

令和3年度環境省委託業務

令和3年度脱炭素型金属リサイクルシステムの  
早期社会実装化に向けた実証事業  
(包括的中間処理（ソーティングセンター4.0）の  
実現に向けた再資源化技術・システム実証)  
委託業務

成果報告書

令和4年3月

三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社



## 要約

使用済み製品等の中間処理（解体・破碎・選別）は、鉄のほか、貴金属や銅といった非鉄金属の回収を念頭におくものが多い。使用済み製品等に付随する製鋼・製錬忌避物質の除去や管理までを目的にしておらず、高価値成分の濃縮に最適化されていることも多い（ソーティングセンター1.0～2.0）。その結果、単価が低く、量が少ない部材やレアメタル等は、破碎残渣や低品位基板、鉄鋼スクラップやスラグ、焼却灰の中へ拡散・埋没している。

中国政府による輸入規制以降、国内で処理が必要な使用済み製品やスクラップが増加している。従来、雑品等として国外処理されていたスクラップを、既存の技術・システムで処理し続けると、一部の再生資源や破碎残渣、低品位基板等に忌避物質が集中し、鉄鋼・セメント産業等による資源循環が困難になる可能性がある。忌避物質の一例として、製品品質に影響を与えるトランプエレメント、スラグ等に残存して再資源化を難しくさせるハロゲンやクロム等重金属、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）等が挙げられる。過去事業では、自動車破碎残さを対象に、素材事業者間の連携による忌避物質の融通取引の拡大を目指し、CFRP への前処理技術の適用と未資源化物質（銅、貴金属、鉄、原燃料代替品等）の回収可能性を追求した（ソーティングセンター3.0）。

しかし、素材産業が互いに連携するだけでは、忌避物質の管理に限界がある。より広範に忌避物質を管理するには、素材産業と中間処理事業者が連携して、忌避物質に着目した分離・選別技術を開発・実装する必要がある。同時に、再生資源を円滑に取引するため、成分分析等を共有するための情報連携システムの構築が必要である（ソーティングセンター4.0）。再生資源の供給者である中間処理事業者は、忌避物質の管理情報を把握しておらず、再生資源の需要家である各素材産業は、忌避物質がどの程度管理された再生資源であるか、把握できない場合がある。こうした情報の非対称性は、取引成立の障害となっている。

そこで、素材産業の原料要求仕様をもとにした再生資源規格の導入、これを充足する解体・破碎・選別プロセスの開発、中間処理事業者と各素材産業の間で発生している情報の非対称性を軽減する情報連携システムの確立を目指した。本年度事業では、シュレッタースクラップ（鉄鋼電炉向け）及び廃プラスチック原燃料（セメント事業者向け）を対象に、忌避物質の許容品位に関する規格案を作成した。また、自動販売機をケーススタディとして実証試験を行い、事前解体で忌避物質含有部品を取り外すことで、規格案を満たす再生資源が回収できることを確認した。また、解体方法等を記録する情報連携システムを試作し、中間処理事業者での解体実証を通じて、その有効性を確認した。忌避物質含有部品を特定し、その解体情報を記録できたことは大きな成果である。記録した解体情報を用いることで、素材産業に販売する再生資源中の忌避物質含有量を確認可能なシステムを実装した。新たな忌避物質管理技術として、低品位基板等から製錬原料と原燃料代替品を回収する選別技術（湿式ジグ選別）と、磁着物に含まれるステンレス鋼を分離する選別技術（電磁式ファインダー、LIBS ソーター）の実証を行った。電磁式ファインダーでは、磁着物からモーターコアを約 80%、クロム系ステンレス鋼を約 64%分離できる条件を特定した。

事業における環境影響改善効果と CO<sub>2</sub> 排出量削減効果を推計した。事業成果の普及により、機能単位当たり自動販売機、自動車それぞれで、年間 445 kg、3,289 kg の CO<sub>2</sub> 排出削減効果が見込まれる。今後、規格案の充足可能性を検証しながら、忌避物質含有部品の特定と標準解体方法の開発、情報連携システムの改善（入力効率化、他製品への応用、CO<sub>2</sub> 排出量などの追加記録）、事業化の受け皿となるコンソーシアムの構築に向けた合意形成を進めていくことが求められている。

## Summary

Most waste treatments (dismantling, shredding, sorting) for used products aim to recover non-ferrous metals such as precious metals and copper in addition to steels, without considering the removal and management of accompanying repellent substances for steelmaking and smelting (Sorting Center 1.0 and 2.0). Therefore, some parts and critical minor metals are usually distributed into low-grade substrates, diffused or buried in steel scrap, slag, and incineration ash.

Since the import relief of wastes by the Chinese government started, the number of used products and scraps necessary to be processed in Japan has increased. As a result, more repellent substances would be concentrated on shredder residues and low-grade substrates in the future. Then the resource circulation conducted by the steel and cement industry would be increasingly difficult.

Some problems have already been caused by repellent substances such as carbon-reinforced fibers, tramp elements, halogens and chromium remaining in slag and incineration ash. We aimed to expand the interchange trade of repellent substances through cooperation between material companies in previous projects. We applied new pretreatment to difficult-to-treat substances and recovery of recycled substances (copper, precious metals, iron, coke substitutes, etc.) by technologies each industry has (Sorting Center 3.0). However, there is a limit to the management of repellent substances by cooperating with material sectors. Therefore, it is necessary to involve recycling companies and develop new separation/sorting technologies focusing on repellent substances with further inter-operator cooperation.

In this project, we aim to establish a collaborative system that reduces information asymmetry between the recycling industry and material industries by reviewing the dismantling, shredding, and sorting methods based on each material industry's raw material requirements and implementing an information exchange system (Sorting Center 4.0). As a result, while avoiding the stagnation of resource circulation due to the increase in repellent substances expected to be faced in the future, it is expected to expand the recycling of non-resourced substances and further expand new transactions.

In FY2021, draft standards for the classification of iron scrap and waste plastic raw materials were examined by verification tests of dismantling, shredding, and sorting processes. It was confirmed that iron scraps that satisfy the draft standards were obtained by removing parts containing repellent substances. The prototype information exchange system "Moirā" worked effectively; it was able to calculate the number of repellent substances contained in iron scraps by recording product numbers, removed parts, etc. Besides, sorting technologies that recover smelting raw materials and coke substitutes from low-grade substrates, etc., and separate stainless steel in magnetic materials were demonstrated. In electromagnetic sorter, sorting conditions which were mostly able to separate motor core parts and martensitic stainless steels from magnetic materials, were identified. As a result, it is expected that the annual carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emission will be reduced by 445 kg-CO<sub>2</sub> and 3,289 kg-CO<sub>2</sub> for vending machines and automobiles per functional unit.

事業実施担当（研究会メンバー：組織名五十音順）

（大学・研究所）

川寄幹生 埼玉県環境科学国際センター 資源循環廃棄物担当 主任研究員  
村上進亮 東京大学大学院工学系研究科技術経営戦略学専攻 准教授  
大和田秀二 早稲田大学理工学術院創造理工学研究科 地球・環境資源理工学専攻教授

（鉄鋼電炉事業者）

小野晃 共英製鋼（株） 執行役員 環境リサイクル部  
酒井久敬 東京製鐵（株） 執行役員 宇都宮工場長  
片山浩嗣 東京製鐵（株） 総務部購買課 課長代理

（非鉄製錬事業者）

太田洋文 三井金属鉱業（株） 金属事業本部 技術部

（セメント事業者）

花田隆 太平洋セメント（株） 環境事業部 営業企画グループ リーダー  
福田誠司 太平洋セメント（株） 環境事業部 営業企画グループ 参事  
鎌田賢太郎 太平洋セメント（株） 環境事業部 営業企画グループ  
晝間康之 太平洋セメント（株） 環境事業部 営業企画グループ  
小早川真 太平洋セメント（株） 環境事業部 営業企画グループ  
森賢一 太平洋セメント（株） 環境事業部 営業企画グループ  
井上翔太 太平洋セメント（株） 環境事業部 営業企画グループ  
竹本智典 太平洋セメント（株） 中央研究所 第3研究部 分離技術チーム  
末松諒一 太平洋セメント（株） 中央研究所 第3研究部 分離技術チーム  
武藤恭宗 太平洋セメント（株） 中央研究所 第3研究部 分離技術チーム

（中間処理・再生処理事業者、資源回収・卸売り事業者）

茨木敬久 （株）茨木金属商会 取締役統括部長  
堤庸佐 （株）ツルオカ 総務部 RECYINT事業企画室  
張田真 ハリタ金属（株） 代表取締役社長  
寺崎英樹 ハリタ金属（株） リサイクル本部 取締役 本部長  
仲里卓 ハリタ金属（株） リサイクル事業本部 R&D部門 研究員  
前田俊輔 前田産業（株） 代表取締役社長  
境健一郎 松田産業（株） 金属・環境営業本部 営業企画推進部 部長  
矢野雄高 松田産業（株） 環境ソリューション事業部 企画推進課 課長  
山下勇一郎 リバーホールディングス（株） 事業戦略室 室長代理  
萩原慎一郎 リバーホールディングス（株） 技術部 技術開発課 部長補佐

(装置関連事業者)

矢敷真一 イーペックスジャパン (株) 代表取締役  
寶正史樹 (株) クボタ 水環境総合研究所 水環境開発第三部 担当部長  
矢作実 ゼンキ工業 (株) 専務取締役

(IT 関連事業者)

石井美也紀 (株) ムスビメ ((株) エスエルネット) 取締役会長  
長島行人 (株) ムスビメ ((株) エスエルネット) 代表取締役  
石井康允 (株) ムスビメ ((株) エスエルネット) システム事業部

(事務局)

清水孝太郎 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング (株) 持続可能社会部 上席主任研究員  
小川恵司 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング (株) 持続可能社会部 副主任研究員  
迫田瞬 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング (株) 持続可能社会部 研究員  
園原惇史 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング (株) 持続可能社会部 研究員  
千賀太喜 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング (株) 持続可能社会部 研究員

(オブザーバー)

木原忠志 エコメビウス (株) 代表取締役社長

用語の定義

用語	定義・説明等
ソーティングセンター	中間処理の機能を有する事業者及び共同事業者を指す。最適化する用途とその際に管理する情報の量に応じて、ソーティングセンター1.0 からソーティングセンター4.0 に定義される。
選好物質・成分	特定の産業や製造プロセスにおいて、濃縮や回収の最適化を目指す対象物質、元素等を指す。
忌避物質・成分	特定の産業や製造プロセスにおいて、製品の品質低下、製造プロセスの効率低下、また製造装置等に損傷を与える可能性がある物質、元素等を指す。
情報の非対称性	市場における取引主体間の情報格差を指す。通常の取引では売り手が買い手よりも多くの情報を保有している場合が多く、適切な情報共有が行われない場合には市場の失敗の原因となる。
RFID	Radio Frequency Identification。自動認識技術におけるデータキャリアの一つであり、電波を用いることで無線 IC チップ(RF タグ)に記録された情報を非接触で読み書きするシステムである。
循環経済型ビジネス	循環経済型ビジネスは、物質的なフロー(サプライチェーン)に沿って新たな付加価値を生み出すことで循環経済の実現に資する事業(ビジネス)である。主に、複数の事業者が、共通の事業目的や戦略等のもとで、従来の個社単位でのビジネスでは生み出すことのできなかった新たな付加価値を生み出す事業を指す。
再生資源	再生資源は、回収された使用済み製品または廃棄物を処理・加工して生産される原料または材料である。
比重選別	物質の比重差を利用し、特定の比重よりも重い物質と軽い物質に選別する手法。
流動層選別	流動化した粉体が(粉体の種類に応じて)固有の見かけ比重を持つことを利用した比重選別の一つ。流動化した粉体に固体試料を供給し、粉体の見かけ比重よりも重い物質と軽い物質に選別する手法。
重液選別	比重の重い溶液(重液)や、比重の重い固体微粒子を懸濁させた擬重液を利用した比重選別の一つ。重液(擬重液)に固体試料を供給し、重液(擬重液)よりも比重の重い物質と軽い物質に選別する手法。
磁選	物質の磁性の強弱を利用し、磁石に吸引されやすい物質とそれ以外の物質に選別する手法。
電磁式ファインダー	物質が磁界を通過する際、物質の導電性等に応じて電磁センサー中に発生する誘電起電力を検知し、物質の種類を識別して選別する装置。
LIBS ソーター	レーザー誘起ブレイクダウン分光法(LIBS:Laser induced breakdown spectroscopy)を利用し、特定の元素を一定量以上含む物質を識別して選別する装置。
片刃粒子	目的とする成分とそれ以外の成分から構成されている1つの粒子
回収率	選別によって目的成分をどれだけ回収することができるかを示す指標。選別装置に供給された試料に含まれる目的成分の全重量と、選別によって回収した特定産物中に含まれる目的成分の重量との比。
分配率	選別によって目的成分が各産物にどの程度分配されているかを示す指標。選別装置に供給された試料に含まれる目的成分の全重量と、選別によって得られた各産物中に含まれる目的成分の重量との比。
SR	Shredder Residue。廃棄物等を破碎し、有用金属(鉄、非鉄など)を選別・回収したあとの残渣。
ASR	Automobile Shredder Residue。使用済み自動車を破碎し、有用金属(鉄、非鉄など)を選別・回収したあとの残渣。

(注) 本文中の元素標記は漢字・仮名で統一した。尚、図表中には一部元素記号を用いている。



# 目次

1. 背景・目的	1
2. 事業実施内容	3
2.1. 事業の全体概要	3
2.2. 事業初年度の実施内容・成果及び課題	5
2.2.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証テーマ1）	5
2.2.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証テーマ2）	7
2.2.3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証テーマ3）	8
2.2.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）	10
2.2.5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）	12
2.2.6. 事業における環境影響改善効果・CO <sub>2</sub> 排出量削減効果の評価	13
2.2.7. 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討・出口戦略の検討	14
2.3. 本年度事業の実施内容	15
2.3.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証テーマ1）	15
2.3.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証テーマ2）	15
2.3.3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証テーマ3）	15
2.3.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）	15
2.3.5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）	15
2.3.6. 事業における環境影響改善効果・CO <sub>2</sub> 排出量削減効果の評価	16
2.3.7. 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討・出口戦略の検討	16
2.3.8. 「包括的中間処理（ソーティングセンター4.0）の実現に向けた再資源化技術・システム実証事業」の現地視察会の開催	17
2.3.9. 共同実施者等との打合せ	17
2.3.10. 評価審査委員会の出席	17
3. 実施事項	18
3.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証テーマ1）	18
3.1.1. バウンダリ・対象元素の設定	18
3.1.2. 流通量・忌避物質含有量に関する調査	20
3.1.3. 成分分析の実施	26
3.1.4. マテリアルフロー分析	26
3.1.5. 技術仕様の特定に関する検討	26
3.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証テーマ2）	27
3.2.1. 再生資源の規格案の策定	27
3.2.2. 回収した再生資源の評価及び規格案の改善検討	46
3.3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証テーマ3）	47
3.3.1. 新規プロセス仕様案に基づく解体・破砕・選別処理の実施	47
3.3.2. 樹脂・金属成分を分離する要素技術の検討	53
3.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）	58

3.4.1.	情報連携システムの実証 .....	58
3.4.2.	情報連携システムのコスト分析 .....	61
3.5.	磁着物の高度選別実証（実証テーマ5） .....	62
3.5.1.	電磁式ファインダーにおける選別条件の検討 .....	62
3.5.2.	電磁式ファインダーにおける仕様検討 .....	67
3.5.3.	LIBS ソーターにおける選別条件の検討 .....	68
3.6.	事業における環境影響改善効果・CO <sub>2</sub> 排出量削減効果の評価 .....	73
3.6.1.	試算における前提条件の整理 .....	73
3.6.2.	資源効率性向上効果の検討 .....	75
3.6.3.	天然資源採掘量削減効果の検討 .....	78
3.6.4.	CO <sub>2</sub> 排出量削減効果 .....	80
3.7.	事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討・出口戦略の検討 .....	82
3.7.1.	金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討 .....	82
3.7.2.	出口戦略の検討 .....	82
3.8.	「包括的中間処理（ソーティングセンター4.0）の実現に向けた再資源化技術・システム 実証事業」の現地視察会の開催 .....	84
3.9.	共同実施者等との打合せ .....	85
3.10.	評価審査委員会の出席 .....	87
<b>4.</b>	<b>結果及び考察 .....</b>	<b>88</b>
4.1.	素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証テーマ1） .....	88
4.1.1.	マテリアルフロー分析結果 .....	88
4.1.2.	技術仕様の特定に関する検討 .....	97
4.2.	成分情報を反映した再生資源の規格化（実証テーマ2） .....	98
4.2.1.	再生資源の規格案の策定 .....	98
4.2.2.	回収した再生資源の評価及び規格案の改善検討 .....	107
4.3.	低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証テーマ3） .....	110
4.3.1.	新規プロセス仕様案に基づく解体・破碎・選別処理の実施 .....	110
4.3.2.	樹脂・金属成分を分離する要素技術の検討 .....	125
4.4.	情報連携システムの検討（実証テーマ4） .....	131
4.4.1.	情報連携システムの概要 .....	131
4.4.2.	情報連携システムの実証 .....	141
4.5.	磁着物の高度選別実証（実証テーマ5） .....	152
4.5.1.	電磁式ファインダーにおける選別条件の検討 .....	152
4.5.2.	電磁式ファインダーにおける仕様検討 .....	161
4.5.3.	LIBS ソーターにおける選別条件の検討 .....	169
4.6.	事業における環境影響改善効果・CO <sub>2</sub> 排出量削減効果の評価 .....	179
4.6.1.	資源効率性向上効果の検討 .....	179
4.6.2.	天然資源採掘量削減効果の検討 .....	181
4.6.3.	CO <sub>2</sub> 排出量削減効果 .....	183

4. 7. 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討・出口戦略の検討.....	186
4. 7. 1. 金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討.....	186
4. 7. 2. 出口戦略の検討.....	188
<b>5. まとめ.....</b>	<b>192</b>
5. 1. 実証成果.....	192
5. 1. 1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証テーマ1）.....	192
5. 1. 2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証テーマ2）.....	192
5. 1. 3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証テーマ3）.....	192
5. 1. 4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）.....	193
5. 1. 5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）.....	193
5. 1. 6. 事業における環境影響改善効果・CO <sub>2</sub> 排出量削減効果の評価.....	194
5. 1. 7. 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討・出口戦略の検討.....	194
5. 2. 今後の課題.....	195
5. 2. 1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証テーマ1）.....	195
5. 2. 2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証テーマ2）.....	195
5. 2. 3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証テーマ3）.....	196
5. 2. 4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）.....	196
5. 2. 5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）.....	197
5. 2. 6. 事業における環境影響改善効果・CO <sub>2</sub> 排出量削減効果の評価.....	197
5. 2. 7. 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討・出口戦略の検討.....	197
<b>6. 付録.....</b>	<b>199</b>
6. 1. 資源効率性向上効果の算定根拠.....	199
6. 2. 天然資源採掘量削減効果（天然資源節約効果）の算定根拠.....	218
6. 3. CO <sub>2</sub> 排出量削減効果の計算根拠.....	219



## 1. 背景・目的

使用済み製品等の中間処理（解体・破碎・選別）は、鉄のほか、貴金属や銅といった非鉄金属の回収を念頭におくものが多い。そのため、使用済み製品等に付随する製鋼・製錬忌避物質の除去や管理までを目的にしておらず、高価値成分の濃縮に最適化されていることも多い（図表 1：ソーティングセンター1.0～2.0）。その結果、単価が低く、量が少ない部材やレアメタル等は、破碎残渣（シュレッターダスト）や低品位基板、鉄鋼スクラップやスラグ、焼却灰の中へ拡散・埋没している。

中国政府による廃棄物等の輸入規制以降、日本国内で処理が必要な使用済み製品やスクラップが増加している。従来、雑品等として国外で処理されていたスクラップを、既存の技術・システム（ソーティングセンター1.0～2.0）で処理し続けると、一部の再生資源や破碎残渣、低品位基板等に忌避物質が集中し、鉄鋼・セメント産業等による資源循環を難しくさせる可能性がある。

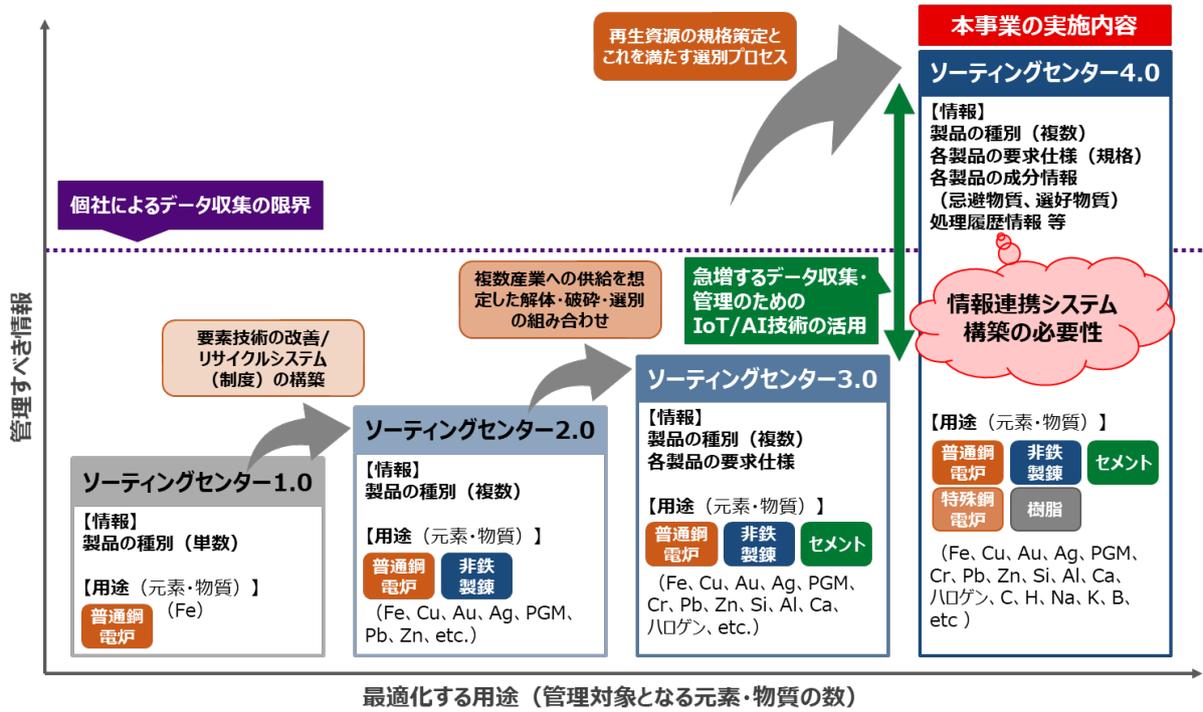
処理困難物の一例として、製品品質に影響を与えるトランプエレメント、スラグや焼却灰等に残留して再資源化を難しくさせるハロゲンやクロム等の重金属、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）等が挙げられる（図表 2）。過去事業<sup>1</sup>では、ASR（自動車破碎残さ）をケーススタディとして、素材事業者間の連携による忌避物質の融通取引の拡大を目指し、処理困難物である CFRP への前処理技術の適用と、それぞれ得意とする資源回収機能を活かした未資源化物質（銅、貴金属、鉄、原燃料代替品など）の回収可能性を追求した（図表 1：ソーティングセンター3.0）。

しかし、鉄鋼、非鉄製錬、セメントといった素材産業が互いに連携するだけでは、忌避物質の管理に限界がある。より広範に忌避物質を管理するには、素材産業と中間処理事業者が連携して、忌避物質に着目した分離・選別技術を開発・実装することが必要になる。また、同時に、こうして処理された再生資源を円滑に取引するため、忌避物質の含有量に応じた再生資源の規格や、品質を担保するための情報連携システムを導入する必要がある（図表 1：ソーティングセンター4.0）。再生資源の供給者である中間処理事業者は、忌避物質の管理情報を把握しておらず、再生資源の需要家である各素材産業は、忌避物質がどの程度管理された再生資源であるか、把握できない場合がある。こうした情報の非対称性は、取引成立の障害となっている。そこで、本事業では、各素材産業の原料要求仕様をもとにした再生資源規格の導入、これを充足する解体・破碎・選別プロセスの開発に加えて、中間処理事業者と各素材産業の間で発生している情報の非対称性を軽減する情報連携システムの確立を目指した。

---

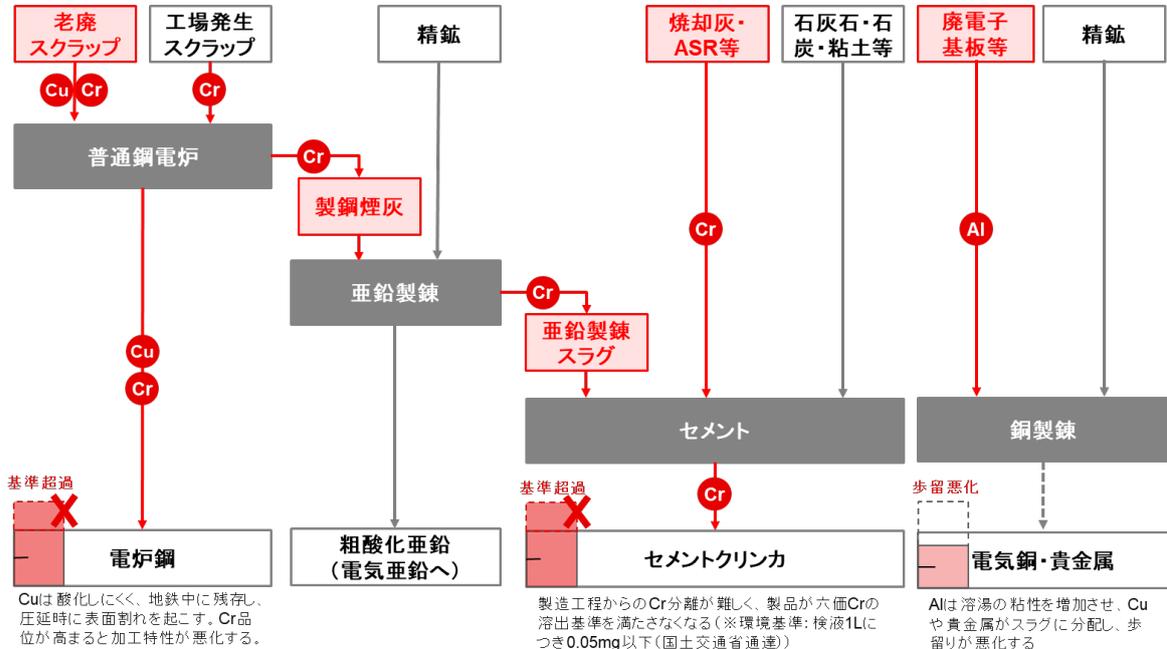
<sup>1</sup> 環境省「省 CO2 型リサイクル等高度化設備技術実証事業」（平成 30～31 年度）

図表 1 ソーティングセンターにおける最適化する用途と管理すべき情報の広がり



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 2 再生资源の品質低下と素材産業への影響 (一例)



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

## 2. 事業実施内容

### 2.1. 事業の全体概要

各素材産業は、自産業に投入される選好・忌避物質の量を、購買時や再資源化時に把握している。しかし、他の素材産業や中間処理事業者と、これら情報は十分に共有されていない。また、再生資源の品質管理という観点から、こうした情報を定期的に把握し、改善していくための手段を持っていない。そこで、忌避物質を社会全体で管理していくためには、こうした情報の可視化が必要である（図表 3：課題 B）。そこで、鉄鋼電炉、非鉄製錬（銅、鉛、亜鉛）、セメント、樹脂にとっての再資源化忌避物質（例：銅、錫、クロム、塩素、臭素等）を対象に、静脈産業内における流通量を推計した。そのうえで、忌避物質等の管理技術が必要とされる箇所を検証し、今後、どのような技術が必要とされるか検討した（2.2.1）。

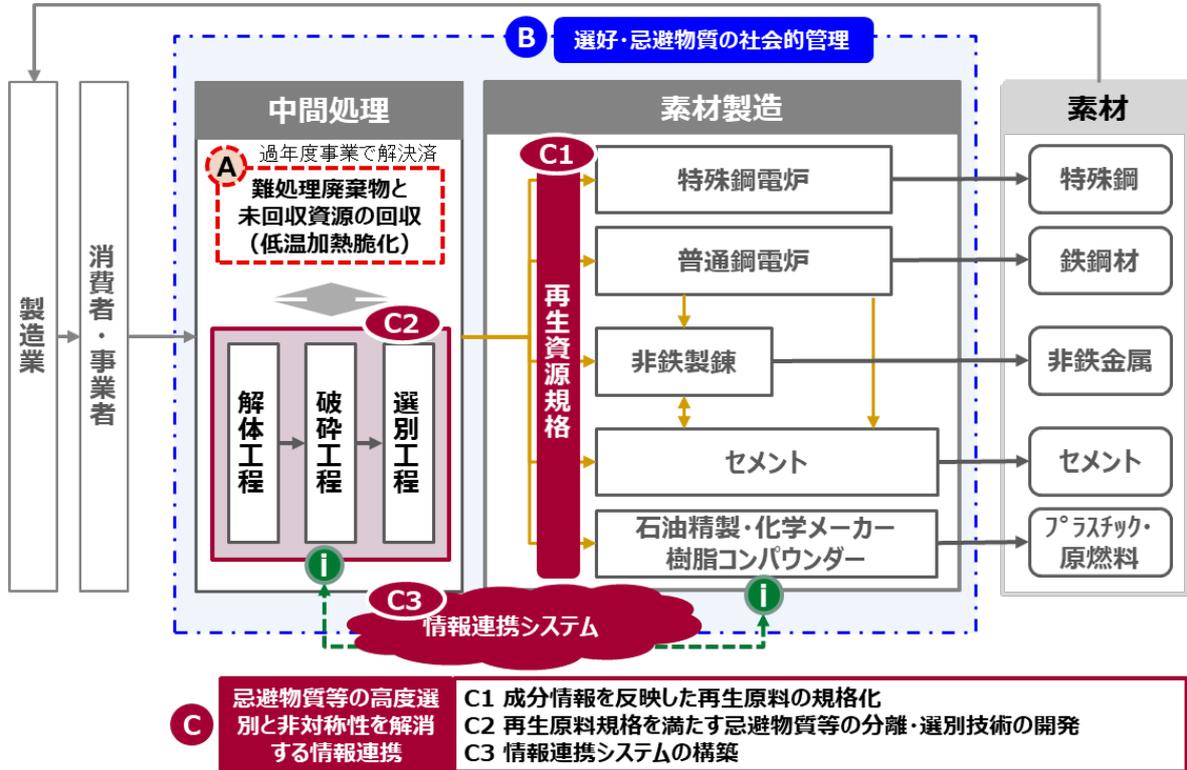
また、再生資源中の忌避物質の含有量が不明確であることで、情報の非対称性による「市場の失敗」が生じている。そこで、各素材産業の検収基準等から再生資源規格を具体化のうえ（図表 3：課題 C1）、これを満たす忌避物質等の分離プロセス（解体・破碎・選別工程）の見直しや要素技術の開発が必要になる（図表 3：課題 C2）。同時に、中間処理事業者と各素材産業間で客観的な取引を促すため、複数事業者で管理・運用可能な情報連携システムの構築が求められる（図表 3：課題 C3）。

本事業では、鉄鋼向け鉄スクラップやセメント向け原燃料を対象に、忌避物質の含有量に応じた再生資源の規格案を具体化した（2.2.2）。そのうえで、使用済み自動販売機をケーススタディの対象として、忌避物質含有部位を特定し、規格案を満たすための解体・破碎・選別方法の検証を行った（2.2.3）。また、回収した再生資源の品質を担保するため、投入された廃製品や処理手法を記録・追跡可能な情報連携システムを試作し、中間処理事業者においてシステムの実証を行った（2.2.4）。なお、現状の技術水準では、十分に分離することが困難なものがある。一例として、低品位基板や破碎残渣に含まれる金属と樹脂、磁着物に含まれる鉄とステンレス鋼が挙げられる。そこで、金属と樹脂分の相互分離におけるジグ選別の適用可能性、鉄とステンレス鋼の分離における電磁ファイnder・LIBSソーターの適用可能性をそれぞれ確認した（2.2.5）。

本事業の特徴は、選好・忌避物質の社会的な管理を可能とする、あるべき姿を具体化することと、これを実現するため、再生資源に対する要求仕様の明確化、解体・破碎・選別方法の見直しと必要な要素技術の実証、取引を促すツール（情報連携システム）の開発を、一体となって実施することにある（図表 4）。これら一連の実証成果として、期待される環境影響改善効果を算定し（2.2.6）、金属リサイクルビジネスの活性化・事業の出口戦略を検討した（2.2.7）を行った。

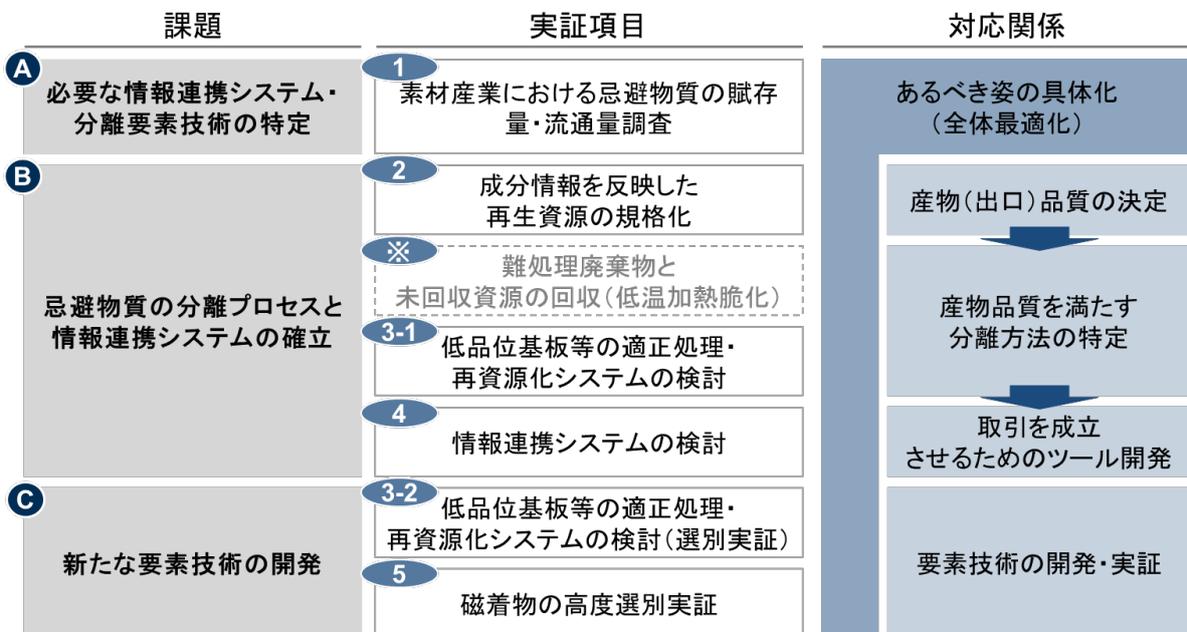
なお、事業の実施に際して、共同実施者等との打ち合わせを通じて、進捗確認や実証成果・課題に対する意見を交換した。また、現地視察会や評価審査会に参加し有識者からの助言を得ながら、円滑かつ効果的な事業実施に努めた。

図表 3 本事業で解決を目指す課題



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 4 各実証テーマと課題の対応関係



(注)※は過去実証(環境省平成30~31年度省CO<sub>2</sub>型リサイクル設備技術実証事業)実施したもの

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

## 2.2. 事業初年度の実施内容・成果及び課題

### 2.2.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証テーマ1）

#### 2.2.1.1 事業初年度の実施内容と成果

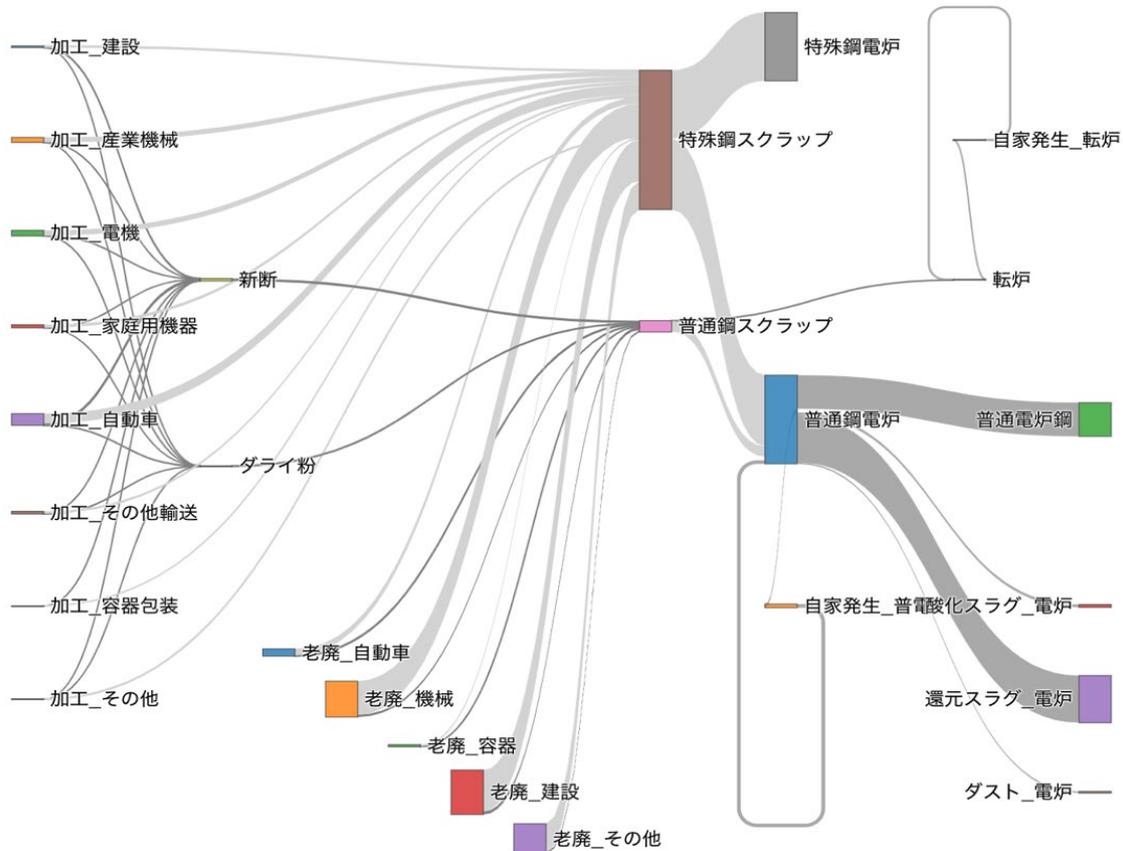
事業初年度は、セメント産業における忌避物質であるクロム、ハロゲン、鉄鋼産業における忌避物質である銅を対象に、中間処理事業者から素材産業に投入されるまでの流通量を推計した。

普通鋼電炉が購入する鉄スクラップには、マルテンサイト系のステンレス等の混入が想定され、微量のクロムが含まれている。鉄スクラップに随伴して、普通鋼電炉に投入されたクロムの一部は、電炉ダストにも分配されると考えられる。電炉ダストは、亜鉛製錬事業者で粗酸化亜鉛の原料として利用されるが、こうして亜鉛製錬に投入されたクロムの多くはスラグに分配される。亜鉛製錬スラグはセメント産業に供給されているため、普通鋼電炉に投入されたクロムは、結果的に、セメント産業のクロム流入源となっている可能性がある。

そこで、鉄鋼産業（特殊鋼電炉、普通鋼電炉）を対象に、スクラップに随伴して投入されるクロムのマテリアルフローを推計した。推計の結果、特殊鋼スクラップのうち、特殊鋼電炉で有効利用されるクロムは限定的であり、特殊鋼スクラップに含まれるクロムの約半分は、普通鋼電炉に流入することが明らかになった。また、特殊鋼スクラップと比較すると少量ではあるが、普通鋼スクラップに含まれるクロムも普通鋼電炉に投入されていた。普通鋼電炉に投入されたクロムの多くは、普通電炉鋼中に残存するか、還元スラグに分配される。しかし、一部は普通鋼電炉ダストにも分配され、これが後工程（亜鉛製錬、セメント）におけるクロムの流入源となっている可能性が示唆された（図表 5）。

このほか、セメント産業における忌避物質であるクロム、ハロゲン、鉄鋼産業における忌避物質である銅を対象に、中間処理から素材産業に投入されるまでの流通量を推計した。

図表 5 鉄鋼産業におけるクロムのマテリアルフロー



(出所) 東京大学村上研究室提供

### 2.2.1.2 事業初年度の課題

中国政府をはじめとする諸外国の輸入規制により、鉄スクラップ中に含まれる微量成分（トランプエレメント、クロム等）は増加している可能性がある。しかし、初年度の推計では、こうした実態の解明には至らなかった。普通鋼電炉として供給されるスクラップ中の忌避物質（銅、クロム等）の流通実態を、より精緻に推計することが求められる。

また、普通鋼電炉ダストに含まれるクロムが、セメント産業におけるクロムの流入源である可能性が明らかになったが、セメント産業に流入するクロムの全体量と比較して、どの程度影響を及ぼしているのか確認する必要がある。そこで、亜鉛製錬の原料や副産物（スラグ）に随伴して流通するクロムの実態解明、セメント産業が調達するその他の原料（再生資源・天然資源）に随伴して流通するクロムの実態解明が求められる。

昨年度、塩素や銅に関しても一部検討を行ったが、中間処理事業者や各素材産業における流通実態を解明するまでにはいらっておらず、クロム以外の忌避物質に関しても、同様に再生資源の流通量の把握とこれらの成分情報を収集し、マテリアルフロー分析を行う必要がある。

## 2.2.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証テーマ2）

### 2.2.2.1 事業初年度の実施内容と成果

事業初年度は、規格化の対象とする再生資源及び忌避物質を特定するため、各素材産業で忌避物質とされる元素を整理した。そのうえで、鉄鋼電炉向けシュレツダースクラップ及びセメント事業者向け廃プラスチック原燃料を対象として、規格の必要性を検討するため、各素材産業における再生資源の分類（品質等級）に関する既存規格の有無・内容を調査した。

以上の結果を踏まえ、文献及びヒアリング調査によって得られた再生資源の受入管理の実態、再生資源における忌避物質の含有状況等に関する情報を参考にしながら、鉄鋼電炉向けシュレツダースクラップにおける忌避物質（銅、クロム）品位に着目した等級に関する規格案を検討した。同様に、セメント事業者向け廃プラスチック原燃料における忌避物質（銅、クロム）品位に着目した等級に関する規格案を検討した。

このほか、規格の活用可能性を検討するため、既存規格の運用実態や課題、新たな規格の活用可能性に関する情報収集を行った。

### 2.2.2.2 事業初年度の課題

初年度に作成した規格案は、受入基準に関する既存文献や個社へのヒアリングをもとに作成したものであり、必ずしも代表的な数値に基づくものとなっていなかった。規格案が日本国内で一般的に受け入れられるものになるよう、国内における代表的なデータを用いて、規格案を再精査する必要がある。

また、規格案の実用可能性（中間処理業者が規格案の要求する基準を満たすことができるか否か）の確認をできていない。実証テーマ③の結果を踏まえて、規格案の実用可能性を確認する必要がある。

## 2.2.3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証テーマ3）

### 2.2.3.1 事業初年度の実施内容と成果

既往調査やヒアリングをもとに、使用済み製品の排出形態や資源価値に基づいて、解体・破碎・選別プロセスの設計指針を検討した。個別リサイクル法や商流を考慮して、個体管理が可能な使用済み製品（自動車、家電、自動販売機等）は、忌避物質含有部品を事前に解体・回収することで、破碎・選別産物の品質改善を目指した。一方、個体管理が難しく、資源価値の低い使用済み製品（小型家電等）は、破碎後の残渣を精緻に選別することで、残存した有用金属（鉄・非鉄）を回収しながら、樹脂分等の有効活用を目指した。これら設計指針に基づいて、使用済み自動販売機及び小型家電を対象に、解体・破碎・選別プロセス案を具体化した（図表 6）。

このうち、後者の設計指針では、金属と樹脂等を効率的に分離可能な選別技術の実装が必要となる。そこで、小型家電の破碎残渣（低品位基板を含む）から、非鉄製錬やセメント、樹脂製造に適した再生資源を回収することを目的に、流動層選別及び重液選別の実証試験を行った。流動層選別試験の回収物には、銅製錬原料やセメント・鉄鋼電炉産業における原燃料代替品として、利用できる可能性があるものがあつた。

### 2.2.3.2 事業初年度の課題

使用済み自動販売機を対象に検討したプロセス案では、事前にコンデンサやハーネス、背面鋼板を解体・回収することで、磁着物（製鋼原料を想定）やダスト（原燃料代替品を想定）に含まれる銅・クロムを減らすことを目指している。しかし、これら部品を回収することで、どの程度忌避物質の含有量を低減できるのか明らかではなく、実証テーマ2で検討した再生資源規格案を満たすかわからない。また、事業初年度では、ヒアリング等によって忌避物質を含む部品を特定したが、これら以外にも忌避物質使用量の多い部品を含む可能性がある。そのため、銅やクロムといった忌避物質の含有部品を詳細に把握したうえで、これら部品を事前に取り外して破碎・選別を行い、産物の品質を確認する必要がある。

また、忌避物質の含有量が少ない再生資源は、従来と比較して付加価値向上が期待されるが、再生資源の販売収入より解体コストが多い場合、プロセスの導入は困難になる。そこで、産物の品質改善と、解体・破碎・選別コストを両立させるプロセスの開発が必要となる。複数の解体パターンで試験を実施し、その際の産物の品質と追加的に必要な作業量を評価することで、最適な解体・破碎・選別条件を具体化することが必要となる。

小型家電の破碎残渣を対象とした要素技術実証では、流動層及び重液を用いても、樹脂と金属を完全に分離することは困難であつた。一部の粒群では、樹脂と金属、ガラス等を十分に分離することができず、再生資源として供給が難しい産物があつた。いずれの産物も素材産業で利用できるよう、試料の前処理条件や選別方法・条件を見直す必要がある（図表 7）。

なお、回収される樹脂分について、セメント等の原燃料代替品のみでなく、マテリアルリサイクル原料としての利用可能性を検討した。コンパウンド原料として利用するには、単一樹脂であることが必要になるが、回収物には複数種の樹脂が含まれていた。比重差が小さく、また粒子の状態（片刃、フィラー添加量等）によって比重が変動するため、比重選別のみで単一樹脂を回収することは容易ではない。そのため、事前解体による単一樹脂の回収、破碎残渣から単一樹脂を回収する技術の検証が必要である。

図表 6 使用済み自動販売機を対象とした解体・破碎・選別プロセス（案）



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 7 選別要素技術（小型家電由来のダストを対象）に関する昨年度の課題

回収物	昨年度の結果(赤字:改善点)	想定される要因(■:試料由来、■:装置由来)
銅製錬原料	<ul style="list-style-type: none"> <li>一部の回収物は、銅製錬原料に要求される水準まで、銅・金・銀を濃縮できた</li> <li>銅製錬想定原料以外(低比重側)に銅が分配された</li> <li>銅製錬想定原料(重比重側)にアルミが混入した</li> <li>中粒群・重産物の銅品位が低い(30wt%程度)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 粒粒径が細かく、(比重による)速度差が生じなかった</li> <li>■ 紙基板等に含まれる銅が軽産物に分配された</li> <li>■ 細銅線が絡まって銅が軽産物に分配された</li> <li>■ (流動層)上部数cmの層から軽産物を回収しており、流動層中に存在する中産物が重産物側に回収されたため銅品位が低下した</li> <li>■ (エアテーブル)滞留時間が短く、銅とアルミ、その他ガラスが十分に分離されなかった</li> </ul>
原燃料代替品	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 粗粒群・低比重側では、セメントや鉄鋼電炉での原燃料代替品の要求水準を満たす産物を回収した</li> <li>■ 中粒群の軽産物は、(銅の含有量は高いが)セメントでの原燃料代替品の要求水準を満たす品質であった</li> <li>■ 中・細粒群の軽産物には、金属(銅、鉄など)や土砂などが混入した</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 粒粒径が細かく、(比重による)速度差が生じなかった</li> <li>■ (エアテーブル)滞留時間が短く、銅とアルミ、その他ガラスが十分に分離されなかった</li> </ul>
樹脂原料(コンパウンド)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ コンパウンド原料として供給するには、単一樹脂のみ回収することが必要だが、複数の樹脂が混在していた</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 樹脂同士の比重の差が小さい</li> <li>■ 片刃粒子や充填剤(フィラー)により比重が変動する</li> <li>■ 粒子同士が絡まり、比重に基づく速度が生じていない</li> </ul>

