がある。

2) O2 センサー

(1) 効率的に切断できる高速回転切断機向け治具開発

前述の通り、高速回転切断機で PMG 含有部位を分離できることは確認済みだが、効率的に切断するための開発が必要である。現在の想定では、「安全」及び「効率」を両立するために半円形の台に O2 センサーをねじ込み、一度に 10 本セットできる治具の開発を想定する。治具への O2

センサーのセット時間を考えても、2分で10本のセットができるものと想定している。

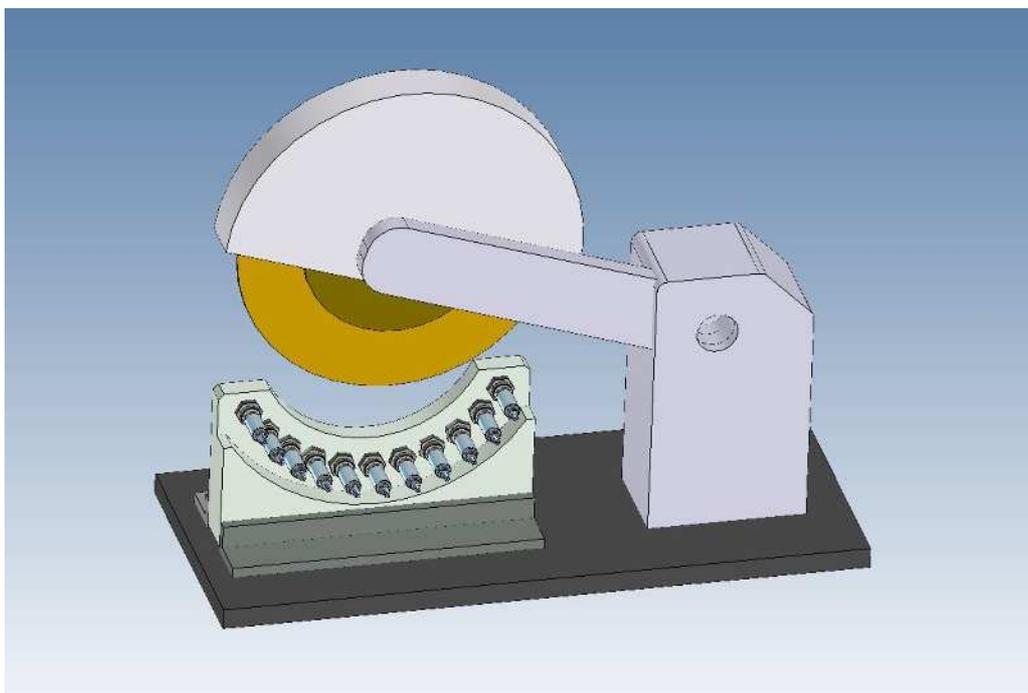


図 58 高速回転切断機向け治具のイメージ

(2) バリューチェーンの拡大

整備工場へのヒアリングにより、事故修理における O2 センサーの交換需要はあるが、整備・車検における O2 センサーの交換は少ないことがわかった。一方で、解体工場では O2 センサーを回収しており、台湾企業に 1 個あたり 100 円で売却していることがわかった。整備工場からの発生量が少ないことから、O2 センサーからプラチナをリサイクルしようとしている本事業を達成するには、バリューチェーンの拡大が重要である。着火プラグのバリューチェーン拡大に向けて調査範囲を広げたエンジンリサイクル工場でも、アルミ溶解炉に投入する前に O2 センサーを回収していることを確認している。エンジンリサイクル工場は、取引のある解体工場に回収した O2 センサーを売却しているとのことから、ヒアリングした解体工場と同じく、海外に売却されている可能性がある。

2. 環境影響評価

2.1. インベントリ・バウンダリの考え方

本実証における CO2 削減効果を測定するにあたり、着火プラグ・O2 センサー、電子基板のそれぞれについて、ベースラインを設定し、本実証において比較するバウンダリについて検討した。

2.1.1. 着火プラグ・O2 センサーのインベントリ・バウンダリ（図 59 参照）

1) インベントリにおけるベースラインシナリオ：

本実証における調査結果により、現状では整備工場から手解体により発生する着火プラグ・O2 センサーは一般的に整備工場から発生する産業廃棄物の一部として廃棄されている。（極一部が台湾などの人件費が安い海外へ輸出されている。）

よって、着火プラグ・O2 センサーは産業廃棄物の一部として、混載輸送で回収され、破碎・選別等により、電炉鉄などの原料としてリサイクルされていると推測され、廃製品に含まれるプラチナ・イリジウム等の貴金属元素は鉄の微量元素として散逸している可能性が高いと考えられる。

2) インベントリにおける比較対象となる本実証のシナリオ：

本実証では、整備工場において手解体により発生する着火プラグ・O2 センサーを保管してもらい、一定量（ゆうパックに入る数量または重量）が溜まった時点で郵送（混載）による回収を行う。回収された着火プラグ・O2 センサーは、貴金属を含む着火プラグ、貴金属を含まない着火プラグ、O2 センサーの3種類に手選別を行う。

貴金属を含む着火プラグは 2.2.7 1) の通り、ヤスリ、ニッパーを使った手作業により、イリジウム部分（着火プラグの種類によっては、プラチナ部分が回収できる場合もある）を分離・回収する。

O2 センサーは 2.2.7 2) の通り、高速回転機による切断を行うことで、金属製筒状部品の内側にあるプラチナが塗布されたセラミックス部品を取り出し、回収することができるようになる。

上記着火プラグ及び O2 センサーから回収されたイリジウム・プラチナ含有物は製錬の原料として売却することでイリジウム・プラチナの地金としてリサイクルすることができるようになる。

貴金属を含まない着火プラグはベースラインと同じく産業廃棄物として廃棄するものとする。

3) バウンダリの設定

まず、ベースラインにおける着火プラグ・O2 センサーの回収にかかる CO2 排出量と、本実証において、着火プラグ・O2 センサーを回収し、製錬へ売却する原料となる状態まで加工することにかかる CO2 排出量を比較する。但し、ベースライン・本実証とも混載物流による回収を行うものとするが、ベースラインは近隣の資源リサイクラーへの輸送であり、輸送距離を 50km と設定し、本実証では全国から代表事業者の工場へ収集するため、輸送距離を 300km と設定している。

次に、本実証により回収したプラチナ・イリジウム含有物を製錬した場合にかかる CO2 排出量と、貴金属の鉱石を鉱山から採掘、輸送、製錬することにかかる CO2 排出量と比較した。ベースラインでは散逸していた貴金属元素をリサイクルできることにより、経済的にも資源戦略的にも重要な取り組みであり、世界的なバウンダリで見た場合の CO2 排出量の削減を達成することが

可能であると考える。

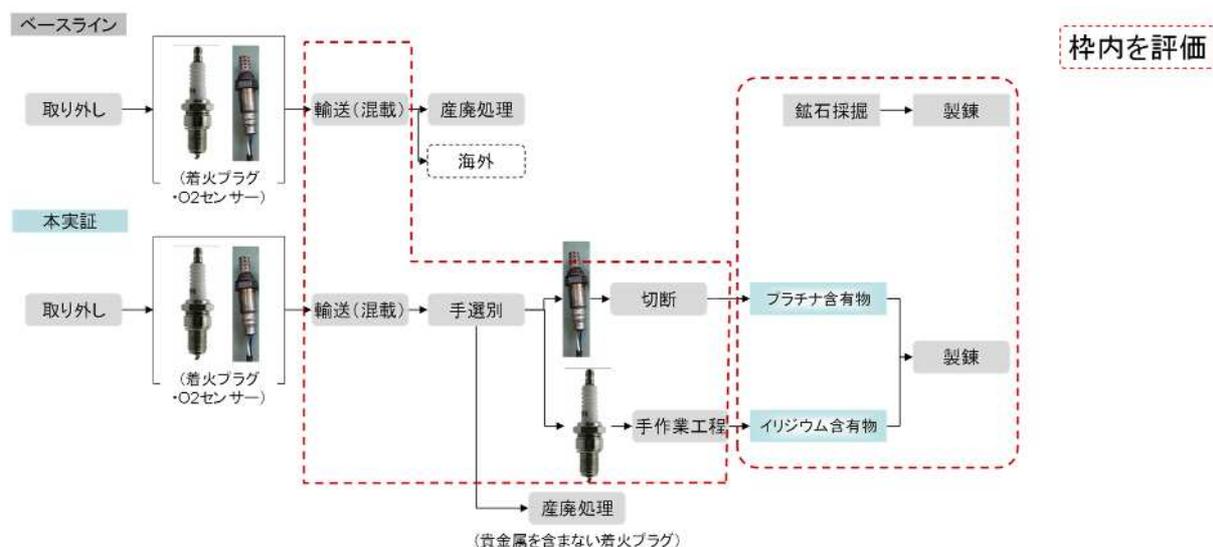


図 59 着火プラグ・O2 センサーのバウンダリ

2.1.2. 電子基板のインベントリ・バウンダリ (図 60 参照)