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

## 2.2.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）

### 2.2.4.1 事業初年度の実施内容と成果

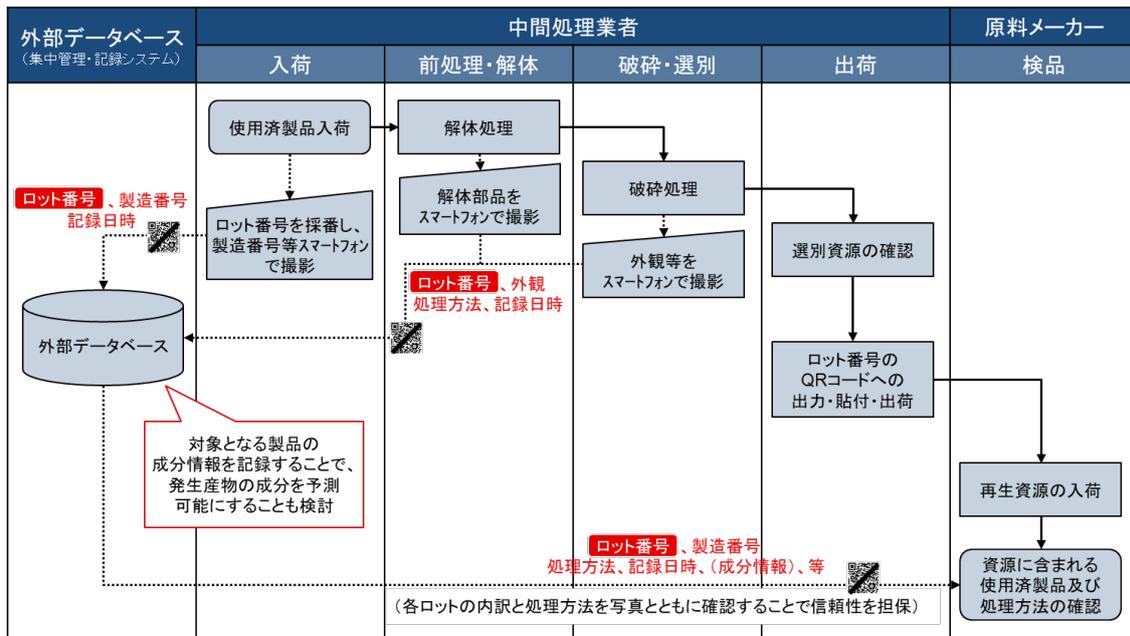
実証テーマ2で検討を進める再生資源規格により、素材産業による要求仕様（忌避物質含有量等）の特定は可能になる。一方で、現在の取引では再生資源の成分情報が明らかになっておらず、中間処理後の産物を素材産業側で客観的に評価することは困難である。

こうした中、素材産業側で再生資源の評価を可能とするために、事業初年度は選好・忌避物質の含有状況を複数事業者間で管理・運用できる情報連携システムの仕様を検討した。再生資源品質の透明化を推進することで、取引の活性化を意図したものである。

情報連携システムの検討にあたり、廃棄物によって処理フローが異なることから、対象となる具体的な廃棄物を設定する必要がある。本事業では、サンプルとして多くの中間処理業者でバッチ処理が行われており、発生産物の管理が行いやすい使用済み自動販売機を対象とした。自動販売機は製品を設置事業者に貸し出すサブスクリプション型ビジネスで運用されており、排出事業者が自動販売機の管理業者に集約されていることが多い。そのため、有用なケーススタディとして使用済み自動販売機を取り上げた。

中間処理における情報連携を実現するために、最大の課題となるのは破碎工程である。破碎処理を行うことで、個体別での成分情報の追跡が困難となるため、事業初年度では再生資源の販売単位ごとに成分情報を把握するワークフローを検討した。図表8に示すように、QRコードとスマートフォンを活用した活動記録システムであり、従来フローと新規フロー（情報連携システム導入フロー）を比較しながら、再生資源の付加価値向上に繋がる情報連携システムの仕様を設定した。

図表8 情報連携を行うためのワークフロー



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

#### 2.2.4.2 事業初年度の課題

事業初年度の課題としては、実証テーマ3とも連携し、自動販売機の最適な解体方法を具体化することが挙げられる。最適な解体方法と、それにより得られる産物の規格化等を前提として、本テーマではそれを満たす解体方法が行われたことを証明するための方法の検討が求められる。

また、事業初年度は仕様の検討に留まったため、検討した仕様案を満たす情報連携システムを試作し、システムの有効性を確認する必要がある。具体的には、試作システム及び使用済み自動販売機を活用し、QRコードの貼付・読取、銘板情報の入力、解体前後の部品撮影・記録等を行うことで、事業初年度に整理した記録すべき情報の記録時期や記録方法、情報の記録における作業効率等を検証が必要である。

なお、発生産物の成分把握と直接的な関係はないが、フロンの回収についてもシステム上で管理できるようにする必要がある。従来はフロンの管理は既定の様式に手書きで記録し、それをさらにPCに手入力する作業が行われてきた。フロンの回収工程のみ手書きでの記録を維持することは、煩雑かつ非効率になることから、試作システムではフロン回収を含む解体プロセス全体を記録することが不可欠になる。

## 2.2.5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）

### 2.2.5.1 事業初年度の実施内容と成果

シュレッダー処理と磁選を経て得られる磁着物には、普通鋼のほか、クロム系ステンレス鋼やモーターコアなどもしばしば含まれる。現状、クロム系ステンレス鋼の選別は行われていない場合が多い。また、モーターコアも手選別に頼らざるを得ない場合が多く、事業者の大きな負担にもなっている。鉄スクラップに随伴する磁着物中のクロム系ステンレス鋼は、電炉事業者で溶解される際、クロムに富んだ製鋼煙灰やスラグを発生させる原因になっているものと考えられており、結果として（クロムの混入を嫌う）セメント事業者における再資源化を難しくさせている（なお、セメント事業者が製鋼煙灰を直接再資源化することはないが、亜鉛製錬事業者が製鋼煙灰から酸化亜鉛を再資源化する際に発生する亜鉛製錬スラグにクロムが濃集し、それを受け取るセメント事業者での再資源化をやはり難しくしている）。同様に磁着物中にモーターコアが残存すると、電炉鋼中に銅が残存し、表面赤熱脆性の発現要因となる。これが発現すると、熱間鍛造や熱間圧延の際、その表面に亀裂が発生しやすくなるという問題を発生させてしまう。

そこで、事業初年度は、磁着物中の忌避物質（クロム、銅）の含有量を低減するべく、それら忌避物質を含有するクロム系ステンレス鋼やモーターコアを識別する高度選別技術を模索した。具体的には、まだクロム系ステンレス鋼やモーターコアの選別等では使用実績がない電磁式ファイnderを選定し、選別の可能性を検討した。また、比較対象として、LIBS ソーターによる実証試験も実施した。分離効率では LIBS ソーターが潜在的に大きな可能性を有しているが、一方で初期投資の小ささや単位時間当たりの処理能力では電磁式ファイnderに大きな可能性がある。それぞれの試験で、クロム系ステンレス鋼やモーターコアを識別するため最適な識別条件、今後の課題などを検討することを目的とした。標準試料を用いた基礎試験の結果、電磁式ファイnderはクロム系ステンレス鋼、普通鋼（S50C）、ニッケル系ステンレス鋼、銅の識別に有効であることを確認した。LIBS ソーターは、クロム系ステンレス鋼と普通鋼の識別に有効であることを確認した。また、クロム系ステンレス鋼と普通鋼の実試料を高い分離効率（92%）で選別できることを確認した。

### 2.2.5.2 事業初年度の課題

電磁式ファイnderでは、標準試料における2成分系試料（鉄、銅）での識別可能性、またシュレッダー工場で発生した実試料（モーターコア、シュレッダースクラップ（普通鋼・クロム系ステンレス鋼））での識別可能性が十分には確認されていない。そこで、電磁式ファイnderにおいて識別条件を十分に具体化出来ていない実試料において、測定条件や解析手法を見直し、より優れた識別条件を模索する必要がある。

LIBS ソーターでは、鉄・クロムの含有率と発光強度比の関係から、普通鋼とクロム系ステンレス鋼を選別できる可能性が確認された。しかし、含有率と発光強度比の関係性を示す検量線の直線性が低いため、発光強度比から正確な含有率を算出することが困難であった。また、実試料では、試料表面の汚れやメッキ、表面形状が観測される発光強度に影響を及ぼしていた。そこで、含有率と検量線の直線性を改善できるよう、発光線の選択や分析条件を検討する。また、実試料の表面状態による影響を低減できるよう、前処理（表面研磨）及び分析条件を見直す必要がある。

## 2.2.6. 事業における環境影響改善効果・CO<sub>2</sub>排出量削減効果の評価

### 2.2.6.1 事業初年度の実施内容と成果

昨年度事業では、本事業における環境影響改善効果（「天然資源採掘削減効果」、「二次資源単位重量当たりの収益改善効果（資源効率性向上効果）」）、CO<sub>2</sub>排出量削減効果を評価した。本事業の新プロセスそのものは廃小型家電や廃家電等にも適用可能であると考えられるため、昨年度は便宜的に国内の認定事業者で回収された家電及び小型家電を対象に推計を行った。具体的には、事業実施後の新プロセスにおける再生原料由来の素材生産量を基準とし、事業実施前の従来プロセス（天然資源＋二次資源）で同等の素材生産量を得る場合に必要な天然資源の採掘量を「天然資源採掘削減効果」として推計した。また、中間処理事業者が家電及び小型家電を処理する際、処理重量1tあたりに得られる収益の変化を「二次資源単位重量当たりの収益改善効果（資源効率性向上効果）」として推計した。CO<sub>2</sub>排出量削減効果の推計では、家電及び小型家電を対象にそれぞれ1tの処理とその際に回収される二次資源を原料とした素材（普通鋼、非鉄金属、クロム系ステンレス鋼、セメント、樹脂）生産量を機能単位として推計を行った。なお、CO<sub>2</sub>排出量削減効果の評価範囲（バウンダリ）は破碎・選別、埋め立て、普通鋼電炉製錬、非鉄（金、銀、銅）製錬、ステンレス鋼製錬、セメント製造、本事業導入時に二次資源へ代替される天然資源生産とした。

昨年度の推計では、実証事業の目標値等をもとに推計を行っており、環境影響改善効果、CO<sub>2</sub>排出量削減効果のいずれも良好な結果が得られた。

### 2.2.6.2 事業初年度の課題

昨年度の「二次資源単位重量当たりの収益改善効果（資源効率性向上効果）」における推計では、中間処理事業者における資源効率性向上効果にのみ着目しており、社会全体における資源効率性向上効果を考慮することができていない。本事業における「資源効率性」という用語を再定義し、その評価範囲を拡大させることが必要である。

また、昨年度事業では、いずれも実証事業の目標値等をもとに推計を行っていた。今年度の評価では、より実態に即した数値を用いることで、具体性の向上、代表性の向上が求められる。

## 2.2.7. 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討・出口戦略の検討

### 2.2.7.1 事業初年度の実施内容と成果

実証成果をもとに、「ソーティングセンター4.0」が実現することによって、金属リサイクルビジネスが活性化する可能性を検討した。再生資源の供給者である中間処理事業者は、忌避物質の管理情報を把握することができる。一方、これら再生資源の需要家である各素材産業は、忌避物質がどの程度管理された再生資源であるか、把握できていないことが多い。中間処理事業者と素材産業間で生じるこうした情報の非対称性は、取引成立を妨げる一つの要因となり、「市場の失敗」が起きている。その結果、本来は価値を有している再生資源が、付加価値の低い再資源化工程に投入されるケースや、廃棄物として処理されるケースがある。

「ソーティングセンター4.0」が実現すれば、資源の需要家である素材産業へ、再生資源の情報を正しく伝達し（情報完全性の向上）、新たな価値判断及び取引を促すことができる。こうして、情報の非対称性によって停滞していた取引が活性化するだけでなく、資源の適正な価値判断による再生資源販売益の増加も期待される。

また、事業初年度は、産業廃棄物由来の使用済み製品（自動販売機など）を想定して実証を進めたが、使用済み自動車や廃家電、廃小型家電などにも、本事業成果を展開できる可能性がある。さらに、金属に留まらず、微量成分が原因で取引の停滞や不適正な価値判断が起きている他の資源にも展開が期待される。一例として、プラスチック中のハロゲン（塩素、臭素）、太陽光パネル中のヒ素やセレン、自動車破砕残渣中の炭素繊維強化プラスチックを取り上げた。本事業成果が普及することで、様々な製品や金属以外の物質も対象としたリサイクルビジネスが、活性化する可能性を明らかにした。

また、事業成果の社会実装に向けて必要な取り組みを検討した。再生資源規格案や解体・破砕・選別プロセス、情報連携システムは、本事業の参画事業者を中心に、中間処理事業者と各種素材生産事業者により構成されるコンソーシアムで実用化を進める予定である。実用化に向けたテーマ（規格、プロセス、システム）ごとの課題・対応策を整理し、同時に、コンソーシアムを構成する各事業者の役割分担や規格・システムを運営する機関を検討した。

### 2.2.7.2 事業初年度の課題

事業初年度では、再生資源規格案を検討したが、実際にこうした規格案を満たす再生資源を回収できるか明らかでない。そこで、解体・破砕・選別プロセス案をもとに試験を行い、規格案の充足可能性を検証する必要がある。また、初年度仕様案を検討した情報連携システムを試作し、プロセス案と同様、中間処理の現場で実証することで、実用化に向けた課題を特定する必要がある。特に、リサイクルビジネスの活性化の観点では、産業廃棄物（自動販売機など）のみでなく、様々な製品にも展開可能な、分離プロセスと情報連携システムの構築が求められる。他製品への展開を念頭に実証試験を行い、普及拡大に向けた課題とその解決策を明らかにする必要がある。

また、コンソーシアムにおいて、再生資源規格や分離プロセス、情報連携システムを自立的に活用していくため、事業の採算性を明らかにする必要がある。こうして採算性を確認したうえで、事業化に向けた出口戦略や施策を具体化する必要がある。

## 2.3. 本年度事業の実施内容

### 2.3.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証テーマ1）

各素材産業は、それぞれ自産業に流れ込む選好・忌避物質の量を把握している。しかし、複数の素材産業間でこうした成分情報は共有されていない。また、再生原料の品質管理という観点から、選好・忌避物質の量を定期的に把握したり、改善したりする手段を持っていない。そこで、鉄鋼電炉、非鉄製錬、セメント、樹脂にとっての再資源化忌避物質を対象に、静脈産業における流通状況を調査する。特に、事業初年度で新たに推計等が必要であると判断された流通フロー、事業初年度で対象としていない物質を対象に推計を行った。そのうえで、忌避物質等管理技術が必要とされる箇所と、どのような仕様の技術が必要とされるのか検討した。

### 2.3.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証テーマ2）

事業初年度において、素材産業に流入する忌避物質の管理を目的に、日本全体のマクロデータ等をもとに再生資源（鉄鋼スクラップ、セメント原燃料等）の規格案を検討し、その実用可能性を確認した。

### 2.3.3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証テーマ3）

現状の中間処理は、複数の素材産業の要求仕様を同時に満たす解体・破碎・選別システムになっていない。事業初年度は、金属や樹脂の成分バランスと、用途に応じた中間処理プロセス仕様案を検討した。本年度事業では、解体・破碎・選別プロセス仕様案に基づき、使用済み自動販売機をケーススタディとして、解体・破碎・選別実証を行った。また、低品位基板等の一つとして、自動販売機を処理したときのダストを対象に、銅製錬原料やセメント・鉄鋼電炉用の原燃料代替品等を回収するための要素技術を検討した。

### 2.3.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）

現在の取引では、中間処理業者で生産される再生資源の成分情報が明らかになっておらず、素材産業側で客観的に評価することが困難である。そのため、事業初年度は、フィードの種類や状態に関する情報、解体・選別の履歴情報、選好・忌避物質の含有状況情報を複数事業者間で管理・運用出来る情報連携システムの仕様案を策定した。本年度事業では、システム仕様案をもとに情報連携システムを試作し、中間処理の現場における情報記録方法や運用の実用性、導入した場合の経済性を評価した。

### 2.3.5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）

電磁式ファインダーにおいて、導電流情報（位相、振幅等）に基づく識別条件を十分に具体化できていない鋼種（標準試料：普通鋼（SPCC）、クロム系ステンレス鋼、実試料：各鋼種）において、測定条件や解析手法を見直し、選別が可能になる条件を検討した。具体的には、観測データに影響を与える物理的性質、装置条件を検討したほか、本実証に用いた電磁式センサーにオプションとして搭載されている可視光カメラを用いて色調条件による選別可能性も検討した。また、

形状に特徴のある実試料の観測データを整理し、形状と観測データの関係性等も確認した。

LIBS ソーターでは、鉄・クロムの含有率と発光強度比の関係を示す検量線の直線性の改善、表面状態（表面粗度、汚れ、塗装、メッキ等）や形状に特徴のある実スクラップの回収率の向上と検出率の改善に取り組んだ。また、LIBS ソーターの処理能力向上に向け、ベルト速度による選別精度への影響を検討した。

### 2.3.6. 事業における環境影響改善効果・CO<sub>2</sub>排出量削減効果の評価

本事業における環境影響改善効果及び CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の評価方法を明確化するとともに、それらの評価を行った。環境影響改善効果として、具体的には「資源効率性向上効果」及び「天然資源採掘量削減効果」を評価した。

本事業では、事業の採算性や天然資源投入削減量等の観点から環境影響改善効果を評価するべく、資源効率性を“粗付加価値額／天然資源投入量”と定義した。事業実施前後の資源効率性を比較することで「資源効率性向上効果」を推計した。また、本事業では、“天然資源投入量”をある製品の生産に必要な各種天然資源の関与物質総量（TMR : Total Materials Requirement）と定義した。事業実施前後の天然資源投入量の差分から、「天然資源採掘量削減効果」を推計した。

環境影響改善効果及び CO<sub>2</sub> 排出量削減効果は、本実証事業で得られた成果を用いて評価することで、具体性の向上、代表性の向上に努めた。

### 2.3.7. 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討・出口戦略の検討

本事業によって中間処理業と各素材産業との間の情報の非対称性が改善され、未回収資源の活用が促進されることが見込まれる。これに伴う新規市場の創出及び経済性を確保したリサイクルビジネスの活性化、加えて自動車や家電・小型家電への応用可能性が見込まれることから、これらの展開可能性について検討した。

また、事業の将来的な展開可能性を経済的・技術的側面から評価するとともに、それらを実現するための、実証事業終了後の事業展開に係る出口戦略について検討した。一例として、策定する規格案について、関連する業界団体やこれらの再生資源を受け取る事業者等の間での周知・活用を目指した。

### 2.3.8. 「包括的中間処理（ソーティングセンター4.0）の実現に向けた再資源化技術・システム実証事業」の現地視察会の開催

業務の円滑な実施のため、業務実施期間内において、評価審査委員1名程度、環境省担当官1名程度、「令和3年度地球温暖化対策に係る技術実証事業管理・検討等事業委託業務」の受託者（以下、「事務局」という。）2名程度による現地視察会を開催した。尚、現地視察会の日程については、事務局と調整を行うこと。また、現地視察会に併せて、本業務の進捗報告を行った。

### 2.3.9. 共同実施者等との打合せ

業務実施に当たっては、必要に応じて共同実施者である太平洋セメント株式会社等と、成分分析の実施、樹脂・金属成分を分離する要素技術の検討について、イーペックスジャパン株式会社と、電磁式ファインダーによる選別実証について、株式会社エスエルネット等と情報連携システムの検討について、オンラインにて打合せを行った。なお、共同実施者以外を含む研究会メンバー間において、オンラインにて作業部会を6回開催した。

### 2.3.10. 評価審査委員会の出席

業務実施期間内において開催する評価審査委員会（オンライン、2回）に出席し、業務の進捗状況についてプレゼン形式で報告を行った。

### 3. 実施事項

#### 3.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証テーマ1）

##### 3.1.1. バウンダリ・対象元素の設定

各種素材産業における資源効率性の向上を念頭におきながら、鉄鋼電炉、非鉄製錬、セメント産業で流通する再生資源や廃棄物等を、評価対象（システムバウンダリの対象範囲）に設定した。なお、樹脂素材産業も検討対象とするが、すべての樹脂関連産業を対象に、流通量の推計を行うのは困難であるため、鉄鋼電炉、非鉄製錬（銅、鉛、亜鉛）、セメント、樹脂リサイクル産業を対象に選定した。

これら産業における主たる忌避物質は銅、錫、クロム、鉛、ハロゲンなどである。鉄鋼電炉では、銅が製品中のトランプエレメントとなること<sup>2</sup>、また、ハロゲンのうち塩素は、これら素材産業の操業に及ぼす影響が大きいこと<sup>3</sup>が知られている。こうした忌避物質を管理する重要性は認知されつつあり、徐々に対策が講じられている。

他方、十分な対策が実施されていない忌避物質として、クロムがある。セメント産業にクロムが流入すると、セメントキルン内部の還元雰囲気中で焼成された際に、一部が六価クロムになってしまう。六価クロムは環境規制物質であり、建設省技調発第48号では、「セメント及びセメント系固化材を使用した改良土を再利用する場合、六価クロム溶出試験を実施し、六価クロム溶出量が土壌環境基準以下であることを確認すること<sup>4</sup>」とされている。六価クロムの土壌環境基準は「検液1Lにつき0.05mg以下<sup>5</sup>」である。こうした基準に適合する製品を生産するため、セメント産業はクロムに関する厳格な受入基準を有している。

鉄鋼電炉や非鉄製錬から供給される副産物、また各種廃棄物（焼却灰、シュレッターダストなど）には、微量のクロムが含まれている。今後、こうした副産物・廃棄物等に随伴して、セメント産業に流入するクロムが増加した場合、セメント産業でこれら副産物・廃棄物等が受け入れできなくなる恐れがある。その結果、我が国の資源循環にも、大きな影響を及ぼす可能性がある。そこで、クロムを重点的な分析対象元素として取り上げ、マテリアルフロー分析を実施することとした。

初年度事業で整理した、中間処理業から各素材産業（鉄鋼電炉、非鉄製錬、セメント、樹脂）の各種再生資源・廃棄物等の流通量、素材産業間で取引される副産物・廃棄物等（スラグ、ダスト等）の流通量を踏まえて、図表9に示すシステムバウンダリを設定した。なお、すべての潜在的なフローを示すと煩雑になってしまうため、一部簡略化している。

青枠の項目は最終的な用途を示す。クロムが有効的に利用されるには、ステンレス鋼等にリサイクルされる必要がある。これ以外は、セメントに混入されるか、最終処分場に埋め立てられるか、「その他の有効利用」として路盤材等に拡散している。赤線のフローは、流通量の観点から、管理の必要性が高いと考えられるものを示す。図中では、主に鉄鋼・非鉄製錬から供給されるス

<sup>2</sup> 水上 義正ほか「新製鋼プロセス・フォーラムの活動概況」電気製鋼, 1997, 68 巻, 1 号, p. 29-34

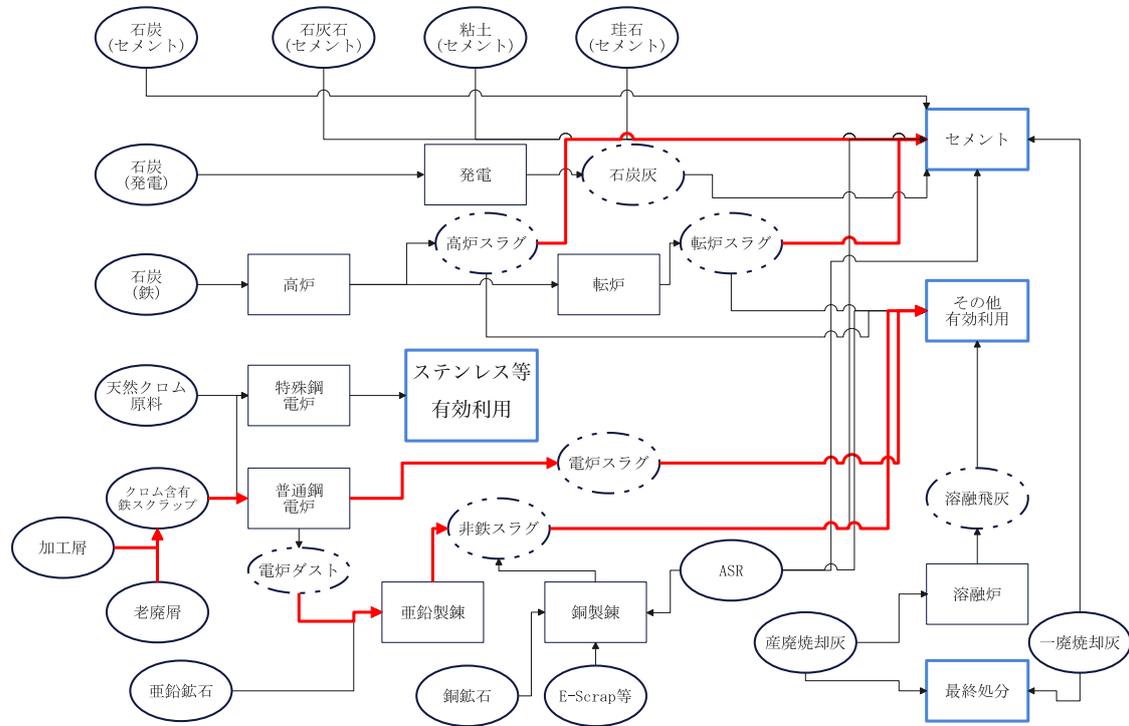
<sup>3</sup> 齋藤 優子ほか「プラスチックリサイクルが直面する課題と将来展望」廃棄物資源循環学会誌, 2018, 29 巻, 2 号, p. 152-162

<sup>4</sup> 建設大臣官房技術審議官「セメント及びセメント系固化材の地盤改良への使用及び改良土の再利用に関する当面の措置について」（平成12年3月24日）

<sup>5</sup> 平成3年8月23日環境庁告示第46号「土壌の汚染に係る環境基準について（抜粋）」

ラグを取り上げており、必ずしもすべての二次原料を記載していない。

図表 9 本年度事業における推計対象範囲



(出所) 東京大学村上研究室作成

### 3.1.2. 流通量・忌避物質含有量に関する調査

#### 3.1.2.1 国内へのクロムの投入

国内に投入されるクロムのデータは、統計や公開論文等<sup>6,7,8,9,10,11,12,13,14</sup>から整理した。まず、鉄鋼のバルクフローを整理したのち、文献等から得られるクロムの含有量を乗じることで、クロム純分換算のフローを推計した。鉄鋼材料中のクロム含有量は文献値<sup>15</sup>を参考に設定した（図表10）。

図表 10 本推計で使用した鉄鋼材料の鋼種別クロム含有率

鋼種	クロム含有率(%)
クロム系ステンレス鋼	15.5
ニッケル系ステンレス鋼	18.0
耐熱鋼	16.3
軸受鋼	1.6
ばね鋼	0.95
構造用特殊鋼	0.96

（出所）東京大学村上研究室作成

#### 3.1.2.2 鉄鋼産業

鉄鋼産業に投入されるクロムのうち、天然資源由来のクロムは本推計の対象外とし、特殊鋼及び普通鋼電炉に投入されるスクラップに随伴するクロムを推計対象とした。特に、回収された特殊鋼スクラップのうち、非意図的に普通鋼電炉に投入されてしまうスクラップの混入量の解明を目指した。

普通鋼産業の主なクロム混入要因は、転炉や電炉に投入される鉄スクラップであると考えられる。そこで、まずは鉄スクラップのフロー（バルク量）を推計した。文献<sup>67</sup>より、普通鋼スクラップ、特殊鋼スクラップについて、転炉・電炉それぞれにおける消費量を整理した（図表11：{1}～{4}）。また、普通鋼スクラップの消費量（{1},{3}）と特殊鋼スクラップの消費量（{2},{4}）をそれぞれ足し合わせて、電炉・転炉におけるスクラップ総消費量を求めた（{5},{6}）。次に、電炉・転

6 日本鉄鋼連盟「普通鋼・特殊鋼 品種別・用途別受注統計」（2020）

7 経済産業省生産動態統計調査事務局「経済産業省生産動態統計年報 鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計編 2019年版」（2020）

8 調査統計グループ経済産業省大臣官房「経済産業省生産動態統計月報 鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計編 2020年3月分」（2020）

9 鉄鋼新聞社「鉄鋼年鑑 令和元年度版」（2019）

10 関東鉄源協同組合「関東鉄源協同組合 HP」<http://www.kantotetsugen.com/index.html>（accessed Jan. 19, 2021）

11 日本鉄源協会「鉄源年報 第31号」（2020）

12 日本鉄源協会「クォータリー てっげん Vol. 64」（2015）

13 日本鉄源協会「クォータリー てっげん Vol. 83」（2020）

14 鉄鋼新聞社「鉄鋼年鑑 平成二十七年度版」（2014）

15 T. Oda, I. Daigo, Y. Matsuno, and Y. Adachi, “Substance flow and stock of chromium associated with cyclic use of steel in Japan,” ISIJ Int., vol. 50, no. 2, pp. 314-323, 2010

炉におけるスクラップ総消費量（{5},{6}）を、それぞれ普通鋼・特殊鋼の生産量で割ることで、転炉・電炉別の生産量あたりのスクラップ消費原単位を得た。この原単位は普通鋼と特殊鋼と同様であると仮定して、普通鋼・特殊鋼、転炉・電炉のそれぞれの生産量から、スクラップ消費量を求めた（{7}~{10}）。特殊鋼スクラップは全て特殊鋼の製造に消費されることを想定して、{11}={2}、{12}={4}と仮定した（{13}=0,{14}=0）。

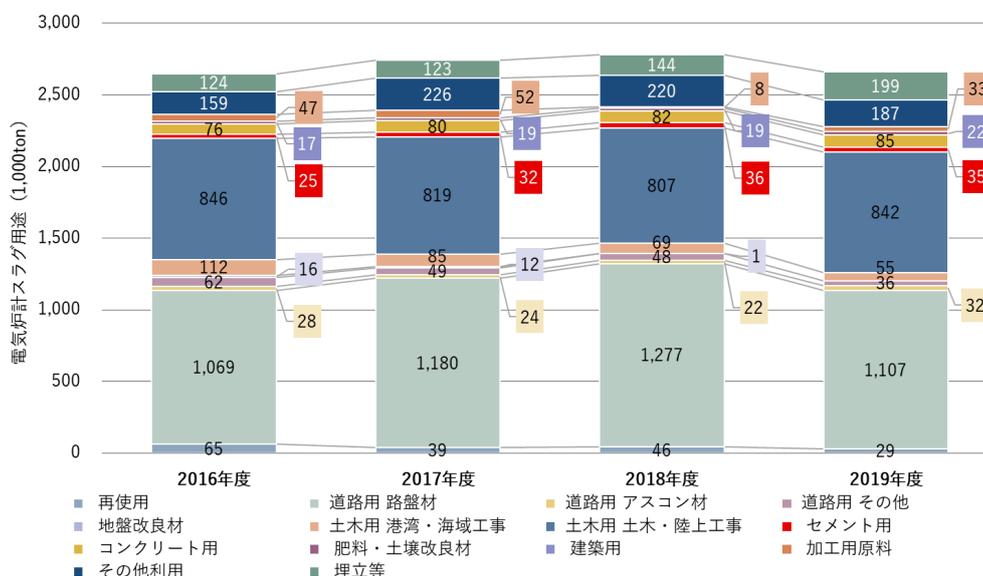
我が国における鉄鋼スラグ（普通鋼電炉スラグ）の発生量は、鉄鋼スラグ協会が発行する「鉄鋼スラグ統計年報（2020年度版）」を参考にした（図表12）。同統計では、用途別の使用量を公開しているため、「セメント用」に供給される電炉スラグ（2019年度は35千t）を利用した。スラグ中のクロム含有量は、既往文献やヒアリングにより明らかにした。なお、酸化スラグと還元スラグ別の供給量が不明であったため、スラグの発生比率によって按分している。

図表 11 スクラップ消費量の推計方法

	転炉			電炉		
	普通鋼	特殊鋼	合計	普通鋼	特殊鋼	合計
普通鋼スクラップ			{1}			{3}
特殊鋼スクラップ	{13}	{11}	{2}	{14}	{12}	{4}
合計	{7}	{8}	{5}	{9}	{10}	{6}

（出所） 東京大学村上研究室作成

図表 12 我が国における電気炉スラグの供給先



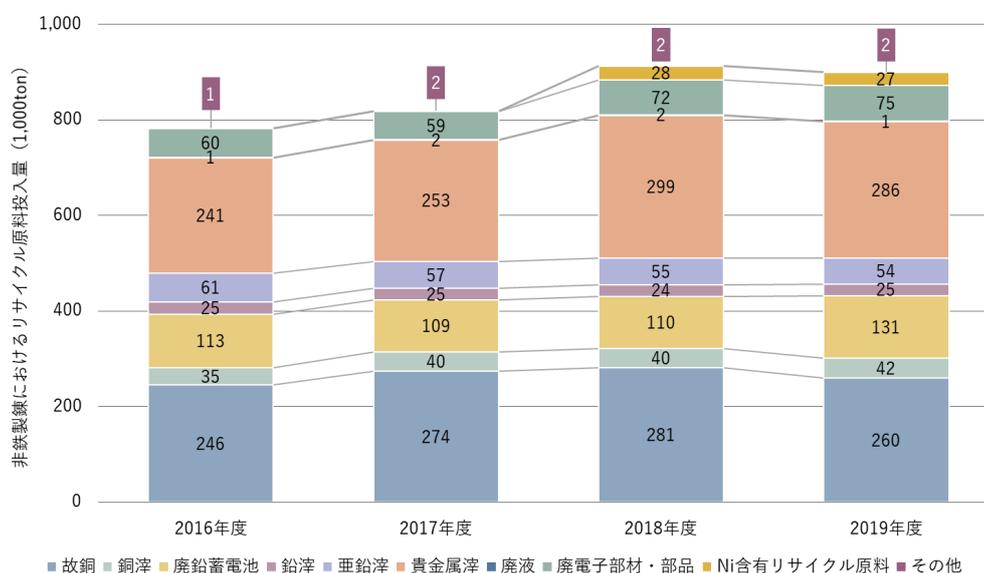
（出所） 鉄鋼スラグ協会「鉄鋼スラグ統計年報」をもとに三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

### 3.1.2.3 非鉄製錬

非鉄製錬（銅、鉛、亜鉛）に対する、リサイクル原料及び各種廃棄物・副産物の投入量は、金属鉱山会が発行する「鉱山」（2020年10月号）を参考にした（図表13、図表14）

このうち、特定の製錬工程（銅製錬、鉛製錬、亜鉛製錬）に投入されるものと、すべての製錬工程にも投入されるものは、ヒアリングをもとに、図表15に示す通りに振り分けた。なお、銅製錬、鉛製錬、亜鉛製錬のすべてに投入されると想定したものは、2019年度の各鋼種（銅、鉛、亜鉛）の総生産量をもとに按分した。また、非鉄製錬（銅、亜鉛）スラグの利用量は、日本鉱業協会の資料に記載のある販売実績（図表16）をもとに、比率を設定して、リサイクル原料・副産物等の投入量をもとに推計した。

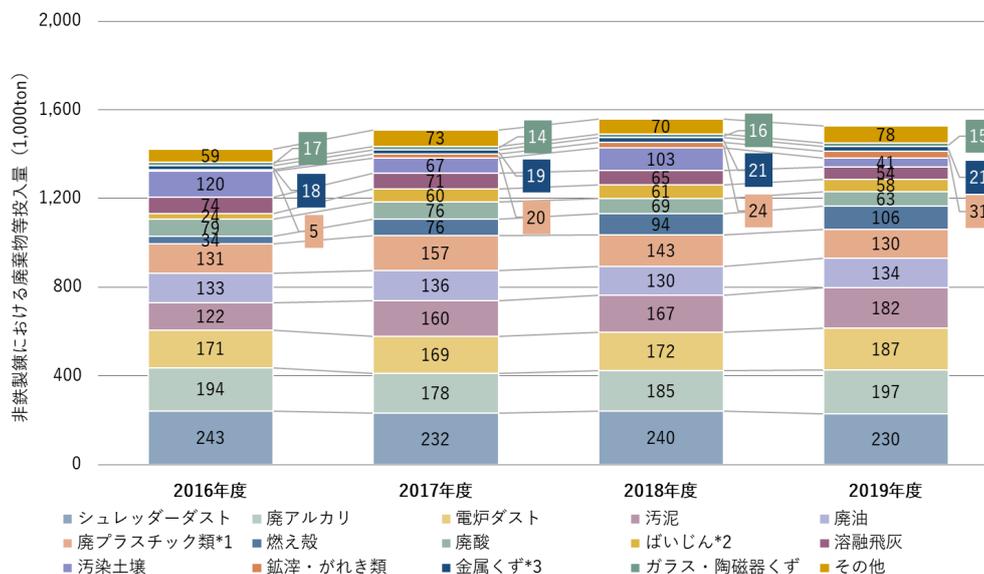
図表13 我が国の非鉄製錬におけるリサイクル原料の投入量



(注) 次の会員企業における使用量の合計値：住友金属鉱山(株)、中外鉱業(株)、東邦亜鉛(株)、DOWAホールディングス(株)、JX 金属(株)、日鉄鉱業(株)、野村興産(株)、古河機械金属(株)、三井金属鉱業(株)、三菱マテリアル(株)、日本冶金工業(株)、大太平洋金属(株)。「Ni含有リサイクル原料」の区分は2017年度以前はなし。

(出所) (一社) 金属鉱山会「鉱山」をもとに三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 14 我が国の非鉄製錬における廃棄物等の投入量



(注) 次の会員企業における使用量の合計値:住友金属鉱山(株)、中外鉱業(株)、東邦亜鉛(株)、DOWAホールディングス(株)、JX 金属(株)、日鉄鉱業(株)、野村興産(株)、古河機械金属(株)、三井金属鉱業(株)、三菱マテリアル(株)、日本冶金工業(株)、太平洋金属(株)。

\*1 「廃プラスチック類」にはシュレッダーダストを含まず

\*2 「ばいじん」には電炉ダスト・溶融飛灰を含まず

\*3 「金属くず」には電池類を含む

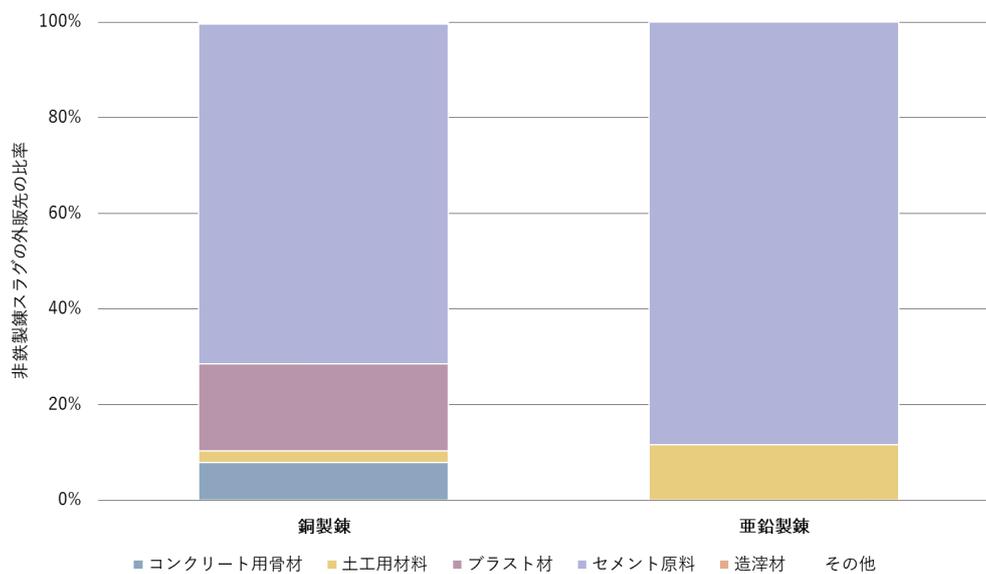
(出所) (一社) 金属鉱山会「鉱山」をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 15 非鉄製錬における各種リサイクル原料・廃棄物等の投入先

リサイクル原料	銅製錬	鉛製錬	亜鉛製錬	廃棄物等	銅製錬	鉛製錬	亜鉛製錬
故銅	●			シュレッダーダスト	●		
銅滓	●			電炉ダスト			●
廃鉛蓄電池		●		溶融飛灰			●
鉛滓		●		廃アルカリ	●	●	●
亜鉛滓			●	汚泥	●	●	●
貴金属滓	●			廃油	●	●	●
廃液	●	●	●	廃プラスチック類 (シュレッダーダストを除く)	●	●	●
廃電子部材・部品	●			燃え殻	●	●	●
Ni含有リサイクル原料				廃酸	●	●	●
その他	●	●	●	ばいじん (電炉ダスト・溶融飛灰を除く)	●	●	●
				汚染土壌	●	●	●
				鉱滓・がれき類	●	●	●
				金属くず (電池類を含む)	●	●	●
				ガラス・陶磁器くず	●	●	●
				その他	●	●	●

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 16 我が国の非鉄（銅・亜鉛）スラグの供給先比率



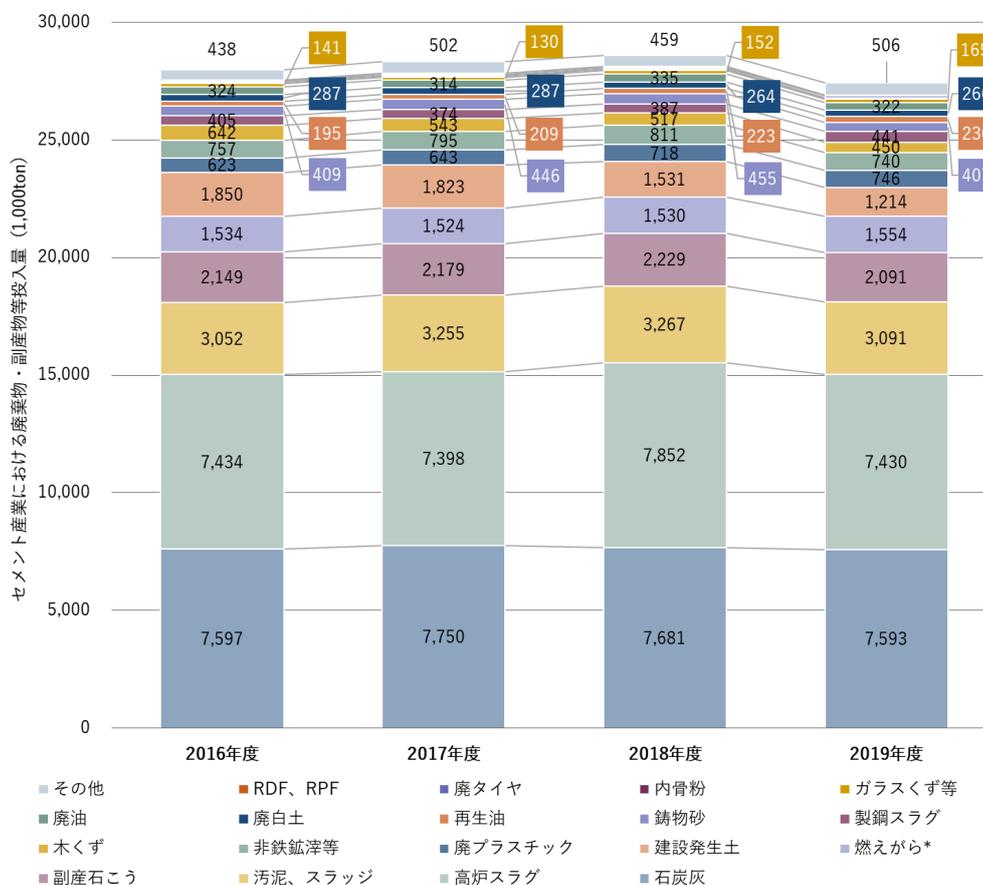
(注) 2016 年度から 2020 年度までの平均値

(出所) (一社) 日本鉱業協会資料をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.1.2.4 セメント

セメント産業への廃棄物等の投入量は、一般社団法人セメント協会が発行する「セメントハンドブック」（2021年度版）を参考にした（図表 17）。内訳の細分化が必要な部分は、個別にヒアリングを行い、内訳の比率（例えば、廃プラスチックとして供給される ASR・SR 比率）を設定したうえで、日本全国に拡大推計を行った。また、廃棄物・副産物等の成分情報は、既往文献及びヒアリング等によって収集した。なお、事業者により性質の似た廃棄物等でも異なる分類で取り扱われる可能性があること、同じ分類に含まれても性状が様々にあることが指摘されている。マテリアルフロー推計を行ううえで、蓋然性の高い成分情報を収集することは引き続きの課題である。

図表 17 我が国のセメント産業における廃棄物等投入量



(注) 「燃えがら」にはダスト・ばいじんが含まれ、石炭灰は含まない。

(出所) (一社)セメント協会資料をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.1.3. 成分分析の実施

成分情報が不足する廃棄物・副産物等、また代表性が低い廃棄物・副産物等を対象に、成分分析を実施した。具体的には、亜鉛製錬において、粗酸化亜鉛を生産する際に活用する普通鋼電炉ダストを対象に、全クロム及び六価クロムの分析を行った。異なる生産ロットから回収した電炉ダスト 10 検体を、ディスク型振動ミルを用いて粉碎し、分析試料を調製した。フッ素化水素酸処理を行ったのちに王水を加えて、マイクロ波により分解を行ったのちに、ICP にてクロム含有量を定量した。また、水溶性六価クロムは JCASI-53 に準じて分析を行った。

### 3.1.4. マテリアルフロー分析

収集した情報をもとに、素材産業間で取引される副産物・廃棄物等（スラグ、ダストなど）に伴う流通量（バルク量・クロム純分換算量）を推計した。

マテリアルフローの推計手法は、大きく 3 つに分類される（「積み上げ法」、「投入産出法」、「ハイブリッド法」）。それぞれ長所と短所があるため、算出対象やデータの入手可能性を考慮して、最適な手法を選択する必要がある。

「積み上げ法」は、各種統計資料などからデータを積み上げる方法である。例えば製品の生産量に対して、原材料の構成比や元素の構成を乗じることで、対象元素の流通量を算出する。製品の台数・個数を把握するのが困難なこと、同種の製品でも個別製品ごとに組成や材料構成が異なることが課題である。

他方、「投入産出法」は、産業連関表を援用する手法である。産業連関表とは、国内経済において一定期間に行われた財・サービスの産業間取引を金銭単位で整理した統計表である。これを物量単位に変換することで、マテリアルフローを推計する。網羅性の高い産業連関表をもとに推計を行うため、これを変換して求められるマテリアルフローも網羅性と完全性に優れている。他方で、マクロ経済を計量するために整理された産業分類を用いるため、個別資源・元素・素材のマテリアルフローを描くうえで、分類の粗い部分や、非常に細かい部分が混在していることが問題である。

また、「ハイブリッド法」は、積み上げ法と投入産出法など、複数の方法を組み合わせた手法であり、本調査ではこの手法を採用する。単一手法で網羅できるほどの情報が存在しないため、基本は「積み上げ法」により推計を行うものの、一部情報が不足するフローは、ヒアリングを参考にしながら、フローの総量を任意の比率で按分することで補完する。

### 3.1.5. 技術仕様の特定に関する検討

マテリアルフローの推計結果（クロムの純分換算量）をもとに、今後分離技術の導入が必要な個所を特定した。

## 3.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証テーマ2）

### 3.2.1. 再生資源の規格案の策定

#### 3.2.1.1 素材産業における忌避物質の整理

図表 18 に示す通り、素材産業では複数の物質が忌避物質としてみなされている。これらの忌避物質は歩留まり悪化、設備損傷・劣化、環境汚染・健康被害、製品品質の低下などの様々な悪影響を及ぼす。これらはいずれも各素材産業の採算性を悪化させるものである。忌避物質を適切に管理し、事前に混入を防ぐほか、効率的な対応（除去や希釈）することで、素材産業への影響を抑えることができる。

本事業では、3.2.1.2 に記載する理由から、鉄鋼電炉における銅、クロム、セメント事業者における塩素、クロムを優先的に管理すべき対象とし、これに関する規格案を作成した。

図表 18 素材産業における主な忌避物質及びその影響

素材産業主体	主な忌避物質	各素材産業での影響				
		歩留まり悪化	設備損傷・劣化	環境汚染・健康被害	製品品質の低下	
					主製品	副産物
鉄鋼電炉	銅	○			○	
	クロム					○
	スズ	○			○	
	リン				○	
	硫黄				○	
	窒素				○	
セメント	塩素		○		○	
	臭素		○			
	クロム				○	
	マグネシウム				○	
	ナトリウム				○	
非鉄製錬	臭素	○	○	○		
	アルミニウム	○				
	クロム					○
	水銀			○		
	ヒ素	○				

（出所）各種資料をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.2.1.2 対象とする再生資源及び忌避物質

#### (1) シュレッダースクラップ（鉄鋼電炉向け）

鉄鋼電炉では、再生原料中に銅が混入することがある。製鋼時に銅が混入すると、熱間加工時（圧延時）に銅が地鉄の結晶粒界に入ることによって結晶強度を弱め、表面割れを生じる。製品の品質低下につながるほか、歩留まりが低下する。そのため、銅は鉄鋼電炉における忌避物質となる。また、鉄鋼電炉では、再生原料中にクロムが混入することもある。製鋼時に発生するスラグはセメント資材として再資源化、処理されているが、これにクロムが混入するとセメント製品に要求される品質を満たさなくなる。国土交通省の通知（土壌の汚染に係る環境基準について）で、セメント及びセメント系固化材に対して六価クロムの溶出基準（検液 1L につき 0.5mg）を要求しているためである。また、同様に製鋼時に発生する製鋼煙灰にも酸化しやすいクロムが混入するが、製鋼煙灰を処理して亜鉛を再資源化する亜鉛製錬において亜鉛製錬スラグに濃集する。そのため、製鋼スラグと同様の理由から、亜鉛製錬スラグをセメント資材として再資源化することが困難になる。これらの理由からは、クロムも鉄鋼電炉における忌避物質となる。

これらの忌避物質は、ステンレス鋼スクラップや廃モーター等として鉄スクラップ中に混入する可能性がある。鉄リサイクルを担う電炉事業者は、これらの混入を目視で確認し、人海戦術で取り除くことしかできていない。特にクロム系ステンレス鋼は、普通鋼スクラップと同様に磁選で磁着物となるため、鉄スクラップ中のクロムの管理はほとんど行われていない状況である。

そのため、国内における発生量が比較的多く、また物理選別の適用が比較的容易と考えられる自動車や廃家電等のシュレッダー処理で得られる鉄スクラップを対象として、これらにおける忌避物質（銅、クロム）の許容品位に関する規格化を試みた。

#### (2) 廃プラスチック原燃料（セメント事業者向け）

セメント産業では、塩素は原料に含まれている鉛、亜鉛等の重金属を、沸点の低い塩化物の形で揮発させて除去する塩化揮発法に用いられる。そのため、原料の調合の際には塩素分を混合することがあるが、再生原料由来の塩素も含まれる。一方、塩素化合物はロータリーキルン内の高温域で揮発し、窯尻にある予熱器（プレヒーター）に移る<sup>16</sup>。予熱器で温度が低くなった塩素化合物は周囲の原料粉体表面に凝縮し、再度キルン内に戻る<sup>16</sup>。このようにセメント製造中に塩素化合物はキルンと予熱器を循環するが、この過程で予熱器とキルンの連結分付近等に塩素化合物を含む粉体が付着する<sup>16</sup>。付着した塩素化合物は、窯尻から投入される原料や揮発したガスの流れを阻害する<sup>16</sup>。これにより、操業が非効率となるほか、場合によっては操業停止となることもある。このほか、セメント製品中に塩素が多く残留した場合には、塩素が浸出することで鉄筋コンクリートの鉄筋腐食が生じるため、セメント製品の品質低下につながる。以上の理由から、塩素はセメント事業者における忌避物質となる。

また、セメント産業では、原料中にクロムが混入することがある。混入したクロムを塩化揮発法によって除去することはできないため（塩化クロムは沸点が高いため）、セメント製品中にクロムが残留することになる。セメント製品中にクロムが残留した場合、セメント製品に要求される品質を満たさなくなってしまう。これは国土交通省の通知（土壌の汚染に係る環境基準について）

<sup>16</sup> 伊藤光弘. セメント製造分野における資源リサイクル技術. SCEJ 39th Autumn Meeting (Sapporo, 2007) ([https://www.jstage.jst.go.jp/article/scej/2007f/0/2007f\\_0\\_1057/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/scej/2007f/0/2007f_0_1057/_pdf)) (2022年2月閲覧) を参考とした。

で六価クロムの溶出基準（検液 1L につき 0.5mg）を要求しているためである。この理由から、クロムもセメント事業者における忌避物質となる。

これらの忌避物質は、主に廃プラスチック原燃料（ASR を含む）から混入する可能性が高い。セメント事業者では、受け入れた廃プラスチック原燃料から塩素やクロムのみを事前に除去することが困難であり、他の原料と混ぜて希釈して対応するしかない状況である。

そのため、プラスチック資源循環や CO<sub>2</sub> 排出量削減（石炭の代替）という観点から、今後発生量が多くなると考えられる廃プラスチック原燃料を対象として、これらの忌避物質（塩素、クロム）の許容品位に関する規格化を試みた。

### 3.2.1.3 忌避物質の許容品位に関する規格の作成方針

鉄鋼電炉向けシュレグダースクラップにおける忌避物質（銅、クロム）、セメント事業者向け廃プラスチック原燃料における忌避物質（塩素、クロム）の許容品位に関する規格案を作成する。各再生資源における忌避物質の許容品位（ $C_{ti}$ ）は、生産する製品（鋼材、セメント製品）の種類や原料の投入比率によって異なる。そのため、各再生資源における忌避物質の許容品位を段階的に設定した規格案を作成した。

規格化にあたり、日本における代表的な許容品位（ $C_{ti}$ ）の推計を行った。なお、本実証では日本における代表的な許容品位を推計した。各再生資源における忌避物質の許容品位は、製品の種類（許容可能な水準が厳しい製品、許容可能な水準が緩い製品）及び原料の投入比率によってことなる。これらが異なる複数のパターンを想定し（図表 19 に記載のパターン1～パターン9）、各再生資源における忌避物質の許容品位を推計した。推計結果をもとに、各再生資源における忌避物質の許容品位を段階的に設定（第1等級、第2等級・・・）した規格案を作成した。

図表 19 再生資源における忌避物質の許容品位のパターン

		原料の投入比率		
		対象とする再生資源のみを投入	日本の平均的な原料投入比率	代表的な企業における原料投入比率
製品中の忌避物質許容品位	許容可能な水準が厳しい製品	パターン1: $C_{t1}$	パターン2: $C_{t2}$	パターン3: $C_{t3}$
	許容可能な水準が緩い製品	パターン4: $C_{t4}$	パターン5: $C_{t5}$	パターン6: $C_{t6}$
	より一般的な許容水準の製品	パターン7: $C_{t7}$	パターン8: $C_{t8}$	パターン9: $C_{t9}$

（注） $C_{t1}$ ～ $C_{t9}$ は忌避物質の許容品位を示す。推計方法は後述する。

（注）「対象とする再生資源のみを投入することを想定する場合」では、熱エネルギー源用途の他の再生原料及び石炭の代替として廃プラスチックのみを投入することを想定

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

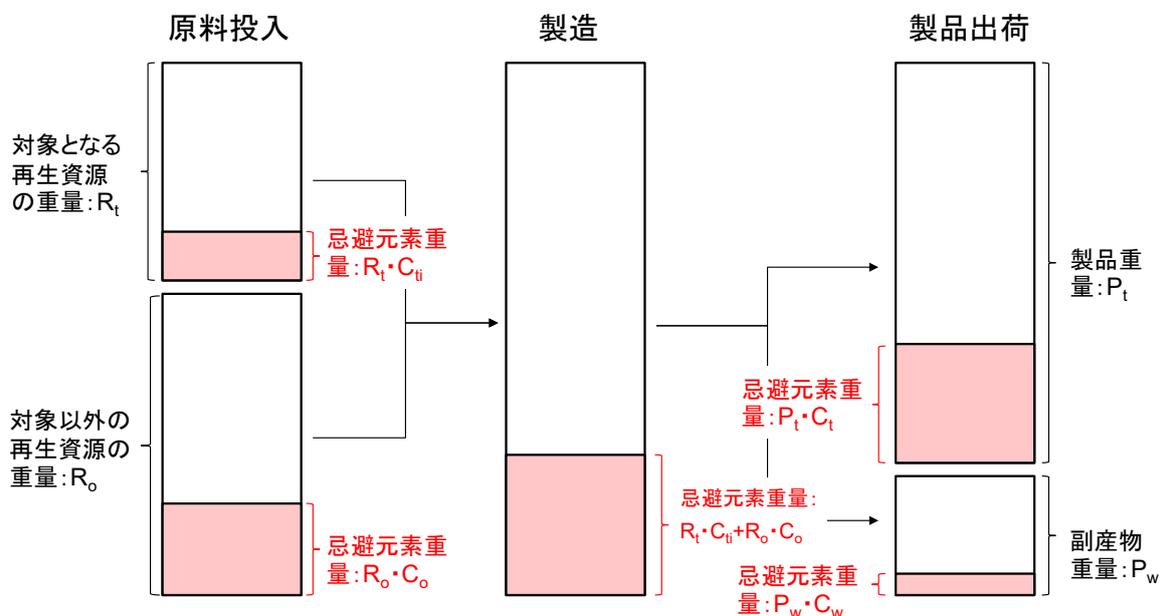
### 3.2.1.4 再生資源における忌避物質の許容品位の推計方法

各再生資源における忌避物質の許容品位 ( $C_{ti}$ ) の推計方法は以下の通りである。なお、推計の前提を 3.2.1.5 以降で示す。

$$C_{ti} = \frac{P_f \cdot C_f + P_w \cdot C_w - R_o \cdot C_o}{R_t}$$

$R_t$  : 対象となる再生資源 (原料) の投入重量 (製品重量あたり)  
 $C_{ti}$  : 対象となる再生資源における忌避物質の許容品位 ( $i=1\sim 9$ )  
 $R_o$  : 対象以外の原料の投入重量 (製品重量あたり)  
 $C_o$  : 対象以外の原料中の忌避元素品位  
 $P_f$  : 生産される製品の重量  
 $C_f$  : 製品における忌避物質の許容品位  
 $P_w$  : 生産される (発生する) 副産物の重量 (製品重量あたり)  
 $C_w$  : 副産物中の忌避元素品位

図表 20 本推計で想定するフローのイメージ



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.2.1.5 製品における忌避物質の許容品位の整理（シュレッダースクラップ）

#### (1) 対象とする製品

推計に用いる製品が許容可能な忌避物質品位 ( $C_f$ )<sup>17</sup>のデータを整理するにあたり、対象とする製品を特定した。対象とする製品は、鉄スクラップを多く扱う事業者が生産するものであり、かつ国内生産量の多い鋼材とした。国内で排出される鉄スクラップのうち 24,438 千 t を鉄鋼電炉事業者が取り扱っており、これは過半数を占める（図表 21）。本事業では、鉄スクラップを多く扱う事業者として鉄鋼電炉事業者をとりあげ、鉄鋼電炉事業者が扱う製品を対象とする。

図表 21 鉄スクラップの販売先別の流通量（2020 年）

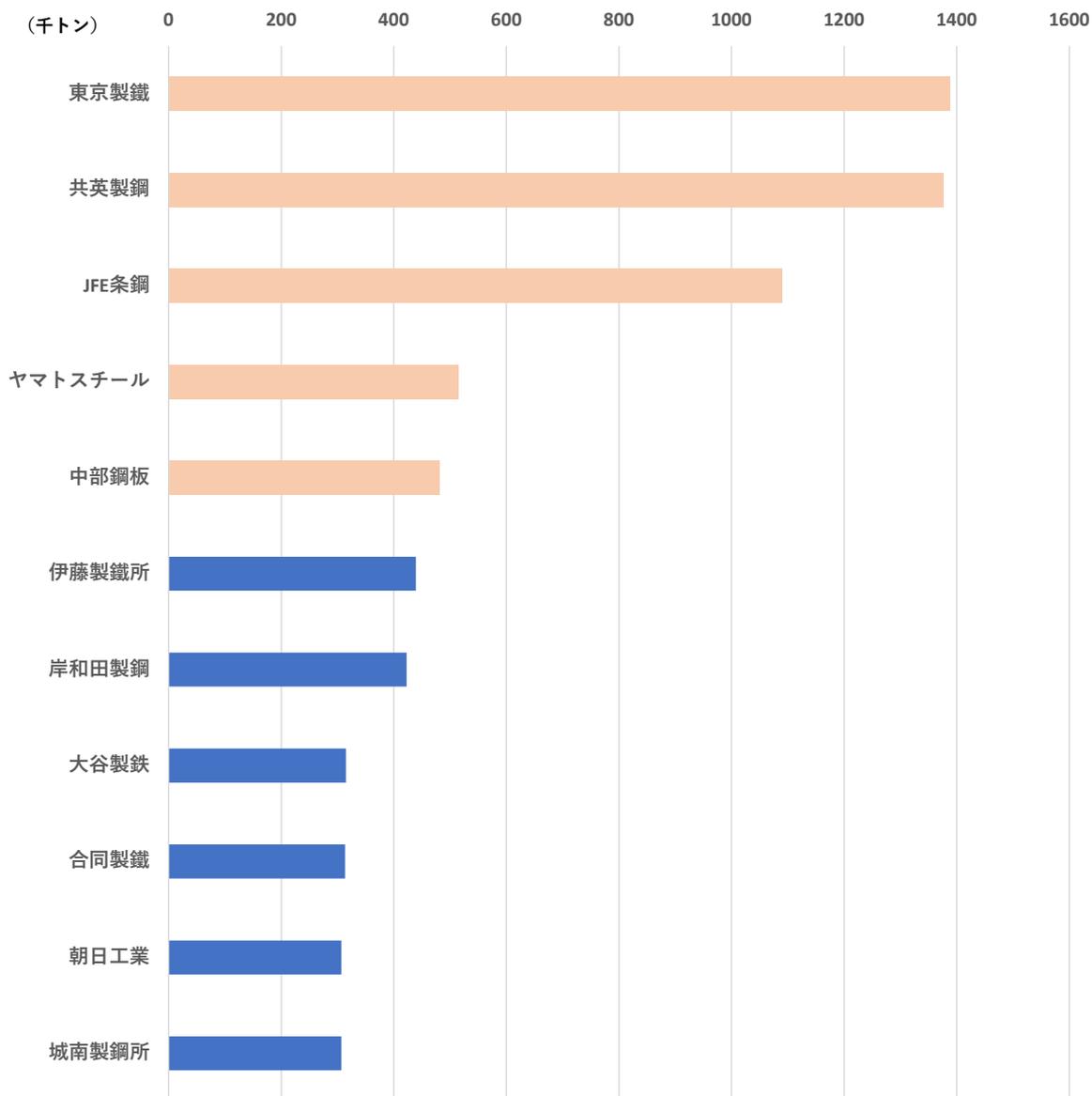


(出所) 日本鉄源協会「鉄源需給基礎情報」をもとに作成

<sup>17</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

鉄鋼電炉事業者のなかでも鉄スクラップの取扱量が多い事業者を対象とする。各事業者の鉄スクラップ取扱量を把握するためのデータがないため、鉄スクラップを用いて生産する鉄鋼製品の生産量が多い事業者を、取扱量が多い事業者とみなす。鉄鋼電炉事業者のうち、特に主要鉄鋼製品の生産量の多い上位5社は東京製鐵、共英製鋼、JFE条鋼、ヤマトスチール、中部鋼板である(図表22)。そのため、これら5社が取扱う製品を対象とする。

図表 22 鉄鋼電炉事業者における主要鉄鋼製品生産量(上位10社)



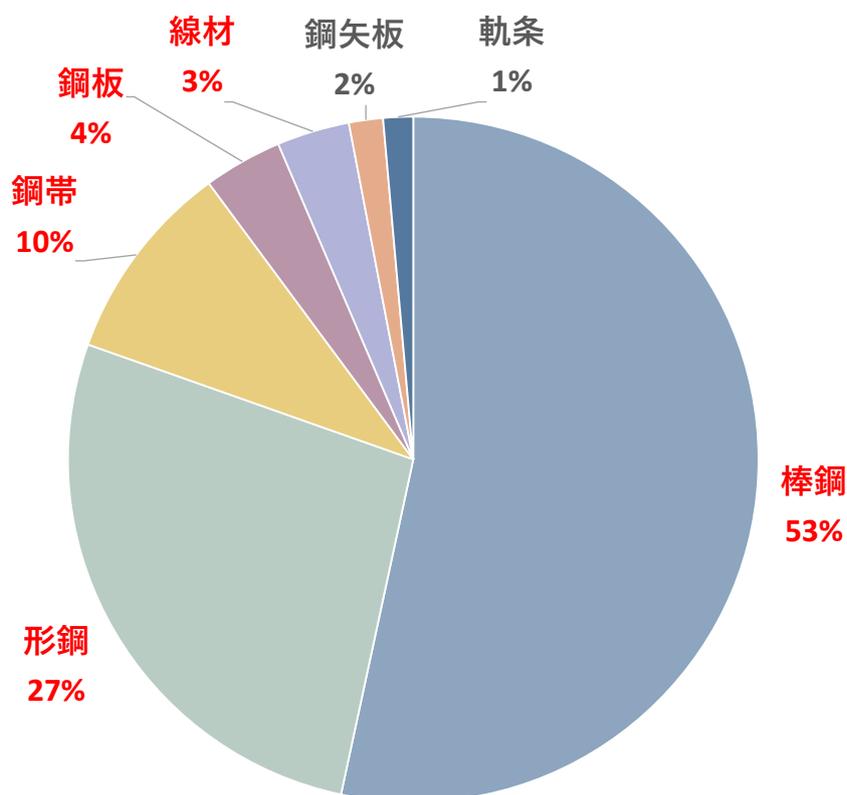
(注1) 主要鉄鋼製品を小形棒鋼、H形鋼、厚中板、普通線材、鋼矢板としている。

(注2) 朝日工業、城南製鋼所の生産量は同じと推計されたため、図表には11社含まれている。

(出所) 各種資料をもとに三菱UFJリサーチ&コンサルティング推計・作成

本事業では、国内生産量の多い鋼材を対象製品とした。電炉事業者が生産する鋼材のうち、国内生産量の多い鋼材上位 5 種類は「棒鋼」、「形鋼」、「鋼帯」、「鋼板」、「線材」である（図表 23）。そのため、上記で抽出した 5 社が扱う「棒鋼」、「形鋼」、「鋼帯」、「鋼板」、「線材」を対象製品とした。

図表 23 鉄鋼電炉事業者における鋼材（普通鋼熱間圧延鋼材）種類別の生産量内訳



(注) 普通鋼電炉の主な取扱製品として普通鋼熱間圧延鋼材を対象としている。  
 (出所) 鉄鋼統計等をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング推計・作成

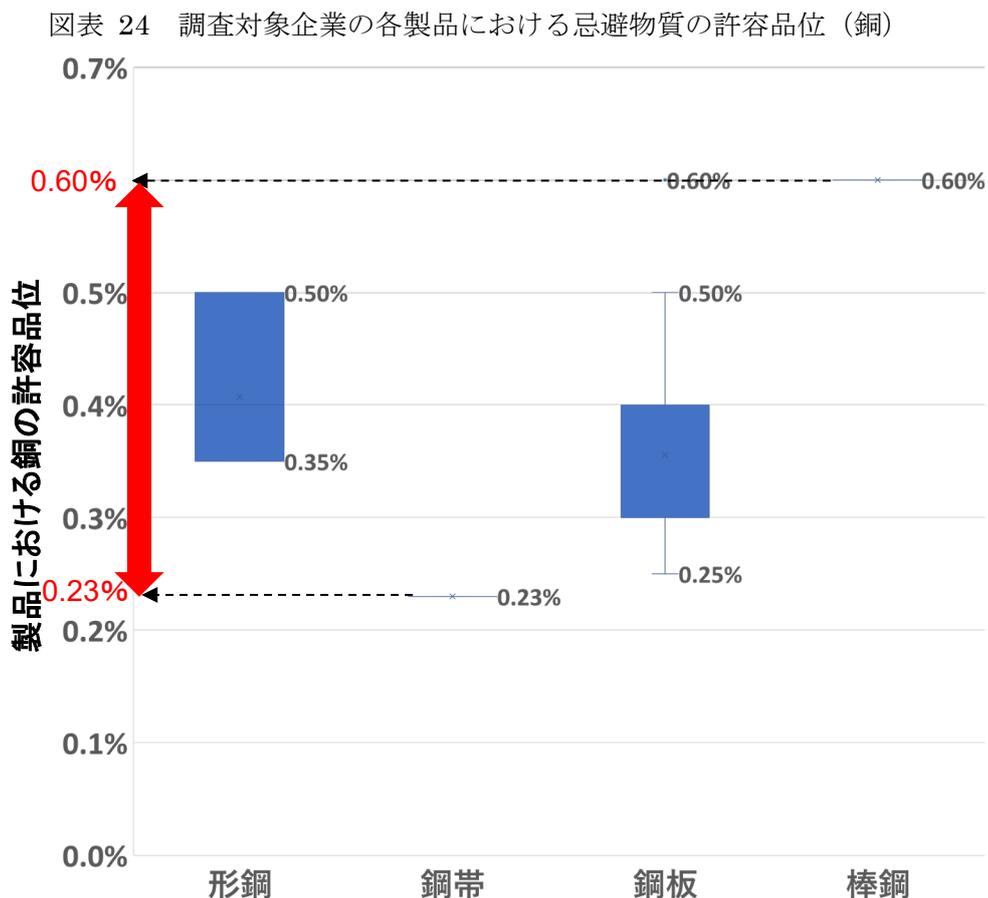
## (2) 各製品における忌避物質の許容品位の整理

各社の製品カタログをもとに、上記で対象とした製品における忌避物質の許容品位を整理した。忌避物質（銅、クロム）ごとに、最も厳しい水準（最小値）、最も緩い水準（最大値）、最もよく使用される水準（最頻値）を整理した。

銅における最も厳しい水準（図表 19 のパターン 1~3 で想定する水準）は 0.60%、最も緩い水準（図表 19 のパターンの 4~6 で想定する水準）は 0.23%、最もよく使用される水準（図表 19 のパターンの 7~9 で想定する水準）は 0.30%であった。

クロムにおける最も厳しい水準（図表 19 のパターン 1~3 で想定する水準）は 1.20%、最も緩い水準（図表 19 のパターン 4~6 で想定する水準）は 0.12%、最もよく使用される水準（図表 19 のパターンの 7~9 で想定する水準）は 0.20%であった。

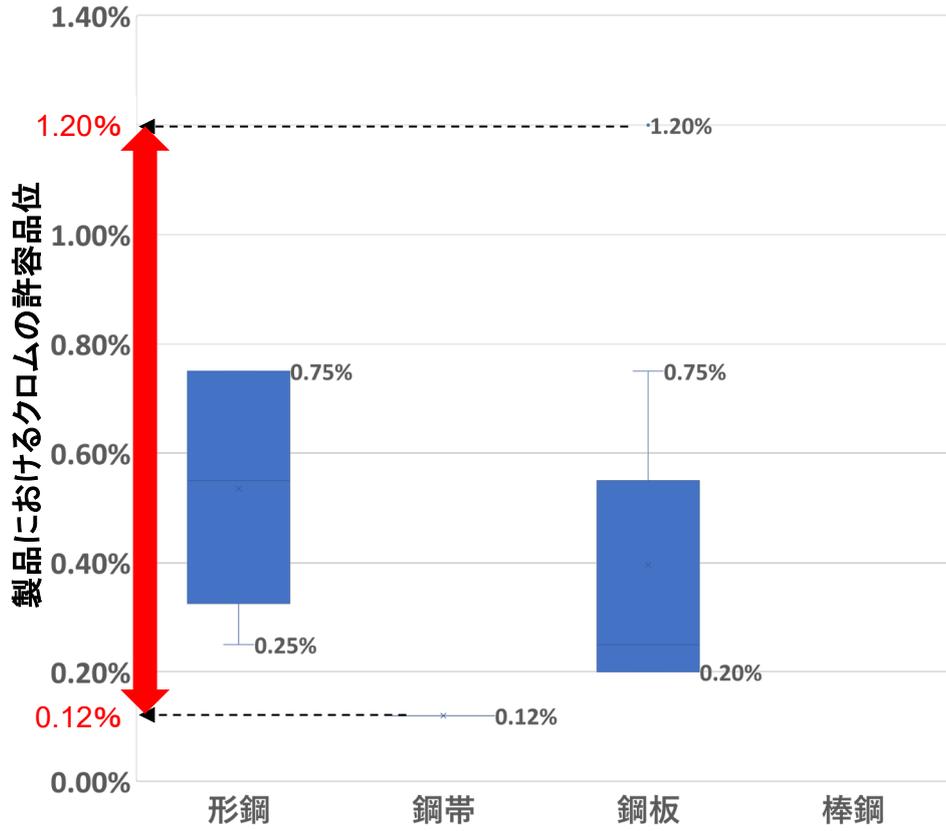
以上で整理した最も厳しい水準の値、最も緩い水準の値、最もよく使用される水準の値を「製品における忌避物質の許容品位（C<sub>f</sub>）<sup>18</sup>」として用い、再生資源における忌避物質の許容品位を推計した。



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

<sup>18</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

図表 25 調査対象企業の各製品における忌避物質の許容品位（クロム）

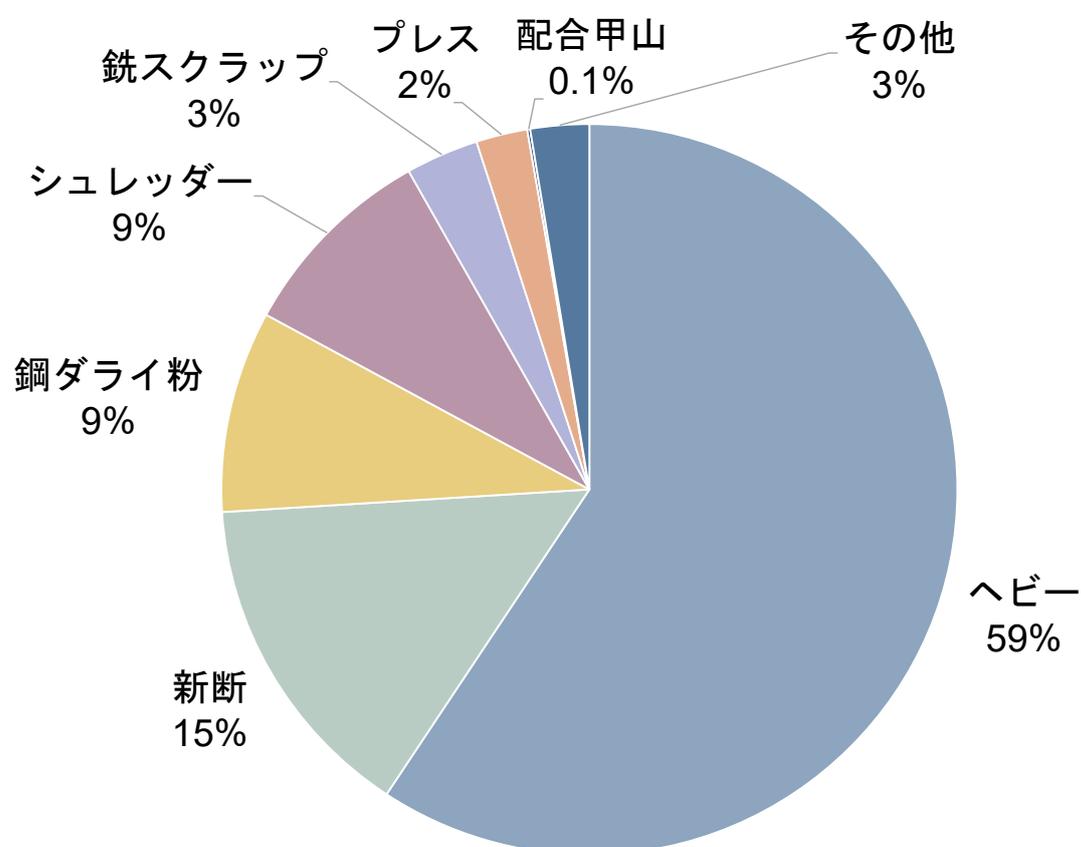


(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.2.1.6 原料の投入重量の整理（シュレッダースクラップ）

原料の投入比率は、シュレッダースクラップのみを原料として用いる場合のほか、日本全国の平均的な原料の投入比率及び日本の代表的な原料の投入比率の場合を想定した。日本全国の平均的な鉄スクラップの原料投入比率（ロットごと）に関するデータは整備されていないため、鉄スクラップの品種別購入比率が原料投入比率にあたるものと想定し、直近の品種別購入比率のデータをもとに投入重量を設定した。また、鉄鋼電炉事業者へのヒアリング調査等をもとに代表的な企業における再生資源投入比率を整理した。以上をもとに原料の投入重量 ( $R_t$ 、 $R_o$ )<sup>19</sup>を設定した。

図表 26 鉄スクラップの原料種類別購入量内訳（2020 年度）



（出所）鉄源協会「2020 年度（令和元年度）鉄源流通量調査結果」をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

<sup>19</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

### 3.2.1.7 対象以外の再生資源中の忌避元素品位の整理（シュレッダースクラップ）

対象（シュレッダースクラップ）以外の再生資源中の忌避元素品位はばらつきがある。そのため、以下に示す複数のケースに従って対象以外の再生資源中の忌避元素品位（C<sub>0</sub>）<sup>20</sup>を設定した。

図表 27 対象以外の再生資源中の忌避元素品位の想定ケース

ケース番号	対象以外の再生資源中の忌避元素品位の設定方法
ケース1	忌避物質品位を0と想定
ケース2	以下の文献より、日本における鉄スクラップ（棒鋼スクラップ）中の銅・クロムの品位（銅:0.278%、クロム0.175%）を設定 出所：醍醐市朗ら. 鉄鋼材における不純物元素濃度の日中間比較. 鉄と鋼. 2014, vol. 100, No. 6, p. 756-760.
ケース3	以下の文献より、鉄スクラップ中の銅・クロムの代表的な品位（銅:0.17%、クロム:0.30%）を設定 出所：醍醐市朗ら. 鉄鋼材における不純物元素濃度の日中間比較. 鉄と鋼. 2014, vol. 100, No. 6, p. 756-760.
ケース4	クロム系ステンレス鋼向けのクロムが全て鉄スクラップに混入すると想定したクロム品位（0.16%）を設定 出所：経済産業省「鉄鋼生産内訳月報」等をもとに推計 ※銅は該当無し
ケース5	以下の文献より、日本における鉄スクラップ（種類別）中の銅の品位を設定（ヘビー:0.23%、新断:0.10%、Aプレス:0.55%、Bプレス・Cプレス:0.10%、ダライ粉:0.30%、廃棄鋳型:0.15%、銑鉄:0.05%） 出所：（伊藤秀夫. 鉄鋼のリサイクルと不純物元素. 表面処理. 1997, vol. 48, No. 2, p. 132-137.） ※クロムは該当無し

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

<sup>20</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

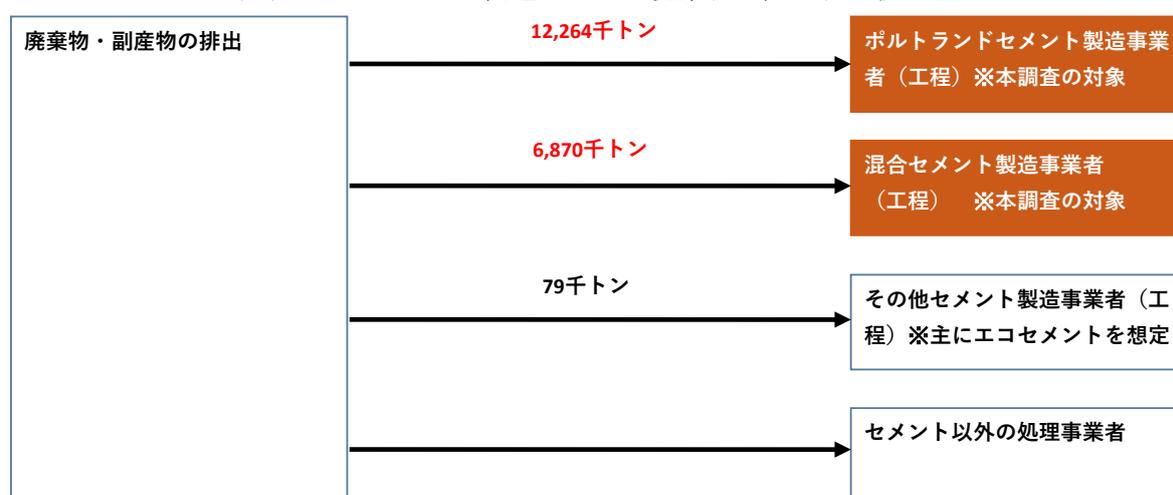
### 3.2.1.8 製品における忌避物質の許容品位（廃プラスチック原燃料）

#### (1) 対象とする製品

製品における忌避物質の許容品位品位（ $C_f$ ）<sup>21</sup>のデータを整理するにあたり、対象とする製品を特定した。対象とする製品は、廃棄物・副産物を原料として多く扱う事業者が生産するものであり、かつ国内生産量の多いセメント製品とした。

廃棄物・副産物を原料として多く扱う事業者はポルトランドセメントの製造事業者、混合セメントの製造事業者である（図表 28）。本事業ではこれらの事業者が扱う製品を対象とする。

図表 28 セメント製造における廃棄物・副産物の投入量

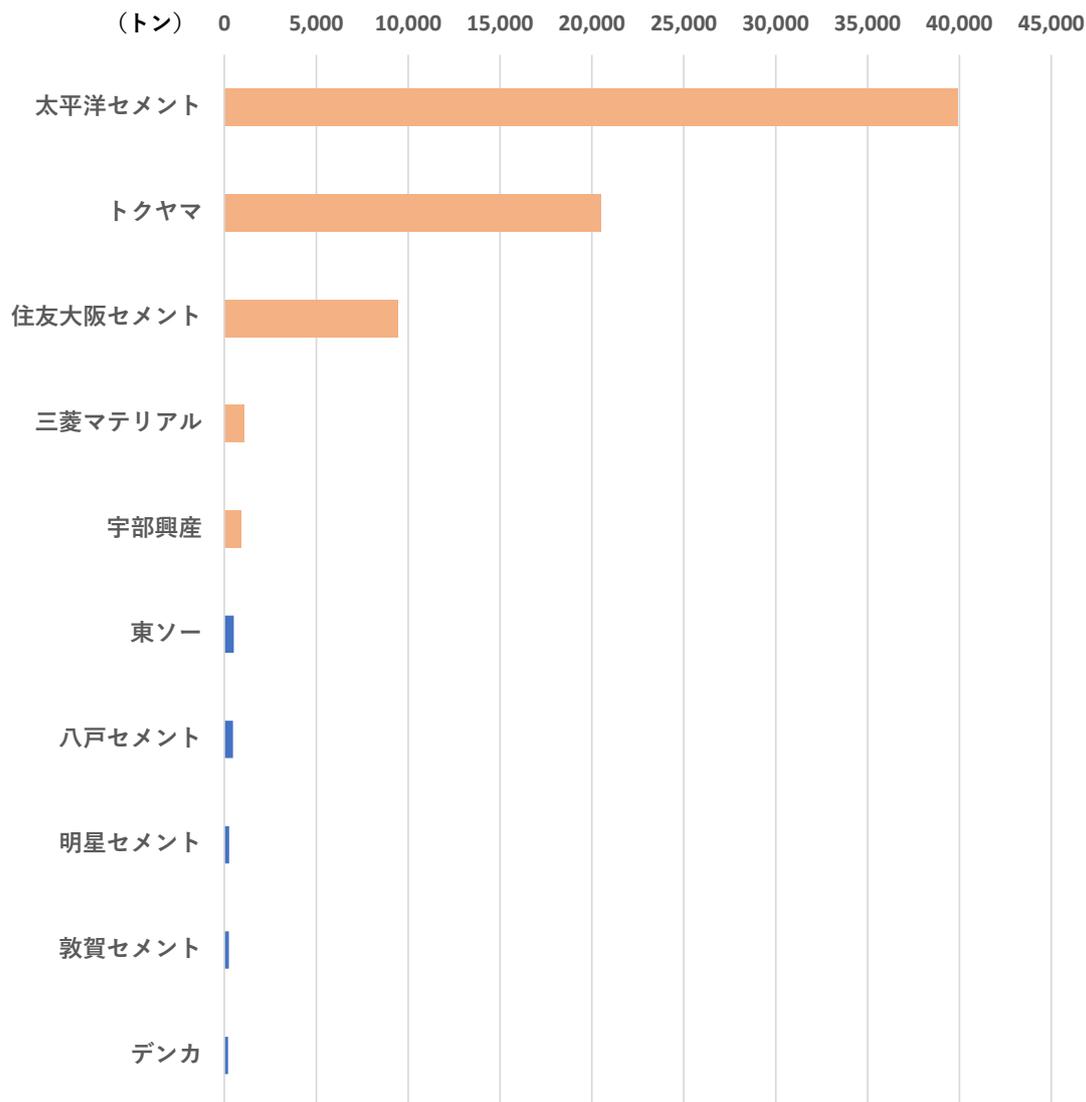


（出所）セメント協会「セメントの LCI データの概要」をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

<sup>21</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

ポルトランドセメントの製造事業者、混合セメントの製造事業者のなかでも廃プラスチック（ASR を含む）の取扱量が多い事業者を対象とする。本事業では ASR の投入量が多い事業者を対象とする。ポルトランドセメントの製造事業者、混合セメントの製造事業者のうち、特に ASR の投入量が多い上位 5 社は太平洋セメント、トクヤマ、住友大阪セメント、三菱マテリアル、宇部興産である（図表 29）。そのため、これら 5 社が取扱う製品を対象とする。

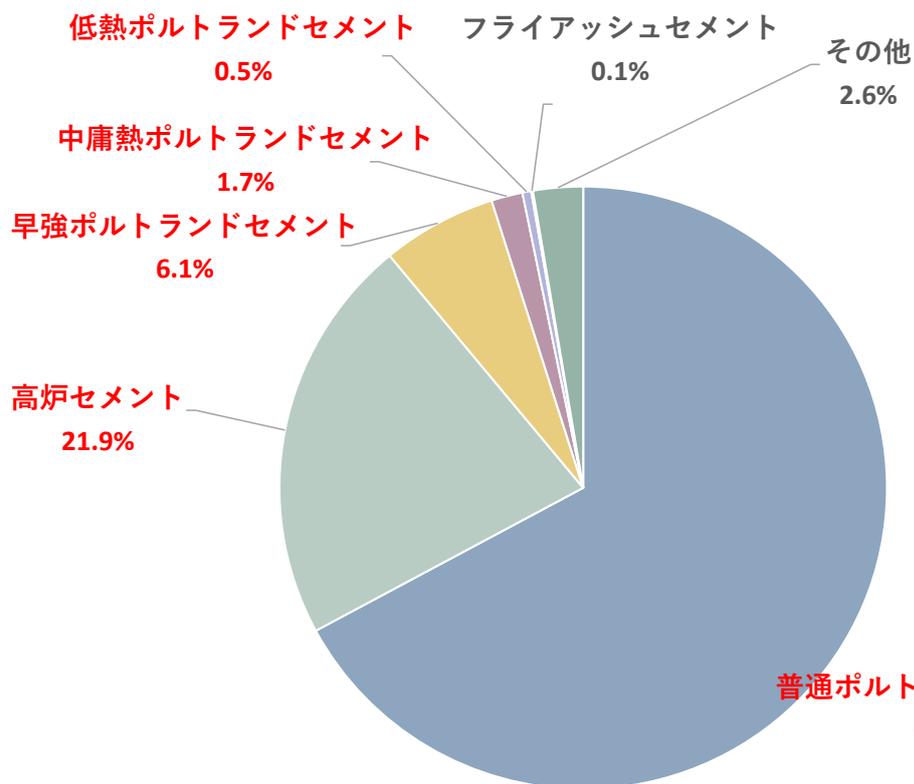
図表 29 セメント事業者における ASR の投入量（2021 年度）



(出所) 各種資料をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

本事業では、国内生産量の多いセメント製品を対象製品とした。セメント製品のうち、国内生産量の多い製品上位 5 種類は「普通ポルトランドセメント」、「高炉セメント」、「早強ポルトランドセメント」、「中庸熱ポルトランドセメント」、「低熱ポルトランドセメント」である(図表 30)。そのため、上記で抽出した 5 社が扱う「普通ポルトランドセメント」、「高炉セメント」、「早強ポルトランドセメント」、「中庸熱ポルトランドセメント」、「低熱ポルトランドセメント」を対象製品とした。

図表 30 セメント製品種類別の生産量内訳 (2020 年)



(出所) セメント協会「セメントハンドブック」をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

## (2) 各製品における忌避物質の許容品位の整理

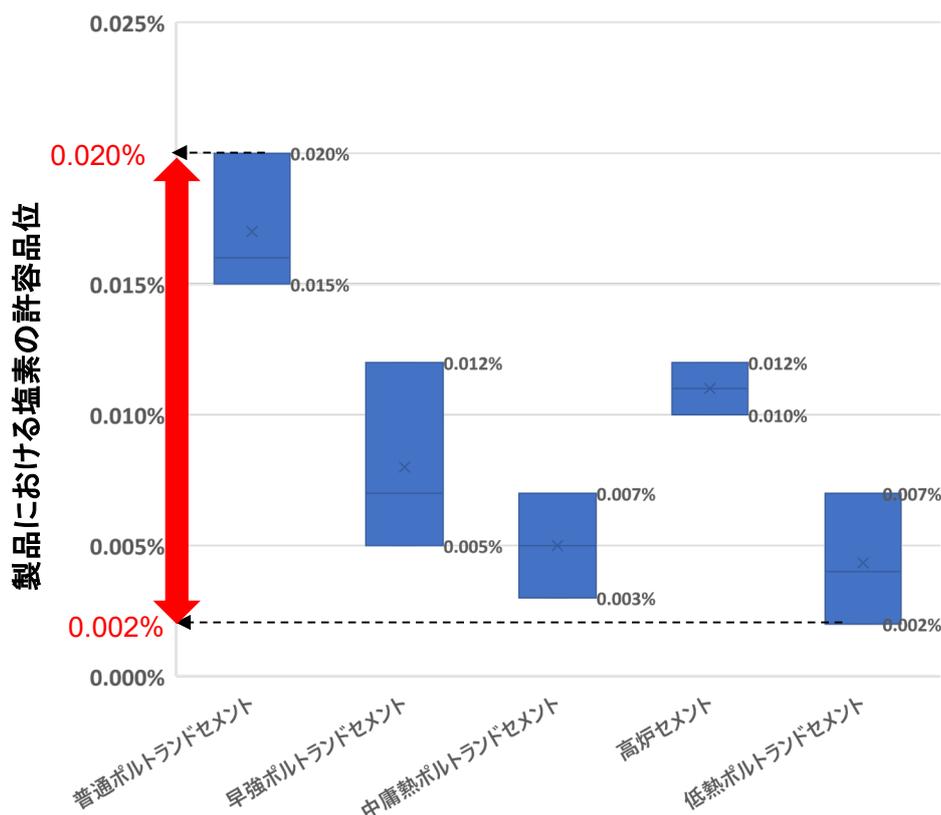
各社の製品カタログをもとに、上記で対象とした製品における忌避物質の許容品位を整理した。忌避物質（塩素、クロム）ごとに、最も厳しい水準（最小値）、最も緩い水準（最大値）、最もよく使用される水準（最頻値）を整理した。

塩素における最も厳しい水準（図表 19 のパターン 1~3 で想定する水準）は 0.002%、最も緩い水準（図表 19 のパターン 4~6 で想定する水準）は 0.020%、最もよく使用される水準（図表 19 のパターン 7~9 で想定する水準）は 0.007%であった。

クロムにおける最も厳しい水準（図表 19 のパターン 1~3 で想定する水準）は 0.0073%、最も緩い水準（図表 19 のパターン 4~6 で想定する水準）は 0.0095%であった。なお、クロムの許容品位が明らかな製品は少なく、最もよく使用される水準として最頻値をとることはできなかった。

以上で整理した最も厳しい水準の値、最も緩い水準の値、最もよく使用される水準の値を「製品における忌避物質の許容品位（C<sub>f</sub>）<sup>22</sup>」として用い、再生資源における忌避物質の許容品位を推計した。

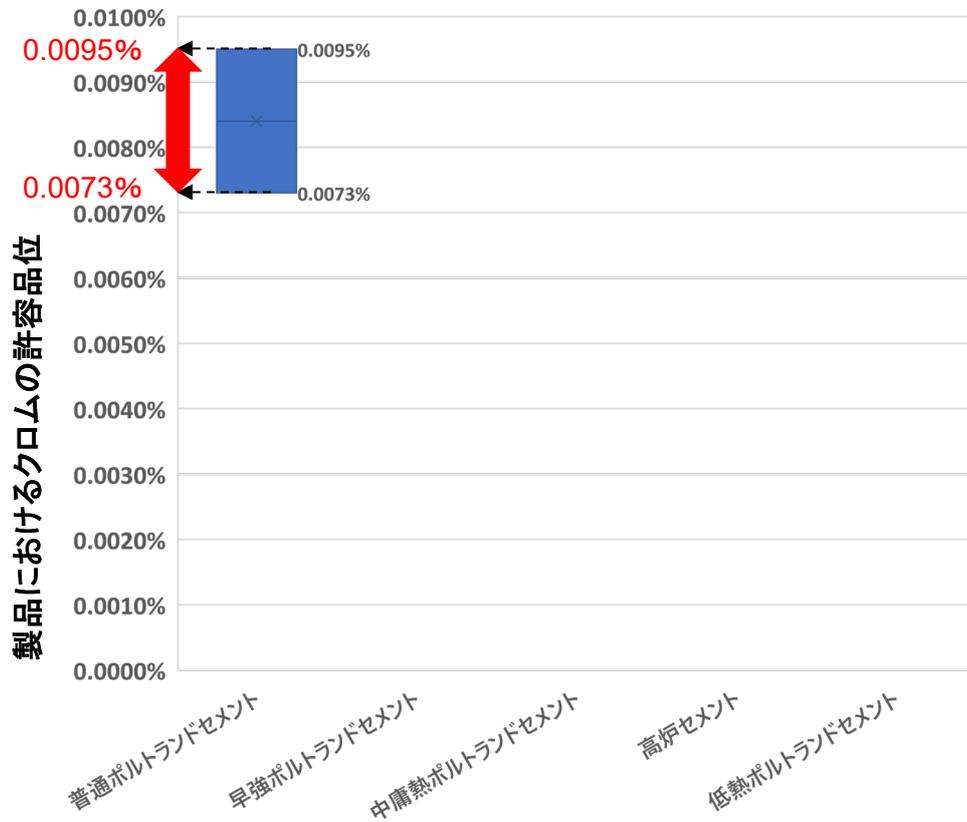
図表 31 調査対象企業における各製品の忌避物質許容品位（塩素）



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

<sup>22</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

図表 32 調査対象企業における各製品の忌避物質許容品位（クロム）



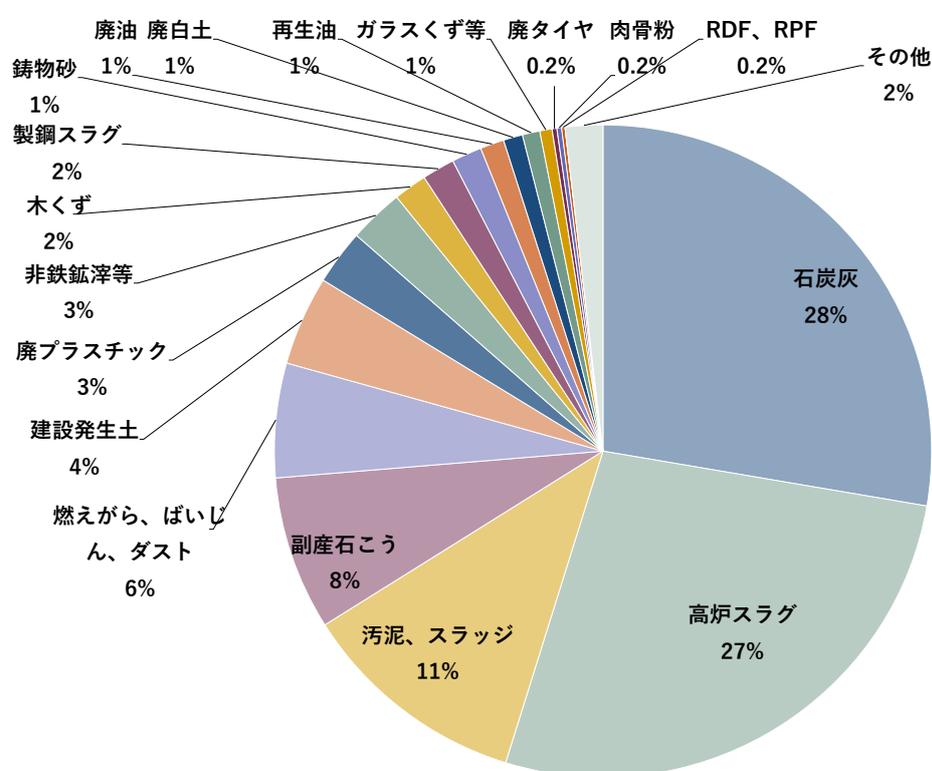
(注) 早強ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、高炉セメント、低熱ポルトランドセメントにおけるクロムの許容品位は公開されていない。