1) インベントリにおけるベースラインシナリオ:

本実証の既存技術である蒸気分離プロセスにおいて、これまで電子基板から分離した電子部品は、主に IC 類、コネクタ、混合部品の 3 種類 (更に電子部品を分離後の基板がある) に選別され、混合部品については、選別せずに湿式製錬の原料として売却し、湿式製錬では主に金・銀・パラジウムを地金として回収する。

2) インベントリにおける比較対象となる本実証のシナリオ:

本実証では、蒸気分離後の選別から回収される混合部品について、画像認識による AI 自動選別を行い、金・銀・パラジウム・ルテニウムなどを対象として、「貴金属含有部品」と貴金属含有量が少ない「その他部品」に区分する。

貴金属含有部品については、金・銀・パラジウムを対象にベースラインと同じく湿式製錬の原料として売却し、湿式製錬で金・銀・パラジウムを地金として回収する。

3) バウンダリの設定

ベースラインにおいて、混合部品全量を湿式で製錬する場合と、本実証において貴金属含有部品だけを湿式で製錬した場合にかかる CO2 排出量を比較する。(ルテニウムを含有する部品の重量は微量であり、現時点ではルテニウムを製錬できる事業者と連携に向けた検討中であるため、評価対象外とした。また、「その他部品」についても、製錬で回収可能な金・銀濃度が含まれており、今後、湿式製錬以外への売却可能性も含めて検討可能である。)

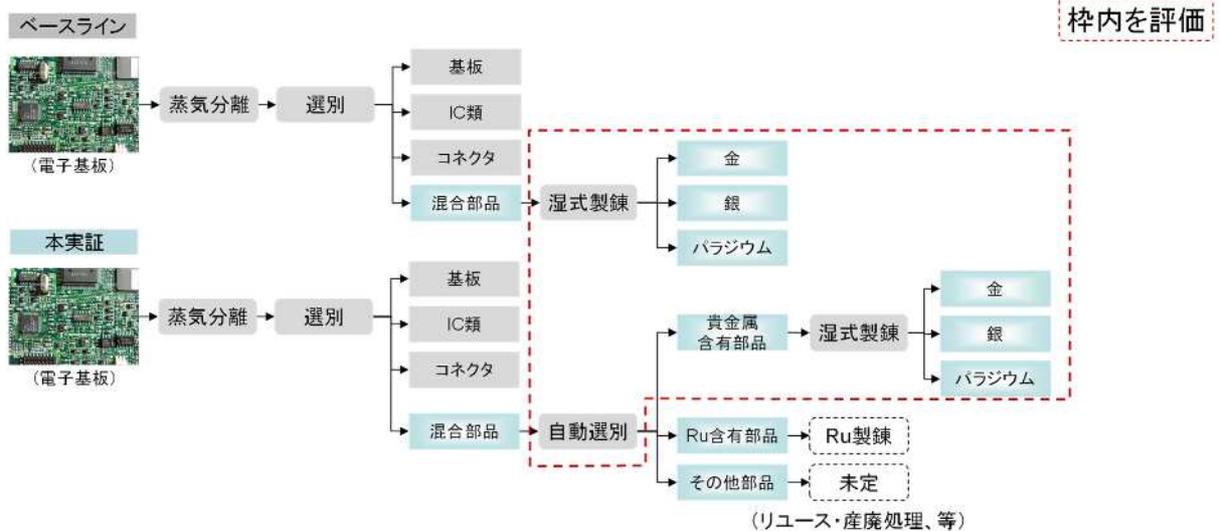


図 60 電子基板のパウンダリ

2.2. CO2 削減効果の試算

2.2.1. 着火プラグ・O2 センサー（図 61 参照）

1) 評価の前提条件

(1) 輸送については、着火プラグ・O2 センサーをそれぞれ 100 本ずつ、回収した場合にベースラインと本実証の輸送にかかる CO2 排出量をそれぞれ算出する。

輸送距離については、ベースラインは近隣の資源リサイクラーへ輸送するものとして 50km と設定し、本実証では全国から代表事業者の工場へ収集するため 300km と設定している。

輸送にかかる CO2 排出係数は、(社) 産業環境管理協会 IDEAv2.3：製品コード 441111304 「トラック輸送サービス, 4 トン車, 積載率_平均」をもとに、0.294kg-CO2/tkm としている。

(2) PGM 含有部位の分離については、O2 センサーのみ高速回転機による切断を行うため、100 本の切断にかかる CO2 排出量を算出する。

高速回転機による切断にかかる電力は実測により、0.012kWh/本であり、電力 1kWh にかかる CO2 排出係数は東京電力の 2018 年度実績である 0.455kg-CO2/kWh としている。

(3) 本実証においてプラチナ・イリジウム含有物の重量と貴金属成分含有量（品位）をもとに貴金属成分量を算出した。また、ベースラインにおいて、本実証と同等の貴金属成分量に相当する鉱石重量を算出した。プラチナ・イリジウム含有物重量と鉱石重量に基づいて、それぞれの製錬にかかる CO2 排出量を算出する。

CO2 排出係数はいずれも(社) 産業環境管理協会 IDEAv2.3 を参照しており、鉱石採掘～輸送は製品コード 053125000 「貴金属鉱石（金銀鉱），精鉱」をもとに 0.144kg-CO2/kg-鉱石とし、鉱石製錬は製品コード 241912000 「金地金（金鉱石原料）」をもとに 0.193kg-CO2/kg-鉱石としている。また、同 LCA データにおける貴金属鉱石の貴金属含有量（品位）は 20g/t となっている。