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.2.1.9 再生資源（原料）の投入重量（廃プラスチック原燃料）

原料の投入比率は、廃プラスチック原燃料のみを原料（熱エネルギー用途）として用いる場合のほか、日本全国の平均的な原料の投入比率及び日本の代表的な原料の投入比率の場合を想定した。日本全国の平均的な原料投入比率（ロットごと）に関するデータは整備されていないため、セメント業界の原料種類別使用比率が原料投入比率にあたるものと想定し、直近の原料種類別使用比率をもとに投入重量を設定した。また、セメント事業者へのヒアリング調査等をもとに代表的な企業における再生資源投入比率を整理した。以上をもとに原料の投入重量（ $R_t$ 、 $R_o$ ）を設定した<sup>23</sup>。

図表 33 セメント業界における再生資源の種類別使用比率（2019年度）



(出所) セメント協会ウェブサイトをもとに三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

<sup>23</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

### 3.2.1.10対象以外の再生資源中の忌避元素品位（廃プラスチック原燃料）

対象（廃プラスチック原燃料）以外の再生資源中の忌避元素品位はばらつきがある。そのため、以下に示す複数のケースに従って対象以外の再生資源中の忌避元素品位（C<sub>o</sub>）<sup>24</sup>を設定した。

図表 34 対象以外の再生資源中の忌避元素品位の想定ケース

ケース番号	対象以外の再生資源中の忌避元素品位の設定方法
ケース1	忌避物質品位を0と想定
ケース2	既存文献及び過去調査結果をもとに含有量設定。分析結果（文献に記載される分析結果含む）の平均値を使用。
ケース3	既存文献及び過去調査結果をもとに含有量設定。分析結果（文献に記載される分析結果含む）の最大値を使用。
ケース4	既存文献及び過去調査結果をもとに含有量設定。分析結果（文献に記載される分析結果含む）の最小値を使用。

（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

<sup>24</sup> 引数の表記は3.2.1.4に示す推計方法に対応するもの

## 3.2.2. 回収した再生資源の評価及び規格案の改善検討

### 3.2.2.1 シュレッダースクラップ（鉄鋼電炉向け）

3.2.1 で策定するシュレッダースクラップ（鉄鋼電炉向け）の規格案が、中間処理業者にとって実現可能なものであるかを検討する。本実証ではケーススタディとして、3.3.1 の解体・破碎・選別実証で回収・評価した自動販売機由来のシュレッダースクラップが、規格案が定める各等級の水準を満たすものであるかを確認する。

同実証で回収・評価したシュレッダースクラップ中の忌避物質品位が、規格案における各等級の水準を満たさない場合には、規格案改善の必要性及び改善の方向性を検討する。

### 3.2.2.2 廃プラスチック原燃料（セメント事業者向け）

3.2.1 で策定する廃プラスチック原燃料（セメント事業者向け）の規格案が、中間処理業者にとって実現可能なものであるかを検討する。本実証ではケーススタディとして、3.3.1 の解体・破碎・選別実証で回収・評価した自動販売機由来のダスト（廃プラスチック原燃料にあたるもの）が、規格案が定める各等級の水準を満たすものであるかを確認する。

同実証で回収・評価したダスト中の忌避物質品位が、規格案における各等級の水準を満たさない場合には、規格案改善の必要性及び改善の方向性を検討する。

### 3.3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証テーマ3）

#### 3.3.1. 新規プロセス仕様案に基づく解体・破碎・選別処理の実施

##### 3.3.1.1 忌避物質含有部品の特定

事前の部品回収により、破碎・選別後の回収物に含まれる忌避物質を低減することを目的として、本実証でケーススタディとして取り上げる使用済み自動販売機を対象に、忌避物質（銅、クロム）を含む部品の特定を行う。

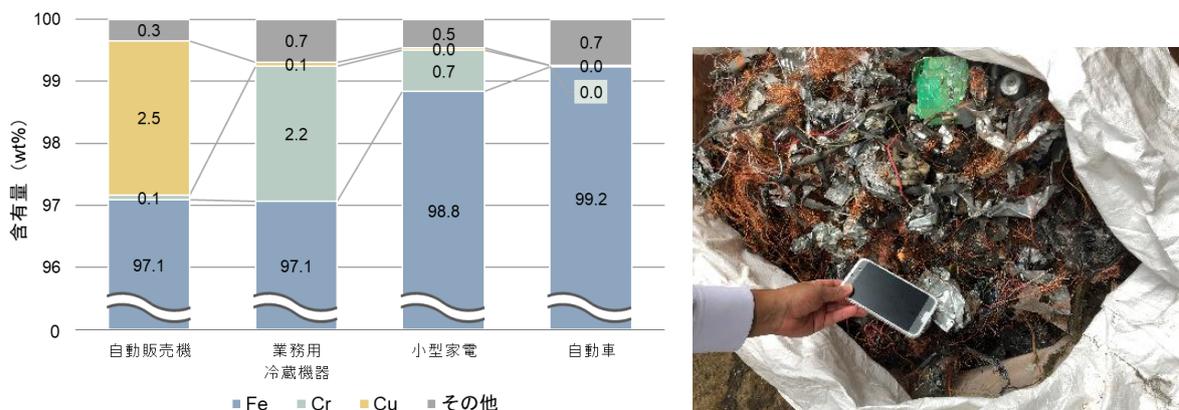
使用済み自動販売機や自動車、小型家電を破碎・選別し、回収した鉄スクラップの成分分析を行った。使用済み自動販売機から回収した鉄スクラップは、自動車や小型家電を処理したスクラップと比較して、銅の含有量は高く、クロムの含有量は低い傾向にあった。使用済み自動販売機から回収した鉄スクラップには、目視でも銅線・コイルや銅管の混入している様子が確認できる（図表 35）。これらの結果から、使用済み自動販売機から回収する鉄スクラップの品質改善には、銅含有部品の管理が重要であると考えられる。

既存調査<sup>25</sup>では、缶タイプ 96 台、カップタイプ 42 台の合計 138 台を解体・処理したときの、自動販売機の構成部素材と構成比が報告されている（図表 36）。もっとも大きな割合を占めるのは鉄であり、重量比で全体の 80%弱を占めている。また、銅含有部品として、モーターやコンプレッサー、配線、基板、熱交換器等が想定され、全体の 10%弱を占めている。なお、自動販売機にはステンレス鋼も使用されており、これら部素材にはクロムが含まれると想定される。そこで、銅に加えて、クロムを含む部品も分析の対象とした。

特許情報やヒアリングをもとに、使用済み自動販売機から、銅及びクロム含有部品を取り外し、可能な限り素材単位まで分解した。そのうえで、ハンドヘルド XRF により、銅やクロムの成分分析を行った。各部品や素材の重量を計測し、XRF で実測した銅・クロムの成分情報をもとに、これら部品中の銅・クロム含有量を算出した。なお、ハンドヘルド XRF では表面近傍の成分分析しかできないが、素材表面とバルクの成分は一定としている。また、作業の安全上、やむを得ず素材単位まで分解が難しい部品は、作業者の目視等をもとに、素材別の重量比を推測し、部品重量に掛けることで、各素材の重量を推計した。

<sup>25</sup> 経済産業省「平成 15 年度モデル循環システム事業（飲料用自動販売機適正リサイクルシステムの構築事業）」

図表 35 自動販売機を破砕・選別した鉄スクラップの品質（左：分析値、右：外観）



(注) 分析値は各母材に対して同様の破砕・選別処理を行って回収した磁着物を縮分し、一定量を完全に溶解させたうえで XRF により成分分析を行ったもの。

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 36 自動販売機を構成する部品（銅及びクロムが含まれると想定されるもの）

品名	重量	構成比	品名	重量	構成比
鉄	35,991 kg	78.3%	液体	81 kg	0.2%
樹脂	2,624 kg	5.7%	断熱フロン	44 kg	0.1%
モーター	1,106 kg	2.4%	コンデンサー	40 kg	0.1%
コンプレッサー	1,057 kg	2.3%	ポリタンク・ケース	33 kg	0.1%
配線	881 kg	1.9%	ヒーター	30 kg	0.1%
基板	660 kg	1.4%	ゴミ	23 kg	0.1%
ウレタン	659 kg	1.4%	冷媒フロン	20 kg	0.0%
ステンレス	602 kg	1.3%	ショックアブソーバー	8 kg	0.0%
熱交換器	426 kg	0.9%	粉（コーヒー等）	7 kg	0.0%
トランス	377 kg	0.8%	乾電池	6 kg	0.0%
銅管	317 kg	0.7%	ゲージ	3 kg	0.0%
真鍮	178 kg	0.4%	アルミ枠	2 kg	0.0%
コインボックス	158 kg	0.3%	防音材	0 kg	0.0%
非鉄	143 kg	0.3%	空缶	0 kg	0.0%
ダスト	129 kg	0.3%	合計	45,946 kg	100.0%
ホース	126 kg	0.3%	銅含有部品	4,343 kg	9.5%
ガラスウール	123 kg	0.3%	クロム含有部品	640 kg	1.4%
蛍光灯類	93 kg	0.2%			

(注) 缶タイプ 96 台、カップタイプ 42 台の合計 138 台を解体・処理した際の部品重量（分解処理期間）平成 15 年 11 月 10 日～12 月 12 日

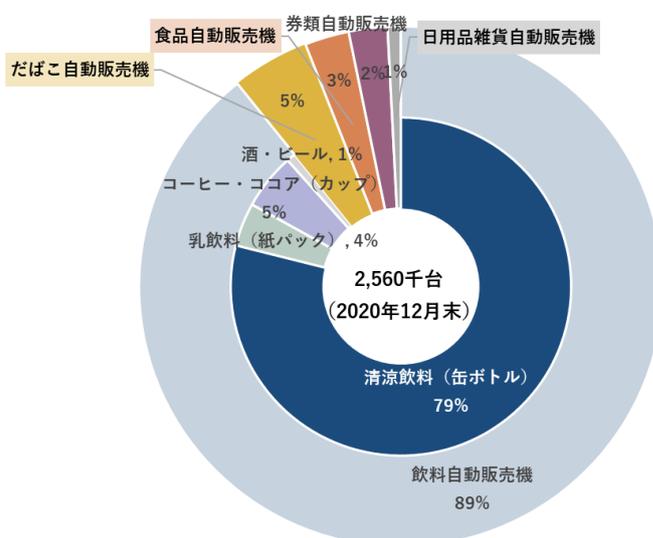
(出所) 経済産業省「平成 15 年度モデル循環システム事業（飲料用自動販売機適正リサイクルシステムの構築事業）」をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

なお、忌避物質含有部品を特定するうえで、自動販売機にも種類を考慮する必要がある。両替機などの自動サービス機を除いても、自動販売機では缶ボトル、紙パック、カップといった、多様な商品を取り扱っている。取扱う商品によって、取出口の形状・機構や温度が異なり、構成部品や素材が異なる可能性がある。また、メーカーや年式によっても、忌避物質含有量が異なる可能性がある。

一般社団法人日本自動販売システム機械工業会の統計では、2020 年末の自動販売機普及台数において、飲料用自動販売機のうち 89%、自動サービス機を除く自動販売機全体のうち 79%が、缶ボトル用自動販売機とされる（図表 37）。また、事業者へのヒアリングの結果、実態として、缶ボトル用自動販売機が最も多く入荷されていることを確認した。そこで、本事業では、缶ボトル用自動販売機を対象に分析を行い、また後段の解体・破碎・選別実証を実施することとした。

部品の解体及び成分分析は、共同実施者である中間処理事業者で実施した。図表 38 に示す各部品を回収し、それぞれ分析を行った。

図表 37 機種別・中身商品別の自動販売機普及台数



(注) 自動サービス機 (両替機、自動精算機、コインロッカー等) を除く

(出所) 一般社団法人日本自動販売システム機械工業会「普及台数 (2020 年 (令和 2 年) 版)」  
をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 38 解体・分析対象部品

モーター	ヒーター	ショックアブソーバー
コンプレッサー	トランス	ハンドルロック
熱交換器	配線	コイン投入口・コインメック
銅管	基板	背面鋼板
ラック		

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.3.1.2 解体・破碎・選別試験の実施

3.3.1.1 で特定した銅及びクロム含有部品のうち、法令で回収が義務付けられている部品に加えて、破碎・選別工程で分離が困難と想定される部品を対象に、事前に回収を行った。追加的に解体を行う部品として、冷却装置、リモコン、コインメック（コイン投入口を含む）、ハンドルロック、ラックを選定した。

「ブランク」は法令で回収が必要な電池、蛍光灯、フロン類のみを解体するものであり、既存の処理方法に該当する。これに対して、「解体パターン②（銅・クロム緻密解体）」では、銅及びクロム含有部品をすべて解体することを想定した。「解体パターン①」は作業性を考慮して、銅及びクロム含有量の多い部品である冷却装置とリモコンのみ取外した（図表 39）。各パターンに従って解体した筐体は、同一条件でそれぞれ破碎・選別を行うことで、事前解体が回収物の品質に与える影響を明らかにする。

破碎・選別工程による影響を確認するため、共同実施事業者（2社）で試験を行った。試験1回当たり、缶ボトル用自動販売機 30 台程度（約 1t）を解体し、筐体を破碎・選別した。選別の結果として、磁着物、ミックスメタル、ダストを回収し、それぞれ重量を計測した。

図表 39 各解体パターンにおける事前解体対象部品

解体・選別フロー	回収対象部品・回収物	ブランク (法令対応のみ)	解体パターン① (作業性を考慮)	解体パターン② (銅・クロム緻密解体)
使用済み自動販売機 ↓ 解体 ↓ 筐体	電池	●	●	●
	蛍光灯 <sup>*1</sup>	●	●	●
	フロン類 <sup>*2</sup>	●	●	●
	冷却装置(配線含む)		●	●
	リモコン(基板・配線含む)		●	●
	コインメック(コイン投入口含む)			●
	ハンドルロック			●
	ラック			●
↓ 破碎				
↓ 磁選	磁着物	(パターンごとに回収して重量計測/成分分析)		
	非磁着物			
↓ 風選等	ダスト	(パターンごとに回収して重量計測/成分分析)		
	ミックスメタル	(パターンごとに回収して重量計測/成分分析)		

※事業者の選別ラインにより、磁選と風選の順番が前後する。また、複数の選別装置でミックスメタルを回収する場合には、ミックスメタル①/ミックスメタル②と表記する。

(注)

\*1 蛍光灯ではなく LED が使用されていた場合には回収対象としない

\*2 代替フロンが使用されている場合には回収対象としない

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.3.1.3 回収した産物の評価

事前解体により、銅やクロムを含む部品を取り除くことで、磁着物中の銅やクロム品位は低下すると考えられる。そこで、磁着物の成分分析を実施し、解体パターンと磁着物品位の関係性を確認した。解体パターンごとに解体試験を行い、他の母材と混ざらないよう、バッチ処理（破碎・選別）で回収した磁着物を、10～15kg 程度になるまで縮分した。縮分したスクラップ（100～300 個程度）を対象に、ハンドヘルド XRF を用いて成分分析を行った。

事前解体は磁着物の品質を改善する方向に働くと想定される。一方、同時にミックスメタルやダスト回収量の減少、これら回収物の銅及びクロム品位の低下につながると考えられる。ミックスメタル回収量の減少は、非鉄製錬原料の販売量に影響を及ぼす可能性がある。また、ダスト中のクロム品位の低下は、セメント産業における原燃料代替品としての利用価値向上につながると期待されるが、ダスト中の銅品位の低下は非鉄製錬によるダスト処理手数料の増加につながる可能性がある。そこで、磁着物と同様に、バッチ処理によってミックスメタル及びダストを回収し、1～2kg 程度になるまで縮分を繰り返した。その後、銅は JIS M8121、クロムは JIS M8224 に準拠した方法で、それぞれ含有量を測定した（図表 40）。

図表 40 回収物の評価項目

試料			評価項目									
			金属分析					燃料分析				
			Au	Ag	Cu	Al	Fe	Cr	S	Cl	Br	発熱量
A社	ダスト	ブランク	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		解体パターン①	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		解体パターン②	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	ミックスメタル	ブランク	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-
		解体パターン①	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-
		解体パターン②	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-
B社	ダスト	ブランク	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		解体パターン①	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		解体パターン②	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	ミックスメタル①	ブランク	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-
		解体パターン①	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-
		解体パターン②	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-
	ミックスメタル②	ブランク	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-
		解体パターン①	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-
		解体パターン②	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.3.1.4 作業負荷の確認

事前に取り外す銅及びクロム含有部品が増えるほど、磁着スクラップ品質の向上が期待できる一方、解体に伴う作業員の工数も増加する。採算性を確保するためには、作業員の負荷・工数を考慮した解体プロセスを検討する必要がある。

そこで、各解体パターンにおける作業工程を録画し、部品解体に要する工数を計測することで、解体パターンごとに作業性を評価した。3.3.1.2 で解体した自動販売機のうち、3 台を対象に部品解体の時間を計測した（図表 41）。時間計測を行うのは、解体工程に使用済み自動販売機を搬入（個体管理含む）してから、破碎工程へ投入（もしくは破碎用のヤードに運搬）するまでとした。

実証テーマ 4 で行う試作システムの実証に関しても、同様に時間計測を行った。システムは複数回改良を行うため、改良の度に計測を行うこととした。なお、情報連携システムの導入によって、解体現場における作業工数の増加と、情報記録が電子化されることによる事務作業の工数削減が見込まれる。このうち、事務作業の工数減少が見込まれる点について、事務作業の動画撮影は困難と考えられることから、担当者へのヒアリング等により削減が予測される作業工数を推測し、経済性の検証に用いることとする。

時間分析は 5 つの作業区分により行う（図表 42）。図表 39 の各部品を回収する工程は「解体」に該当する。これら目的部品を解体するために、前もって必要な工程を「準備解体」と定義し、前扉を開くためのネジの取り外し工程等が該当する。作業員の移動や工具・部品の運搬は「移動・運搬」、機械等の立ち上げ時間は「停滞」、情報入力や写真撮影は「情報記録」と定義した。

図表 41 時間分析の実施対象

解体パターン	台数	実施時期
解体パターン②	3台	解体試験実施時（2021年9月）
ブランク+情報連携①	3台	解体試験実施時（2021年10月）
解体パターン①+情報連携①	3台	解体試験実施時（2021年10月）
解体パターン②+情報連携①	3台	試作システム導入時（2021年10月）
解体パターン②+情報連携②（改良後）	3台	試作システム導入時（2021年11月）
解体パターン②+情報連携③（再改良後）	3台	試作システム導入時（2021年12月）
合計	18台	

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 42 時間分析における作業区分

作業区分	内容
解体	対象部品を自動販売機から取り外す作業
準備解体	対象部品を自動販売機から取り外すために必要な解体作業
移動・運搬	解体のための作業員の移動や、工具・部品の運搬等
停滞	機械等の立ち上げや作動時のアイドル時間
情報記録	端末を用いて解体記録の撮影及び入力を行う時間

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.3.2. 樹脂・金属成分を分離する要素技術の検討

#### 3.3.2.1 選別プロセスの要求仕様の特定

事業初年度に検討した通り、貴金属や銅の品位が低く、また個別管理が困難な使用済み製品を対象とした場合、事前に緻密な解体を行うより、破碎・選別工程を工夫することが、忌避物質の管理の観点から有効な可能性がある。

小型家電や産業廃棄物等を破碎・選別したあとの残渣（シュレッダーダスト）にも、まだ貴金属や銅といった有用金属が残存している。残渣を埋立処分した場合、これら有用金属は未資源化物質として散逸してしまう。一方、残渣にはクロムなどの重金属やハロゲン（塩素、臭素等）も含まれている。これら元素はセメント産業の忌避物質であり、セメント産業における原燃料代替品として利用を阻害する要因となっている。

そこで、銅製錬原料に提供可能な品位まで銅や貴金属を濃縮し、同時にセメントや鉄鋼電炉等で原燃料代替品として活用できるような産物の回収を目指す（図表 43）。銅製錬原料の品位目標として、金 5~10ppm、銀 400ppm 以上、銅 60~70%程度を設定した。また、原燃料代替品として、総発熱量 6,000~7,000kcal/kg、セメント及び普通鋼電炉それぞれの忌避物質を含まない（もしくは一定値以下にする）産物の回収を目指した。なお、事業初年度で技術的なハードルが高いことが明らかになっているが、コンパウンド原料として提供可能な単一樹脂が回収可能か確認した。

図表 43 本実証における回収物の品位目標

想定用途	要求水準(本実証における目標)	
	選好物質	忌避物質
銅製錬原料	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 金: 5~10g/ton以上</li> <li>■ 銀: 400g/ton以上</li> <li>■ 銅: 60~70%(故銅グレード)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ハロゲン: 1~3%未満</li> </ul>
原燃料代替品 (セメント)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 総発熱量: 6,000~7,000kcal/kg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 塩素: 0.5%未満</li> <li>■ クロム: 可能な限り含まれない</li> </ul>
原燃料代替品 (普通鋼電炉)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 総発熱量: 6,000~7,000kcal/kg</li> <li>■ 固定炭素分が多いこと</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 塩素: 0.8%</li> <li>■ 硫黄: 1~2%</li> <li>■ 銅: 含まれない</li> </ul>
樹脂原料 (コンパウンド)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 目的樹脂(PP、PE等)がほぼ100%の純度で含まれること</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 目的以外の樹脂、タルク分が可能な限り含まれないこと</li> </ul>

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.3.2.2 選別プロセスの検討

事業初年度は乾式比重選別（流動層選別）装置を用いて、実証試験を行った。一部の回収物は、銅製錬原料及び原燃料代替品の目標水準を満たしていたが、中間比重域（比重 2 前後）や、中・細粒群では、金属と樹脂を十分に分離できなかった（図表 44）。

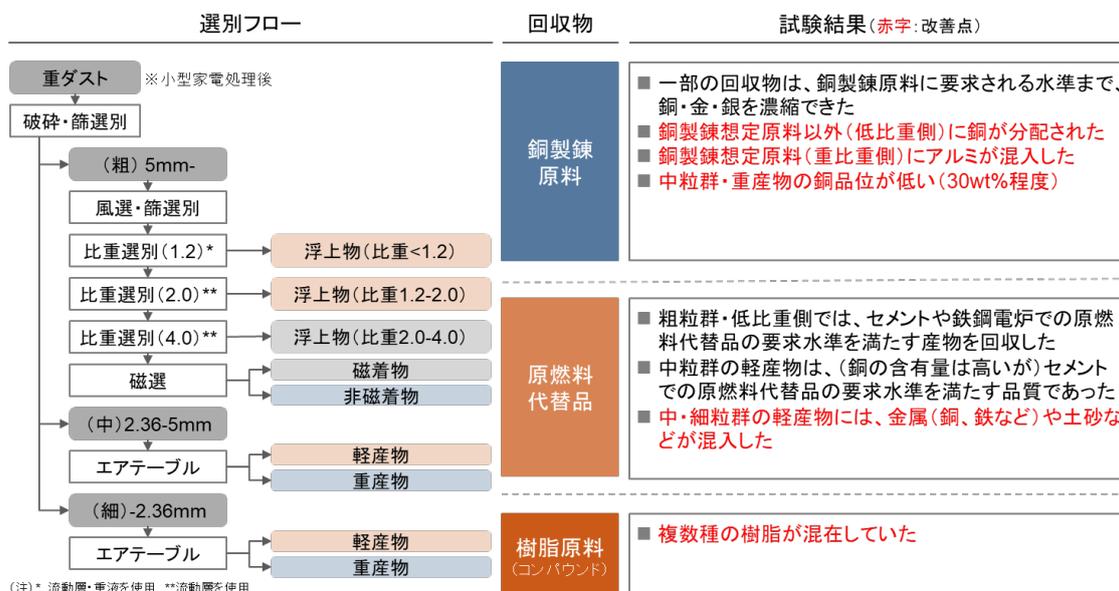
そこで、金属と樹脂の選別精度の向上を目指して、湿式選別（ジグ選別）装置を用いた実証試験を行った。湿式ジグ選別は、流動層選別より均質な媒体を使用できること（本実証では水）、脈動により非定常状態を形成できるため、比重差が顕著に表れやすい初期速度付近で選別可能であることから、選別精度の向上が期待される。本試験では、株式会社アール・アンド・イーが保有する「湿式選別装置（RETAC JIG）」を使用した（図表 45）。

試験実施に際して、選別精度や装置条件を考慮して、破碎残渣（ダスト）を破碎・篩選別して「1~5mm」「5~15mm」の 2 粒群を調製した。また、予察試験にて、ダスト中のハーネス（銅線）が互い絡み合い、装置底面に銅線の層が形成され、重産物の回収が困難になった。そこで、事前に銅線を取り除いてから、湿式ジグ装置に投入するようにした。

湿式ジグ選別で回収した重産物は、磁選機及び渦電流選別機に投入し、「磁着物（製鋼原料想定）」、「導電産物（銅製錬原料想定）」、「非導電産物（その他用途）」を回収した。一方、軽産物は再び湿式ジグ選別機に投入し、「浮上物」、「軽産物（軽）」、「軽産物（重）」を回収した（図表 46）。

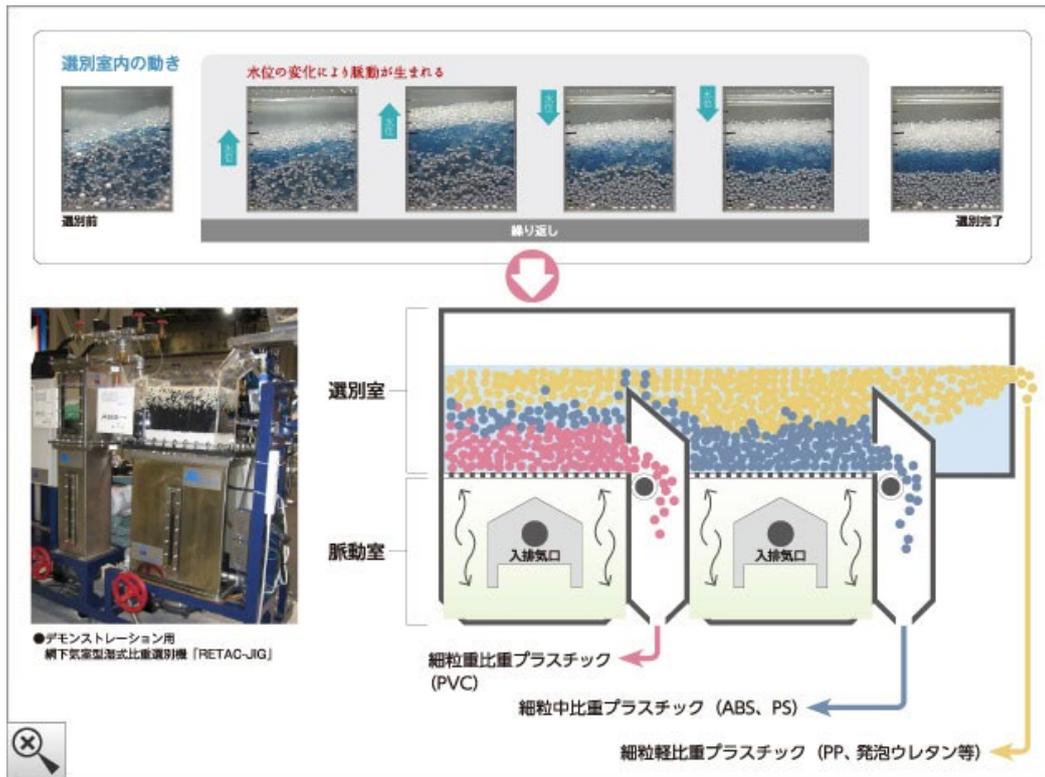
なお、事業初年度は小型家電ダストを対象に試験を実施したが、サンプル中の金属品位のぶれが大きく、試験結果の考察が容易でなかった。この要因は、小型家電として回収された使用済み製品に複数種の製品が含まれており、この割合が変動するためと推察される。そこで、本年度事業では、バッチ処理を行うニーズがあり、また装置のバリエーションが少ない使用済み自動販売機を破碎・選別した際のダストを、試験サンプルとして選定した。

図表 44 事業初年度の選別フロー概要と試験結果・課題



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 45 湿式選別装置 (RETAC JIG) の選別原理



(出所) 株式会社アール・アンド・イーウェブサイト(<http://www.rande.co.jp/retacjig.php>)より引用 (2022年1月閲覧)

図表 46 湿式ジグを用いた選別フロー概要と期待事項・検討課題

選別フロー	回収物	期待事項	検討課題
重ダスト ※自販機処理後 ↓ 破碎・篩選別 ↓ (粗) 5-15mm ↓ 湿式ジグ選別 → 浮上物、軽産物 ↓ 磁選 → 磁着物 ↓ 渦電流選別 → 導電産物、非導電産物 ↓ (細) 1-5mm ↓ 湿式ジグ選別 → 浮上物、軽産物 ↓ 磁選 → 磁着物 ↓ 渦電流選別 → 導電産物、非導電産物	銅製錬原料       原燃料代替品     樹脂原料 (コンパウンド)	■ 銅回収率の改善 (低比重側産物への銅の混入防止) ■ 銅品位の向上   ■ 低比重側産物における金属・土砂の分離 (特に粒径の小さな粒群)	■ 片刃粒子(基板等)の分配状況の確認 ■ 形状(板状、線状等)による影響の確認  ■ 片刃粒子(基板等)の分配状況の確認 ■ 形状(板状、線状、フィルム等)による影響の確認 ■ 塩素(PVC由来)の管理可否の確認  ■ 形状(板状、フィルム等)による影響の確認 ■ フィラー等による選別精度への影響の確認

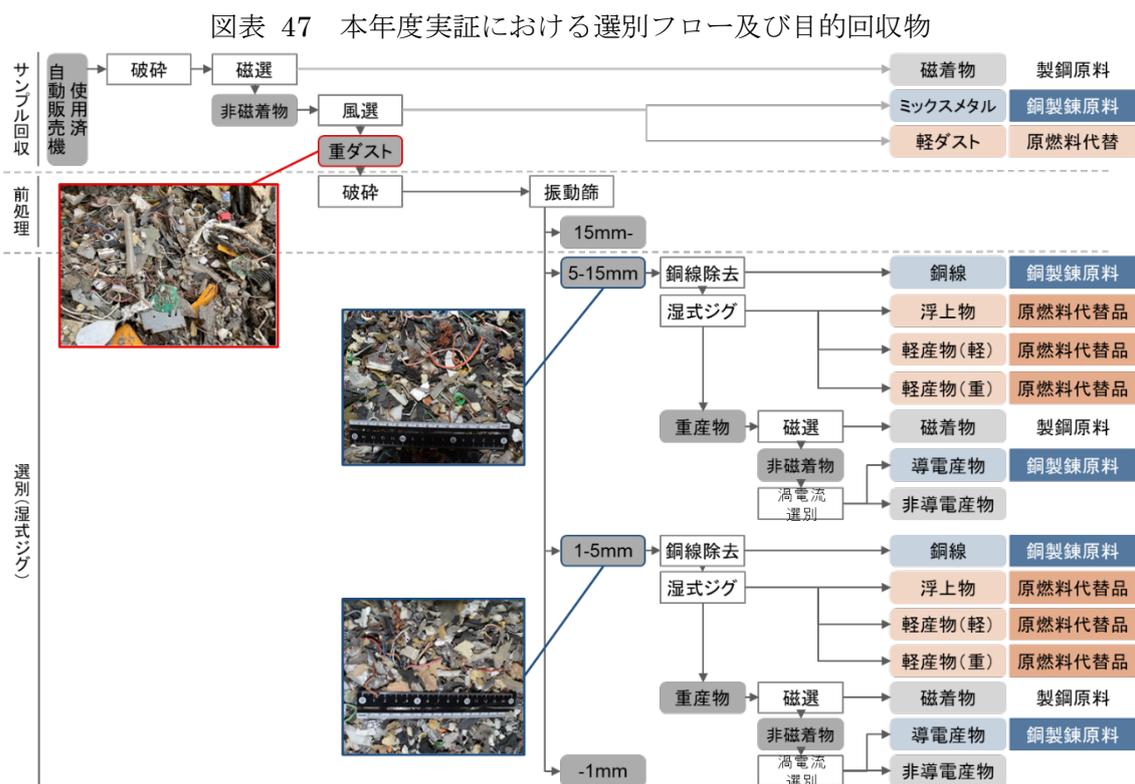
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.3.2.3 選別試験の実施

2021年9月にラボスケールでの試験、11月にパイロットスケールでの予察試験、12月に本試験を実施した。本試験では、図表47に示す選別フローに従って試験を実施した。なお、使用済み自動販売機は法令で要求されるもの以外、特に追加的に部品解体を行っていないものを破砕・選別している（図表39における「ブランク」に該当する）。

試料は図表48の装置上部から投入し、中央に位置する水槽で選別される。浮上物や軽産物は右上部に接続したホースから、重産物は装置底部に設けられたスリットを通して、それぞれ排出される。

試験結果を評価するため、回収した各産物の重量を計測し、金属（金、銀、銅、アルミニウム、鉄、クロム）及び原燃料に関する元素（硫黄、塩素、臭素）の成分分析、総発熱量の測定を行った。産物を乾燥させたのち、JIS M 8082 に準じてマットを作成し、ジョークラッシャー及び振動ミルで粉砕して、金属成分分析用の試料を調製した。フッ化水素酸処理後に王水を加え、マットを分解したのち、ICP-MS/ICP-OESを用いて分析を行った。原燃料に関する元素の成分分析と総発熱量の測定には、乾燥試料をカッティングミルで粉砕した試料を用いた。硫黄はJIS Z 7302-7、塩素はエシュカ法による塩素抽出とイオンクロマトグラフ法、臭素は酸素ポンプ法とイオンクロマトグラフ法、総発熱量はJIS Z 7302-2に準じた方法で、それぞれ定量を行った。



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 48 試験装置の外観



(注) 画像中央上部にみえる水槽が選別部

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング撮影 (2021 年 11 月)

図表 49 試験条件

パラメータ	条件
媒体	水 (0.997g/cm <sup>3</sup> )
投入物粒径	1~5mm、5~15mm
波高	5cm
サイクル数	15回/分

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）

#### 3.4.1. 情報連携システムの実証

##### 3.4.1.1 実証を行う解体パターン

本事業で試作する情報連携システムでは、実証テーマ3で検討する解体パターンの分類に従い、記録すべき部品の種類や単位を設定した。本事業で実証を行ったパターン別の解体台数を図表 50 に再掲する。なお、実証事業はテーマ3と同様に、事業者による解体方法の差異に対するシステムの柔軟性を検討するため、共同実施事業者2社で実施した。

実証試験は、情報連携システムで予定していた2度の更新前後（3回）に加え、システム導入無しのケースを加えた4回に分けて行う予定であった。一方、12月に実施した2回目の情報連携システムを用いた解体実証完了までに3度の更新を行うことで、システムの課題は概ね解決できた。そのため、2022年1月の実証ではスマートフォンとは異なる光学文字認識（OCR：Optical Character Recognition）機能を備えたデバイスを用いた実証を行った。

また、すべての解体パターンで4回の実証を事業期間内に行うことは困難であったことから、最も解体部品が多く、情報の記録や管理も複雑化する解体パターン②を基軸として実証を行うこととした。但し、実証テーマ3での成分分析用のサンプル作成も兼ね、ブランク及び解体パターン①でも情報連携システムを活用した実証試験を行った。

解体台数は1社あたり111台で合計222台に達するが、このうち180台は実証テーマ3の成分分析を兼ねて解体を行ったものである。また、作業工数の測定に用いるため、すべてのパターンで各3台の動画撮影を行った。なお、情報連携システム更新及び新たな端末を活用するパターン（情報連携②、③）については、新たな作業環境に慣れてから動画撮影を行うことを目的として、各9台の解体を実施した。

図表 50 本事業で実証を行う解体パターンと情報連携システム

		解体パターン		
実施 時期	解体パターン	ブランク (法令対応のみ)	解体パターン① (作業性を考慮した解体)	解体パターン② (Cu・Cr含有部品 緻密解体)
	事前回収 対象部品	フロン類、電池、蛍光灯等	ブランク+ 冷却装置(ファンモーター除く)、 リモコン	ブランク+ 冷却装置、リモコン、ラック コインメック、ハンドルロック
情報 連携 システム	9~10月 (情報連携なし)	-	-	30台 (うち3台動画撮影)
	11月 情報連携① (初版)	30台 (うち3台動画撮影)	30台 (うち3台動画撮影)	3台 (すべて動画撮影)
	12月 情報連携② (1回目更新版)	-	-	9台 (うち3台動画撮影)
	1月 情報連携③ (2回目更新版)	-	-	9台 (うち3台動画撮影)

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.4.1.2 情報連携システムの構築

情報連携システムの実証にあたり、中間処理業者における使用済み自動販売機の解体方法や破碎方法が確認できるシステムを試作した。システムの仕様については、初年度事業の成果と実証テーマ3で検証した解体方法を踏まえ、図表 51 に示すように再整理した。

中間処理業者では、減容及び選別を目的に破碎処理が行われるため、破碎処理までは個体管理、破碎処理以降は販売単位ごとに管理することにした。事業初年度に検討した仕様では、解体前に各個体に販売単位となるロット番号を記録することを想定していた。しかし、解体時点では販売ロットが不明確である可能性も考慮し、出荷時に販売する再生資源の破碎日を期間指定することで、破碎日単位で品質を管理できるようにした。各個体の解体記録や証跡（写真）に関しては、外部データベースへ記録し、販売する再生資源に QR コードを貼り付けることで、外部データベースに記録した情報と紐づけられるようにした。

なお、解体フローは中間処理業者により異なることが想定されるため、活用先となる中間処理業者の要望等に沿ってカスタマイズしていくことを前提としている。

図表 51 本事業で試作するシステムの仕様

対象製品		使用済み自動販売機
管理範囲	対象範囲	中間処理業者の入荷～後工程（原料メーカー等）の検品 中間処理業者への入荷～出荷までの処理工程を記録し、再生資源を購入する素材産業側が荷姿に含まれる各個体（使用済み自動販売機）の解体記録を確認できるようにする。
	対象部品	以下の部品を含む、最大で15部品を選定し、各部品の解体状況を記録するとともに、解体した証跡（写真）を保存できるようにする。但し、記録する解体部品は中間処理業者の解体工程により異なるため、導入する中間処理業者によってカスタマイズ可能な設計とする。 ① フロン ② 電池（一次電池、二次電池） ③ 蛍光灯 ④ アクリル板 ⑤ メイン基板 ⑥ リモコン ⑦ 電源ボックス ⑧ コインメック（ケース部） ⑨ コンプレッサ
	対象資源	以下の資源を含む、最大7つの資源を選定し、破碎後の各資源に含まれる各個体（使用済み自動販売機）の解体記録を確認できるようにする。但し、記録する再生資源は中間処理業者の選別工程により異なるため、導入する中間処理業者によってカスタマイズ可能な設計とする。 <b>（実証事業では磁着物に注目して検証を行う。）</b> ① 鉄スクラップ（磁着物） ② 銅スクラップ ③ アルミスクラップ ④ その他非鉄スクラップ（ミックスメタル等） ⑤ 重ダスト
利用するデバイス	スマートフォン	開発予定の実証システム（アプリ）の動作及び実証システムでの使用に十分な端末。
	QR	開発予定の実証システムの動作及び実証システムでの使用に十分な端末。
	プリンタ	<b>（実証事業では使用するQRコードが限られるため、事前に印刷して送付する。）</b>
	ハンディターミナル	OCR機能の活用を想定（銘板のスキャンにより型番や品番の入力作業の効率化）して、実証システムでの活用可否を検討する。
	情報管理サーバ	システムの実証で記録が想定される情報（個体情報及び解体記録）及び証跡（写真データ）が保管可能なサーバ。実証用として使用済み自動販売機100台分の解体情報が記録できることを最低限とする。

### 3.4.1.3 試作システムの検証項目

情報連携システムの実証では、その構築段階から図表 52 に示す 4 つの観点で検証した。

試作システムの構築にあたり、まずは情報管理方法を検証した。仕様を満たす形で記録すべき情報を整理し、各個体と解体・選別方法の紐づけ、各販売単位と個体の紐づけ方法等に関して、最適な情報の取得方法や管理方法を検討した。

また、解体作業員が実際に入力を行うアプリの入力方法に関して、誤入力等を避けるためにチェックボックスやプルダウンリストを活用した選択式を主体とする必要がある。そのため、自動販売機の解体において、想定される入力項目等について、実証を行う中間処理業者とも連携して検討を行った。シリアル番号やモデル番号の入力は手入力で行うことが想定されるが、入力ミスや入力漏れ等も懸念される。そのため、ミスが少なく、省力化が可能な OCR 技術の活用等も検討した。

さらに、付加機能として記録した情報を特定の様式に出力する抽出プログラムや、再生資源に含まれる忌避物質含有量を計算するプログラムの実装等についても検討した。

システム設計以外の点でも、解体作業環境下での QR コード（タックラベル）の耐久性や、使用済み自動販売機の多段積み等を行うことで QR コードの読取が困難になる作業環境の有無等、解体情報を記録するための作業上の課題についても合わせて検討を行った。

図表 52 試作システムの検証項目

検証項目	検証方法
情報管理方法	記録が必要となる情報を整理し、最適な情報管理方法を検証 <ul style="list-style-type: none"> <li>－ 個体と解体・選別方法の紐づけ方法</li> <li>－ 個体と販売単位の情報の紐づけ方法</li> <li>－ 証跡となる画像の記録・管理方法</li> <li>－ QR コードの貼付時期や活用方法、等 (適切に情報を記録するために何種類の QR を活用するか等)</li> </ul>
入力 インターフェース	入力を簡素化し、記録漏れをなくすインターフェースの検討 <ul style="list-style-type: none"> <li>－ 中間処理業者と連携した入力選択肢の検討</li> <li>－ 入力漏れがあった場合のアラートの発出</li> <li>－ 入力情報の制限 (あり得ない選択肢を選ばなくする等)</li> <li>－ ハンディターミナルを用いた文字認識技術の活用可能性検証、等</li> </ul>
その他システムに 関する付加機能等	使用する中で求められる付加機能の検討 <ul style="list-style-type: none"> <li>－ 記録情報の抽出プログラムの作成</li> <li>－ 忌避物質の含有率計算システムとの連携、等</li> </ul>
作業性	情報連携システムの活用における課題を検証 <ul style="list-style-type: none"> <li>－ QR コード (タックラベル) の耐久性</li> <li>－ QR コードの読取が困難な状況 (多段積み等) の確認</li> <li>－ その他の情報記録を行う上で負荷の大きい作業、等</li> </ul>

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.4.2. 情報連携システムのコスト分析

本事業で試作するシステムを対象に、その導入コストや運用コストを試算した。実証テーマ2で検討する品質規格を満たすことで、再生資源の付加価値向上が見込まれる。一方で、品質を担保するための情報連携システムに係るコストが、その付加価値を上回ってしまえば、導入することは困難となる。運用コストの検証においては、システムのメンテナンスや通信費だけでなく、解体工程での情報の記録に伴う工数の増加や、従来の紙面での記録をPCに入力する工数の削減等も考慮した上で、試算を行った。

### 3.5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）

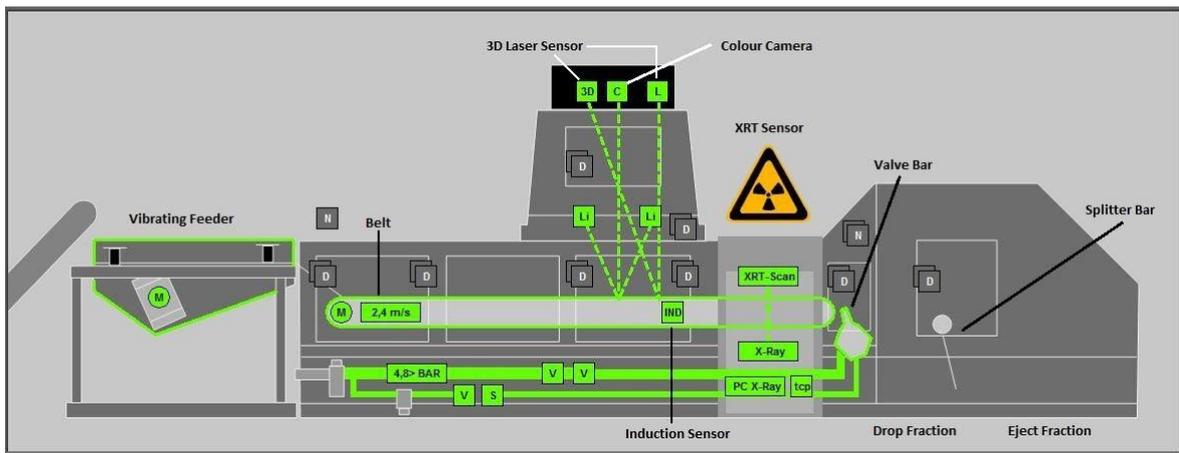
#### 3.5.1. 電磁式ファインダーにおける選別条件の検討

##### 3.5.1.1 観測データに影響を与える要因分析

本事業では、図表 53 に示す電磁式ファインダーを用いて実証を行った。本実証に用いた電磁式ファインダーには、電磁センサー、3D レーザーカメラ、可視光カメラが搭載されている。図表 54 に示す通り、電磁センサーで観測されるデータに加えて、試料のみかけ体積、色調情報等を得ることができる。

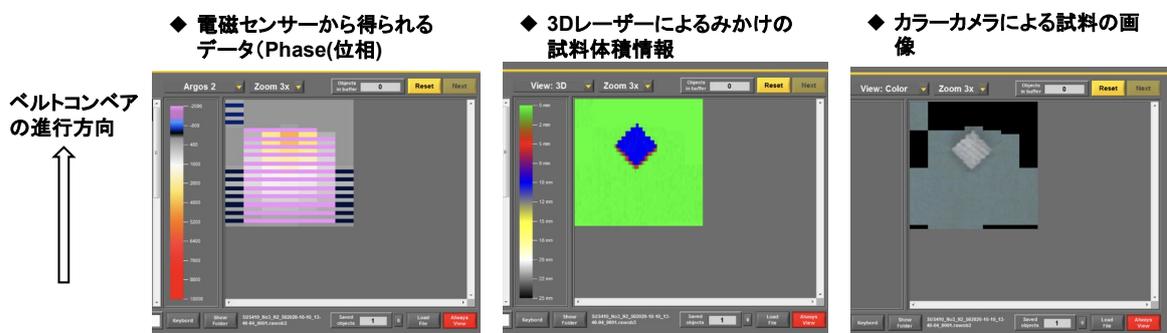
電磁式ファインダーのメーカーであるシュタイナート社は、電磁センサーにおける観測データに関する詳細な情報を開示していない。そのため、文献調査等をもとに、電磁式ファインダーで観測されるデータに影響を与える要因を分析した。具体的には、昨年度の成果から、電磁センサーによる観測データである Amplitude（振幅値）、Phase（位相値）に着目し、各観測データの理論式を既往文献のレビューから推定のうえ、観測データに影響を与える因子を整理した。

図表 53 本試験で用いた電磁式ファインダーの装置イメージ図



(出所) Steinert HP より

図表 54 本試験で用いた電磁式ファインダーによって観測される各種データ



(出所) イーペックスジャパン株式会社提供資料をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング 作成

### 3.5.1.2 観測データに影響を与える試料条件の検討

昨年度、電磁式ファインダーの観測データに影響を与える試料条件を検討したところ、試料の金属種が大きな影響を及ぼすことが分かった。昨年度、金属種によって導電率、比透磁率が異なることから、金属種が電磁センサーによる観測データに影響を及ぼしていると考察された。

上記要因のうち、特に比透磁率は同一の金属種であっても形状によって見かけの比透磁率が異なる他、金属の組成がわずかに異なるだけでも変化する。そこで、今年度は試料の比透磁率による観測データへの影響を考察するべく、図表 55 に示す可搬型磁化率測定計を用いて磁化率の計測を行った（図表 56）。観測された磁化率から、計測器におけるみかけの比透磁率を算出し、考察を行った。

図表 55 可搬型磁化率測定計の諸元

製造会社	ZHstruments
装置名称・型式	SM - 30
感度 [SI Units]	$1 \times 10^{-7}$
動作周波数 [kHz]	8
測定時間 [s]	5 未満
ピックアップコイル直径 [mm]	56
寸法 [mm]	100×65×25

(出所) Zhinstruments 社 HP より三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 56 磁化率測定試験 試験条件

実サンプル	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 磁着物（普通鋼）×10 個</li> <li>■ 磁着物（クロム系ステンレス鋼）×10 個</li> </ul>
試行回数	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 各条件 5 回ずつ</li> </ul>

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

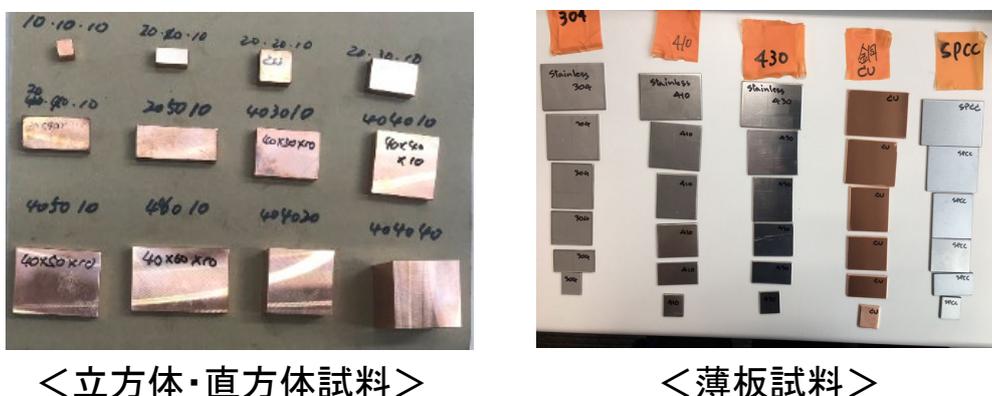
### 3.5.1.3 観測データに影響を与える装置条件の検討

昨年度、電磁式ファインダーの観測データに影響を与える試料条件（試料の高さ、試料の断面積、金属種、材質の均一性）に注目して検討を行ったが、電磁式ファインダーの装置条件について十分に検討できていない。

普通鋼（SPCC）とクロム系ステンレス鋼は、昨年度実施した試験における観測データの傾向が類似しており、識別条件の特定には至らなかった。この要因として、試料の物理的性質の差を検知できる装置条件（ベルト速度等）が設定されていない、センサーの感度が十分でない等、装置由来のものが考えられる。

そこで、今年度は変更可能な装置条件として、ベルト速度を見直し、観測データへの影響を検討した。試験に用いた標準試料の外観と試験条件を図表 57、図表 58 にそれぞれ示す。

図表 57 試験に用いた標準試料の外観



<立方体・直方体試料>

<薄板試料>

図表 58 ベルト速度変化試験 試験条件

標準試料	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 銅</li> <li>■ 普通鋼（S50C、SPCC）</li> <li>■ SUS410</li> <li>■ SUS430</li> <li>■ SUS304</li> </ul>
試料形状 (m×m×m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 20×20×10（直方体試料）</li> <li>■ 20×40×10（直方体試料）</li> <li>■ 40×40×10（直方体試料）</li> <li>■ 20×20×2（薄板試料）</li> <li>■ 20×40×2（薄板試料）</li> <li>■ 40×40×2（薄板試料）</li> </ul>
ベルト速度 (m/s)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 2.2（設定可能な最低速度条件）</li> <li>■ 2.8（通常設定における速度条件）</li> <li>■ 3.8（設定可能な最高速度条件）</li> </ul>
試行回数	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 各条件 3 回ずつ</li> </ul>

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.5.1.4 色調による選別可能性の検討

3.5.1.1 で述べた通り、本実証で用いている電磁式ファインダーには可視光カメラが搭載されている。そこで、電磁センサーによって観測されるデータと可視光カメラによって観測されるデータを組み合わせることで、試料を選別できるかどうか確認した。

本試験に用いた代表的な実試料の外観と試験条件を図表 59、図表 60 に示す。

図表 59 試験に用いた代表的な実試料の外観



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 60 色調条件確認試験 試験条件

実サンプル	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ モーターコア×101個 (※用意可能な試料全て)</li> <li>■ 磁着物(普通鋼)×60個</li> <li>■ 磁着物(クロム系ステンレス鋼)×60個</li> </ul>
試行回数	■ 各条件3回ずつ

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.5.1.5 実サンプルの形状等による観測データへの影響の確認

モーターコア等の二成分（銅と鉄）から成る試料を選別する場合、各種金属の形状や配置が観測データに影響を及ぼすことが想定される。そこで、特に金属種の位置が観測データに与える影響を検討するべく、標準試料を組み合わせた二成分系試料を用いた予察試験を実施した。また、スクラップは、形状や粒径等にはばらつきが大きいことから、観測データにはばらつきが生じることが想定される。そこで、昨年度得られた各種実サンプルの観測データの再現性を確認するべく、実サンプルを用いた試験を実施し、試料形状と観測データの相関を確認した。

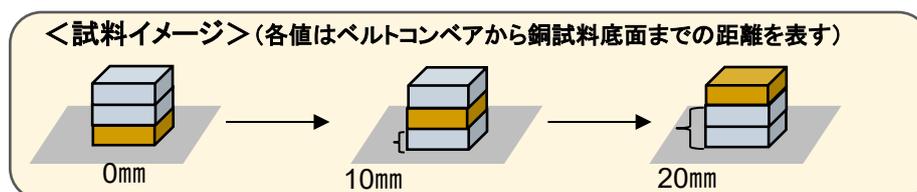
予察試験の条件、及び形状等による影響確認試験の条件を図表 61、図表 63 に示す。また、予察試験における試料形状パターンのイメージ図を図表 62 に示す。

図表 61 予察試験 試験条件

組み合わせる標準試料	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ①-1 銅 (40 mm×40 mm×10 mm) ×1 個</li> <li>■ ①-2 銅 (40 mm×40 mm×2 mm) ×1 個</li> <li>■ ②普通鋼 (S50C) (40 mm×40 mm×10 mm) ×2 個</li> <li>■ ③普通鋼 (SPCC) (40 mm×40 mm×2 mm) ×2 個</li> </ul>
試料形状	<p>パターン A : ①銅、②普通鋼 (S50C) ×2 個の組み合わせ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 下から順に①銅、②普通鋼 (S50C)、②普通鋼 (S50C)</li> <li>■ 下から順に②普通鋼 (S50C)、①銅、②普通鋼 (S50C)</li> <li>■ 下から順に②普通鋼 (S50C)、②普通鋼 (S50C)、①銅</li> </ul> <p>パターン B : ①銅、③普通鋼 (SPCC) ×2 個の組み合わせ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 下から順に①銅、③普通鋼 (SPCC)、③普通鋼 (SPCC)</li> <li>■ 下から順に③普通鋼 (SPCC)、①銅、③普通鋼 (SPCC)</li> <li>■ 下から順に③普通鋼 (SPCC)、③普通鋼 (SPCC)、①銅</li> </ul>
試行回数	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 各条件 5 回ずつ</li> </ul>

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 62 予察試験 試料形状パターンのイメージ図



図表 63 形状等による影響確認試験 試験条件

実サンプル	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ モーターコア×101 個</li> <li>■ 磁着物 (普通鋼) ×187 個</li> <li>■ 磁着物 (クロム系ステンレス鋼) ×95 個</li> <li>※上記、いずれも用意可能な試料全て</li> </ul>
試行回数	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 各条件 3 回ずつ</li> </ul>

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

## 3.5.2. 電磁式ファインダーにおける仕様検討

### 3.5.2.1 実サンプルを対象とした選別条件及び装置・前処理要件の特定

3.5.1 の検討を踏まえ、本実証で用いた電磁式ファインダーにおける最適な選別条件を検討した。具体的には、磁着物中のモーターコアとクロム系ステンレス鋼をそれぞれ個数ベースで除去する割合が最大となる各観測データの閾値を算出した。それら検討を踏まえ、各選別方法における高度な選別の実現に向けた要求仕様を整理するとともに、各要求仕様を阻害する要因と要因発生抑制のための改善策も整理した。

### 3.5.2.2 試作機の仕様具体化及び開発費用の検討

3.5.2.1 で特定した選別条件をもとに、電磁式ファインダーの試作機を製作する場合の仕様の具体化及び開発費用の検討を行った。

装置仕様としては、要求される電磁センサーの仕様、可視光カメラの仕様の検討を行った。

### 3.5.3. LIBS ソーターにおける選別条件の検討

#### 3.5.3.1 鉄・クロムの含有率と発光強度比の関係を示す検量線の直線性改善

昨年度、試料中の鉄・クロムの含有率と LIBS ソーターで観測された鉄・クロムのピーク強度<sup>26</sup>比（クロムに特有のピーク波長<sup>27</sup>の発光強度／鉄に特有のピーク波長の発光強度）の関係から検量線を作成できることを確認した。さらに、この検量線に閾値を設定することで、普通鋼とステンレス鋼を選別できる可能性があることが分かった。しかし、含有率とピーク強度比の関係性を示す検量線の直線性が低いため、ピーク強度比から正確な含有率を算出することが困難という課題もあった。

そこで、今年度は検量線作成時に着目する鉄、クロムのピーク波長等を再検討し、検量線の改善を図った。また、再検討した検量線を用いて、磁着物中の普通鋼とクロム系ステンレス鋼の選別可能性を確認した。

#### 3.5.3.2 ベルト速度向上に伴う選別精度低下要因と影響を軽減する前処理・装置条件の特定

センサー選別においてベルトコンベアの速度はその処理能力を決定する重要な要素である。昨年度実施した LIBS ソーターを用いた実証試験におけるベルト速度条件は全て 1 m/s であったが、実操業への適用を想定するとより速いベルト速度条件が望ましい。

しかし、ベルト速度を向上させるとセンサーの検知精度は低下する恐れがある。例えば、ベルト速度が向上すると、レーザー照射によって発生するプラズマの挙動が変化することが想定され、プラズマの発光を正確に検知できない可能性がある。また、必要量のプラズマを発生させるためには、試料に対して一定数以上のレーザーを照射しなければならない。そのためベルト速度を向上させる場合、レーザー照射間隔を短くする必要がある。レーザー照射間隔が短くなると、発生したプラズマが消滅する前に次のレーザーが照射され、残存するプラズマ中の原子を再励起させる恐れがあり、正確な発光強度を測定できない可能性もある。

そこで、今年度はベルト速度変化による選別精度への影響の有無を確認し、ベルト速度 1 m/s 及び 2 m/s の二条件を比較する試験を実施した。本試験で用いた LIBS ソーターの外観・構成、諸元、本試験の条件を図表 65、図表 66、図表 67 にそれぞれ示す。

<sup>26</sup> ピーク波長において観測された発光強度

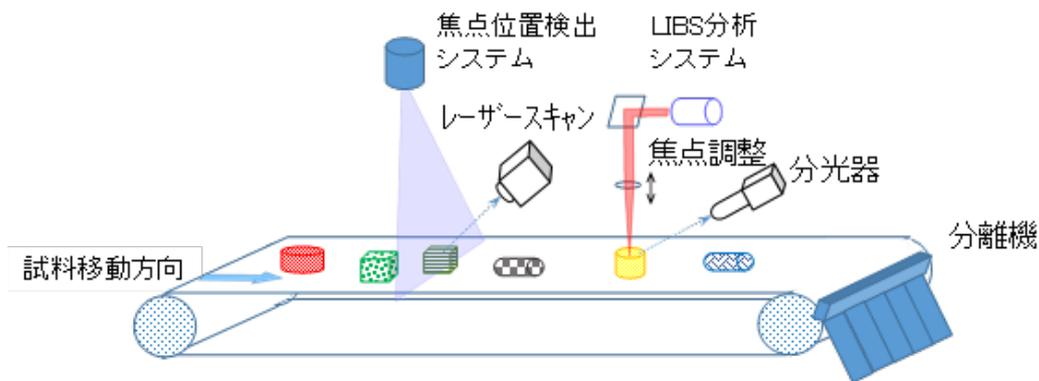
<sup>27</sup> LIBS ソーターでは、分析対象物質にレーザーを照射することでプラズマ化させ、原子の励起を引き起こす。励起した原子が脱励起する際に発生する光を分光して得られるスペクトルのうち、前後域波長に比して相対的に大きな発光強度を有する波長をピーク波長という。元素ごとに固有のピーク波長を有することで知られる。

図表 64 本試験で用いた LIBS ソーターの外観



(出所) 早稲田大学大和田研究室提供

図表 65 本試験で用いた LIBS ソーターの構成



(出所) 早稲田大学大和田研究室提供

図表 66 本試験で用いた LIBS ソーターの諸元

レーザー波長 [nm]	1064
パルス幅 [ns]	100
レーザーエネルギー[mJ]	1
測定波長範囲 [nm]	242.76 - 412.43
レーザー発振周波数[kHz]	20

(出所) 早稲田大学大和田研究室提供

図表 67 LIBS ソーターを用いた各種試験における実験条件

ベルト速度 [m/s]	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 1.0</li> <li>■ 2.0</li> </ul>
実サンプル	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 磁着物（普通鋼）×184 個</li> <li>■ 磁着物（クロム系ステンレス鋼）×94 個</li> </ul> <p>※上記いずれも用意可能な試料全て。ただし、LIBS ソーターによる検知が難しい形状（線状・リング状等）の試料を除く</p>
試行回数	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 各試料 20 回以上ずつ</li> </ul>

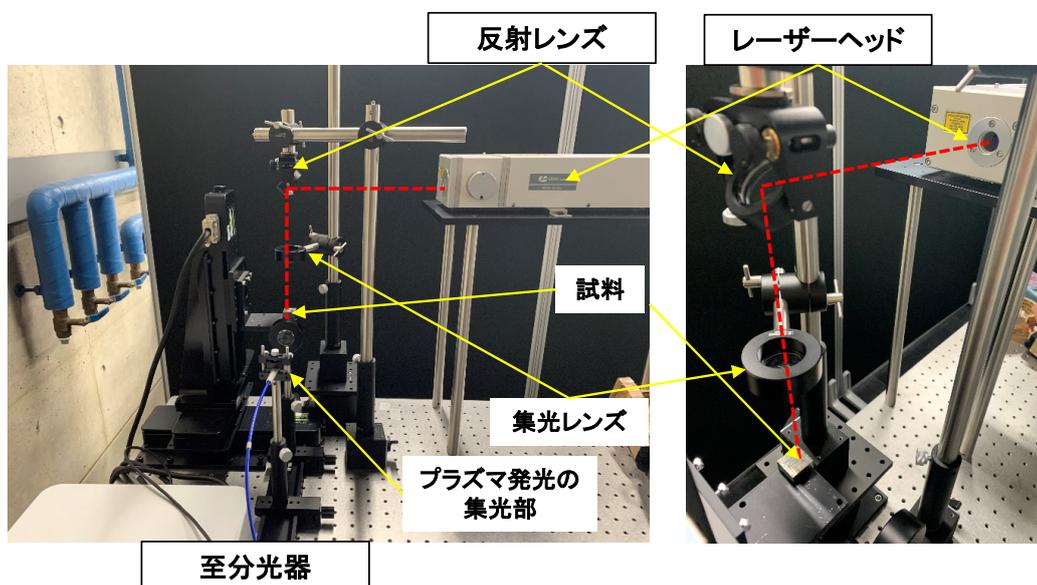
(出所) 早稲田大学大和田研究室提供

### 3.5.3.3 表面状態や形状による選別精度への影響を低減する前処理・選別条件の特定

昨年度、LIBS ソーターは、表面状態（汚れ・塗装・メッキ、表面粗度等）に特徴がある一部の実サンプルを適切に識別することができなかった。また、形状（細線、空洞がある等）に特徴がある実スクラップも、LIBS ソーターの 3D カメラが検知できない、またはレーザーが適切に試料に照射されなかった等の要因で、鉄・クロムの発光強度比を適切に検出することができなかった。

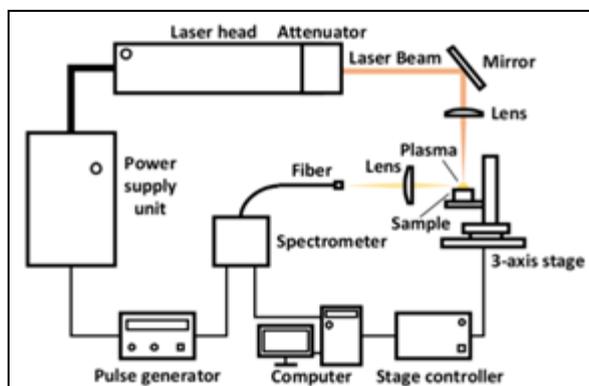
そこで、今年度は試料の表面状態や形状による選別精度への影響を確認するべく、表面粗度、表面傾斜を変えた人工試料に対して LIBS 分析装置を用いて試験を実施した。本試験で用いた LIBS 分析装置の外観・構成、諸元、本試験の条件を図表 68、図表 69、図表 70、図表 71、図表 72 にそれぞれ示す。

図表 68 本試験で用いた LIBS 分析装置の外観（左：全体、右：レーザー照射部）



※赤点線はレーザーの照射経路を示す  
 (出所) 早稲田大学大和田研究室提供

図表 69 本試験で用いた LIBS 分析装置の構成



(出所) 早稲田大学大和田研究室提供

図表 70 本試験で用いた LIBS 分析装置の諸元

レーザー波長 [nm]	1064
レーザーエネルギー[mJ]	1~80 (可変)
測定波長範囲 [nm]	220.97 – 492.533

(出所) 早稲田大学大和田研究室提供

図表 71 LIBS 分析装置を用いた試料表面粗度変化試験における実験条件

レーザーエネルギー [mJ]	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 80</li> </ul>
試料	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ SUS 標準物質 JSM M205-1~M205-8 (SUS304、スタンダードテストピース社より購入)</li> </ul>
試料表面加工条件 (9条件)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 無加工 (標準試料の表無縁無加工)</li> <li>■ DP (ダイヤモンドペーストで試料表面を鏡面仕上げ)</li> <li>■ #800 (標準試料表面を 800 番の板やすりで研磨)</li> <li>■ #40 (標準試料表面を 40 番板やすりで研磨)</li> <li>■ ショットブラスト細目仕上げ</li> <li>■ ショットブラスト中目仕上げ</li> <li>■ ショットブラスト粗目仕上げ</li> <li>■ 棒やすり中目仕上げ</li> <li>■ 棒やすり粗目仕上げ</li> </ul>
試行回数	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 各条件 20 回以上ずつ</li> </ul>

(出所) 早稲田大学大和田研究室提供

図表 72 LIBS 分析装置を用いた試料表面傾斜変化試験における実験条件

レーザーエネルギー [mJ]	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 80</li> </ul>
試料	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fe-Cr 二元系合金 FXS339~343 (日本鉄鋼連盟作成)</li> </ul>
試料表面傾斜条件 (9条件)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 0~80 度</li> </ul>
試行回数	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 各条件 20 回以上ずつ</li> </ul>

(出所) 早稲田大学大和田研究室提供

### 3.5.3.4 モーターコアの識別条件の検討

昨年度、LIBS ソーターでモーターコア中の銅の検知を試みたところ、銅のピーク波長において十分な発光強度を得ることができなかった。これは、昨年度用いた LIBS ソーターのレーザーパルスエネルギー (1mJ) では、(モーターコア中の) 銅線のように絡み合った複雑な形状のものをプラズマ化させるために必要なエネルギーとして不十分であったことが原因と考えられる。

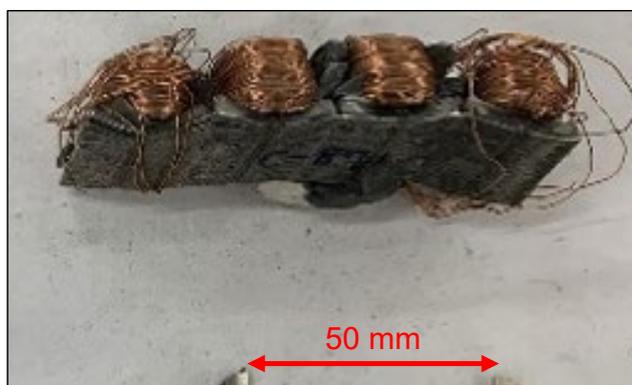
そこで、今年度はレーザーパルスエネルギーを変化させることのできる LIBS 分析装置を用いて、モーターコア中の銅の検知可否を確認した。本試験の条件と本試験に用いたモーターコアの外観を図表 73、図表 74 にそれぞれ示す。なお、本試験で用いた LIBS 分析装置は、3.5.3.3 で使用した装置と同様のものである。

図表 73 LIBS ソーターを用いた試料表面傾斜変化試験における実験条件

レーザーパルスエネルギー [mJ]	■ 1, 3, 5, 10, 20, 40 (6 条件)
試料	■ 銅標準試料 (純度 99.96 %以上,無酸素銅, スタンダードテストピース社より購入) ■ モーターコア×1 個
試行回数	■ 各条件 5 回ずつ

(出所) 早稲田大学大和田研究室提供

図表 74 本試験に用いたモーターコア 外観



(出所) 早稲田大学大和田研究室提供

### 3.6. 事業における環境影響改善効果・CO<sub>2</sub>排出量削減効果の評価

#### 3.6.1. 試算における前提条件の整理

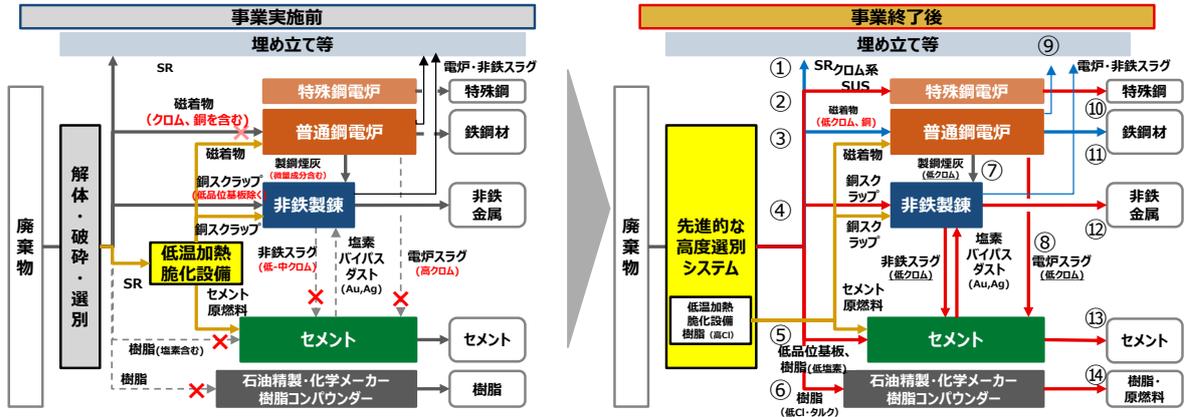
メーカーや用途に応じて設計種別があまり多様化していないこと、集荷が容易であること等に着目し、本事業では「自動販売機」を実証の対象としている。そこで、本事業の環境影響改善効果、CO<sub>2</sub>排出量削減効果の推計においても同様に「自動販売機」を推計対象として選定した。また、本事業における同様の情報連携システムは自動車、家電、小型家電、産業廃棄物由来の雑品等にも応用が期待される。個別リサイクル法の対象となる廃棄物のうち、使用済み製品としての発生量が多いもの、代表性の高いデータの入手が見込めるもの、適正処理に関するトレーサビリティのニーズがありバッチ処理が求められる可能性のあるもの等の観点から、「自動車」も本事業の推計対象とした。

環境影響改善効果、CO<sub>2</sub>排出量削減効果を推計するにあたり、以下の仮定を設定した。なお、以下文中の丸数字は、図表 75 中の丸数字と対応する。

- 使用済み製品から回収された二次資源（普通鋼電炉原料、銅製錬原料、クロム系ステンレス鋼製錬原料、樹脂原料）は、全量水平リサイクル<sup>28</sup>される。そのため、銅スクラップ、低品位基板・樹脂（低塩素・タルク等）の再資源化量が増加（④,⑤,⑥）し、SR・ASRの埋立処分量が減少する（①）。
- 磁着物中のクロム系ステンレス鋼を選別することで、普通鋼電炉向け磁着物の供給量は減少する（③）ものの、クロム系ステンレス鋼が特殊鋼電炉で再資源化される（②）。また、磁着物に微量含まれる銅も選別され、非鉄精錬向け原料として供給される（④）。
- 普通鋼電炉向けに供給される磁着物中のクロム品位が低下することで、鉄鋼材の副産物である製鋼煙灰、電炉スラグ中のクロム品位も低下する（⑦,⑧）。そのため、セメント事業者が受容する電炉スラグ量が増大し、埋立処分される電炉スラグ量が減少する。（⑨）
- 二次資源を原料とした特殊鋼、非鉄金属、セメント、樹脂・原燃料の生産量が増大する（⑩,⑪,⑫,⑬,⑭）。磁着物の供給量減少に伴い二次資源を原料とした鉄鋼材の生産量は減少するものの、磁着物中のクロム品位が減少することで鉄鋼材生産の歩留まりは向上する。（⑩）
- 本推計では、忌避物質が高度に管理された社会を想定する。そのため、回収された二次資源が本事業で設定した再生資源規格の第2等級を満たさない場合、天然資源由来の原料で希釈して生産（再資源化）を行う。
- 忌避物質が高度に管理され、高品質な素材の生産が可能になることから、自動車等には現状あまり利用されていない電炉鋼板であっても、再資源化された後は自動車や自動販売機に等しく使用される。
- 製品は、平均耐用年数使用されたのち全量廃棄され、代わりに（再資源化原料をもとにした）新品製品が使用される。そのため、機能単位時間を製品の平均使用年数で除して得られたサイクル数分、製品の製造、廃棄が行われる。機能単位時間は50年とし、自動販売機では4.6回、自動車では3.8回循環使用される。

<sup>28</sup> 使用済み製品から回収された二次資源が、元の製品・用途と同じ製品・用途に活用されること

図表 75 本事業の実施前後における中間処理産物・素材生産量等の変化



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

### 3.6.2. 資源効率性向上効果の検討

#### 3.6.2.1 資源効率性向上効果に関する定義

事業の採算性や天然資源投入削減量等の観点から評価するべく、本事業では「資源効率性」を“粗付加価値額／天然資源投入量”と定義した。ただし、ここで粗付加価値額とは、“評価時間内において、評価範囲内の各プロセスで生じた粗付加価値額の合計”と定義した。

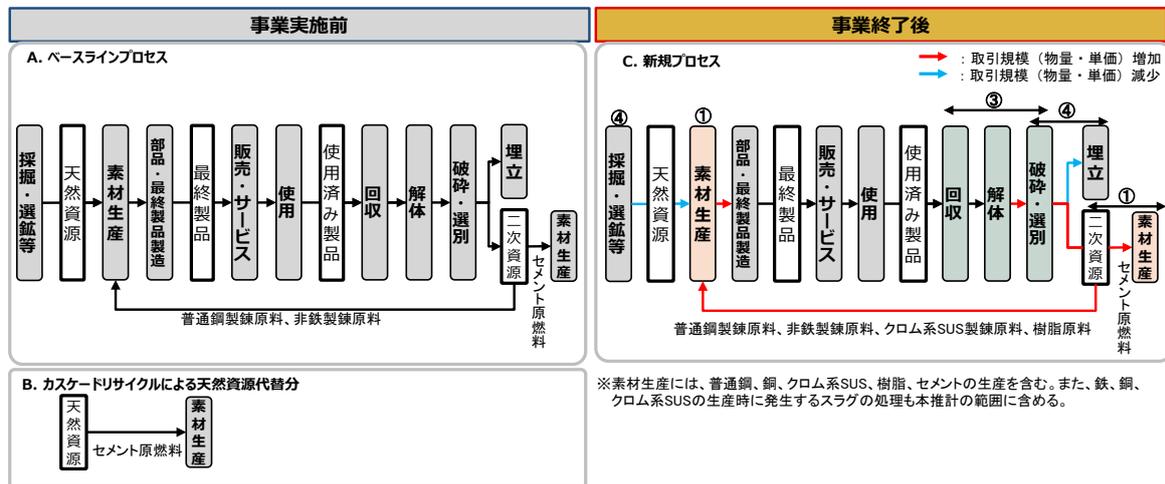
同様に、天然資源投入量とは“評価時間内において、評価範囲内に投入された天然資源投入量の合計”と定義した。事業実施前後における資源効率性を比較し、その向上率を本事業における資源効率性向上効果と定義した。

#### 3.6.2.2 評価単位・評価時間・評価範囲

本推計における評価単位は、“製品 1t の 50 年間の使用と、使用済製品から回収された二次資源によるカスケードリサイクル<sup>29</sup>(回収されたセメント原燃料によるセメント生産)”とした。なお、その他に回収された二次資源（普通鋼電炉原料、銅製錬原料、クロム系ステンレス鋼製錬原料、樹脂原料）は、3.6.1 で言及した通り、全量水平リサイクルされると仮定する。また、ここでの製品とは、先述の通り自動販売機、自動車を想定する。

本推計における評価時間は、50 年と設定した。また、本推計における評価範囲を、採掘・選鉱等、素材生産、最終製品生産、販売・サービス、使用、回収、解体、破碎・選別、埋立とした（図表 76）。

図表 76 資源効率性向上効果の評価範囲



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

<sup>29</sup> 使用済製品から回収された二次資源が、元の製品・用途とは異なる製品・用途に活用されること。

### 3.6.2.3 インベントリ・評価方法

本推計のインベントリを図表 77 に示す。本推計では各プロセスにおける活動量（製品の投入量、産出量、排出量）と単価から、原料費、売上高、処理費用をそれぞれ推計した。売上高から原料費、処理費用を差し引いた額をプロセスごとに積み上げ、その合計額を粗付加価値額とした。また、“天然資源投入量”は、製品の生産に必要な各種天然資源の関与物質総量（TMR：Total Materials Requirement）で評価した。なお、ここでの TMR とは、天然資源を得るために、人間の経済行為として直接・間接的に投入された物質と、直接、間接の経済行為に伴う物質以外にその行為に伴って起きる物質の移動（岩石や土石の移動、森林の伐採量、水の使用等）の総量である。推計に用いた TMR 係数を図表 78 に示す。なお、図表 77 に示す赤字部分の活動量には、本事業の実証で得られた実測値を用いた。

粗付加価値額を天然資源投入量で除して資源効率性を算出し、事業実証前後における資源効率性を比較することで、本事業における資源効率性向上効果を評価した。なお、本推計では、各プロセスにおける主要な製品・原料等のみを対象とし、副産物・副原料等は考慮していない。また、推計対象製品（自動販売機・自動車）に使用された部品や素材の種類・原料投入量等は不明であった。そのため、最終製品生産に係るプロセスでは、推計対象製品の生産における粗付加価値額のみ産業連関表を用いて推計した（波及する部品生産等の粗付加価値額は考慮していない）。詳細な各インベントリにおける推計方法は付録に示す。

図表 77 資源効率性向上効果のインベントリ例（ベースラインプロセス）

No.	プロセス	プレイヤー	プロセスへ投入・排出される製品等			プロセスへ投入・排出される金額							粗付加価値 (e-d-f)			
			a.原料等	b.製品等 (アロケーション対象)	c.不要品 (アロケーション対象外)	a.投入量 (1)	b.産出量 (2)	c.排出量 (3)	a.単価 (4)	b.単価 (5)	c.単価 (6)	d.原料費 (1×4)		e.売上高 (2×5)	f.処理費用 (3×6)	
1-1	採掘・選鉱 (Cr鉱石)	鉱山事業者	-	Cr鉱石 (精鉱)	尾鉱等											
1-2	採掘・選鉱 (鉄鉱石)	鉱山事業者	-	鉄鉱石 (精鉱)	尾鉱等											
1-3	採掘・選鉱 (銅鉱石)	鉱山事業者	-	銅鉱石 (精鉱)	尾鉱等											
1-4	採掘 (原油)	石油開発事業者	-	原油	油性廃棄物等											
2-1	素材生産 普通鋼電炉製錬	普通鋼電炉事業者	鉄スクラップ	鉄鋼材	電炉スラグ (普通鋼) 製鋼塵灰											
2-2	普通鋼高炉製錬	普通鋼高炉事業者	鉄鉱石 (精鉱)	鉄鉄	高炉スラグ											
2-3	鋼製錬	非鉄製錬事業者	銅鉱石 (精鉱) 鋼スクラップ	電気鋼 非鉄スラグ	-											
2-4	溶解・還元 (フェクロム)	フェクロム製錬事業者	Cr鉱石	フェクロム	-											
2-5	特殊鋼電炉製錬	特殊鋼電炉事業者	フェクロム 鉄鉄 Cr系SUSスクラップ	特殊鋼	電炉スラグ (特殊鋼)											
2-6	精製 (原油)	化学メーカー	原油	ナフサ	-											
2-7	樹脂製造	樹脂コンパウンダー	樹脂 (二次原料)	樹脂	-											
2-8	スラグ処理	スラグ処理事業者	電炉スラグ (普通鋼) 高炉スラグ 電炉スラグ (特殊鋼) 非鉄スラグ	珪酸材等	-											
3	最終製品生産	最終製品メーカー	各種部品	最終製品	-											
4	販売・サービス	サービス提供者	-	最終製品	-											
5	使用	ユーザー	-	-	使用済み製品											
6	回収	回収事業者	使用済み製品	使用済み製品	-											
7	解体・破砕・選別	中間処理事業者	解体部品	鉄スクラップ 鋼スクラップ セメント原燃料 Cr系SUSスクラップ 樹脂 (二次原料)	SR											
8	埋立	最終処分事業者	SR	電炉スラグ (普通鋼) 電炉スラグ (特殊鋼) 非鉄スラグ	-											
9	素材生産 セメント製造	セメント事業者	セメント原燃料	セメント	-											
			高炉スラグ 非鉄スラグ 電炉スラグ (普通鋼)													

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 78 各種金属・エネルギー資源における TMR 係数

各種金属・エネルギー資源	数値	単位	出所
クロム	8.9	t / metal-t	(1)
鉄	5.1	t / metal-t	(1)
銅	300	t / metal-t	(1)
原油	0.0074	t / L	(2)
石炭	12.4	t / t	(2)

(出所) 以下をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

(1) : 原田幸明ほか、金属の関与物質総量の概算、日本金属学会誌第 65 巻第 7 号 (2001) p564-p570

(2) : 片桐望ほか、NIMS-EMC 材料環境情報データ No.18 概説 資源端重量 (TMR : Total Materials Requirement)、(独) 物質・材料研究機構 元素戦略クラスター、(2009)

### 3.6.2.4 追加シナリオ

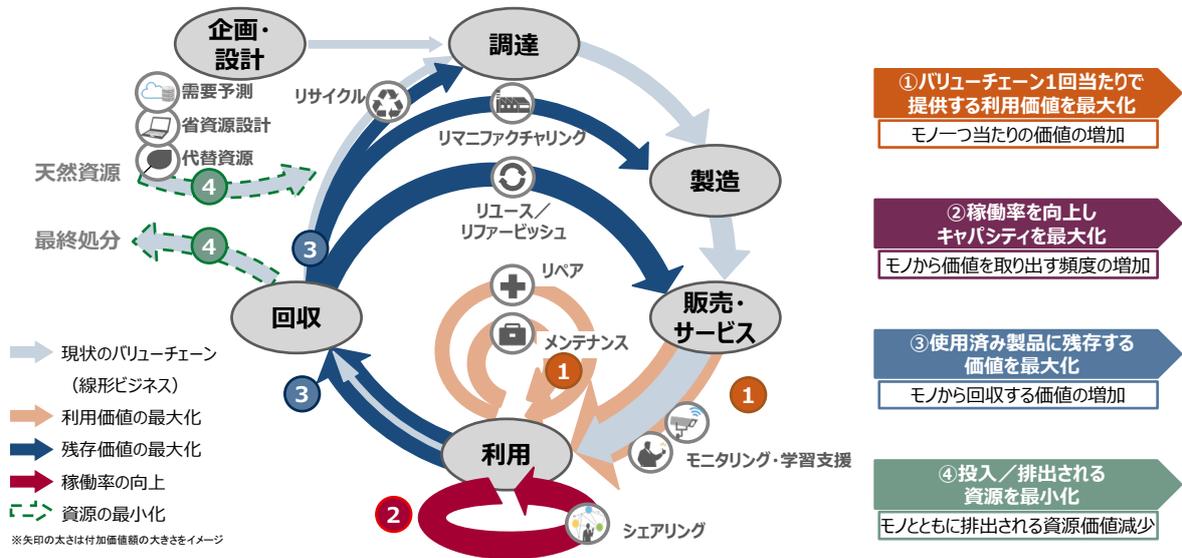
社会全体で資源効率性を高める取り組みを、図表 79 に整理した。資源効率性を向上させる要素としては、「①バリューチェーン 1 回当たりで提供する利用価値を最大化」、「②稼働率を向上しキャパシティを最大化」、「③使用済み製品に残存する価値を最大化」、「④投入／排出される資源を最小化」の 4 つが考えられる。

①は、利用時に提供する価値を向上させるものである。例えば、モニタリング等によって製品の最適稼働支援、劣化予測などを行うことで、資源単位当たり提供する価値を増大させる取り組み等が該当する。②は、製品が有する価値を取り出す回数を増大させる取り組みを指し、シェアリングビジネス等が該当する。③は使用済み製品から取り出す価値を最大化するものであり、リユース、リファービッシュ、リサイクル等の取り組みが該当する。④は循環の系外から投入する資源と系外から排出される資源を最小化する取り組みを指す。

本推計では、3.6.1 で設定した前提条件に加えて、以下の要素によって資源効率性が向上するシナリオを設定した。

- 精緻な事前解体、高度な破碎選別によって使用済み製品から回収する二次資源量を最大化 (③の取り組み) し、天然資源の投入量を最小化する。(④の取り組み)
- 本事業実施前後で最終製品のモニタリング等 (①の取り組み)、シェアリングの普及割合 (②の取り組み) や、使用済み製品が回収され、リユース・リマニファクチャリングが行われる (③の取り組み) 割合は変わらない。

図表 79 資源効率性を向上させる要素



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.6.3. 天然資源採掘量削減効果の検討

#### 3.6.3.1 天然資源採掘量削減効果の定義

本事業では、事業実施前後における天然資源投入量の差分を、天然資源採掘量削減効果と定義した。なお、ここで天然資源投入量とは、資源効率性向上効果と同様に、“評価時間内において、評価範囲内に投入された天然資源投入量の合計”と定義した。

#### 3.6.3.2 評価単位・評価時間・評価範囲

3.6.2 と同様の評価単位、評価時間、評価範囲を設定した。

本推計における評価単位は、“製品 1t の 50 年間の使用と、使用済製品から回収された二次資源によるカスケードリサイクル（回収されたセメント原燃料によるセメント生産）”とした。なお、その他に回収された二次資源（普通鋼電炉原料、銅製錬原料、クロム系ステンレス鋼製錬原料、樹脂原料）は、3.6.1 で言及した通り、全量水平リサイクルされると仮定する。また、ここでの製品とは、先述の通り自動販売機、自動車を想定する。

本推計における評価時間は、50 年と設定した。また、本推計における評価範囲を、採掘・選鉱等、素材生産、最終製品生産、販売・サービス、使用、回収、解体、破碎・選別、埋立とした。

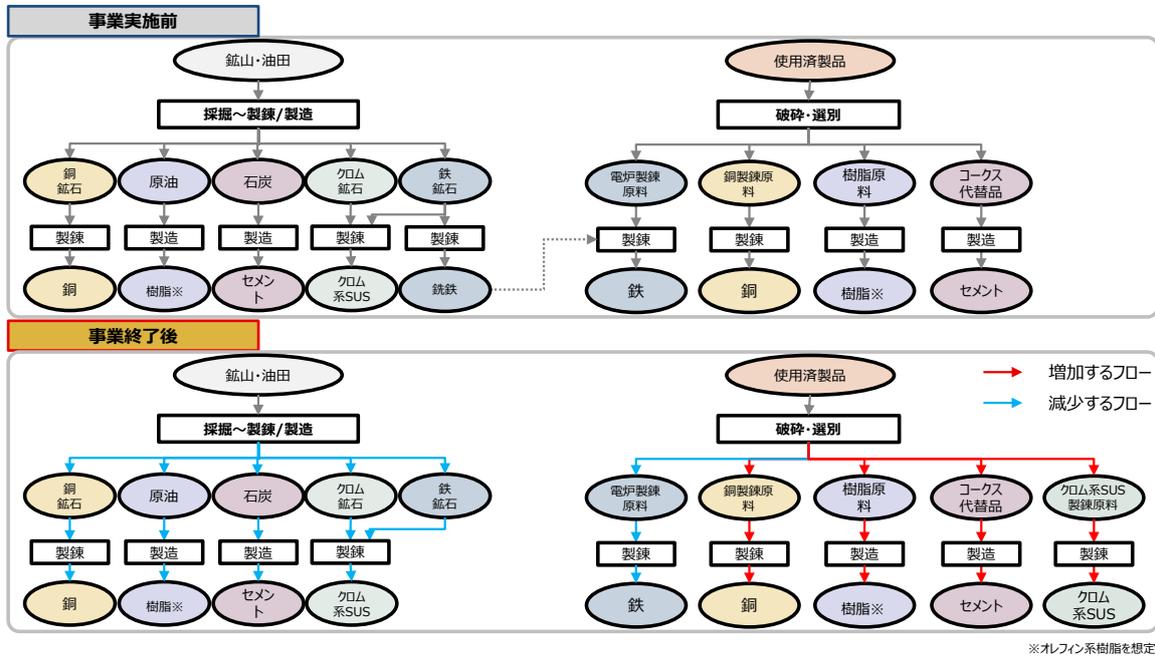
#### 3.6.3.3 インベントリ・評価方法

天然資源採掘削減量は、製品の生産に必要な天然資源の関与物質総量（TMR：Total Materials Requirement）で評価した。

本事業実施前後における二次資源及び天然資源を原料とした素材生産の増減イメージを図表

80 に示す。事業実施前後におけるクロム鉱石、鉄鉱石、銅鉱石、原油、石炭に係る関与物質総量をそれぞれ推計し、その削減量を推計した。

図表 80 本事業実施前後における二次資源及び天然資源を原料とした素材生産量の増減イメージ



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.6.3.4 追加シナリオ

3.6.2 と同様のシナリオを設定した。

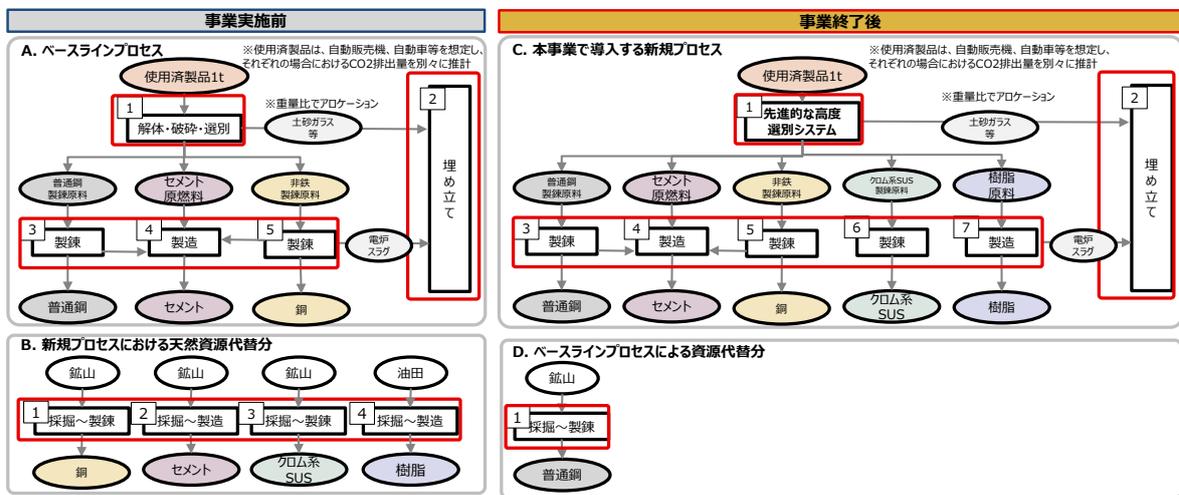
### 3.6.4. CO<sub>2</sub> 排出量削減効果

#### 3.6.4.1 評価単位・評価時間・評価範囲

本推計における評価単位は、“製製品 1t の 50 年間の使用と本事業で設定した再生資源規格の第 2 等級を満たす二次資源を原料とした素材（普通鋼、非鉄金属、クロム系ステンレス鋼、セメント、樹脂）生産”とした。なお、使用済製品は、自動販売機、自動車等を想定し、それぞれの場合における CO<sub>2</sub> 排出量を別々に推計した。

本推計における評価時間は、50 年と設定した。また、本推計における評価範囲を、破碎・選別、埋立、普通鋼電炉製錬、非鉄（銅）製錬、ステンレス鋼製錬、セメント製造、樹脂製造、本事業導入時に二次資源へ代替される天然資源生産とした（図表 81）。

図表 81 CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の評価範囲



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

#### 3.6.4.2 インベントリ・評価方法

本推計におけるインベントリを図表 82、図表 83 にそれぞれ示す。赤字で示す活動量には、本事業の実証で得られた実測値を用いた。また青字で示す活動量には、日本全国の活動量とコンソーシアム内（研究会メンバー）の活動量をそれぞれ用いた。

本推計では、日本全国の活動量とコンソーシアム内（研究会メンバー）の活動量を活用し、コンソーシアム内における CO<sub>2</sub> 排出量削減効果と、日本全国における CO<sub>2</sub> 排出量削減効果をそれぞれ算出した。