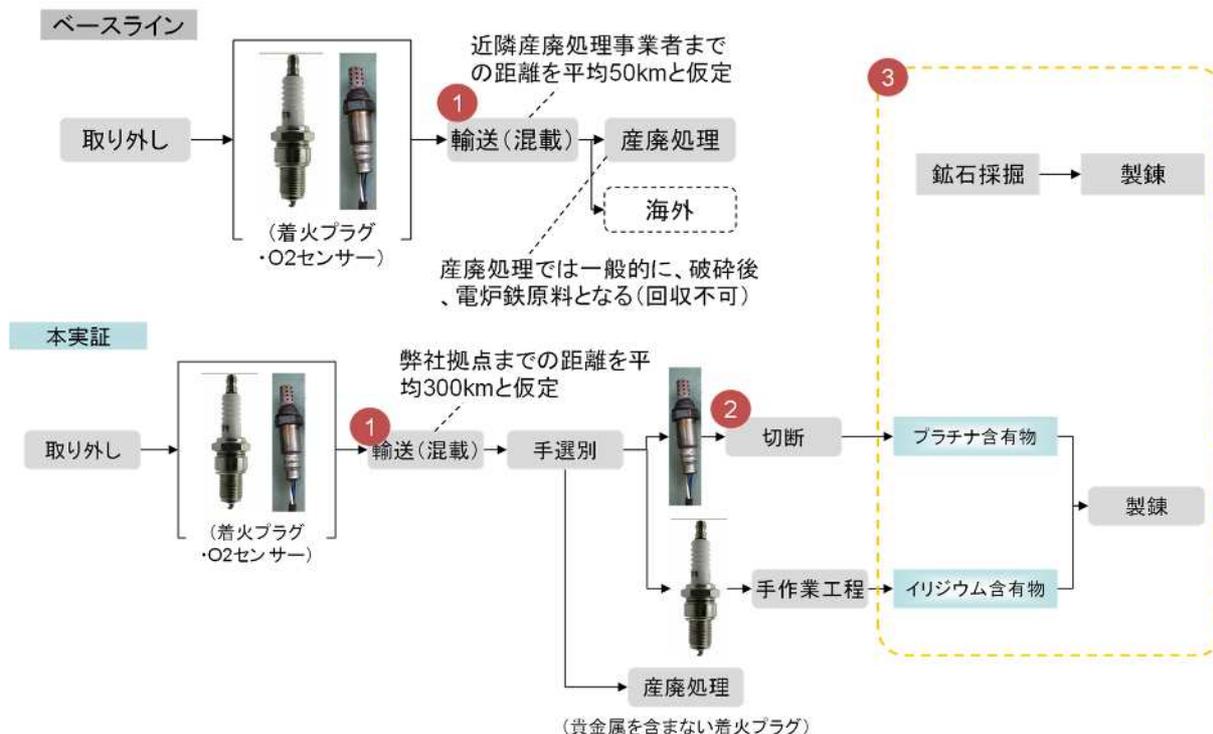


図 61 評価の前提条件

2) 評価結果

(1) 輸送による CO2 排出量

着火プラグ・O2 センサーをそれぞれ 100 本輸送した場合の CO2 排出量は表 19 の通りとなった。

ベースライン : $0.530\text{kg-CO}_2 + 0.057\text{kg-CO}_2 = 0.587\text{kg-CO}_2$

本実証 : $0.934\text{kg-CO}_2 + 0.340\text{kg-CO}_2 = 1.274\text{kg-CO}_2$

表 19 輸送による CO2 排出量

対象 (100 本あたり)		輸送重量 (kg)	運搬距離 (km)	CO2 係数 (kg-CO2/tkm)	CO2 排出量
O2 センサー	ベース ライン	10.59	50	0.294	0.530kg-CO2
	本実証		300		0.934kg-CO2
着火 プラグ	ベース ライン	3.91	50		0.057kg-CO2
	本実証		300		0.340kg-CO2

(2) PGM 含有部位の分離における CO2 排出量

着火プラグについては、ヤスリ・ニッパーを使った手作業であるため、分離において CO2 は発

生しない。

O2 センサーは、高速回転機により切断する際、実測で 1 本あたり 0.012kWh となった。よって、100 本切断するのにかかる電力は 1.2kWh であり、CO2 排出量は 0.546kg-CO2 となった。

表 20 PGM 含有部位の分離における CO2 排出量

対象 (100 本あたり)	消費電力 (kWh)	CO2 係数 (kg-CO2/kWh)	CO2 排出量
O2 センサー	1.2	0.455	0.546kg-CO2

(3) 分離部位の精錬による CO2 削減効果

着火プラグから分離可能なイリジウム含有物の重量は 0.01g/本であり、分析により、イリジウムの品位は 20.2%であった。よって、着火プラグ 100 本あたりに含まれるイリジウム重量は 0.202g となる。

O2 センサーから分離可能なプラチナ含有物の重量は 0.1g/本であり、分析により、プラチナの品位は 4.8%であった。よって、O2 センサー 100 本あたりに含まれるプラチナ重量は 0.48g となる。

よって、本実証で着火プラグ・O2 センサーをそれぞれ 100 本処理した際に回収できるイリジウム・プラチナ含有物の重量は 11g であり、その中に 0.682g の貴金属が含まれ、これを貴金属鉱石 (20g/t) に換算すると、34.1kg-鉱石に相当する。

ベースライン：

【採掘にかかる CO2】 $34.1\text{kg-鉱石} \times 0.144\text{kg-CO2/kg-鉱石} = 4.910\text{kg-CO2}$

【製錬にかかる CO2】 $34.1\text{kg-鉱石} \times 0.193\text{kg-CO2/kg-鉱石} = 6.572\text{kg-CO2}$

本実証：

【製錬にかかる CO2】 $0.011\text{kg-鉱石} \times 0.193\text{kg-CO2/kg-鉱石} = 0.002\text{kg-CO2}$

表 21 分離部位の精錬による CO2 削減効果

対象		鉱石重量 (kg-鉱石)	CO2 係数 (kg-CO2/kg-鉱石)	CO2 発生量	合計
ベースライン	鉱石採掘	34.1	0.144	4.910kg-CO2	11.482kg-CO2
	地金精錬		0.193	6.572kg-CO2	
本実証	地金精錬	0.011	0.193	0.002kg-CO2	0.002kg-CO2

3) まとめ

表 22 の通り計算し、着火プラグ・O2 センサーをそれぞれ 100 本回収・リサイクルした場合の CO2 削減効果は 10.247kg-CO2 となる。

表 22 本実証による CO2 削減効果

対象		鉱石重量 (kg-鉱石)	CO2 係数 (kg-CO2/kg-鉱石)	CO2 発生量	合計
ベースライン	回収	0.530kg-CO2+0.057kg-CO2=0.587kg-CO2			12.069kg-CO2
	鉱石採掘	34.1	0.144	4.910kg-CO2	
	地金精錬		0.193	6.572kg-CO2	
本実証	回収+切断	0.934+0.340+0.546=1.82kg-CO2			1.822kg-CO2
	地金精錬	0.011	0.193	0.002kg-CO2	
本実証による CO2 削減効果					10.247kg-CO2

2.2.2. 電子基板

1) 評価の前提条件 (図 62 参照)

ベースラインにおいて、電子基板 30t から回収される混合部品の重量は 1,533kg となっており、貴金属含有量は 6,070.6g となっている。

本実証では、電子基板 30t から回収される混合部品 1,533kg を自動選別により、貴金属含有部品として 594kg を回収し、貴金属含有量は 5,675.3g となった。

本実証の自動選別により、貴金属に関しては、総重量を 61.3%削減し、貴金属重量は選別前の約 93.5%を回収(パラジウムについては 100%回収)することが可能となった。貴金属濃度はベースラインの 3,960mg/kg に対し、9,556.1mg/kg となり、約 2.4 倍濃縮されていることが分かる。

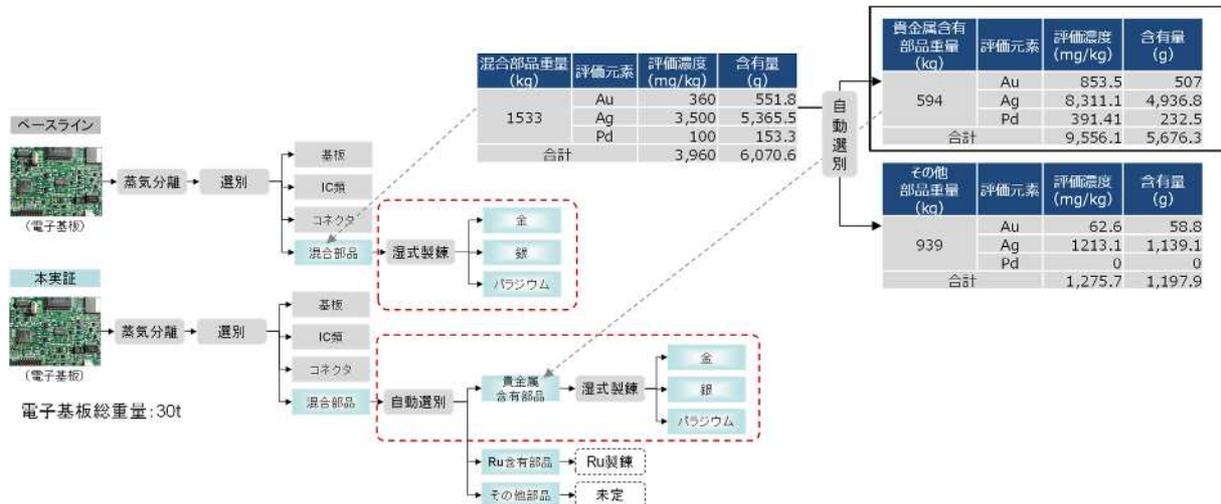


図 62 評価の前提条件

2) ベースラインにおける混合部品の湿式精錬による CO2 排出量

総重量：1,533kg-混合部品

貴金属濃度：3,960mg/kg-混合部品

湿式製錬にかかる CO2 発生量：871.49kg-CO2/kg-貴金属

貴金属濃度により酸溶解工程で使用する硝酸重量が変動するものとし、硝酸のCO₂排出係数は1.467kg-CO₂/kgとし、濃度3,960mg/kgの原料を溶解する際にかかるCO₂排出量は806.11kg-CO₂/kg-貴金属と算出した。

酸溶解後の精製、晶析、焼成の各工程については、一律65.4kg-CO₂/kg-貴金属とした。

3) 自動選別の電力消費にかかるCO₂排出量

自動選別にかかる電力量(実測): 5kWh/5.676Kg-貴金属

貴金属1kg分の部品選別にかかるCO₂発生量:

$5\text{kWh} \times 0.455\text{kg-co}_2/\text{kWh} \div 5.676\text{kg-貴金属} = 0.4\text{kg-co}_2/\text{kg 貴金属}$

4) 貴金属含有部品の湿式精錬によるCO₂排出量

総量: 594kg-貴金属部品

貴金属濃度: 9,556.1mg/kg-混合部品

湿式製錬にかかるCO₂発生量: 399.42kg-CO₂/kg-貴金属

貴金属濃度により酸溶解工程で使用する硝酸重量が変動するものとし、硝酸のCO₂排出係数は1.467kg-CO₂/kgとし、濃度9,556.1mg/kgの原料を溶解する際にかかるCO₂排出量は335.05kg-CO₂/kg-貴金属と算出した。

酸溶解後の精製、晶析、焼成の各工程については、一律65.4kg-CO₂/kg-貴金属とした。

5) まとめ

本実証によるCO₂削減効果:

混合部品の湿式製錬CO₂排出量 - 自動選別にかかるCO₂排出量 - 貴金属含有部品の湿式製錬CO₂排出量
= 871.49 - 0.4 - 399.42
= 471.67kg-co₂/kg-貴金属

(参考)

アステック入江における年間の基板リサイクル量は約240tであり、本実証技術を適用した場合、回収できる貴金属重量は、45.41kgとなり、CO₂削減効果は、21.419t-CO₂/年となる

3. 事業化可能性の検討

3.1. 既存技術との比較

3.1.1. 着火プラグ・O₂ センサー

着火プラグ、O₂ センサー共に、従来は鉄スクラップとしてリサイクルされているが、外側・内側電極の分離によりプラチナ・イリジウムとしてリサイクルでき、資源評価を最大限に引き出せる。

3.1.2. 電子部品

電子基板を破碎して精錬所に売却する従来技術では、PGM（特にパラジウム）は資源評価下限濃度に満たないケースがほとんどだが、本技術により電子部品をグルーピングすることで濃縮され、PGM がリサイクルできる。また精錬所で忌避されがちなアルミ等も除去でき、電子基板の資源評価を最大限に引き出せる。

3.2. 採算性の評価

3.2.1. 着火プラグ・O₂ センサー

1) 着火プラグ

着火プラグのプラチナおよびイリジウム含有量の分析結果に基づき、処理費と精錬費を金属評価額から差し引き、最終評価額を算出した。算出結果を表 23 に示す。この結果、物量 1kg あたりのプラチナを評価対象とした最終評価単価は 143,481 円/kg となった。また、物量 1kg あたりのイリジウムを評価対象とした最終評価単価は 894,385 円/kg となった。ここで、着火プラグ 1 本あたりからプラチナ含有部位、イリジウム含有部位を分離した際の物量は、それぞれ 0.1g、0.01g であることから、着火プラグ 1 本あたりの最終評価単価は、約 23.3 円/個となる。

ここで、着火プラグ 1 本からプラチナ含有部位、イリジウム含有部位を分離するのに有する時間は 30 秒～60 秒程度である。従って、1 時間あたり処理量は 60 本～120 本となる。この時、時給 1,000 円と想定すると、1 本あたりの人件費はそれぞれ約 17 円、約 8 円となる。輸送費を考慮すると 1 時間当たりの処理量が 60 本の場合には採算性として利益は出ず、1 時間当たりの処理量が 120 本の場合に、採算性が取れる結果となった。

2) O₂ センサー

O₂ センサーのプラチナ含有量の分析結果に基づき、処理費と精錬費を金属評価額から差し引き、最終評価額を算出した。算出結果を表 24 に示す。この結果、物量 1kg あたりのプラチナを評価対象とした最終評価単価は 18,282 円/kg となった。ここで、O₂ センサー 1 本あたりからプラチナ含有部位を分離した際の物量は 3.7g であることから、O₂ センサー 1 本あたりの最終評価単価は、約 67.6 円/個となる。

ここで、次年度以降に検討する専用治具を使うことで、1 回に 10 本を切断でき、治具への固定に要する時間は 2 分程度である。切断時間は 30 秒程度と想定されることから、O₂ センサー 1 本からプラチナ含有部位を分離するのに有する時間は、1 本 15 秒程度である。この時、時給 1,000 円と想定すると、1 本あたりの人件費はそれぞれ約 4.2 円となる。また、O₂ センサーのプラチナ

含有部位を分離するのに使う砥石が消耗するが、本事業で実験したところ O2 センサー20 個で 355mm の砥石を使い切ったため、O2 センサー1 本あたり 60 円程度のコストがかかる。1 本あたりの輸送費 12.3 円を加えると O2 センサー1 本あたり 76.5 円のコストがかかり、採算性が取れない結果となる。ここで、本事業の実験では、O2 センサーを 1 本ずつ熟練工でない人間が分離作業を行っており、切断する際にかける力に大ききばらつきがあるため、通常よりも砥石の消耗が速いとの指摘を熟練工や機械メーカーから受けている。例えば砥石の交換頻度が半分になれば、O2 センサー1 本あたり 76.5 円かかるコストが 46.5 円となり採算性が取れる結果となる。次年度以降に検討する専用治具の開発の際に、砥石の消耗をどの程度抑えられるか合わせて検討する。

表 23 着火プラグの売却単価

対象金属	想定物量	含有率	含有量	回収率	回収量	処理費		精錬費		金属評価額		最終評価額	最終評価単価
						単価	処理費	単価	精錬費	単価	評価額		
						kg	%	g	%	g	円/kg		
プラチナ	100	4.63	4,630	93	4,306	1,800	180,000	80	344,472	3,454	14,872,579	14,348,107	143,481
イリジウム	1	33.4	334	65	217	1,500	50,000	450	97,695	4,800	1,042,080	894,385	894,385

表 24 O2 センサーの売却単価

対象金属	想定物量	含有率	含有量	回収率	回収量	処理費		精錬費		金属評価額		最終評価額	最終評価単価
						単価	処理費	単価	精錬費	単価	評価額		
						kg	%	g	%	g	円/kg		
プラチナ	100	0.64	640	93	595	100,000	180,000	80	47,616	3,454	2,055,821	1,828,205	18,282

3.2.2. 電子部品

本実証における電子部品選別システムを（株）アステック入江の電子基板リサイクル事業へ導入した場合での事業性を検討した。同社における事業規模は 30t（電子基板重量ベース）/月である。従来、本実証で対象とした電子部品群はパラジウムも資源評価されてはいたものの、本実証により、チップ抵抗、セラミックコンデンサといったパラジウム高含有部品を選別回収することで、湿式精錬業者への高回収率での販売が可能となること、加えて、タンタルコンデンサもタンタル原料として販売できることから、従来の乾式精錬業者への販売よりも 13%の売上高アップとなる。

また、一般的な電子基板リサイクル業者は（株）アステック入江の様な蒸気分離技術を持ち合わせておらず、特にパラジウムは資源評価されないケースが殆どである。本実証での部品選別システムと蒸気分離技術を組み合わせることで、各リサイクル業者へのシステム展開が期待できる。