図表 82 CO<sub>2</sub>排出量削減効果のインベントリ（自動販売機）

番号	活動量	推計方法	備考
A-1	使用済み製品処理量(アロケーション後)	定数(1t)	
A-2	発生したSRの埋立量	機能単位あたりのSRの発生量(事業実施前、③)	注1)
A-3	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	機能単位あたりの鉄製錬原料回収量(事業実施前、③)/粗鋼製造1t当たりの鉄製錬原料投入量 ※粗鋼製造1t当たりの鉄製錬原料投入量=鉄製錬原料投入量/粗鋼生産量	注2)
A-4	希釈用に投入される天然資源を原料とした機能単位当たりの銑鉄生産量	自動販売機ではなしとした。	
A-5	投入された原燃料向け樹脂量	機能単位あたりの原燃料向け樹脂回収量(事業実施前、③)	注2)
A-6	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	機能単位あたりの電炉スラグ回収量/セメント製造1t当たりの電炉スラグ投入量 ※機能単位あたりの電炉スラグ回収量=セメント産業における電炉スラグ投入量×(機能単位当たりの鉄製錬原料回収量(事業実施前、③)/鉄製錬原料投入量) ※セメント製造1t当たりの電炉スラグ投入量=セメント産業における電炉スラグ投入量×セメント生産量	注2)
A-7	回収された鋼製錬原料由来の鋼生産量	機能単位あたりの鋼製錬原料回収量(事業実施前、③)×鋼製錬原料(スクラップ)歩留まり	注2)
B-1	代替された天然資源由来の燃料量	C-4 - A-4	
B-2	代替された天然資源由来のセメント生産量	C-5 - A-6	
B-3	代替された天然資源由来の鋼生産量	C-6 - A-7	
B-4	代替された天然資源由来のSUS生産量	C-7	
B-5	代替された天然資源由来の樹脂生産量	C-8	
C-1	使用済み製品処理量(アロケーション後)	定数(1t)	
C-2	発生したSRの埋立量	機能単位あたりに発生するSRの埋立量(事業実施後、③)	注1)
C-3	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	機能単位あたりの鉄製錬原料回収量(事業実施後、③)/粗鋼製造1t当たりの鉄製錬原料投入量 ※粗鋼製造1t当たりの鉄製錬原料投入量=鉄製錬原料投入量/粗鋼生産量	注2)
C-4	回収された原燃料向け樹脂量	機能単位あたりの原燃料向け樹脂回収量(事業実施後、③)	注2)
C-5	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	機能単位あたりの電炉スラグ回収量/セメント製造1t当たりの電炉スラグ投入量 ※機能単位あたりの電炉スラグ回収量=セメント産業における電炉スラグ投入量×(機能単位当たりの鉄製錬原料回収量(事業実施後、③、⑤)/鉄製錬原料投入量)×(事業実施後の鉄製錬原料中のCr含有率(③、⑤)/事業実施前のCr含有率(③、⑤)) ※セメント製造1t当たりの電炉スラグ投入量=セメント産業における電炉スラグ投入量×セメント生産量	注2)
C-6	回収された鋼製錬原料由来の鋼生産量	機能単位あたりの鋼製錬原料回収量(事業実施後、③)×鋼製錬原料(スクラップ)歩留まり	注2)
C-7	回収されたSUS製錬原料由来のSUS生産量	機能単位あたりのSUS製錬原料回収量(③)/SUS製造1t当たりのSUS製錬原料投入量 ※SUS製造1t当たりのSUS製錬原料投入量=SUS製錬原料投入量/SUS生産量	注2)
C-8	回収された樹脂原料由来の樹脂生産量	機能単位あたりの樹脂原料(二次資源)回収量(③)/樹脂製造1t当たりに樹脂原料(二次資源)投入量 ※樹脂製造1t当たりに樹脂原料(二次資源)投入量=樹脂原料(二次資源)投入量/樹脂生産量	注2)
D-1	代替された天然資源由来の粗鋼生産量	A-3 - C-3	

注1):SRの発生量を埋立量とみなす。  
注2):回収量を投入量とみなす。

図表 83 CO<sub>2</sub>排出量削減効果のインベントリ（自動車）

番号	活動量	推計方法	備考
A-1	使用済み製品処理量(アロケーション後)	定数(1t)	
A-2	発生したASRの埋立量	機能単位あたりに発生するSRの埋立量	注1)
A-3	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	機能単位あたりの鉄製錬原料回収量(事業実施前)/粗鋼製造1t当たりの鉄製錬原料投入量/(Cr含有率(事業実施前)/Cr受け入れ基準) ※粗鋼製造1t当たりの鉄製錬原料投入量=鉄製錬原料投入量/粗鋼生産量	注2)
A-4	希釈用に投入される天然資源を原料とした機能単位当たりの銑鉄生産量	=A-1-3* (1-Cr受け入れ基準/Cr含有率(事業実施前))	
A-5	投入された原燃料向け樹脂量	機能単位あたりの原燃料向け樹脂回収量	注2)
A-6	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	機能単位あたりの電炉スラグ回収量/セメント製造1t当たりの電炉スラグ投入量 ※機能単位あたりの電炉スラグ回収量=セメント産業における電炉スラグ投入量×(機能単位当たりの鉄製錬原料回収量/鉄製錬原料投入量) ※セメント製造1t当たりの電炉スラグ投入量=セメント産業における電炉スラグ投入量×セメント生産量	注2)
A-7	回収された鋼製錬原料由来の鋼生産量	機能単位あたりの鋼製錬原料回収量×鋼製錬原料(スクラップ)歩留まり	注2)
B-1	代替された天然資源由来の燃料量	C-4 - A-4	
B-2	代替された天然資源由来のセメント生産量	C-5 - A-6	
B-3	代替された天然資源由来の鋼生産量	C-6 - A-7	
B-4	代替された天然資源由来のSUS生産量	C-7	
B-5	代替された天然資源由来の樹脂生産量	C-8	
C-1	使用済み製品処理量(アロケーション後)	定数(1t)	
C-2	発生したASRの埋立量	A-2 - C1-4 - C1-8	
C-3	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	機能単位あたりの鉄製錬原料回収量(事業実施後)/粗鋼製造1t当たりの鉄製錬原料投入量 機能単位当たりの鉄製錬原料回収量(事業実施前)×自動販売機における鉄製錬原料回収増加率(事業実施後④)×((1-Cr系SUS含有率)×鉄製錬原料からの普通鋼回収率(事業実施後⑤)+Cr系SUS含有率×(1-Cr系SUS回収率(事業実施後⑤)))×Cr除去率(事業実施後⑥)	注2) 注2)
C-4	回収された原燃料向け樹脂量	A-1-4 + A-1-2×自動販売機におけるSRからの原燃料向け樹脂回収率(事業実施後④)	注2)
C-5	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	機能単位あたりの電炉スラグ回収量/セメント製造1t当たりの電炉スラグ投入量 ※機能単位あたりの電炉スラグ回収量=セメント産業における電炉スラグ投入量×(機能単位当たりの鉄製錬原料回収量(C-1-3から推計)/鉄製錬原料投入量)×(事業実施後の鉄製錬原料中のCr含有率(④、⑤)/事業実施前のCr含有率(③、⑤)) ※セメント製造1t当たりの電炉スラグ投入量=セメント産業における電炉スラグ投入量×セメント生産量	注2) 注2)
C-6	回収された鋼製錬原料由来の鋼生産量	※電気鋼製造1t当たりの鋼製錬原料投入量=鋼製錬原料投入量/電気鋼生産量	
C-7	回収されたSUS製錬原料由来のSUS生産量	鉄製錬原料回収量(事業実施前)×鉄製錬原料からのSUS除去率(⑤)/SUS製造1t当たりのSUS製錬原料投入量 ※SUS製造1t当たりのSUS製錬原料投入量=SUS製錬原料投入量/SUS生産量	注2)
C-8	回収された樹脂原料由来の樹脂生産量	A-2×自動販売機におけるSRからの樹脂原料(二次資源)回収率(事業実施後⑤) ※樹脂製造1t当たりに樹脂原料(二次資源)投入量=樹脂原料(二次資源)投入量/樹脂生産量	注2)
D-1	代替された天然資源由来の粗鋼生産量	A-3 - C-3	

注1):SRの発生量を埋立量とみなす。  
注2):回収量を投入量とみなす。

### 3.7. 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討・出口戦略の検討

#### 3.7.1. 金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討

本事業の成果により、未回収資源の利用促進と資源価値の高い再生資源の供給が進み、リサイクルビジネスの活性化が期待される。解体・破碎・選別プロセスや情報連携システムの実証試験結果を踏まえて、ケーススタディの対象とした使用済み自動販売機のみでなく、使用済み自動車や廃家電、廃小型家電などへの展開可能性と、展開に際しての課題を検討した。検討結果は後述する共同実施者等との打合せ等を通じて、共同実施者や研究会参画企業と意見交換を行った。

#### 3.7.2. 出口戦略の検討

##### 3.7.2.1 採算性分析

実証テーマ3では、複数のパターンで使用済み自動販売機を解体し、事前に部品回収を行ったのち、筐体の破碎・選別試験を行った。回収した磁着物やミックスメタル、ダストの重量及び品位は、解体パターンによって変動した。これに伴って、資源販売収入や廃棄物処理費用が変化すると見込まれる。また、事前に取り外す部品が増えると、作業工数が多くなり、人件費が増加する。そのため、経済性の分析には、解体工数の増加も考慮する必要がある。

実証テーマ4では、使用済み自動販売機の入荷からフロン回収、解体、破碎・選別までの一連の工程で、試作した情報連携システムを活用し、忌避物質の管理に関する情報を記録した。情報連携システムを導入することで、使用済み自動販売機へのQRシールの貼り付けや、スマートフォン端末への入力、写真撮影などによる作業工数の増加が見込まれる。また、システムを導入する際にも、追加的な費用が必要となる。一方、現状、自動販売機からフロンを回収する際の記録・管理は、解体現場で作業員が手書きで冷媒の種類や回収量を記入し、これを事務担当者がPCに入力している。試作した情報連携システムでは、こうした情報ははじめからシステム上に記録できるような設計にしているため、作業を効率化できる。

そこで、「富士電機・セレクション30」を年間1,000台処理すると仮定し、経済性分析を行った。現状の解体方法である「ブランク」と比較して、「解体パターン①・情報連携あり」で同様の経済性を確保できるか、推計結果をもとに検討した。また、本実証の結果を踏まえて検討した目標（磁着物販売価格69円/kg、情報記録作業1分間短縮、システム導入運用費を10%削減）を達成した場合を「改善後」として、採算性の評価を行った。

図表 84 採算性分析の推計方法（ブランクー解体パターン①（情報連携あり）の比較）

費目		推計方法
収入	処理手数料	使用済み自動販売機1台あたりの処理手数料より推計
	資源販売	産物回収比率・元素分配率は実証試験の結果より引用 <ul style="list-style-type: none"> <li>・磁着物：ブランクはシュレッダーC (57円/kg)</li> <li>パターン①は新断バラ (59円/kg) 相当と仮定</li> <li>※改善後は情報追跡可能な再生資源に付加価値がつき、69円/kgで販売すると仮定</li> <li>・ミックスメタル：銅品位に銅価格(1.2千円/kg)を掛けて算出</li> </ul>
支出	解体	時間分析の結果に廃棄物処理業の平均賃金 (0.61円/秒) を掛けて算出
	破碎・選別	費用は変わらないと想定
	フロン管理	時間分析の結果（解現場での手書き工数+事務担当者のPCへの入力工数）に廃棄物処理業の平均賃金 (0.61円/秒) を掛けて算出
	情報記録	時間分析の結果に廃棄物処理業の平均賃金 (0.61円/秒) を掛けて算出 ※改善後は作業時間を1分間短縮できると仮定
	システム導入	<ul style="list-style-type: none"> <li>・端末：スマートフォン購入費 (4万円/台) を減価償却4年で割って算出</li> <li>・通信費：想定される契約プラン (3G/月) より算出</li> <li>・運用費：ヒアリングをもとに設定</li> <li>※改善後は運用費を90%まで減額できると仮定</li> </ul>
	廃棄物処理	ダスト：全量廃棄物として処理されると想定 (70円/kg)

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 3.7.2.2 事業成果の実装に向けた課題検討

各テーマの検討結果、また採算性分析の結果を踏まえて、事業成果を実装するための課題を検討した。検討結果は後述する共同実施者等との打合せ等を通じて、共同実施者や研究会参画企業と意見交換を行った。

### 3.7.2.3 出口戦略の検討（ロードマップの整理）

上記で検討した課題の解決に必要な取り組みを整理し、実証期間内実施するもの（2022年まで）、実証事業後に実施するもの（2024年まで、2025年以降）に分けて、ロードマップを整理した。検討結果は後述する共同実施者等との打合せ等を通じて、共同実施者や研究会参画企業と意見交換を行った。

## 3.8 「包括的中間処理（ソーティングセンター4.0）の実現に向けた再資源化技術・システム実証事業」の現地視察会の開催

下記の通り、現地視察会を開催した。

- 日時：令和3年9月17日（金）13:30～15:30
- 場所：オンライン開催
- 出席者
  - ・ 環境省 事業担当者 2名
  - ・ 事業審査委員 1名
  - ・ 事務局業務受託者 2名
- 対応者
  - ・ 株式会社ツルオカ 堤 庸佐
  - ・ 株式会社ムスピメ（エスエルネット） 長島 行人
  - ・ 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社 清水 孝太郎、小川 恵司、園原 惇史
- 議事次第
  - （1） 本事業の目的及び進捗状況（実証結果）のご説明
  - （2） (株)ツルオカ概要及び解体・破碎・選別工程のご説明
  - （3） (株)ムスピメ（エスエルネット）概要及び情報連携システムのご説明
  - （4） 質疑応答①
  - （5） 解体実証試験（情報連携システムを含む）のご視察
  - （6） 質疑応答②

### 3.9. 共同実施者等との打合せ

下記の通り、共同実施者及び研究会参画企業と打ち合わせを実施した。また、必要に応じて、共同実施者である太平洋セメント、イーベックスジャパンとは随時打ち合わせを行った。

- 日時：令和3年5月24日（月）13:00～14:30
- 場所：テレビ会議（ZOOM）
- 議事次第
  - （1） 令和3年度事業計画の説明
  - （2） 実証テーマ5に関する実施方針の説明
  - （3） 事務手続きに関する説明
  - （4） 今後の予定
  
- 日時：令和3年6月3日（木）15:00～17:00
- 場所：テレビ会議（ZOOM）
- 議事次第
  - （1） 令和3年度事業計画の説明
  - （2） 実証テーマ1に関する実施方針の説明
  - （3） 実証テーマ2に関する実施方針の説明
  - （4） 実証テーマ3に関する実施方針の説明
  - （5） 実証テーマ4に関する実施方針の説明
  - （6） 事務手続きに関する説明
  - （7） 今後の予定
  
- 日時：令和3年7月28日（水）13:00～15:00
- 場所：テレビ会議（ZOOM）
- 議事次第
  - （1） 実証テーマ①に関する進捗説明
  - （2） 実証テーマ②～④に関する進捗説明
  - （3） 実証テーマ⑤に関する進捗説明
  - （4） 今後の予定
  
- 日時：令和3年9月21日（火）15:00～16:30
- 場所：テレビ会議（ZOOM）
- 議事次第
  - （1） 環境省中間報告に関する説明
  - （2） 実証テーマ⑤（電磁ファイナダーにおける選別条件の検討）に関する進捗説明
  - （3） 実証テーマ⑤（LIBSソーターにおける選別条件の検討）に関する進捗説明実証
  - （4） 今後の予定

- 日時：令和3年9月28日（火）10:00～12:00
- 場所：テレビ会議（ZOOM）
- 議事次第
  - （1） 環境省中間報告に関する説明
  - （2） 実証テーマ①に関する進捗説明
  - （3） 実証テーマ②～④に関する進捗説明
  - （4） 事業におけるCO<sub>2</sub>・環境影響改善効果等の評価に関する進捗説明
  - （5） 今後の予定
  
- 日時：令和3年12月8日（水）10:00～12:00
- 場所：テレビ会議（ZOOM）
- 議事次第
  - （1） 実証テーマ①に関する進捗説明
  - （2） 実証テーマ②～④に関する進捗説明
  - （3） 実証テーマ⑤に関する進捗説明
  - （4） 事業におけるCO<sub>2</sub>・環境影響改善効果等の評価に関する進捗説明
  - （5） 今後の予定
  
- 日時：令和4年1月27日（木）13:00～16:00
- 場所：テレビ会議（ZOOM）
- 議事次第
  - （1） 実証テーマ①に関する進捗説明
  - （2） 実証テーマ②～④に関する進捗説明
  - （3） 実証テーマ⑤に関する進捗説明
  - （4） 事業におけるCO<sub>2</sub>・環境影響改善効果等の評価に関する進捗説明
  - （5） 令和4年度事業と出口戦略に関する説明
  - （6） 今後の予定
  
- 日時：令和4年2月28日（月）15:00～16:10
- 場所：テレビ会議（ZOOM）
- 議事次第
  - （1） 実証テーマ⑤に関する進捗説明（電磁式ファインダー）
  - （2） 実証テーマ⑤に関する進捗説明（LIBSソーター）
  - （3） 令和4年度事業に関する説明
  
- 日時：令和4年3月3日（木）13:00～15:00
- 場所：テレビ会議（ZOOM）
- 議事次第
  - （1） 実証テーマ①に関する説明
  - （2） 実証テーマ②に関する説明
  - （3） 実証テーマ③（解体実証）に関する説明

- (4) 実証テーマ④に関する説明
- (5) 実証テーマ③（選別技術実証）に関する説明
- (6) 令和4年度事業に関する説明

### 3.10. 評価審査委員会の出席

下記の通り、環境省及び本事業事務局が開催する2回の評価審査会に参加した。

#### ➤ 中間報告会

- ・ 日時：令和3年10月6日（水）16:15～16:40
- ・ 開催方法：ビデオ会議（ZOOM）
- ・ 参加者：
  - 太平洋セメント株式会社 花田 隆、竹本 智典
  - 株式会社ツルオカ 堤 庸佐
  - 株式会社ムスビメ（エスエルネット）長島 行人
  - 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社 清水 孝太郎、小川 恵司、園原 惇史

#### ➤ 最終報告会

- ・ 日時：令和4年2月15日（火）
- ・ 開催方法：ビデオ会議（ZOOM）
- ・ 参加者：
  - 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社  
清水 孝太郎、小川 恵司、迫田 瞬、園原 惇史、千賀 太喜

## 4. 結果及び考察

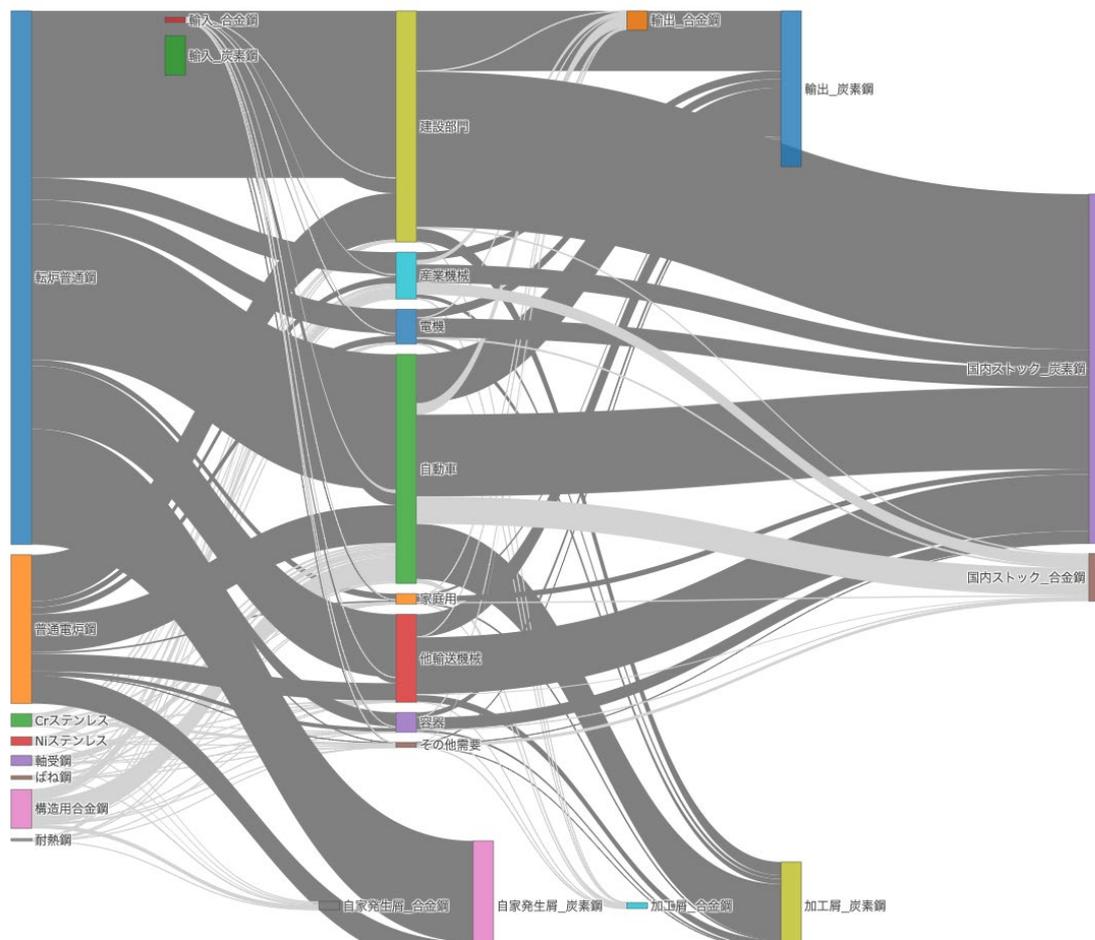
### 4.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証テーマ1）

#### 4.1.1. マテリアルフロー分析結果

##### 4.1.1.1 バルク量

国内に投入される鉄鋼材のフローを図表 85 に示す。転炉普通鋼や普通電炉鋼は、主に建設用途や自動車用途に使用されており、国内にストックされるほか、一部は炭素鋼として輸出されている（製品中に含まれるものも含む）。また、各用途に投入された炭素鋼の一部は、加工スクラップとして排出されており、特に自動車由来の加工スクラップの発生量が多いことがわかる。また、特殊鋼（ステンレス鋼や合金鋼）は、主に自動車や産業機械に投入されている。これらも炭素鋼と同様に、国内にストックされるほか、一部は輸出されている。

図表 85 バルク量推計結果（国内に投入される鉄鋼のフロー）

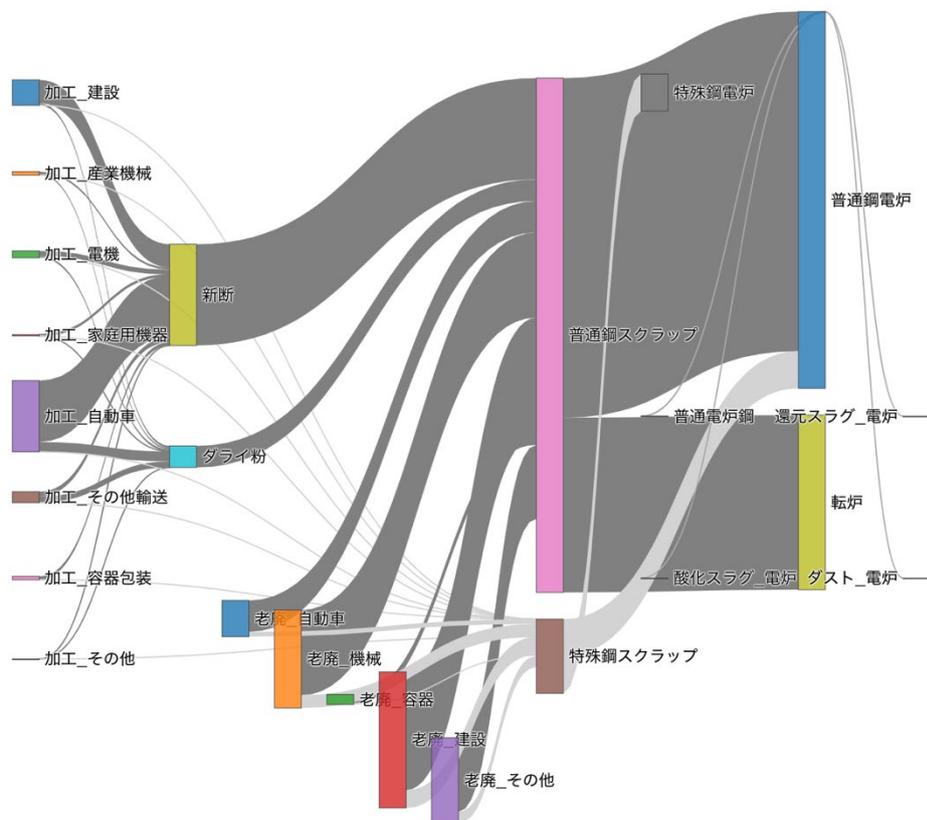


(出所) 東京大学村上研究室作成

次に、普通鋼電炉・転炉に投入されるスクラップのバルク量推計結果を、図表 86 に示す。図中左端に位置しているのが加工スクラップ（新断、ダライ粉）である。図表 85 で確認されたように、自動車由来の加工スクラップの発生量が多く、新断の大半を占めていた。このほか、建設物や電気機器由来の加工スクラップの使用量が多い。

図中・中央下部には、老廃スクラップ（ヘビー、プレス、シュレッダー）から投入されるスクラップのフローを記載している。建設物や機械由来の老廃スクラップの発生量が多いことがわかる。特殊鋼電炉に投入される特殊鋼スクラップは限定的であり、特殊鋼スクラップの多くは、普通鋼電炉に投入されている。特殊鋼にはステンレス鋼など、クロムの含有量が多い鋼種が含まれており、普通鋼電炉におけるクロム混入源である可能性が示唆された。

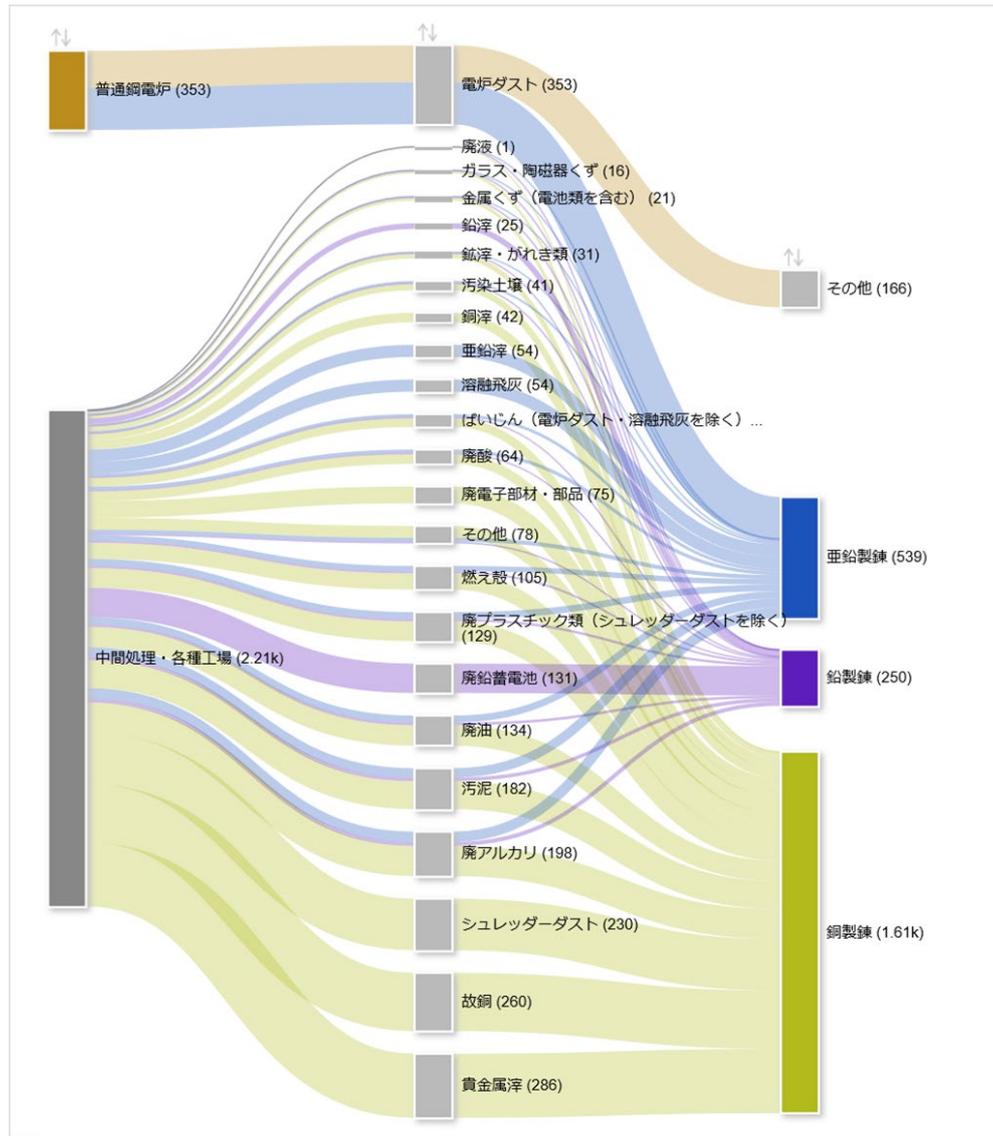
図表 86 バルク量推計結果（普通鋼電炉・転炉に投入されるスクラップのフロー）



(出所) 東京大学村上研究室作成

非鉄製錬（銅、鉛、亜鉛）に投入される廃棄物・副産物等のフローを図表 87 に示す。図表 86 の右端にある「普通鋼電炉・ダスト」の一部が、図表 87 の上部にある「電炉ダスト」として非鉄製錬に供給されていることになる。亜鉛製錬では、普通鋼電炉から供給される電炉ダストの消費量が多いことがわかる。このほか、熔融飛灰や亜鉛滓の使用量が多い。鉛製錬は廃鉛蓄電池の使用量が多く、銅製錬は貴金属滓、故銅、シュレッダーダストの使用量が多かった。

図表 87 バルク量推計結果  
 (非鉄製錬に投入される廃棄物・副産物等のフロー：2019 年度・1,000t)



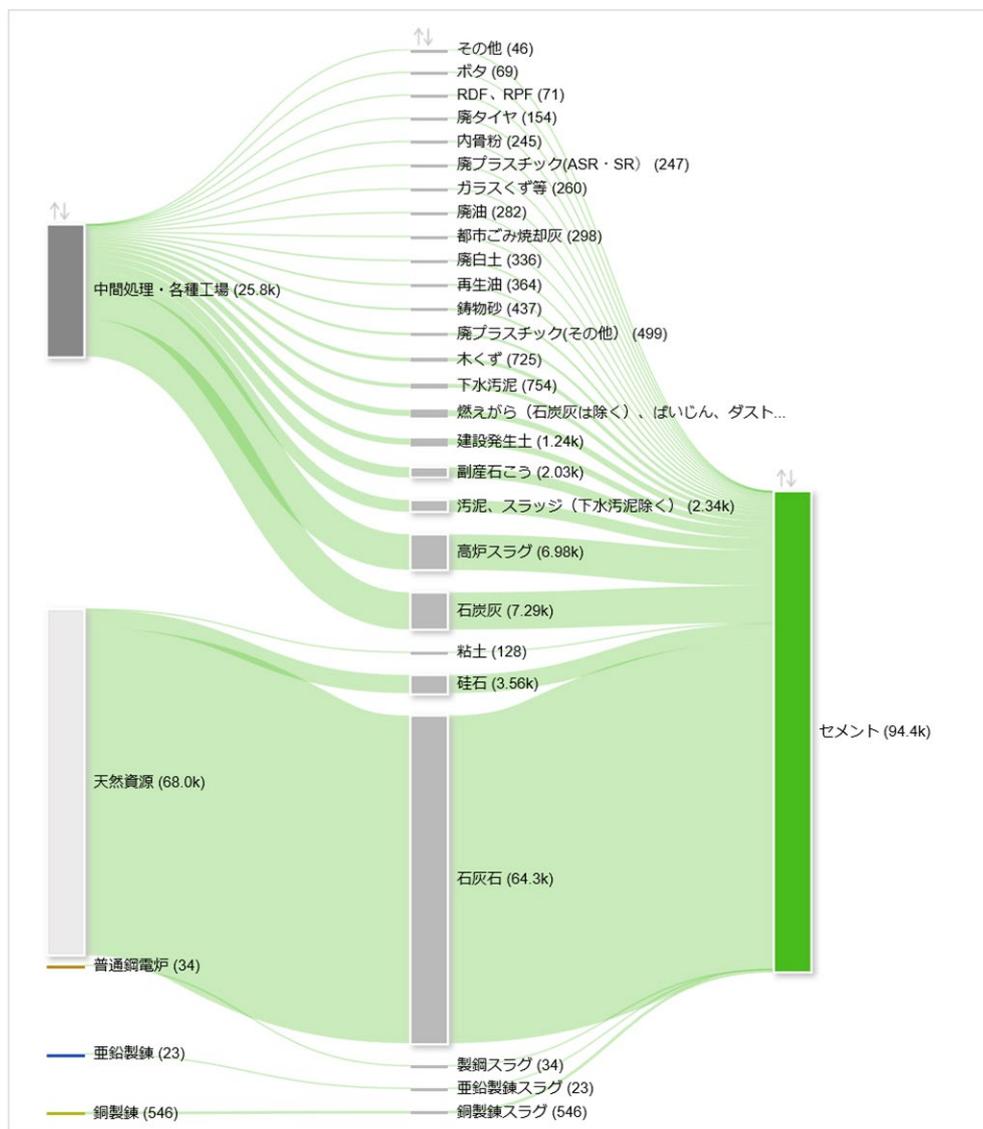
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

セメント産業に投入される天然資源・廃棄物・副産物等のフローを図表 88 に示す。図表 86 の右端にある「普通鋼電炉・スラグ」の一部が、図表 88 の「普通鋼電炉・製鋼スラグ」として供給されることになる。また、図表 87 の右端にある「亜鉛製錬」、「銅製錬」から発生したスラグの一部が、図表 88 の左端及び中央の「亜鉛製錬・亜鉛製錬スラグ」「銅製錬・銅製錬スラグ」として投入されている。

セメント産業で使用される原料のうち、最も大きな割合を占めるのは、天然資源由来の石灰石である。一方、廃棄物・副産物等も相当な量を受け入れており、特に、石炭灰や高炉スラグ、汚泥・スラッジ（下水汚泥を除く）の消費量が多い。また、普通鋼電炉由来の製鋼スラグを 34 千 t、亜鉛製錬由来のスラグを 23 千 t、銅製錬由来のスラグを 546 千 t 使用していると推計された。

図表 88 バルク量推計結果

(セメント産物に投入される天然資源・廃棄物・副産物のフロー：2019 年度・1,000t)



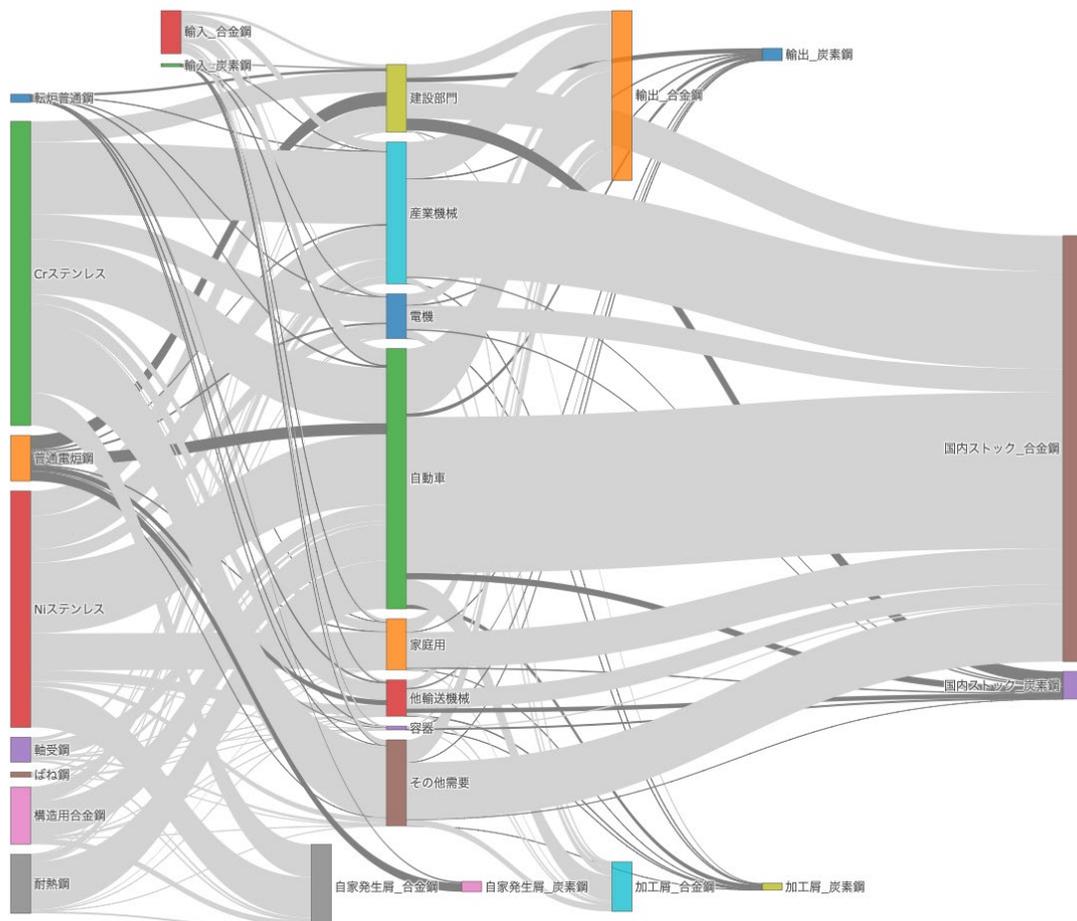
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

#### 4.1.1.2 クロム

国内に投入される鉄鋼に随伴して、各種製品等に投入されるクロムのマテリアルフローを図表 89 に示す。国内に投入されるクロム源は主にステンレス鋼（クロム系ステンレス鋼、ニッケル系ステンレス鋼）であることが分かった。そのほか、構造用合金鋼や遮熱鋼もクロム源であった。ステンレス鋼などと比較すると影響は小さいものの、普通電炉鋼にもクロムが含まれており、普通電炉鋼中のクロムは自動車や建設物に使用されていた。

用途別では、自動車で使用されるクロムが多く、次いで産業機械や建設物の使用量が多かった。図表 86 において、産業機械に使用される鉄鋼のバルク量は、自動車や建設物と比較して少なかったが、図表 89 では大きな割合を占めている。そのため、産業機械には、その他の製品・用途と比較して、多くのクロムが含まれている可能性がある。

図表 89 クロムのマテリアルフロー推計結果  
(鉄鋼に随伴して流入する量：2019年)

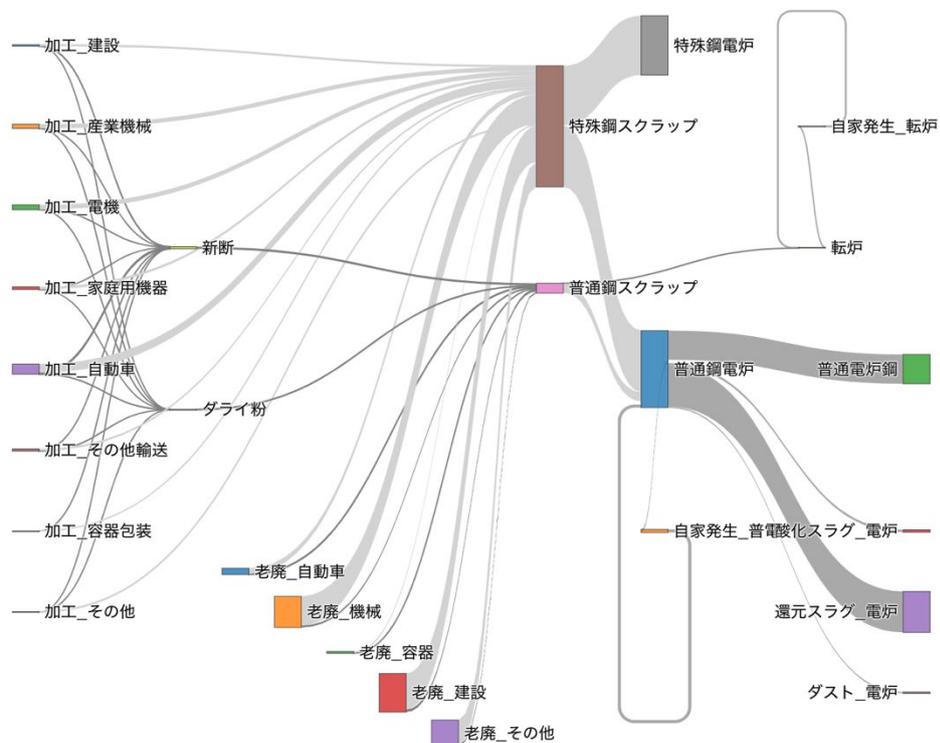


(出所) 東京大学村上研究室作成

スクラップに随伴して、特殊鋼電炉及び普通鋼電炉に流入するクロムのマテリアルフローを図表 90 に示す。特殊鋼スクラップは、加工スクラップ及び老廃スクラップの双方に含まれ、特殊鋼電炉や普通鋼電炉に流入していることが明らかになった。自動車や産業機械由来の加工スクラップ、機械や建設物由来の老廃スクラップが主な流入源であった。

特殊鋼スクラップに含まれるクロムは、およそ半数が特殊鋼電炉で消費されるが、残り半分は普通鋼電炉に流入している。普通鋼電炉に流入したクロムは、半分弱が普通電炉鋼に分配されるが、半分以上は還元スラグ、酸化スラグ、ダストに分配されていた。今回の推計結果より、普通鋼電炉に投入される製鋼原料中の特殊鋼スクラップが、電炉普通鋼やスラグ、ダストのクロム流入源であることが明らかになった。

図表 90 クロムのマテリアルフロー推計結果  
(スクラップに随伴して特殊鋼電炉・普通鋼電炉に流入する量：2019年)

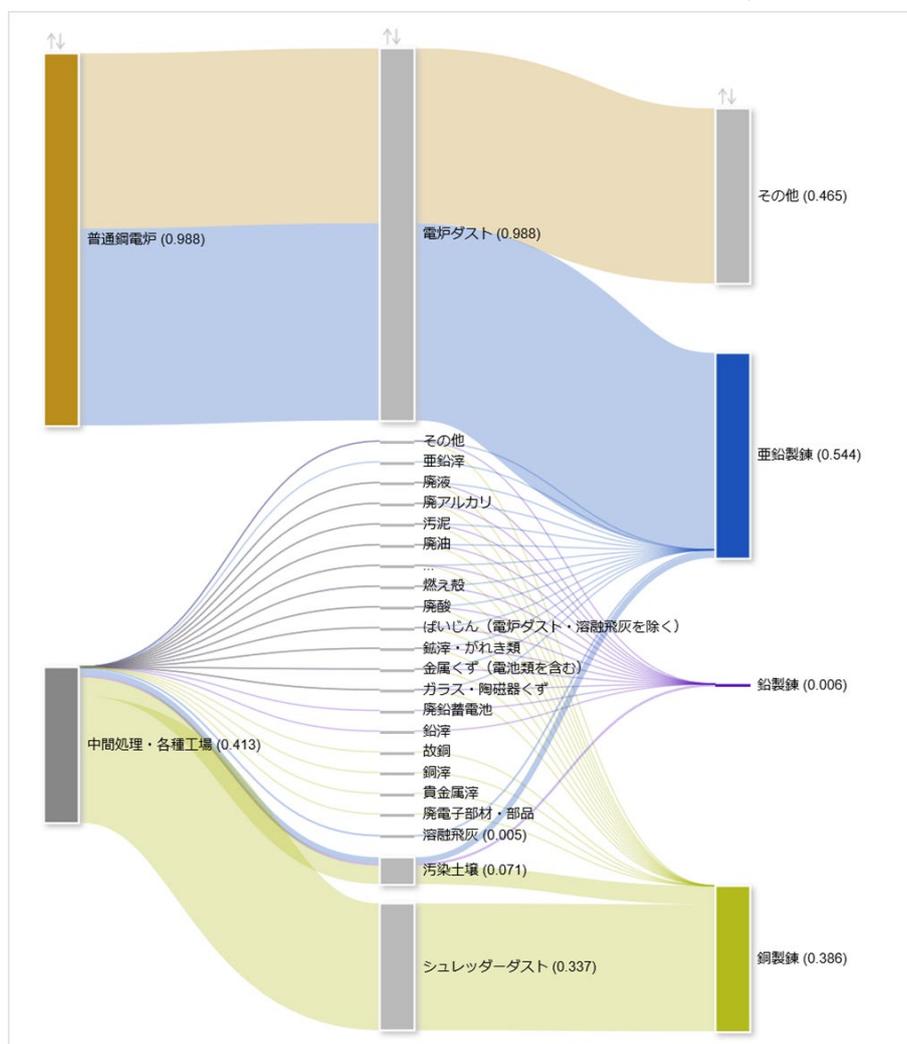


(出所) 東京大学村上研究室作成

廃棄物・副産物等に随伴して非鉄製錬（銅、鉛、亜鉛）に流入するクロムのマテリアルフローを図表 91 に示す。

亜鉛製錬には、電炉ダスト由来のクロムが相当量流入していることが分かった（年間 0.5 千 t）。なお、図表 90 と図表 91 はそれぞれ独立したデータをもとに推計しているため、一部マテリアルバランスが取れていない（電炉ダスト由来のクロム：1.59 千 t（図表 90）、0.99 千 t（図表 91））。電炉ダスト以外では、汚染土壌や熔融飛灰が亜鉛製錬におけるクロムの混入源であった。鉛製錬に流入するクロムの情報は十分明らかになっていない。銅製錬には、シュレッダーダスト由来のクロムが年間 0.4 千 t 流入していると推測された。なお、図中に数字の表記がないものは、成分情報を捕捉できていない廃棄物・副産物等である。今後、成分情報が未捕捉のフローの実態を解明し、より精緻にクロムの混入源を特定することが求められる。

図表 91 クロムのマテリアルフロー推計結果  
 （廃棄物・副産物等に随伴して非鉄製錬に流入する量：純分換算 1,000t・2019 年度）



(注) 数字の記載がないフローは成分情報等が不明のもの  
 (出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

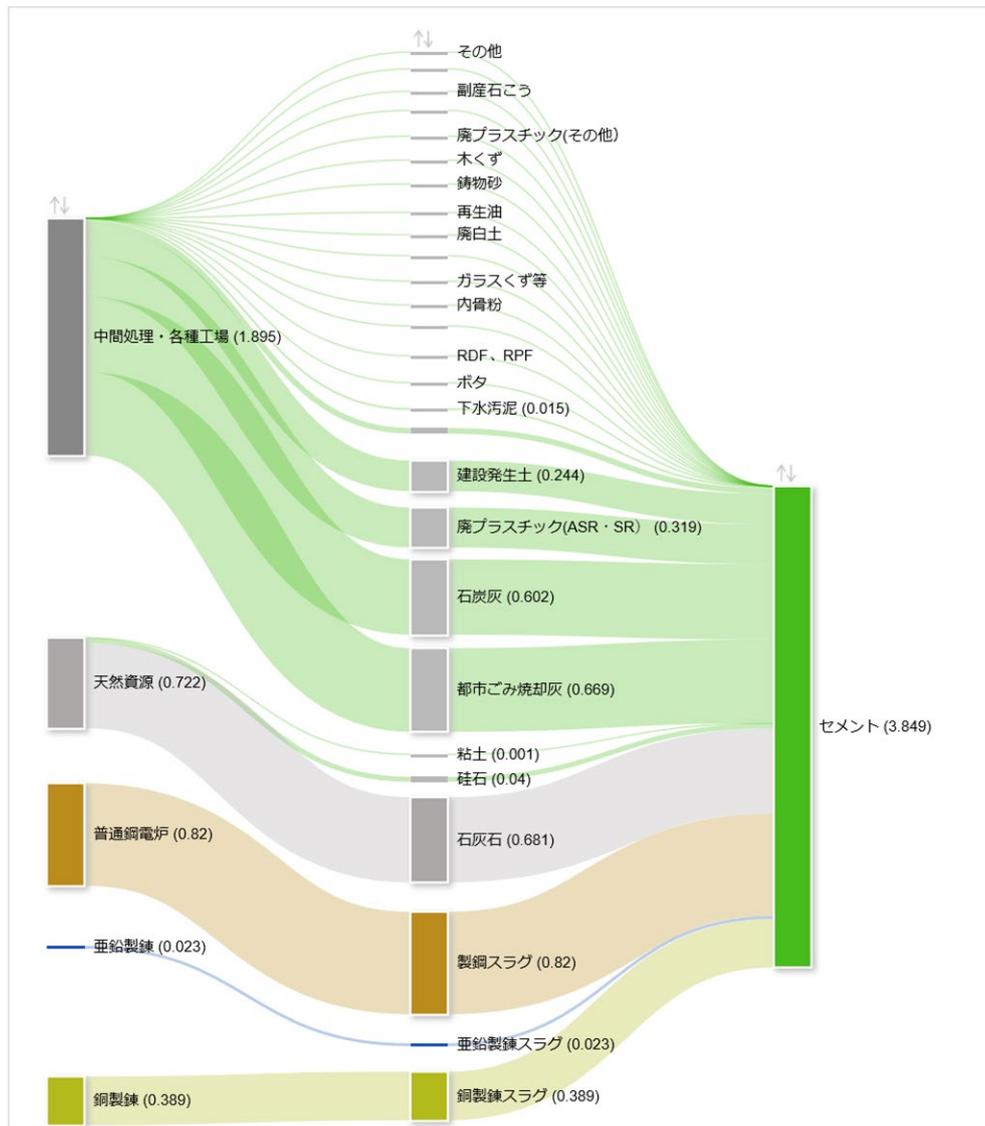
天然資源・廃棄物・副産物等に随伴して、セメントに投入されるクロムのマテリアルフローを図表 92 に示す。天然資源である石灰石に由来して、年間 0.7 千 t のクロムが流入していると推計された。また、廃棄物・副産物等では、製鋼スラグや都市ごみ焼却灰、石炭灰、銅製錬スラグ、廃プラスチック (ASR・SR)、建設発生土が、主たるクロムの流入源であった。図表 88 のバルク量推計結果を踏まえると、製鋼スラグや銅製錬スラグ、都市ごみ焼却灰、廃プラスチック (ASR・SR) 中のクロム含有量が多いことがわかる。