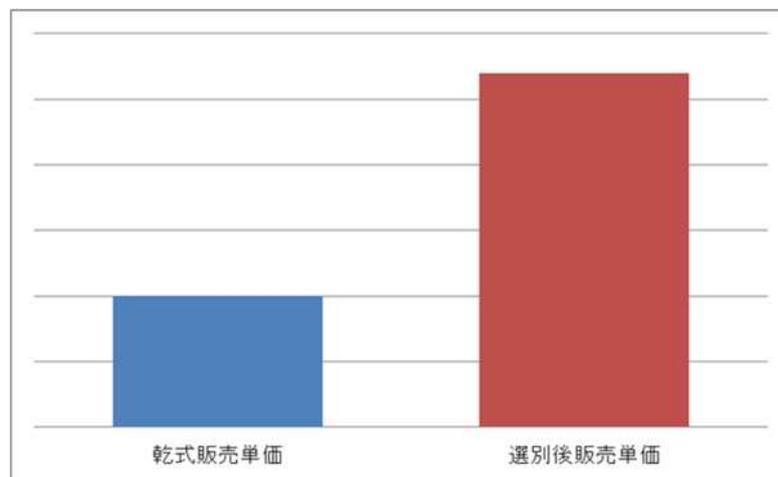


図 63 部品選別システム導入時の事業性比較

3.3. 事業化に向けた課題

3.3.1. 着火プラグ・O2センサー

1) 回収可能性

着火プラグ・O2センサーは、鉄などと一緒に雑品として売却されており、PGMとしてリサイクルされていない。そこでまず、どの程度の市場があるのか全国6整備工場にヒアリングし、統計情報も組み合わせ、着火プラグは約280万個、O2センサーは約28万個と推定した。また、回収可能性については、整備工場で分別保管することは簡単にできることを確認した。輸送は工場側の手間軽減を考え、レターパックライトでの回収を検討し、着火プラグ6.2円/個、O2センサー12.3円/個の輸送コストとなることを確認した。

ここで、着火プラグは満杯60本での想定重量が2.5kg程度であり重量の問題はない一方で、O2センサーは満杯40本での想定重量が4.3kg程度で重量を若干超過のため出荷時に調整有無の確認が必要ある。また、「価値の低いプラグの混入割合、レターパックの重量制限、プラグに残存するイリジウム・プラチナの量のばらつきなどの確認も必要である。

【成果】市場規模と回収可能性を明確化
<p>①市場規模</p> <ul style="list-style-type: none"> - ヒアリング調査、国土交通省の統計情報をもとにマーケット規模を推定 - 点火プラグは、「ガソリン自動車の車検・整備台数の5%」から発生すると想定し計算（整備台数は統計データがないため、車検台数のみで計算） - 点火プラグは約280万個、O2センサーは28万個と推定 <p>②回収可能性</p> <ul style="list-style-type: none"> - 発生個数の規模、工場側の手間軽減を考え、レターパックライトでの回収を検討 - 着火プラグ6.2円/個、O2センサー12.3円/個の輸送コストとなることを確認
【課題】実証を通じた運用課題の検証
<p>①レターパック運用時の課題検証</p> <ul style="list-style-type: none"> - 着火プラグは満杯60本での想定重量が2.5kg程度であり重量の問題はない一方で、O2センサーは満杯40本での想定重量が4.3kg程度で重量を若干超過のため出荷時に調整有無の確認が必要 <p>④プラグに残る残存価値のバラツキの検証</p> <ul style="list-style-type: none"> - 「価値の低いプラグの混入割合、レターパックの重量制限、プラグに残存するIr・Ptのばらつきなど詳細な確認が必要

回収方法・コストの検討

着火プラグ	O2・A/Fセンサー
<ul style="list-style-type: none"> ● 容量：20本で1/3程度 ● 重量：782g 	<ul style="list-style-type: none"> ● 容量：10本で1/4程度 ● 重量：1,059g
	
<p>満杯60本入れても 2.5kg程度で問題なし (60本ベースで6.2円/個)</p>	<p>満杯40本入れると 4kgを若干超える (30本ベースで12.3円/個)</p>

2) 分離方法

回収した着火プラグ・O₂ センサーから PGM の含有部位を分離する方法について、着火プラグは外側電極（プラチナ）を金属バサミで切断でき、その後、中心電極（イリジウム）は金属ヤスリで粉上に削れることを確認した。それぞれに要する時間は 10 秒/本、50 秒/本であり、1 時間あたり約 60 本の処理ができることも確認した。

一方の O₂ センサーは、切断箇所はモース硬度 8.5（鉄は 4～5）と非常に硬く、ウォータージェットカッターを使い切断を試みたが、当該設備は大規模で高コストのため採算性に問題があることを確認した。また、1/2 にカットした O₂ センサーを塩化鉄（ ）液により溶解する実験を行ったが、溶解に 3 日を要し実現性に問題があることを確認した。そこで、購入コストが安く（1 台 2 万円程度）保有している企業も多い高速回転切断機の活用を想定し、切断実験を実施し、30 秒あたり 1 本の O₂ センサーを切断できることを確認したが、高速回転切断に使用する砥石の消耗を軽減させ、かつ、「安全」及び「効率」を両立するための専用治具の開発が必要不可欠であることがわかった。そこで次年度は、に半円形の台に O₂ センサーをねじ込み、一度に 10 本セットできる治具の開発を行う。

【成果】PGM含有部位の分離方法を確認

③着火プラグからのPGM含有部位の分離方法を確立

- 着火プラグは外側電極（Pt）を金属バサミで切断でき、その後、中心電極（Ir）は金属ヤスリで粉上に削れることを確認
- それぞれに要する時間は10秒/本、50秒/本であり、1時間あたり約60本の処理が可能
- なお、中心電極が円錐型のものがIrを含むもの、外側電極に中心電極に向けて突起があるものがPtを含むものと簡単に判別可能

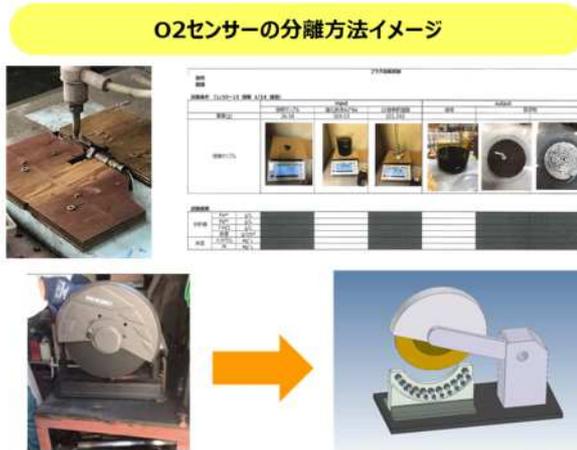
④O₂センサーからのPGM含有部位の分離における課題を把握

- 切断箇所はモース硬度8.5（鉄は4～5）と非常に硬く、ウォータージェットを使い切断を試みたが、当該設備は大規模で高コストのため採算性に問題あり
- 1/2にカットしたO₂センサーを塩化鉄液により溶解する実験を行ったが、溶解に3日を要し実現性に問題あり
- コストが安く（1台2万円程度）、保有している企業も多い高速回転切断機の活用を想定し、切断実験を実施し、30秒あたり1本のO₂センサーを切断できることを確認

【課題】O₂センサーの分離方法の追加検討

効率的に切断できる高速回転切断機向け治具開発

- 高速回転切断機でPGM含有部位を分離できることは確認済みだが、効率的に切断するための開発が必要
- 現在の想定では、「安全」及び「効率」を両立するために半円形の台にO₂センサーをねじ込み、一度に10本セットできる治具の開発を想定
- 治具へのO₂センサーのセット時間を考えても、2分で10本のセットできると想定（1本12秒）



3.3.2. 電子部品

1) 機械部分

直進フィーダー上のエアブローにより、電子部品の塊を落とす仕組みを導入したが、直進フィーダー上で電子部品が塊になることでAIでの画像認識が今ひとつであった。そのために、ボールフィーダー前に粒度選別を設け、サイズ別（3mm以上、2mm以下）に分類してから別々にボールフィーダーに投入することで塊になることを解消した。次に、ベルトコンベア上で電子部品間の間隔を取るための工夫として、ベルトコンベアを直進フィーダーより速くすることで、電子部品同士の間隔を広くしてカメラ下まで搬送できるようにした。

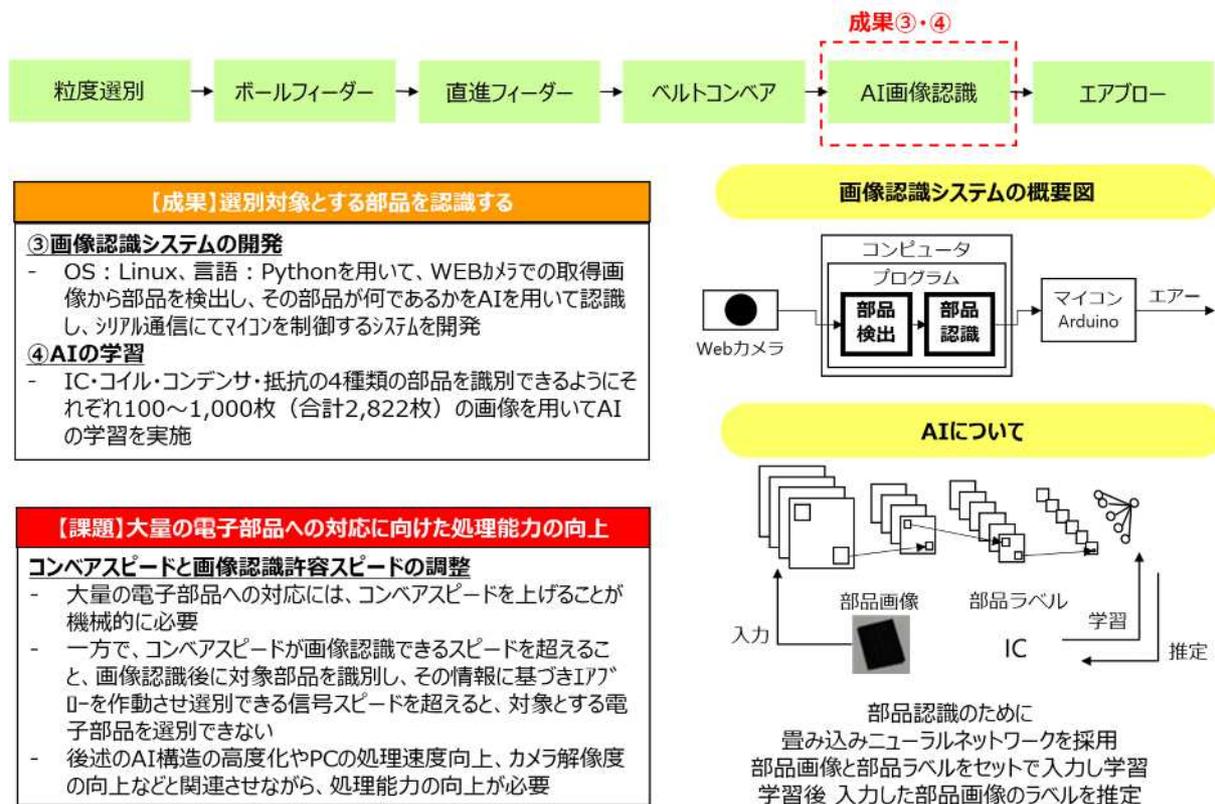
現時点では、2-8mmの電子部品を対象としているが、今後、8mm以上、6mm以上、4mm以上、2mm以上、2mm以下に物理選別が行えるように機械部分を改良し、各AI画像認識選別システムまで個別に搬送することが出来れば、各サイズに適したパーツフィーダとカメラを組み合わせることで更なる高効率、高精度化が図れるものとする。特に8mm以上の部品は、粒度が不均一であるため、別途選別システムの構築が必要であるとする。また、現状1種類の部品の選別に1つのAIカメラを必要としているが、1つのAIカメラで複数の部品選別を行えるような装置を開発する事でコスト低減を図ることも課題である。



2) AI 画像認識部分

画像認識システムとして OS : Linux、言語 : Python を用いて、WEB カメラでの取得画像から部品を検出し、その部品が何であるかを AI を用いて認識し、シリアル通信にてマイコンを制御するシステムを開発した。また、IC・コイル・コンデンサ・抵抗の 4 種類の部品を識別できるようにそれぞれ 100 ~ 1,000 枚 (合計 2,822 枚) の画像を用いて AI の学習を実施した。選別精度については、選別率が高いものと低いものがあり、更なる学習が必要である。

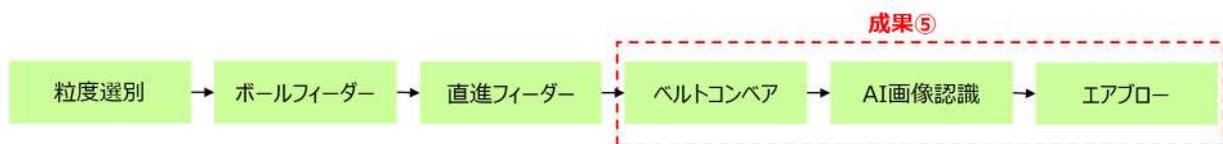
また、大量の電子部品への対応には、コンベアスピードを上げることが機械的に必要であるが、一方で、コンベアスピードが画像認識できるスピードを超えると、画像認識後に対象部品を識別し、その情報に基づきエアブローを作動させ選別できる信号スピードを超えると、対象とする電子部品を選別できないことが考えられるため、後述の AI 構造の高度化や PC の処理速度向上、カメラ解像度の向上などと関連させながら、処理能力を向上させる機械部分の開発が必要となる。



3) 選別率

ICチップ、セラミックコンデンサを対象に、それぞれをAI画像認識選別システムに投入し、エアブローで選別できた割合（選別率）を測定した。それぞれの認識率は、ICチップ71%（ライン投入100個）、セラミックコンデンサ79%（ライン投入100個）となり、ICチップとセラミックコンデンサは高い割合で認識してエアブローで選別できていることを確認している。

ここで、より高い選別率を得るには、カメラ解像度の向上、畳み込み層の層数を増やすなど、AI構造の高度化、カメラ解像度の向上やAI構造の高度化に対応したPC処理速度向上が課題である。



【選別】コンベア上で対象部品を選別できる

⑤部品別に選別率を検証

- ICチップ、セラミックコンデンサを対象に、それぞれをシステムに投入し、エアブローで選別できた割合（選別率）を測定
- それぞれの認識率は、ICチップ71%（ライン投入100個）、セラミックコンデンサ79%（ライン投入100個）となり、ICチップとセラミックコンデンサは高い割合で認識してエアブローで選別できていることを確認

【課題】対象部品拡大と画像認識・選別率の向上

カメラ解像度の向上

- 試作段階ではWEBカメラを使っているため解像度が低く、AIの認識率低下につながっているため解像度の向上が必要

AI構造の高度化

- 畳み込み層の層数を増やすなどAI構造をより高度化することが必要 大量の電子部品への対応には、コンベアスピードを上げることが機械的に必要

PC処理速度の向上

- カメラ解像度、AI構造の高度化に対応したPC処理速度向上

カメラ解像度について



左図はチップ抵抗 右図はIC
低解像度のため識別困難



左図はWEBカメラ 右図はiPhoneで撮影
カメラ性能の向上によって識別性能の向上が見込める

AIの構造について

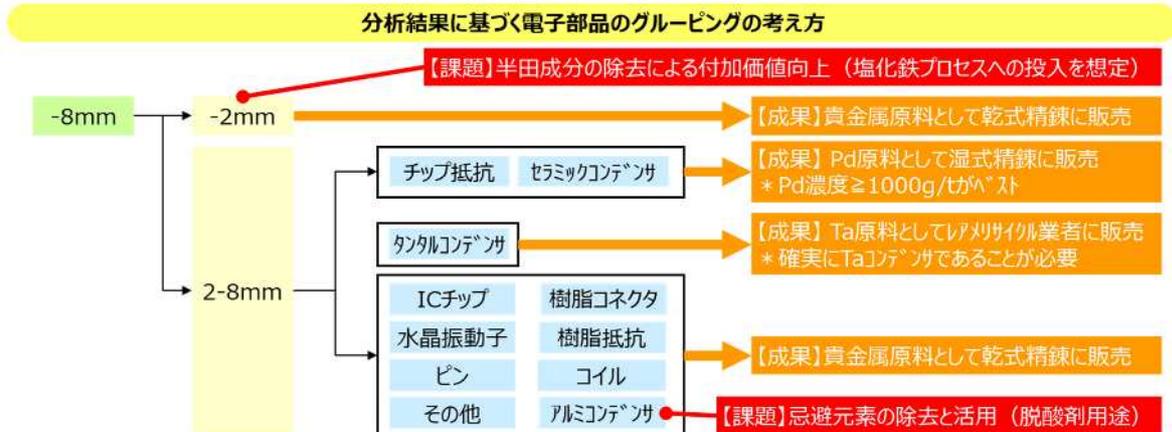
（参考）画像認識ベンチマークILSVRCの結果
畳み込み層の層数が認識精度に大きく関わる