なお、図表 90 と図表 92 はそれぞれ独立したデータをもとに推計している。図表 90 では、酸化スラグ・還元スラグに随伴して、49 千 t のクロムが流通すると推計された。図表 12 より、普通鋼電炉スラグ全体 (バルク量: 2,661 千 t) のうち、セメントに投入されるのは 35 千 t (バルク量)、1.3%程度である。仮に用途によらず成分は一定とすると、49 千 t のクロムのうち、0.64 千 t のクロムがセメントに流入すると推計される。一方、図表 92 では、電炉スラグ由来のクロムは 0.82 千 t との推計結果となっている。それぞれ独立したデータを使用したものの、ある程度は相互に接続しうる結果となっている。

また、図表 91 では非鉄製錬各社が調達する原料等をもとに推計しているが、図表 92 ではセメント産業が調達する原料をもとに推計している。非鉄製錬に投入されたクロムはほとんどがスラグに分配されると考えられ、図表 90 より、亜鉛製錬スラグに随伴して 0.54 千 t 程度、銅製錬スラグに随伴して 0.39 千 t 程度のクロムが流通すると考えられる。一方、図表 92 では、亜鉛製錬スラグからセメントに流入するクロムは 0.023 千 t、銅製錬スラグからセメントに流入するクロムは 0.39 千 t と推計された。図表 16 より、亜鉛製錬スラグ発生量のうち 70%程度、銅製錬スラグ発生量のうち 90%近くがセメントに供給されていることを考慮すると、用途によってクロム含有量が異なる可能性、非鉄製錬に流入するクロムの全量を把握できていない可能性はあるものの、亜鉛スラグ由来のクロムは過小、銅製錬スラグ由来のクロムは過大に見積もられている可能性がある。

図表 92 では、セメントに年間 3.8 千 t 程度のクロムが流入するとの結果になった。2019 年度のセメント生産量 (57,978 千 t) 及び既往文献のセメント中の全クロム含有量 (70mg/kg) より、年間セメント製品中には 4.1 千 t 程度クロムが流入すると推計される。本推計により、日本全国規模で見れば、ある程度網羅的にクロムの混入源を特定できた可能性がある。

図表 92 クロムのマテリアルフロー推計結果（天然資源・廃棄物・副産物等に  
 に伴ってセメントに流入する量：純分換算 1,000t・2019 年度）



(注) 数字の記載がないフローは成分情報等が不明のもの

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

#### 4.1.2. 技術仕様の特定に関する検討

図表 90 より、製鋼原料中に混入する特殊鋼スクラップ（ステンレス鋼など）が、普通鋼電炉におけるクロムの流入源であることが分かった。こうして普通鋼電炉に流入したクロムは、スラグやダストに分配される。図表 91 からわかるように、亜鉛製錬には年間 0.5 千 t のクロムが、電炉ダスト由来で流入している。図表 92 では、亜鉛製錬スラグ由来でセメント産業に流入するクロムの量は 0.023 千 t であったが、普通鋼電炉に流入する特殊鋼スクラップを分離できれば、亜鉛製錬スラグ由来のクロム流入量を減らすことができる。また、図表 92 では、セメント産業には製鋼スラグから年間 0.82 千 t のクロムが流入していると推計されている。本推計で明らかにしたセメントへのクロム混入量の総量（年間 3.8 千 t）のうち、製鋼スラグだけで約 20% を占めている。上記同様に、普通鋼電炉に流入する特殊鋼スクラップを分離することで、製鋼スラグ由来のクロム混入量の削減、また製鋼スラグのセメント利用促進につながる可能性がある。

本事業では、実証テーマ 5（磁着物の高度選別実証）で、磁着物からステンレス鋼を分離する技術を開発しており、こうした技術が実装されることで、亜鉛製錬スラグや製鋼スラグ由来でセメントに混入するクロムを低減できることが明らかになった。

製鋼スラグ以外では、都市ごみ焼却灰や石炭灰、銅製錬スラグ、廃プラスチック（ASR・SR）、建設発生土が、セメント産業における主なクロム混入源である。これらのうち、石炭灰は火力発電所で使用される石炭中のクロム、建設発生土は土壌中のクロムが流入源となっており、天然資源に薄く存在しているため、分離するのは容易ではない。そこで、都市ごみ焼却灰、銅製錬スラグ、廃プラスチック（ASR・SR）からクロムを分離することが有効と考えられる。

図表 91 より、銅製錬にはシュレッダーダスト（SR）や汚染土壌に含まれるクロムが流入していると考えられる。特に、SR から混入するクロム量は比較的多い。そこで、銅製錬に投入される SR、またセメント産業に直接投入される ASR・SR から、クロムを分離する技術が必要になる。ステンレス鋼等を使用する部品を事前に取り除く解体方法の開発、シュレッダーダストから効率的に金属（ステンレス鋼等）を分離する技術の開発・実装が必要となる。

都市ごみ焼却灰のクロムは、家庭から発生する使用済み製品や器具（食器など）に由来すると想定されるが、詳細な発生源は明らかになっていない。次年度以降、都市ごみ焼却灰のクロム混入源を特定する必要がある。そのうえで、有効な分離技術の特定を進めていくことが求められる。

## 4.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証テーマ2）

### 4.2.1. 再生資源の規格案の策定

#### 4.2.1.1 忌避物質の許容品位の推計結果（鉄鋼電炉向けシュレッダースクラップ）

##### （1）シュレッダースクラップにおける銅の許容品位の推計結果

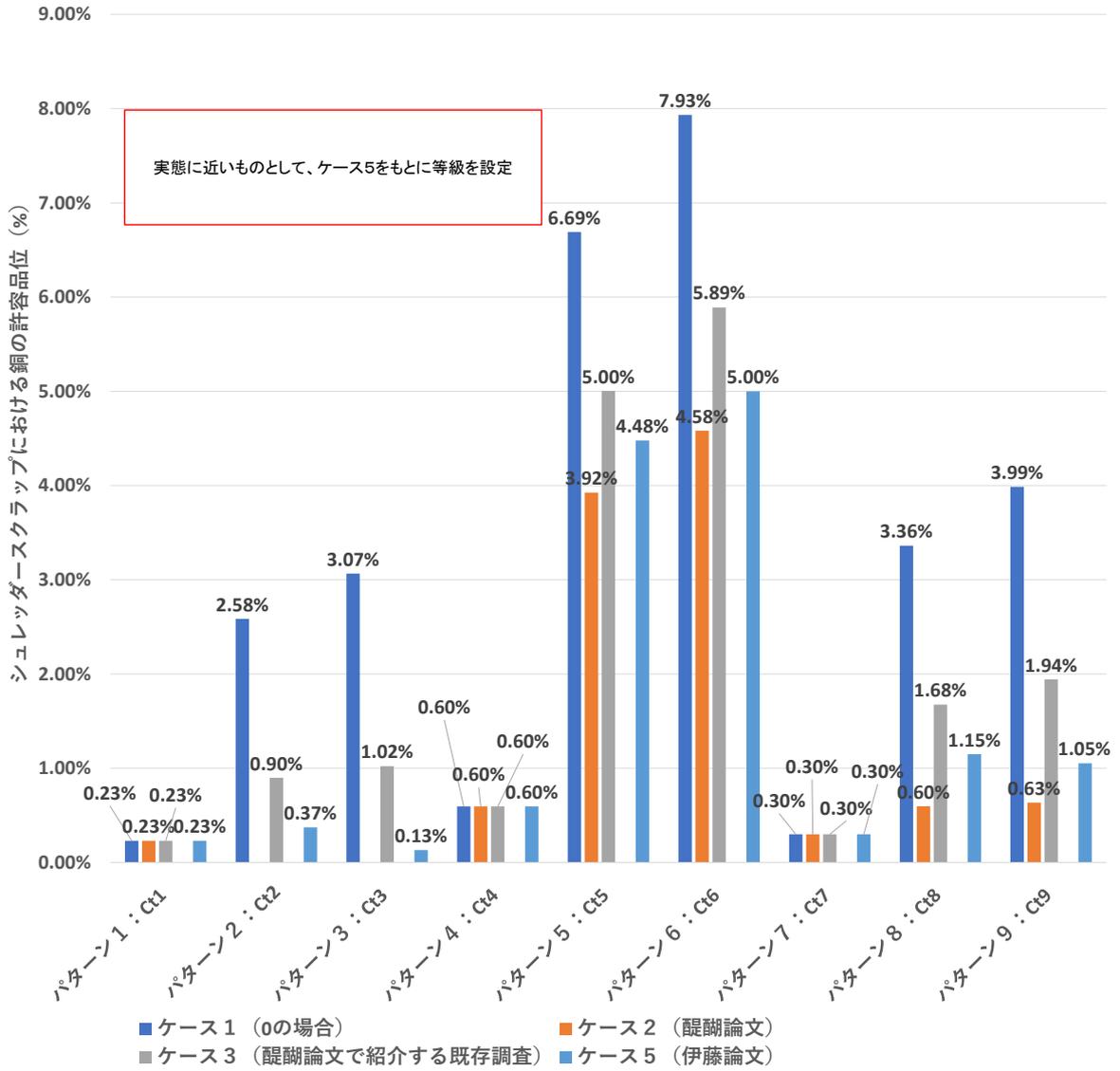
シュレッダースクラップにおける銅の許容品位（ $C_{ti}$ ）<sup>30</sup>の推計結果は図表 93 の通りである。なお、これは、対象以外の再生資源中の忌避物質含有量（ $C_o$ ）<sup>31</sup>の設定（図表 27）に応じた5つのケースの結果を示している。本事業での鉄鋼電炉事業者における操業実態に関する調査（文献及びヒアリングによる調査）をもとに、特に実態に近いものとしてケース5を選択し、この結果をもとに等級を設定した。ケース5における許容品位は低い順に0.23%、0.30%、0.37%、0.60%、1.05%、1.15%、4.48%、5.00%である。この水準をもとに、等級間の値を一定間隔設けるなど中間処理側の充足可能性を考慮したうえで、最終的な等級を設定し、規格案（図表 95）とした。

---

<sup>30</sup> 引数の表記は3.2.1.4に示す推計方法に対応するもの

<sup>31</sup> 引数の表記は3.2.1.4に示す推計方法に対応するもの

図表 93 シュレッタースクラップにおける銅の許容品位

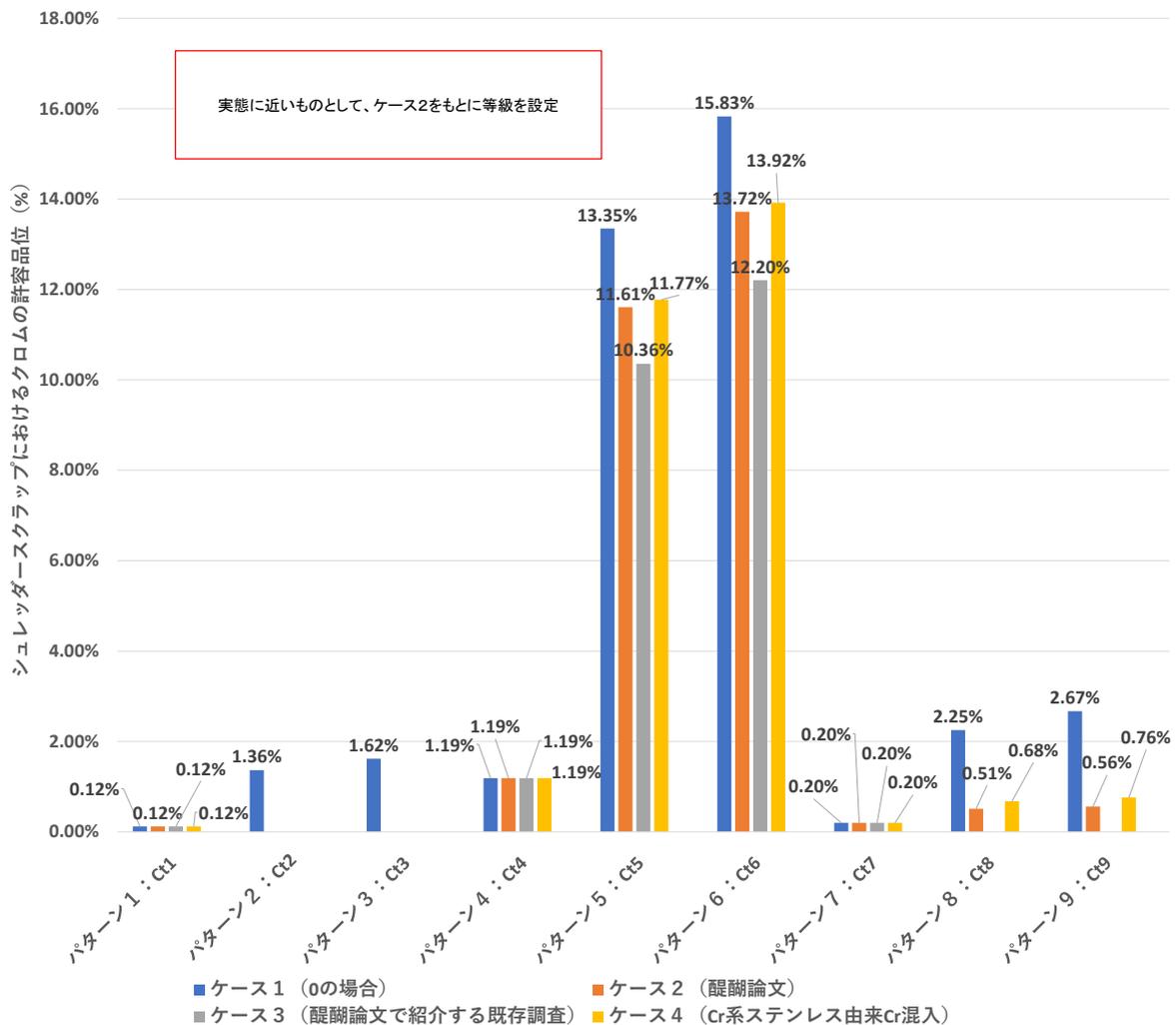


(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

## (2) シュレッタースクラップにおけるクロムの許容品位の推計結果

シュレッタースクラップにおけるクロムの許容品位 ( $C_{ti}$ )<sup>32</sup>の推計結果は図表 94 の通りである。なお、これは、対象以外の再生資源中の忌避物質含有量 ( $C_o$ )<sup>33</sup>の設定 (図表 27) に応じた 5 つのケースの結果を示している。本事業での鉄鋼電炉事業者における操業実態に関する調査 (文献及びヒアリングによる調査) をもとに、特に実態に近いものとしてケース 2 を選択し、この結果をもとに等級を設定した。ケース 5 における許容品位は低い順に 0.12%、0.19%、0.20%、0.51%、0.56%、1.19%、11.61%、13.72% である。この水準をもとに、等級間の値を一定間隔設けるなど中間処理側の充足可能性を考慮したうえで、最終的な等級を設定し、規格案 (図表 96) とした。

図表 94 シュレッタースクラップにおけるクロムの許容品位



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

<sup>32</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

<sup>33</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

#### 4.2.1.2 等級に関する規格案（シュレッダースクラップ）

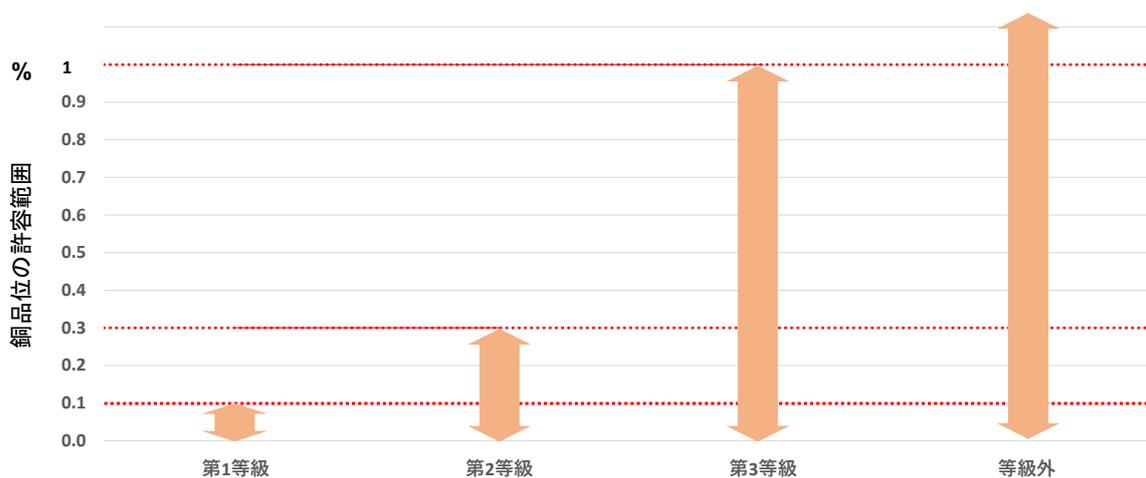
##### (1) シュレッダースクラップにおける銅品位に関する等級の規格案

図表 93 のケース 5 における銅の許容品位 ( $C_{ti}$ )<sup>34</sup>の推計結果をもとに等級を設定し、これを規格案とした（図表 95）。各等級設定の考え方は次の通りであり、中間処理業者における実現可能性を考慮した設定としている。

- 第1等級：最も厳しい水準（パターン3 から）
- 第2等級：第1等級の3倍系列（パターン2 及び7 から）
- 第3等級：第2等級の3倍系列近似値（パターン8 及び9 から）
- 等級外：上記目標値から外れるもの

第1等級の原料は銅品位 0.1%以下を目標値とするもの、第2等級の原料は 0.3%以下を目標値とするもの、第3等級の原料は 1.0%以下を目標値とするものと設定した。

図表 95 銅品位に関する等級の規格案



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

<sup>34</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

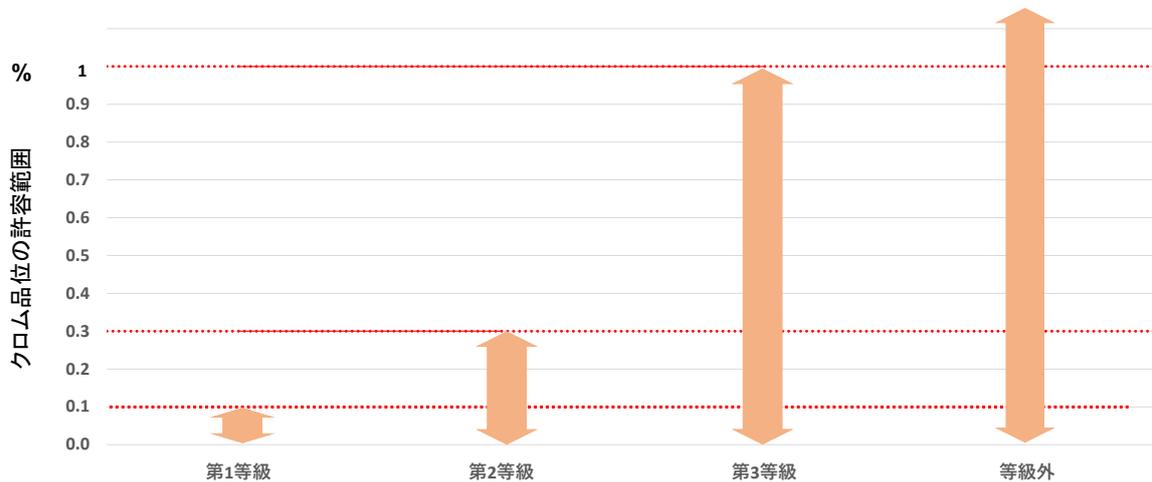
## (2) シュレッタースクラップにおけるクロム品位に関する等級の規格案

図表 94 のケース 2 におけるクロムの許容品位 ( $C_{ti}$ )<sup>35</sup>の推計結果をもとに等級を設定し、これを規格案とした (図表 96)。各等級設定の考え方は次の通りであり、中間処理業者における実現可能性を考慮した設定としている。

- 第 1 等級：最も厳しい水準 (パターン 1 から)
- 第 2 等級：第 1 等級の 3 倍系列 (パターン 8 及び 9 から)
- 第 3 等級：第 2 等級の 3 倍系列近似値 (パターン 4 から)
- 等級外：上記目標値から外れるもの

第 1 等級の原料はクロム品位 0.1%以下を目標値とするもの、第 2 等級の原料は 0.3%以下を目標値とするもの、第 3 等級の原料は 1.0%以下を目標値とするものと設定した。

図表 96 クロム品位に関する等級の規格案



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

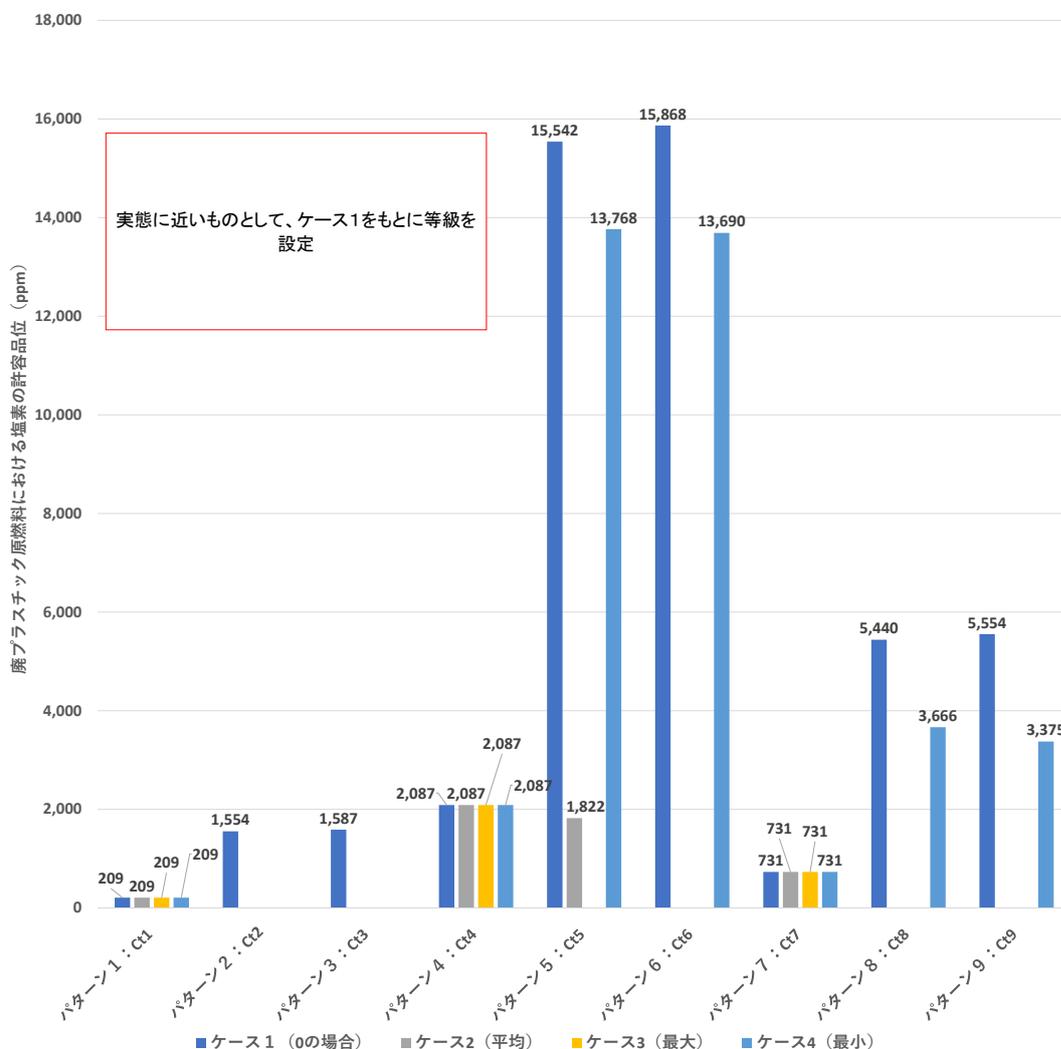
<sup>35</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

#### 4.2.1.3 忌避物質の許容品位の推計結果（セメント事業者向け廃プラスチック原燃料）

##### (1) 廃プラスチック原燃料における塩素の許容品位の推計結果

廃プラスチック原燃料における塩素の許容品位 ( $C_{ti}$ )<sup>36</sup>の推計結果は図表 97 の通りである。なお、これは、対象以外の再生資源中の忌避物質含有量 ( $C_0$ )<sup>37</sup>の設定（図表 27）に応じた 5 つのケースの結果を示している。本事業でのセメント事業者における操業実態に関する調査（文献及びヒアリングによる調査）をもとに、特に実態に近いものとしてケース 1 を選択し、この結果をもとに等級を設定した。ケース 1 における許容品位は低い順に 209ppm、731ppm、1,554ppm、1,587ppm、2,087ppm、15,542ppm、15,868ppm である。この水準をもとに、等級間の値を一定間隔設けるなど中間処理側の充足可能性を考慮したうえで、最終的な等級を設定し、規格案（図表 99）とした。

図表 97 廃プラスチック原燃料における塩素の許容品位



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

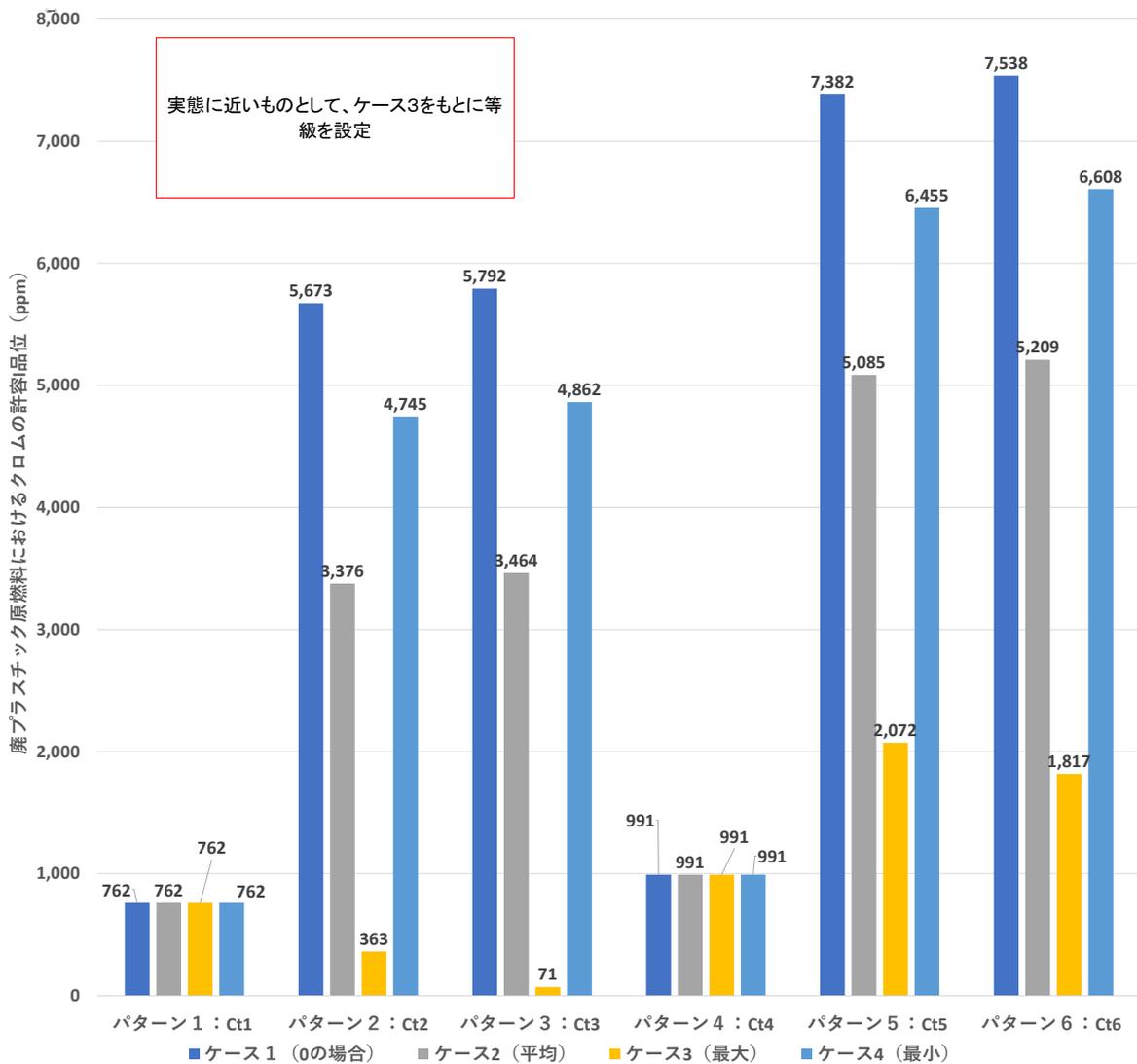
<sup>36</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

<sup>37</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

## (2) 廃プラスチック原燃料におけるクロムの許容品位の推計結果

廃プラスチック原燃料における銅の許容品位 (C<sub>ti</sub>)<sup>38</sup>の推計結果は図表 98 の通りである。なお、これは、対象以外の再生資源中の忌避物質含有量 (C<sub>o</sub>)<sup>39</sup>の設定 (図表 27) に応じた 5 つのケースの結果を示している。本事業でのセメント事業者における操業実態に関する調査 (文献及びヒアリングによる調査) をもとに、特に実態に近いものとしてケース 3 を選択し、この結果をもとに等級を設定した。ケース 3 における許容品位は低い順に 71ppm、363ppm、762ppm、991ppm、1,817ppm、2,072ppm である。この水準をもとに、等級間の値を一定間隔設けるなど中間処理側の充足可能性を考慮したうえで、最終的な等級を設定し、規格案 (図表 96) とした。

図表 98 廃プラスチック原燃料におけるクロムの許容品位



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

<sup>38</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

<sup>39</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

#### 4.2.1.4 等級に関する規格案（セメント事業者向け廃プラスチック原燃料）

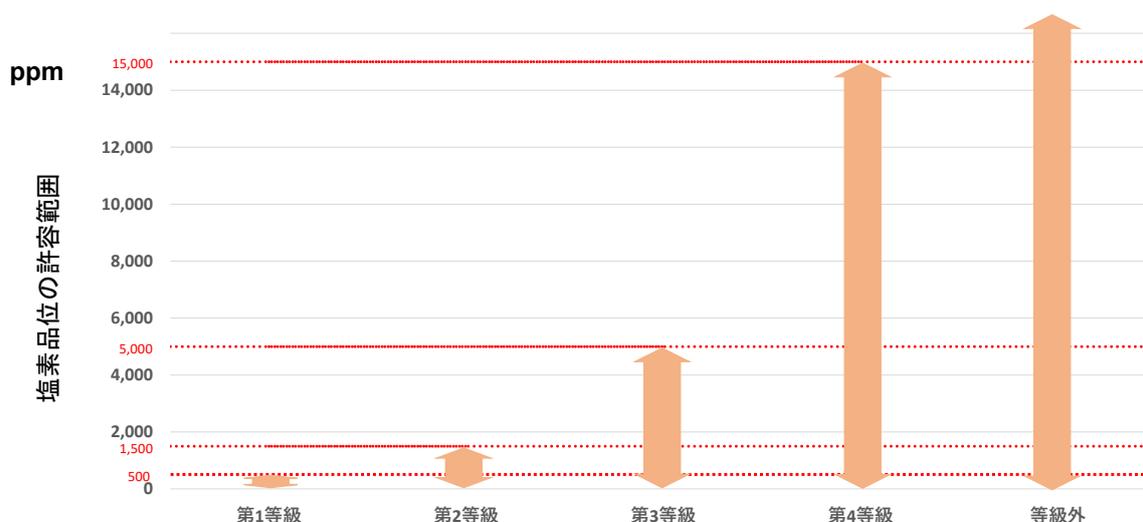
##### (1) 廃プラスチック原燃料における塩素品位に関する等級の規格案

図表 97 のケース 1 における塩素の許容品位 ( $C_{ti}$ )<sup>40</sup>の推計結果をもとに等級を設定し、これを規格案とした（図表 99）。各等級設定の考え方は次の通りであり、中間処理業者における実現可能性を考慮した設定としている。

- 第 1 等級：最も厳しい水準（パターン 1 及び 7 から）
- 第 2 等級：第 1 等級の 3 倍系列（パターン 2 及び 3 から）
- 第 3 等級：第 2 等級の 3 倍系列近似値（パターン 8 及び 9 から）
- 第 4 等級：第 3 等級の 3 倍系列（パターン 5 及び 6 から）
- 等級外：上記目標値から外れるもの

第 1 等級の原料は塩素品位 500ppm 以下を目標値とするもの、第 2 等級の原料は 1500ppm 以下を目標値とするもの、第 3 等級の原料は 5000ppm 以下を目標値とするもの、第 4 等級の原料は 15000ppm 以下を目標値とするものと設定した。

図表 99 塩素品位に関する等級の規格案



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

<sup>40</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

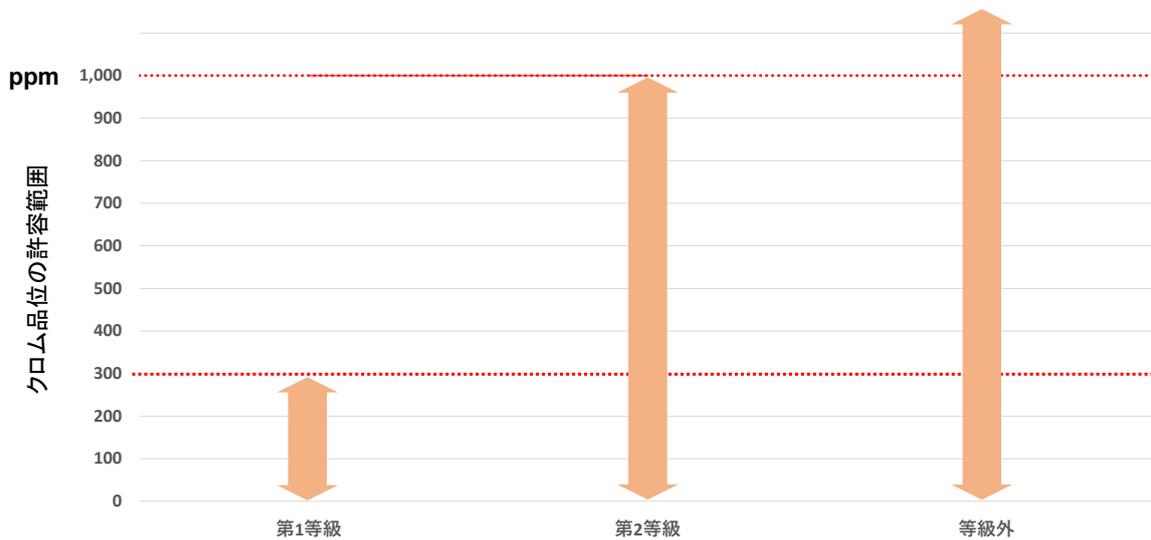
## (2) 廃プラスチック原燃料におけるクロム品位に関する等級の規格式案

図表 98 のケース 3 におけるクロムの許容品位 ( $C_{ti}$ )<sup>41</sup>の推計結果をもとに等級を設定し、これを規格式案とした (図表 100)。各等級設定の考え方は次の通りであり、中間処理業者における実現可能性を考慮した設定としている。

- 第 1 等級：最も厳しい水準 (パターン 2 から)
- 第 2 等級：第 1 等級の 3 倍系列近似値 (パターン 1 及び 4 から)
- 等級外：上記目標値から外れるもの

第 1 等級の原料はクロム品位 300ppm 以下を目標値とするもの、第 2 等級の原料は 1000ppm 以下を目標値とするものと設定した。

図表 100 クロム品位に関する等級の規格式案



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

<sup>41</sup> 引数の表記は 3.2.1.4 に示す推計方法に対応するもの

## 4.2.2. 回収した再生資源の評価及び規格案の改善検討

### 4.2.2.1 シュレッダースクラップ（鉄鋼電炉向け）

本実証における自動販売機由来の磁着物（シュレッダースクラップにあたるもの）の評価結果は図表 101 の通りである。銅に関する規格案（図表 95）が定める第 1 等級、第 2 等級、第 3 等級に該当するシュレッダースクラップがそれぞれ確認されたが、等級外に該当するシュレッダースクラップは確認されなかった。

クロムに関する規格案（図表 96）が定める第 1 等級、第 2 等級に該当するシュレッダースクラップがそれぞれ確認されたが、第 3 等級、等級外に該当するシュレッダースクラップは確認されなかった。

本実証で評価した再生資源（シュレッダースクラップ）は、銅の規格案が定める第 1 等級の水準（0.1%以下）を満たしていた。また、同様にクロムの規格案が定める第 1 等級の水準（0.1%以下）も満たしていた。両規格案は、中間処理業者にとって充足可能なものになっていると考えられる。

図表 101 4.3.1 の実証で回収された磁着物の成分分析結果

		鉄	銅	クロム
A社	ブランク	83.1%	0.12%	第2等級
	解体パターン①	88.6%	0.01%	第1等級
	解体パターン②	87.0%	0.01%	第1等級
B社	ブランク	82.7%	0.69%	第3等級
	解体パターン①	80.1%	0.54%	第3等級
	解体パターン②	92.4%	0.53%	第3等級

(注) データバーの上限値：鉄-100%、銅-1%、クロム-1%

再生資源規格案における銅・クロム含有量基準は次の通り。

第 1 等級：0.1%以下、第 2 等級：0.3%以下、第 3 等級：1.0%以下

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

#### 4.2.2.2 廃プラスチック原燃料（セメント事業者向け）

本実証における自動販売機由来のダスト（廃プラスチック原燃料にあたるもの）の評価結果は、図表 102、図表 103 の通りである。

塩素に関する規格案（図表 99）が定める第 3 等級、第 4 等級、等級外に該当するダストがそれぞれ確認されたが、第 1 等級、第 2 等級に該当するダストは確認されなかった。

クロムに関して、規格案（図表 100）が定める第 1 等級、第 2 等級、等級外の全てに該当するダストがそれぞれ確認された。

本実証で評価した再生資源（廃プラスチック原燃料）は、クロムの規格案が定める第 1 等級の水準（300ppm 以下）を満たしていた。クロムの規格案は、中間処理業者にとって充足可能なものになっていると考えられる。一方、本実証で評価した再生資源は、塩素の規格案が定める第 2 等級の水準（1,500ppm 以下）を満たしていなかった。中間処理業者が塩素の規格案を充足可能であるかを確認できていない。今後は、異なる処理方法（塩素が多く含まれる部品を特定し、これを事前に取り外す等）で回収された再生資源を評価し、中間処理業者にとって充足可能な規格案となっているかを改めて検証する必要がある。

図表 102 4.3.1 の実証で回収されたダストの成分分析結果（金属成分）

		金	銀	アルミ	鉄	銅	クロム	
A社	ブランク	1.4 g/t	92 g/t	3.3 %	0.42 %	18 %	0.0 %	第1等級
	解体パターン①	3.7 g/t	130 g/t	1.3 %	4.7 %	8.3 %	0.0 %	第1等級
	解体パターン②	1.1 g/t	160 g/t	0.48 %	2.4 %	2.6 %	0.010 %	第1等級
B社	ブランク	0.20 g/t	57 g/t	39 %	10 %	36 %	1.6 %	等級外
	解体パターン①	0.0 g/t	130 g/t	6.3 %	26 %	23 %	4.7 %	等級外
	解体パターン②	0.0 g/t	3.2 g/t	16 %	15 %	3.6 %	0.78 %	等級外

（注）データバーの上限値：金-5g/t、銀-200g/t、その他（アルミ、鉄、銅、クロム）-50%  
再生資源規格案におけるクロム含有量基準は次の通り。

第 1 等級：300ppm 以下、第 2 等級：1,000ppm 以下、等級外：1,000ppm より大きい

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 103 4.3.1 の実証で回収されたダストの成分分析結果（硫黄・ハロゲン・総発熱量）

		硫黄	塩素		臭素	総発熱量
A社	ブランク	0.19 %	0.91 %	第4等級	0.33 %	2,450 kcal/kg
	解体パターン①	0.68 %	2.7 %	等級外	0.23 %	3,630 kcal/kg
	解体パターン②	0.22 %	1.6 %	等級外	0.30 %	3,780 kcal/kg
B社	ブランク	0.38 %	1.0 %	第4等級	0.11 %	4,560 kcal/kg
	解体パターン①	0.14 %	0.54 %	第4等級	0.060 %	4,020 kcal/kg
	解体パターン②	0.17 %	0.39 %	第3等級	0.020 %	3,680 kcal/kg

(注) データバーの上限値：硫黄、塩素、臭素・3%、総発熱量・5,000kcal/kg

再生資源規格案における塩素含有量基準は次の通り。

第1等級：500ppm 以下、第2等級：1,500ppm 以下、第3等級：5,000ppm 以下

第4等級：15,000ppm 以下、等級外：15,000ppm より大きい

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 4.3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証テーマ3）

#### 4.3.1. 新規プロセス仕様案に基づく解体・破碎・選別処理の実施

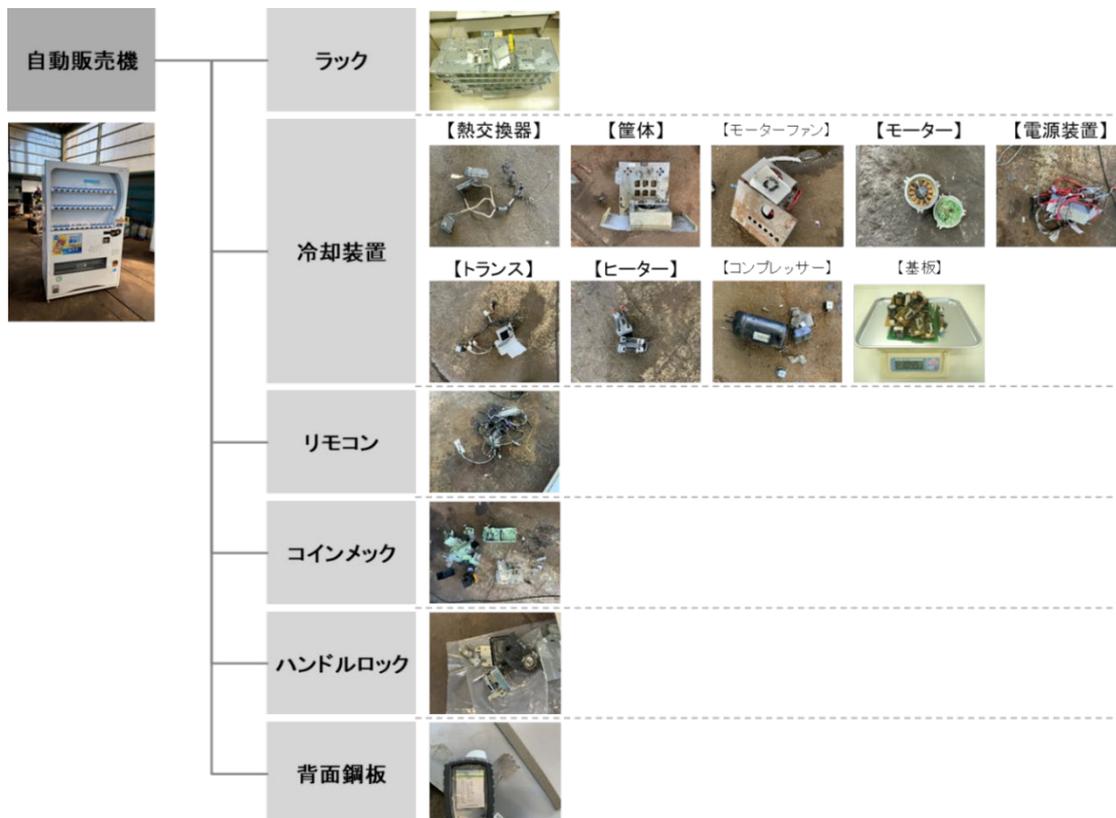
##### 4.3.1.1 忌避物質含有部品の特定

使用済み自動販売機を解体して、「ラック、冷却装置、リモコン、コインメック、ハンドルロック、背面鋼板」をそれぞれ回収した。このうち、「冷却装置」はさらに細かく解体され、熱交換器やモーター、電源装置、ヒーター、コンプレッサーを回収した（図表 104）。これら部品は素材単位まで分解し、素材ごとに、銅・クロムの成分分析を行った。

取り外した部品の重量を図表 105 に示す。セレクション数やメーカーによる差異はあるものの、自動販売機の総重量の約半分を取り外した。このうち、ラックが最も重量の大きな部品であった。

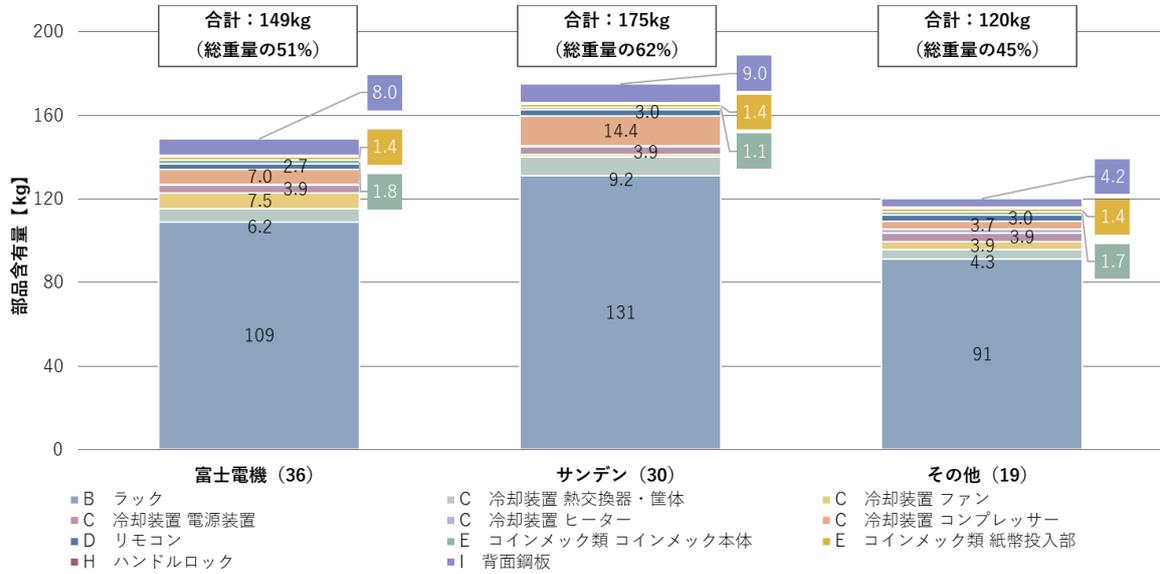
取り外した各部品に含まれる銅及びクロムの重量を図表 106、図表 107 にそれぞれ示す。取り外した部品には、銅が合計 6~7kg 程度含まれていた。部品別では、銅は冷却装置に最も多く含まれていた。特に、熱交換器の導管や電源装置のハーネス・基板が、主な銅含有部品であった（図表 106）。クロムの含有量は銅と比較して少なく、合計で 0.5kg 程度であった。クロムの大半はラックに含まれていたが、一部のクロムはヒーターにも含まれていた（図表 107）。なお、ラックの大部分は鋼板（亜鉛メッキ鋼板など）により構成されるが、ラック下部の商品排出機構にはモーターが使用されており、こうした部品に銅・クロムが含まれていた。