手法	畳み込み層数	エラー率[%]
AlexNet	5層	0.16
GoogLeNet	21層	0.07
ResNet	151層	0.036

4) 部品分類

PGMが含まれていると想定される部品の割合が高い2-8mmに含まれる部品を中心に詳細な分析を行った。この結果、チップ抵抗、セラミックコンデンサにはパラジウムが、タンタルコンデンサにはタンタルが多く含まれていることがわかった。そこで、チップ抵抗・セラミックコンデンサのグループ、タンタルコンデンサ単体、それ以外のグループにわけることが分析結果に基づくグルーピングとして最適と判断した。

ここで、アルミコンデンサは精錬にて忌避部品であるため、本選別システムで除去することで、より資源価値が上げられるものと想定された。アルミコンデンサのAI画像認識選別システムの構築が課題であるとともに、選別後のアルミコンデンサの脱酸剤としての用途開発が課題である。



3.3.3. 事業性について

電子部品の事業性については、選別したチップ抵抗、セラミックコンデンサ、タンタルコンデンサを精錬業者に売却でき、開発した AI 画像認識部品選別システムにより、現状よりも売上高が13%向上できることを確認した。更なる経済性向上を図るためには、開発した選別システムにより部品群からアルミコンデンサやコイル等の精錬における忌避部品を選別、回収し、脱酸素剤への利用等、より付加価値を創出することが出来る研究をさらに進めていくことが必要である。

着火プラグ・O2 センサーの事業性については、長寿命プラグの外側電極 2.4g、中心電極 0.2gの分析を実施したところ、外側電極のターゲットであるプラチナは4.8%、中心電極のターゲットであるイリジウムは20.2~33.4%と高い含有率であることを確認した。1本あたりプラチナ・イリジウムは20~24円程度で売却できる可能性を確認した。しかし、実際に収集回収を行った場合に、「価値の低いプラグの混入割合、レターパックの重量制限、プラグに残存するイリジウム・プラチナの量のばらつき」など詳細な確認が必要である。

電子部品	点火プラグ・O2センサー
<p>【成果】AI画像認識部品選別システムにより経済性が向上</p> <p>①電子部品選別後の電子部品を売却できることを確認</p> <ul style="list-style-type: none"> - 選別したチップ抵抗、セラミックコンデンサ、タンタルコンデンサを精錬業者に売却できることを確認 <p>②選別システムの導入により付加価値を向上できることを確認</p> <ul style="list-style-type: none"> - 開発したAI画像認識部品選別システムにより、現状よりも売上高が13%向上できることを確認 	<p>【成果】点火プラグの外側・中心電極の分離によるPGMが濃縮</p> <p>外側電極および中心電極にそれぞれPt・Irが濃縮</p> <ul style="list-style-type: none"> - 高性能単価プラグの外側電極2.4g、中心電極0.2gの簡易XRF分析を実施 - 外側電極のターゲットであるPtは4.8%、中心電極のターゲットであるIrは20.2~33.4%と高い含有率であることを確認 - 1本あたりPt・Irは20~24円程度で売却できる可能性を確認
<p>乾式販売単価 選別後販売単価</p>	<p>Pt </p> <ul style="list-style-type: none"> ● 1本あたりから0.1g程度の外側電極が得られる ● その中に4.8%Ptが含まれ、15円程度の価値 <p>Ir </p> <ul style="list-style-type: none"> ● 1本あたりから0.01g程度の中心電極が得られる ● その中に20.2%Irが含まれ、5~9円程度の価値 <p>Ni </p> <ul style="list-style-type: none"> ● Ir分離後に中心電極にNiが残存している可能性が高い ● 塩化鉄にて分離を検討
<p>【課題】忌避元素の選別と付加価値創出</p> <p>選別システムを使いより付加価値の高い部品群へと進化</p> <ul style="list-style-type: none"> - 開発した選別システムにより部品群からアルミコンデンサやコイル等の製錬における忌避元素を選別し、脱酸素剤への利用により付加価値を創出すること 	<p>【課題】収集回収のパイロット実証（点火プラグ）による検証</p> <p>重量・プラグ残存価値の詳細な検証</p> <ul style="list-style-type: none"> - 実際に収集回収を行った場合に、「価値の低いプラグの混入割合、レターパックの重量制限、プラグに残存するIr・Ptのばらつきなど詳細な確認が必要

3.4. 今後の普及見通し

3.4.1. 本実証技術の将来展開イメージ

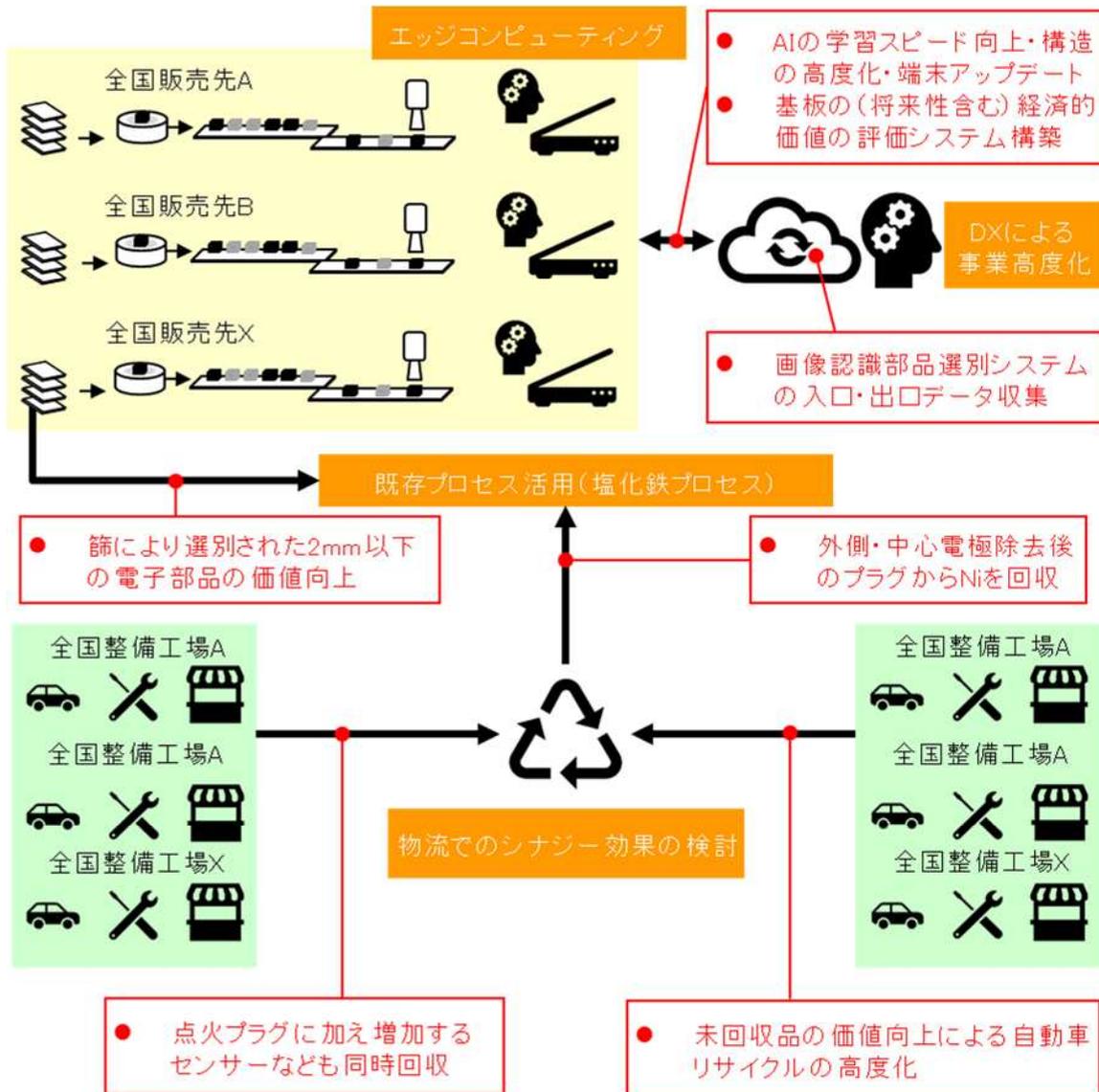


図 64 実証技術の将来イメージ

3.4.2. 普及見通し

1) 着火プラグ・O2 センサー

(1) 2020 年度

2021 年からの商用化開始を目標とし、技術的な課題および運用上の課題を解決する。

全国規模で整備工場やエンジンリサイクル工場と連携したパイロット実証を通じて回収の運用上の障害検証

上記 を通じて回収した着火プラグ・O2 センサーに残存するプラチナ・イリジウムのバラツキの検証

着火プラグから外側電極と中心電極を分離して残る残存物からのニッケル回収量と販売金額の検証

O2 センサーの分離における効率化（分離技術の開発）

（2）2021 年

事業を開始し、実証協力工場を中心に整備工場 200 社との回収ネットワークを構築する。1 整備工場あたりからの月間着火プラグの発生量は 30～40 本程度と想定し、年間の目標回収量 7 万本、目標売上高 200 万円とする。

（3）2025 年

既存の整備工場ネットワークを核に、着火プラグをターゲットに整備工場 2,000 社との回収ネットワークを構築する。また、O2 センサーをターゲットに解体工場 300 社とのネットワークを構築する。1 整備工場あたりからの月間着火プラグの発生量は 30～40 本程度、解体工場からの O2 センサーの発生量は 100 本程度と想定し、年間の着火プラグ目標回収量 60 万本、O2 センサー回収量 36 万本、目標売上高 6,000 万円とする。

（4）2030 年

さらに車体整備協会などと連携し、着火プラグをターゲットに整備工場 10,000 社との回収ネットワークを構築する。また、O2 センサーをターゲットに解体工場 500 社とのネットワークに拡充する。さらに、エンジンリサイクル工場にもネットワークを広げ、5 社程度との取引を目指す。1 整備工場あたりからの月間着火プラグの発生量は 30～40 本程度、解体工場からの O2 センサーの発生量は 100 本程度と想定し、年間の着火プラグ目標回収量 100 万本、O2 センサー回収量 60 万本、目標売上高 1.5 億円とする。

2) 電子部品

（1）2020 年度

2021 年からの商用化開始を目標とし、技術的な課題および運用上の課題を解決する。

AI 画像認識選別システムの精度向上

忌避物質の除去と用途開発（アルミコンデンサへの利活用）

商用化に向けた AI 画像認識選別システムの処理能力の向上

デジタルトランスフォーメーション（DX）の実現に向けた収集データ活用ビジネスモデルの開発

（2）2021 年

自社（アステック入江）の既存プロセスに AI 画像認識選別システムを導入し、PGM の濃縮および従来評価されなかったタンタルとしての売却により年間売上高を 4 千万円向上させる。また、蒸気分離と AI 画像認識選別システム 1 式をリサイクル企業 2 社に販売し、機器販売による売上高 1.4 億円を目標とする。

（3）2025 年

蒸気分離と AI 画像認識選別システム 1 式をリサイクル企業や携帯電話等を処理する福祉施設

等に 10 台販売し、機器販売による売上高 7 億円を目標とする。

(4) 2030 年

システムの販売先と連携した入口・出口情報に基づくデジタルトランスフォーメーション (DX) による事業高度化、基板の (将来性含む) 経済的価値の評価システムを構築し、収集データを用いた情報提供ビジネスを展開する。

3) まとめ

本実証を通じた課題解決を行うと 2020 年度以降のマイルストーンを図 65 に示した。2021 年度からは事業化を見込んでいる。

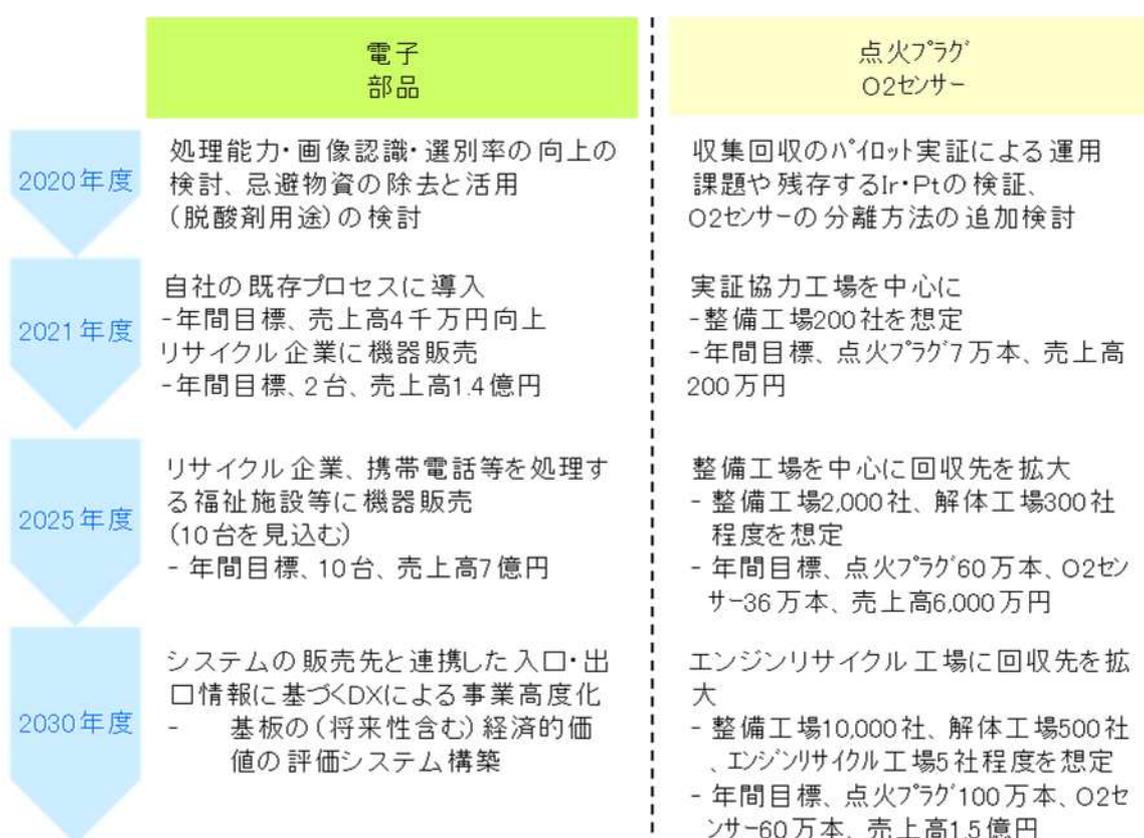


図 65 2030 年までの普及見通し

Ⅲ．おわりに

現状の経済合理性を踏まえると、前述の通り、本事業で対象とした電子基板、O₂ センサー、着火プラグについて、PGM をターゲットとしたリサイクル事業は採算性が取れる見込みがあり、事業化の可能性が十分にある。

一方で、採算性は取れるものの、電子基板のリサイクルにおいて、ルテニウム原料としてチップ抵抗を精錬業者に売却できず、パラジウム原料として売却する結果となっている。

この理由は、ルテニウムの精錬はできるがその技術的難易度が高く、チップ抵抗に含まれるルテニウム含有率(490ppm)では濃度が低いためである。従って、精錬にルテニウム原料として売却するためにはより高濃度に濃縮する必要がある。一方で、本事業ではチップ抵抗単体まで AI 画像認識選別システムにより選別しており、これ以上中間処理業者で濃縮することは困難な状況である。

ここで、我が国の資源循環戦略の中で、

将来にわたり確保しておくべき資源として、こうしたルテニウムを捉えた場合には、経済合理性以外の資源セキュリティーの観点を加えたりサイクルシステムの在り方を考えることも必要ではないかと考える。