図表 104 忌避物質含有部品特定のため取り外した部品



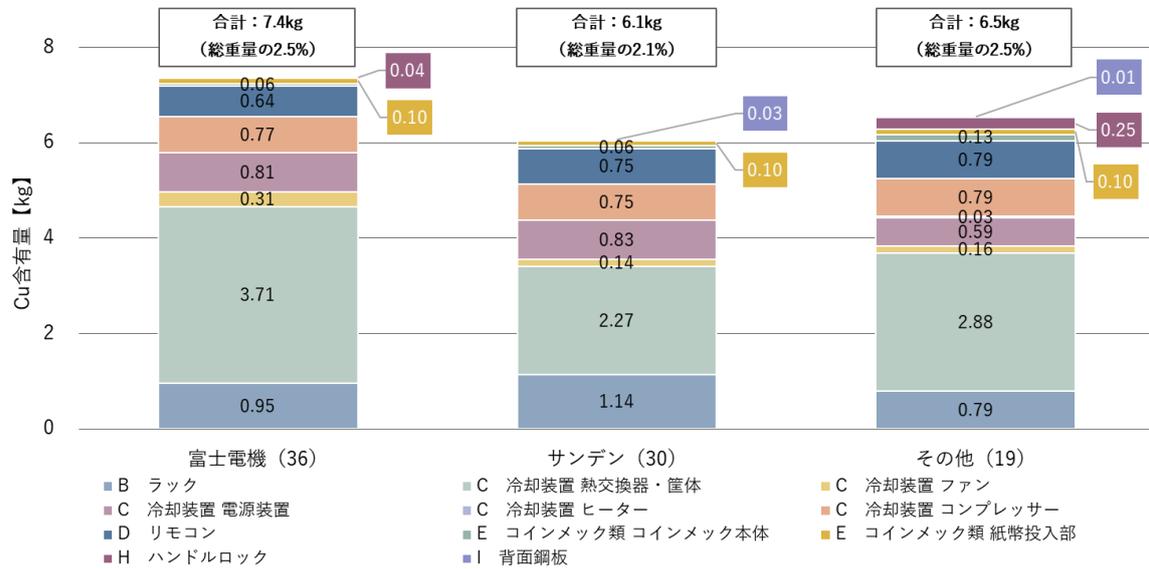
（出所）本事業共同実施事業者にて写真撮影。三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 105 自動販売機における主な銅・クロム含有部品の重量



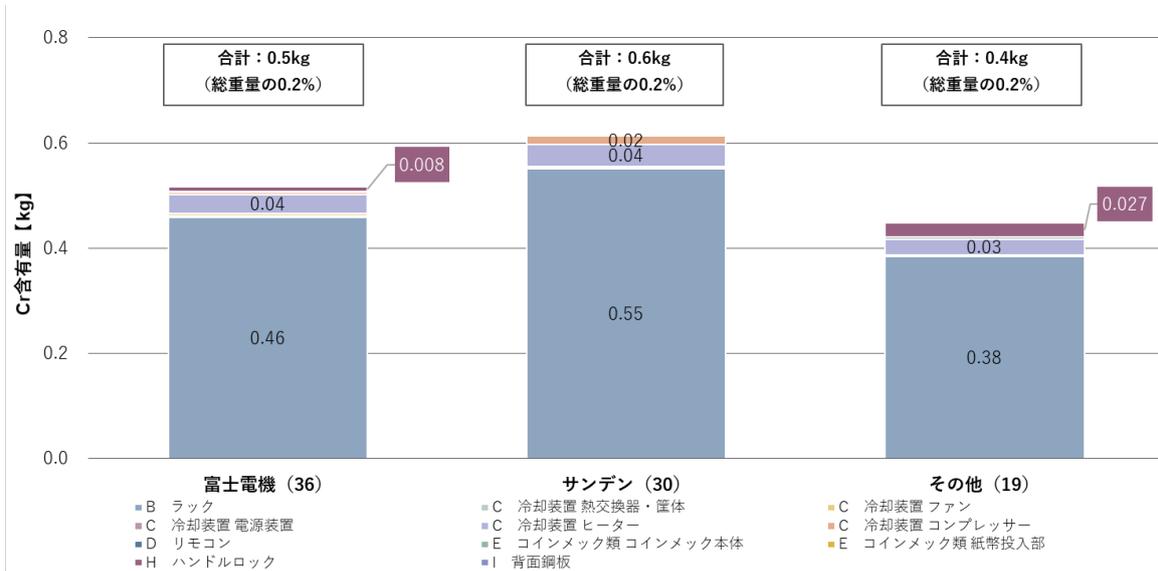
(注) ( ) 中の数字は解体した自動販売機のセクション数  
 (出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 106 自動販売機における主な銅・クロム含有部品中の銅含有量  
 (図表 105 に示す部品重量と各部品の銅含有率より算出したもの)



(注) ( ) 中の数字は解体した自動販売機のセクション数  
 (出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 107 自動販売機における主な銅・クロム含有部品中のクロム含有量  
 (図表 105 に示す部品重量と各部品のクロム含有率より算出したもの)



(注) ( ) 中の数字は解体した自動販売機のセクション数  
 (出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

#### 4.3.1.2 解体・破碎・選別試験の実施

##### (1) 解体・破碎・選別試験の概要

4.3.1.1の結果、「ラック、冷却装置、リモコン」が主な銅・クロム含有部品であることが明らかになった。これらの部品に含まれるモーターやハーネスに銅が使用されている。磁選では、モーターは磁着すること、ハーネスは鉄スクラップと絡まることから、いずれも磁着物側に混入することがある。また、マルテンサイト系ステンレス鋼にはクロムが含まれるが、これらマルテンサイト系ステンレス鋼も磁着する性質を有するため、磁着物側に混入してしまう。

既存の破碎・選別工程で、これら部品・素材に随伴して、磁着物に混入する銅・クロムを分離することは困難である。そこで、当該部品を事前に取り除くことにより、磁着物に混入する忌避物質（銅、クロム）を低減し、鉄スクラップの品質向上を目指した。なお、銅・クロムを含む部品をすべて取り外さなくとも、シュレッダースクラップの規格（普通鋼電炉の要求水準）を満たせる可能性がある。ラックのように、銅・クロムが一部に含まれているが、これを取り外すことで磁着物の歩留まりを著しく低下させるもの、取り外しが容易でないために作業工数が著しく増加するものもあると想定される。

そこで、3.3.1.2に記載の通り、既存の解体方法（ブランク：法令による回収義務のみ満たすもの）、銅・クロム含有部品を精緻に解体する方法（解体パターン②）に加えて、作業工数を考慮した解体方法（解体パターン①）の3つの解体方法で解体試験を行った。2021年9月以降、共同実施者である中間処理事業者の協力のもと、自動販売機を解体し、筐体をバッチ処理（破碎・選別）して、磁着物、ミックスメタル、ダスト等を回収した（図表 108、図表 109）。回収した産物の評価は、4.3.1.3に整理した。

なお、事前に取り外す部品が多くなるため、解体工数は増加すると見込まれる。そこで、解体作業を行う様子を動画撮影し、各部品の取り外しに要する時間を分析した。こうして、解体方法別に作業負荷を確認した（4.3.1.4）。

図表 108 解体実証試験の様子 (A 社)



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 109 解体実証試験の様子 (B 社)



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

## (2) 解体パターン別の産物回収結果

「ブランク」、「解体パターン①」、「解体パターン②」の3通りの解体方法を用いて、A社及びB社で実施した試験結果を、図表110から図表115に示す。横軸は事前回収部品もしくは産物の重量比、縦軸は元素組成である。回収部品及び選別回収物の重量計測結果、成分分析結果をもとに作成した。なお、横軸と縦軸を掛け合わせた面積は、各産物に含まれる鉄や銅などの重量を示す。これらをすべて足し合わせると、投入した自動販売機全体に含まれる元素重量（総量）となる。

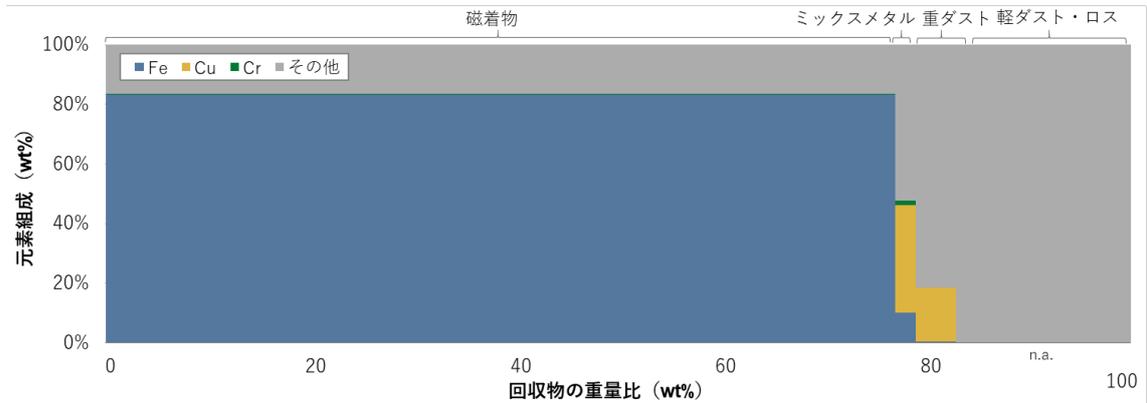
事前に取り外す部品によって、産物の回収量や各種金属（鉄、銅、クロム）品位が変化した。「ブランク」では、回収物の総重量のうち、80%程度は鉄スクラップとして回収された。鉄スクラップの鉄品位は80%程度であり、微量ではあるが、銅・クロムが含まれていた。銅・クロムは、主にミックスメタルに分配されたが、一部、ダストにも分配されていた（図表110、図表113）。

「解体パターン①」では、銅・クロムを含む部品の一部（冷却装置、リモコン）を事前に回収した。回収した部品重量は全体の10%程度であった。破碎工程に投入される銅とクロムが減少したことで、各回収物（鉄スクラップ、ミックスメタル、ダスト）に分配される銅・クロムは減少した。鉄スクラップの回収量は微減したが、A社では、鉄品位が90%前後に向上した。ミックスメタルの回収量は、「ブランク」と比較して50~70%程度に減少し、銅品位は10%程度減少した（図表111、図表114）。

「解体パターン②」では、銅・クロムを含む部品を、可能な限り網羅的に回収した。事前回収した部品の重量は40~60%であり、かなり多くの部品が事前に回収された。「解体パターン①」と比較して、ラックを取り外した影響が表れている。銅及びクロムは、ほとんど破碎工程に投入されなくなった。その結果、「ブランク」と比較して、鉄スクラップの回収量は半減したものの、鉄品位は改善した。ミックスメタルやダストにも、ほとんど銅やクロムが分配されなかった（図表112、図表115）。

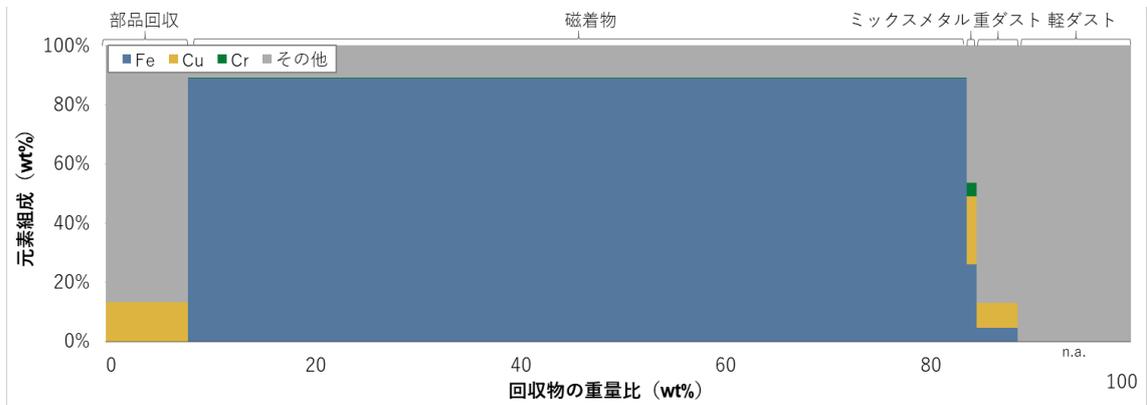
使用済み自動販売機から、事前に取り外す部品を変えることで、選別回収物の品位を一定程度管理できることが分かった。特に、冷却装置やラックを取り外すことで、各回収物に分配される銅・クロムの量は顕著に減少した。また、異なる破碎・選別ラインを有する中間処理事業者で実施しても、事前解体部品と産物の回収量・品位の関係は、類似した傾向にあることを確認した。事前解体部品に基づく標準的な解体工程を開発できれば、概ね近い品質のスクラップを回収できる可能性がある。実際のプロセス導入に向けて、事前解体した部品を販売可能な形態に加工すること、ラックを取り外すことで鉄スクラップの回収量が著しく減少すること、ミックスメタルの回収量や銅品位が低下することを考慮して、経済的に成立する条件を特定する必要がある。なお、亜鉛の含有量が多く（15%以上）、銅・クロムが含まれない磁着物は、亜鉛メッキ鋼板と仮定して成分データを補正した。

図表 110 解体パターン別の選別回収物の成分値 (A社・ブランク)



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

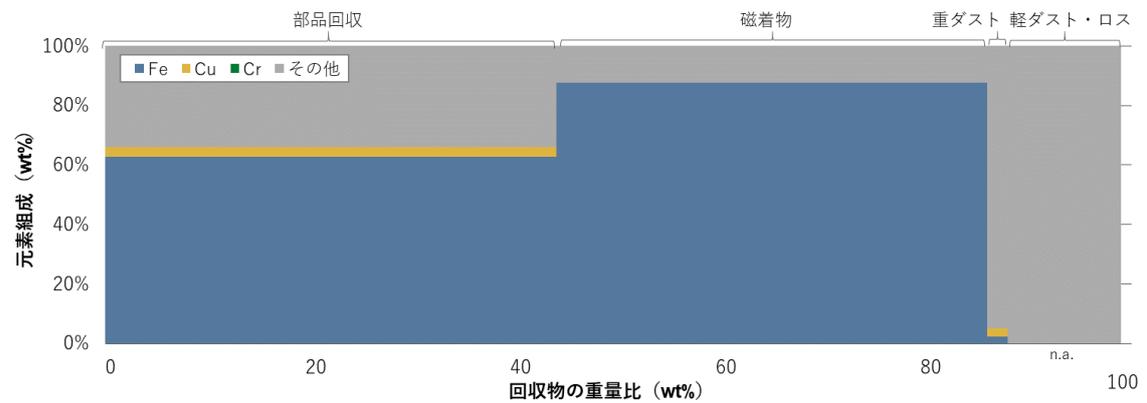
図表 111 解体パターン別の選別回収物の成分値 (A社・解体パターン①)



(注) 部品回収の鉄・クロム含有量は負の値となったため銅のみ記載

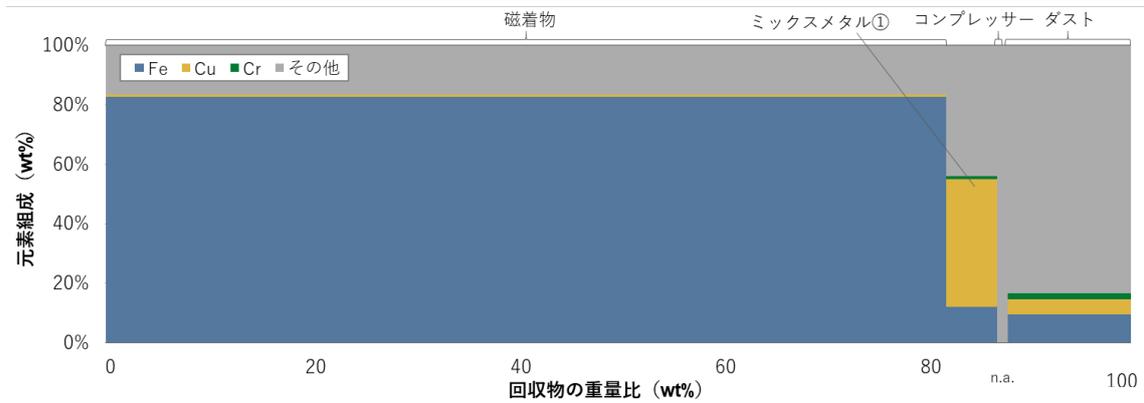
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 112 解体パターン別の選別回収物の成分値 (A社・解体パターン②)



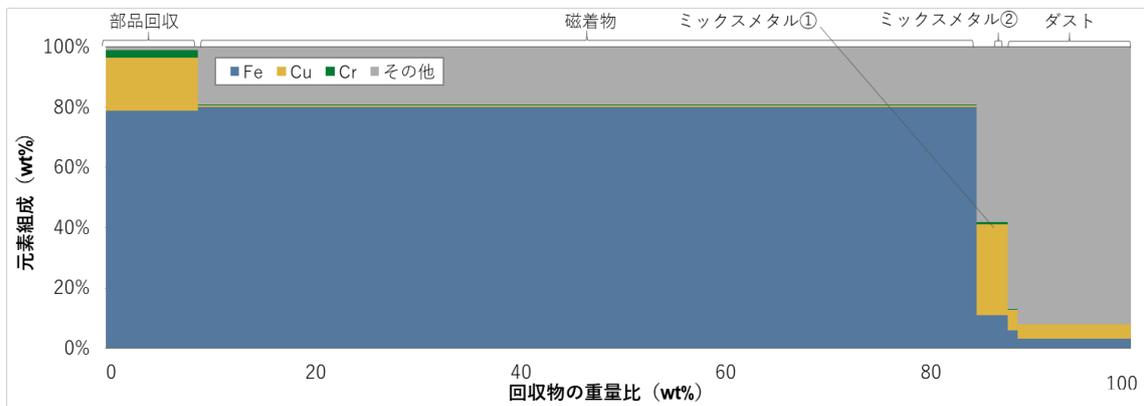
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 113 解体パターン別の選別回収物の成分値 (B社・ブランク)



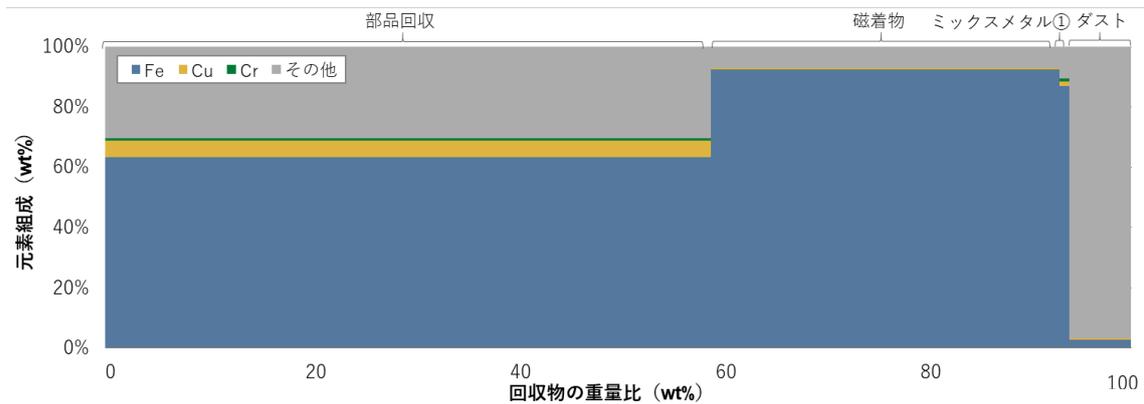
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 114 解体パターン別の選別回収物の成分値 (B社・解体パターン①)



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 115 解体パターン別の選別回収物の成分値 (B社・解体パターン②)



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

#### 4.3.1.3 回収した産物の評価

##### (1) 成分分析結果（磁着物）

図表 39 に示すフローに従って、回収した磁着物の成分分析結果を図表 116 に示す。A 社、B 社ともに、事前に回収する銅・クロム含有部品が増えるほど、鉄品位は向上し、銅・クロム品位は低下する傾向にあった。A 社で「ブランク」で回収した磁着物は、鉄品位 83%、銅品位 0.12%（第 2 等級）、クロム品位 0.01%（第 1 等級）であった。一方、部品回収を行う「解体パターン①」、「解体パターン②」では、鉄品位が 88%程度に向上し、銅品位は 0.01%（第 1 等級）に低下した。B 社では、「ブランク」における磁着物の鉄品位は 83%、銅品位は 0.69%（第 3 等級）、クロム品位は 0.07%（第 2 等級）であった。「解体パターン②」では鉄品位は 92%まで向上した。また、銅品位は、A 社と比較して全体的に高い傾向にあったが、事前解体する部品の増加に伴って、0.53%まで低下した。

A 社、B 社ともに、「解体パターン①」において、クロム品位がやや高い傾向にあった。この要因として、投入した自動販売機にクロム含有部品が多数搭載されていた可能性、こうしたクロム含有部品を事前解体しなかった可能性が考えられる。

図表 107 に示す通り、自動販売機の構成部品のクロム含有量は、メーカーやセクション数によって異なる。このほか、年式や冷却・加熱方式、また用途・デザイン（ステントリム自動販売機<sup>42</sup>など）により、含有量が異なる可能性もあり得る。そのため、投入された自動販売機に由来するクロムの絶対量が多かった可能性がある。

また、クロム含有部品を把握できていなかったため、事前に回収されずに破碎・選別工程に投入され、磁着物のクロム品位が高くなった可能性がある。4.3.1.1 では、ラック（うち、排出機構）や冷却装置、コイン投入口等がクロム含有部品であることを特定した。しかし、これら部品以外にも、クロム含有部品が存在する可能性がある。既述のステントリム自動販売機など、特定の自動販売機のみで使用されるクロム含有部品も対象に、設置箇所やクロム含有量を把握し、事前に取り外しを行うことが求められる。

図表 116 磁着物の成分分析結果

		鉄	銅	クロム
A社	ブランク	83.1%	0.12%	第2等級 0.01%
	解体パターン①	88.6%	0.01%	第1等級 0.29%
	解体パターン②	87.0%	0.01%	第1等級 0.00%
B社	ブランク	82.7%	0.69%	第3等級 0.07%
	解体パターン①	80.1%	0.54%	第3等級 0.11%
	解体パターン②	92.4%	0.53%	第3等級 0.02%

(注) データバーの上限値：鉄-100%、銅-1%、クロム-1%

再生資源規格案における銅・クロム含有量基準は次の通り。

第 1 等級：0.1%以下、第 2 等級：0.3%以下、第 3 等級：1.0%以下

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

<sup>42</sup> 伊藤園ウェブサイト (<https://www.itoen.co.jp/company/vender/lineup/>) (2022 年 2 月閲覧)

## (2) 成分分析結果（ミックスメタル）

図表 39 に示すフローに従って、回収したミックスメタルの成分分析結果を図表 117 に示す。A 社、B 社ともに、銅・クロム含有部品を事前に解体しない「ブランク」で回収したミックスメタルは、事前に部品を回収した場合と比較して、金や銅の品位が高かった。事前に回収する部品が増えるほど、金や銅の品位が低下する傾向にあり、特に銅品位の低下は顕著であった。その他の元素は、解体部品点数の増加に伴って増減する傾向はみられなかった。

「ブランク」で回収したミックスメタルには、アルミニウムも含まれていた。アルミニウムは銅製錬における忌避物質であるため、銅製錬原料として販売することは難しいと考えられる。メタルソーター等で再選別して、アルミニウムを分離する必要がある。また、再選別を実施することで、銅品位の向上にもつながると期待される。

「解体パターン①」で回収されたミックスメタルの銅品位は 20~30%程度であった。「ブランク」と比較して、13%程度品位が低下したのは、冷却装置やリモコンを取り外した影響と考えられる。また、A 社では、他の解体方法と比較して、鉄やクロム品位が高い。これはオーステナイト系ステンレス鋼など、磁着しない特殊鋼が混入したためと考えられる。

「解体パターン②」で回収されたミックスメタルの銅品位は 1~4%程度であった。「解体パターン①」と比較して、さらに銅品位が低下したのは、ラックなどを取り外した影響と考えられる。B 社の「解体パターン②」で回収したミックスメタルは、鉄品位が極めて高い結果となった。銅を含む部品がほとんど事前に回収され、またアルミニウムを含む熱交換器も回収された結果、磁着しないオーステナイト系ステンレス鋼などがミックスメタルに濃縮したためと考えられる。

図表 117 ミックスメタルの成分分析結果

		金	銀	銅	アルミ	鉄	クロム
A社	ブランク	0.20 g/t	57 g/t	36 %	39 %	10 %	1.6 %
	解体パターン①	0.0 g/t	130 g/t	23 %	6.3 %	26 %	4.7 %
	解体パターン②	0.0 g/t	3.2 g/t	3.6 %	16 %	15 %	0.8 %
B社	ブランク	0.70 g/t	150 g/t	43 %	12 %	12 %	1.1 %
	解体パターン①	0.10 g/t	18 g/t	30 %	16 %	11 %	1.0 %
	解体パターン②	0.10 g/t	1.6 g/t	1.5 %	4.1 %	87 %	1.0 %

(注) データバーの上限値：金-5g/t、銀-400g/t、その他（銅、アルミ、鉄、クロム）-100%  
金及び銀の上限値は 3.3.2.1 の目標品位をもとに設定

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### (3) 成分分析結果（ダスト）

図表 39 に示すフローに従って、回収したダストの成分分析結果を図表 118、図表 119 に示す。A 社、B 社ともに、事前回収する部品が増えると、ダストの銅・アルミニウム含有率が低下する傾向が確認された。また、B 社では、ハロゲン（塩素、臭素）の含有率も減少する傾向にあった。このほかの元素は、解体部品点数の増加に伴う含有率の変化は見られなかった。総発熱量は A 社と B 社で異なる傾向にあった。A 社では、解体部品点数の増加に伴って、総発熱量は増加したが、対照的に、B 社では総発熱量が減少した。

A 社のダストはいずれもクロムの第 1 等級を満たしていた。一方、「ブランク」のみ、塩素の第 4 等級を満たし、その他は等級外であった。B 社のダストはクロム品位が高く、いずれもクロムは等級外であった。一方、既述の通り、B 社では解体部品の増加によって塩素含有量が減少しており、「ブランク」、「解体パターン①」では第 4 等級であったが、「解体パターン②」では第 3 等級を満たすダストを回収できた。

事前回収する銅含有部品を増やすことで、破碎工程に投入される銅分が減少したため、ダストに分配される銅分が減少したと考えられる。また、熱交換器を取り外すことで、フィンに使用されるアルミニウムが事前に分離され、アルミニウム含有率が低下したと推察される。冷却装置の電源装置やリモコンに付随するハーネスが取り除かれることで、塩素の含有率が低下したと考えられる。しかし、A 社では、いずれの解体方法でも塩素含有率は高い。解体部品が多いときにも塩素含有量は高く、再生資源規格案を満たせなかった。ダストを原燃料代替品として活用するためには、予め塩素を含む部品を特定し、これら部品を事前に分離する必要がある。

図表 118 ダストの成分分析結果（金属成分）

		金	銀	アルミ	鉄	銅	クロム	
A社	ブランク	1.4 g/t	92 g/t	3.3 %	0.42 %	18 %	0.0 %	第1等級
	解体パターン①	3.7 g/t	130 g/t	1.3 %	4.7 %	8.3 %	0.0 %	第1等級
	解体パターン②	1.1 g/t	160 g/t	0.48 %	2.4 %	2.6 %	0.010 %	第1等級
B社	ブランク	0.20 g/t	57 g/t	39 %	10 %	36 %	1.6 %	等級外
	解体パターン①	0.0 g/t	130 g/t	6.3 %	26 %	23 %	4.7 %	等級外
	解体パターン②	0.0 g/t	3.2 g/t	16 %	15 %	3.6 %	0.78 %	等級外

(注) データバーの上限値：金-5g/t、銀-200g/t、その他（アルミ、鉄、銅、クロム）-50%  
再生資源規格案におけるクロム含有量基準は次の通り。

第 1 等級：300ppm 以下、第 2 等級：1,000ppm 以下、等級外：1,000ppm より大きい

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 119 ダストの成分分析結果（硫黄・ハロゲン・総発熱量）

		硫黄	塩素		臭素	総発熱量
A社	ブランク	0.19 %	0.91 %	第4等級	0.33 %	2,450 kcal/kg
	解体パターン①	0.68 %	2.7 %	等級外	0.23 %	3,630 kcal/kg
	解体パターン②	0.22 %	1.6 %	等級外	0.30 %	3,780 kcal/kg
B社	ブランク	0.38 %	1.0 %	第4等級	0.11 %	4,560 kcal/kg
	解体パターン①	0.14 %	0.54 %	第4等級	0.060 %	4,020 kcal/kg
	解体パターン②	0.17 %	0.39 %	第3等級	0.020 %	3,680 kcal/kg

(注) データバーの上限値：硫黄、塩素、臭素・3%、総発熱量・5,000kcal/kg

再生資源規格案における塩素含有量基準は次の通り。

第1等級：500ppm 以下、第2等級：1,500ppm 以下、第3等級：5,000ppm 以下

第4等級：15,000ppm 以下、等級外：15,000ppm より大きい

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

#### (4) 部品中の銅・クロム含有量をもとにしたスクラップ品質推計結果

試作した情報連携システムでは、対象とする自動販売機のモデル情報と、解体を行った部品の情報を記録している。また破碎・選別ロットごとに、これら情報を紐づけることができる。そこで、処理対象となるモデルの銅・クロム含有情報と、これら部品の取り外し有無から、回収するスクラップの品質を予測することができる。

4.3.1.1 では、サンデン、富士電機、その他（松下冷機）の3つのメーカーの自動販売機を対象に、主要部品中の忌避物質含有量を分析した。これらはいずれもセレクション数が異なるものであった。セレクション数によって、使用する部品の大きさ・重量は変化すると考えられる。そこで、銅・クロム含有部品の重量は、自動販売機のセレクション数に比例するとの仮定を置き、メーカー・セレクション数別の部品重量データベースを作成した。銅・クロムの含有比は一定とみなして、部品ごとの銅・クロムのデータも併せて整理した。

こうして、モデル情報（メーカー、セレクション数）をもとに、部品重量や銅・クロム含有量をデータベースから読み出し、また取り外した部品の情報と紐づけることで、破碎機に投入された筐体重量と、筐体に含まれる銅・クロムの重量を予測できるようにした。加えて、事業者別の磁着物回収率、磁着物への銅・クロムの分配率を設定することで、磁着物の銅・クロム品位が予測可能になる。なお、今回は事業者ごとに「ブランク」の分析値（実測値）から、磁着物回収率、銅・クロムの分配率を設定した。

事業者ごとに、磁着物の分析値と、上記の方法で算出した成分推計値を比較した（図表 120、図表 121）。実測値と推計値には、銅で0.04%～0.5%程度、クロムで0.02～0.3%程度の乖離が生じていた。シュレッダースクラップの規格案では、等級を0.1%、0.3%、1.0%と設定している。これら等級値及び設定幅と比較して、実測値と推計値の差分が大きくなっており、この解消に取り組む必要がある。

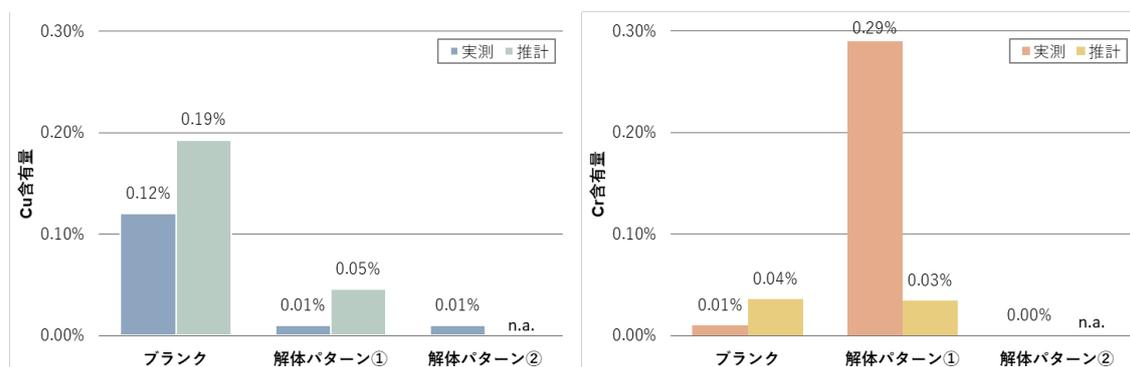
実測値と推計値が乖離した要因の1つとして、銅・クロム含有部品を網羅的に把握できていない可能性がある。4.3.1.1 で分析対象とした部品のみ銅・クロムが含まれていると想定したが、

分析対象部品以外にも、銅・クロムが含まれる部品が存在する可能性がある。一例として、ボタンやLEDの周辺に使用される細かいハーネスは考慮できていない（図表 122）。銅やクロムの含有量を過小評価している可能性があり、追加的な銅・クロム含有部品の特定が求められる。

また、本実証で作成した自動販売機データベースの推計精度が十分でない可能性がある。本実証で分析した自動販売機3台分の部品重量・忌避物質含有量をもとに、セクション数に注目して、その他モデルの部品重量や忌避物質含有量を拡大推計している。そのため、加熱可否や冷却方式、年式などの情報を考慮していない。例えば、冷蔵専用の自動販売機には、ヒーターが搭載されていない。しかし、データベース上は冷蔵専用かどうかを判別しておらず、すべてヒーターを含む前提で推計を行っている。また、ヒートポンプの搭載有無によって、冷却・加熱装置の能力や重量が異なる可能性があるが、こうした特定部品の搭載有無も考慮していない。今後、忌避物質部品に関するデータ蓄積や、拡大推計方法の精査が必要となる。

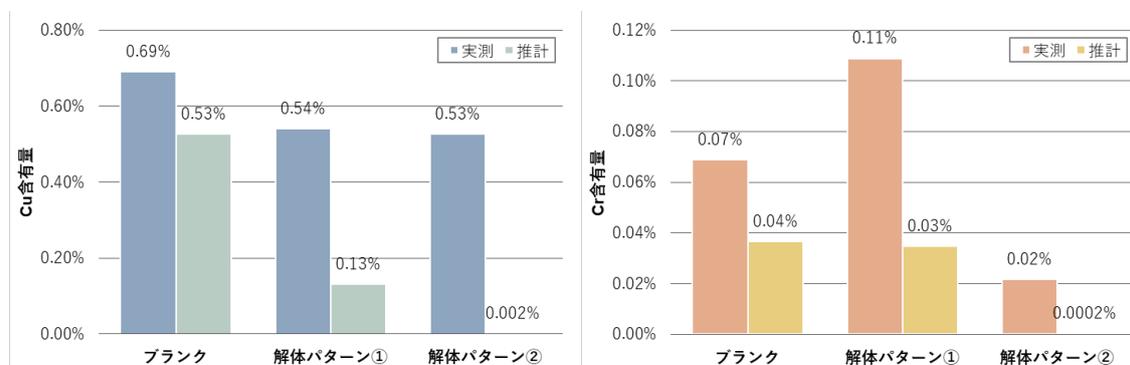
実測値の変動要因として、各解体方法で回収を想定していた部品が残留していた可能性がある。例えば、メーカーや年式により、ヒーターやファンモーターの設置箇所・固定方法は異なる。こうした設置箇所や固定方法の違いによって、作業員が本来取り外すべき部品に気付くことができず、これら部品が一部残留した結果、磁着物の銅・クロム含有量の実測値が、想定より大きくなった可能性がある。銅やクロムの含有部品を特定するのみでなく、その設置箇所や固定方法までを調査・整理し、標準的な解体手順を開発していく必要がある。

図表 120 磁着物品位の実測値と推計値の比較（A社：（左）銅、（右）クロム）



（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 121 磁着物品位の実測値と推計値の比較（B社：（左）銅、（右）クロム）



（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

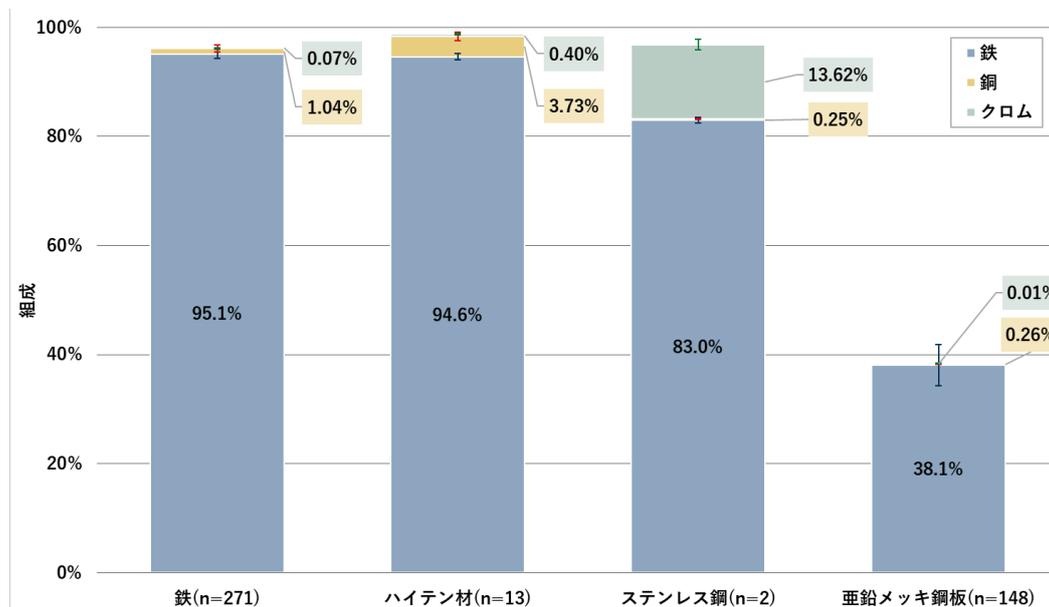
また、スクラップの成分分析のため、サンプリングを行うとき、代表性が十分に担保されるよう、サンプリング数・方法を考慮していく必要がある。図表 123 に、B 社・ブランクの条件で回収した磁着物の成分分析結果（鋼種別の平均組成と標準偏差）を示している。亜鉛メッキ鋼板以外は XRF での分析結果のばらつきは小さく、亜鉛メッキ鋼板のみ補正を行えば、XRF 分析でも十分な精度で分析できると考えられる。他方、ステンレス鋼が 1 つでも混入するとクロムの分析値に大きく影響してしまうため、サンプリングの際には十分に縮分を行うことに注意する。

図表 122 解体されずに筐体に残存したハーネス（商品ボタン付近）



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング撮影

図表 123 XRF 分析結果におけるばらつき（B 社・ブランク）



(注) 鉄：鉄が 85%以上、かつクロム、錫が 1%未満、マンガンが 0.8%未満  
 ハイテン材：鉄が 85%以上、かつクロム、錫が 1%未満、マンガンが 0.8%以上  
 ステンレス鋼：クロムが 10%以上      亜鉛メッキ鋼板：亜鉛が 15%以上かつ鉄が 85%未満  
 (出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング撮影

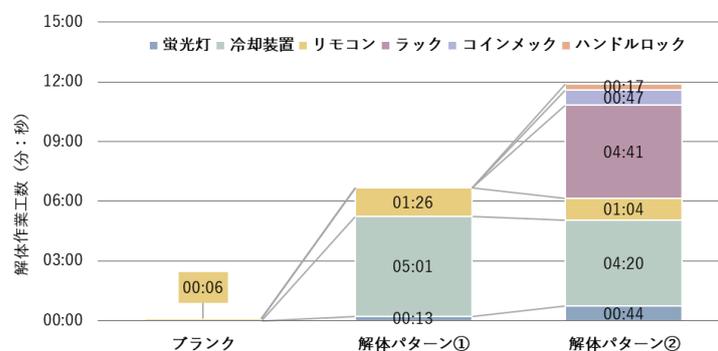
#### 4.3.1.4 作業負荷の確認

A 社、B 社において、各解体方法に従って解体を行う風景を撮影し、解体に要する工数を確認した（図表 124、図表 125）。解体工数は取り外す部品別に算出している。また、解体方法ごと、3 台の自動販売機を解体する時間を分析し、これらの平均値をとったものである。

取り外す部品が増加することで、A 社、B 社ともに解体工数は増加した。「ブランク」では、1 分以内に蛍光灯やリモコン（リモコン付近に残存する電池）を回収できた。一方、「解体パターン①」では 6 分前後、「解体パターン②」では 10~30 分程度、追加的な工数が発生していた。部品別にみると、「解体パターン①」では冷却装置、「解体パターン②」では冷却装置やラック、コインメックの解体に要する時間が、解体作業全体のうち大きな割合を占めていた。こうした部品を効率的に解体できるよう、メーカーや製品モデルに応じた標準的な解体方法の検討や、解体治具の開発が求められる。また、自動販売機メーカーとの協力が必須になるが、製品設計の見直しも有効な解決策と考えられる。

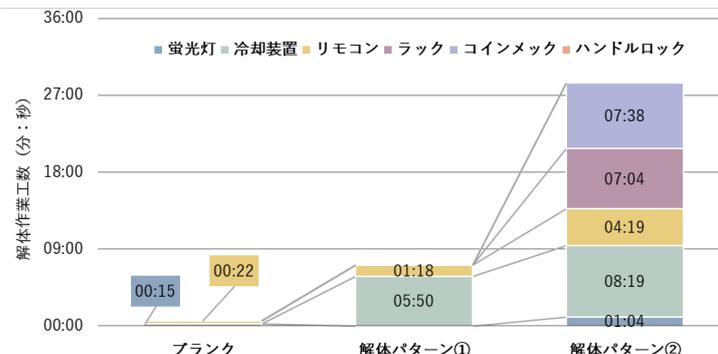
また、解体する個体によって、工数は変動することも明らかになった。LED 照明を使用しているため蛍光灯の回収が不要な場合、一部の利用価値が高い部品（リモコン、コインメックなど）が事前に回収されている場合などでは、工数は削減する。また、冷却装置やラックの配置・固定方法は製品によって異なり、比較的容易に取り外しができるものもあれば、取り外しに時間を要するものもある。実際に、ヒーターやファンモーターがラックの直下に設置されており、ラックを取り外さない限り、こうした部品を回収できない製品も確認された。

図表 124 解体パターン別の作業負荷（A 社）



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 125 解体パターン別の作業負荷（B 社）



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

## 4.3.2. 樹脂・金属成分を分離する要素技術の検討

### 4.3.2.1 選別試験結果

選別試験は、3.3.2.3 に示す選別条件で実施した。使用済み自動販売機から回収したダストは、破碎・篩選別したのち、4つの粒群に選別した(図表 127)。このうち2粒群(1-5mm、5-15mm)を対象に、湿式ジグ選別試験を実施した(図表 126)。

図表 128 に篩選別の試験結果を示す。横軸は粒群別の回収量、縦軸は元素組成である。横軸と縦軸を掛けた面積は、各産物に含まれる元素の重量を示す。湿式ジグ選別に投入する産物(1-5mm、5-15mm)の回収量は、それぞれ25%、65%であった。粒径が細くなるほど、銅の含有率は高くなった。反対に、粒径が粗くなるほど、塩素の含有率は低くなった。なお、図中の「その他」の組成は、主に樹脂由来の成分と考えられる。

図表 129 に粒群「1-5mm」の選別結果を示す。湿式ジグ選別の投入前に、銅線を回収した(回収率9%)。その後、湿式ジグ選別を行い、「浮上物」、「軽産物(軽)」、「軽産物(重)」、「重産物」を回収した。さらに、「重産物」を磁選・渦電流選別し、「磁着物」、「導電産物」、「非導電産物」を回収した。「銅線」、「導電産物」は、主に金属を含んだ産物であり(金属含有率80~90%)、回収率は11%であった。一方、「浮上物」、「軽産物(軽・重)」は、主に樹脂を含んだ産物であり(金属含有率1%未満)、回収率は64%であった。湿式ジグ選別は、金属と樹脂の分離に有効であったといえる。なお、ここでの金属は、銅、鉄、アルミニウム、クロムを指す。

「導電産物」、「非導電産物」の銅分配率は、それぞれ7%、53%であった。銅の多くは、「導電産物」として回収できていなかった。また、塩素は、「導電産物」を除く産物に分配された。「銅線」に含まれる塩素分は、ハーネス(被覆銅線)に由来するものと考えられる。「浮上物」、「軽産物(軽)」、「軽産物(重)」の塩素の分配率は、それぞれ6%、45%、10%であった。

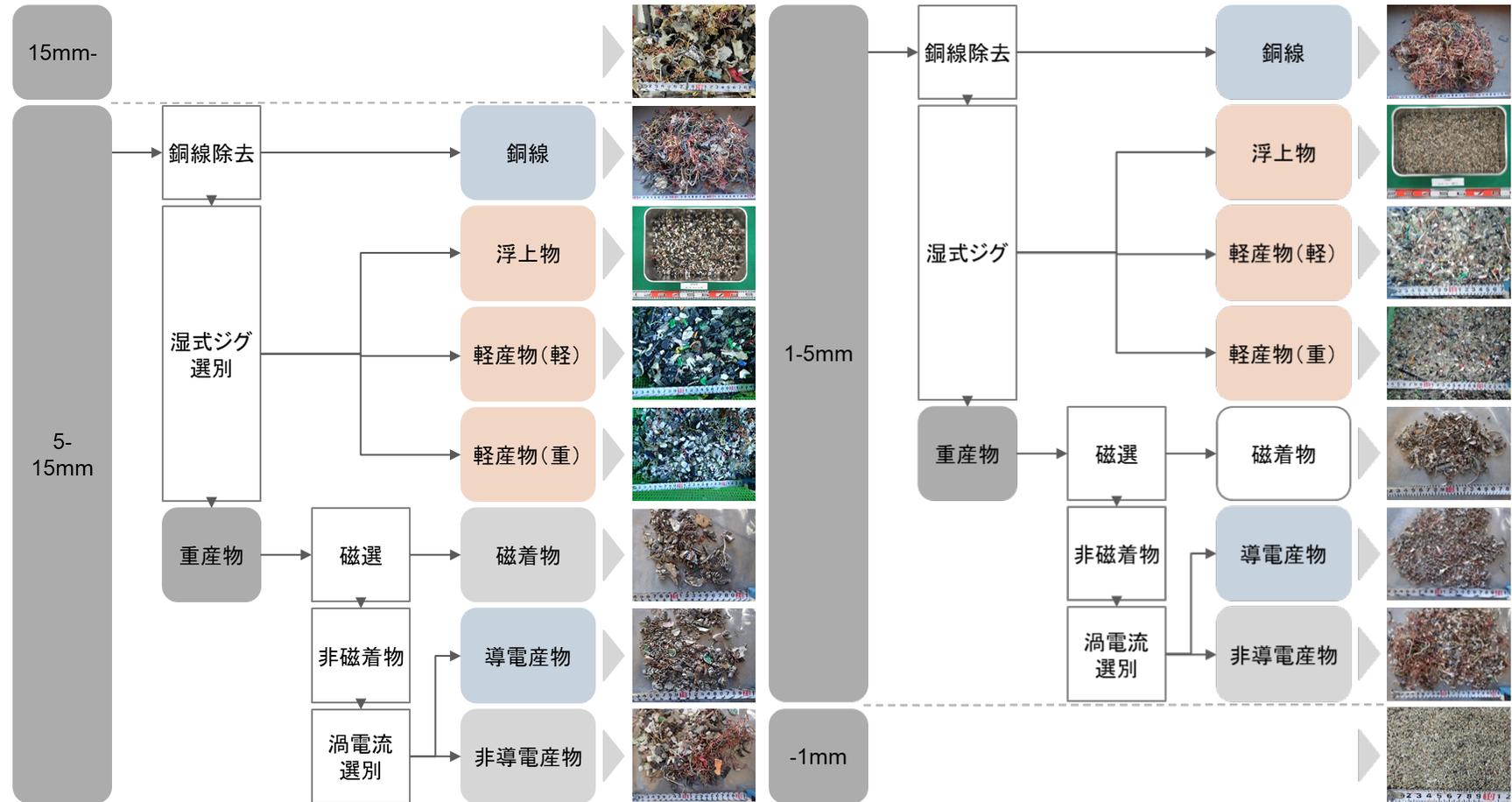
図表 130 に、粒群「5-15mm」の選別結果を示す。選別結果は、「1-5mm」の結果と概ね一致していた。一方、「1-5mm」の結果と比較して、「軽産物(重)」銅の分配率は高かった(1-5mm : 0.4%、5-15mm : 16%)。また、「浮上物」、「軽産物(軽)」、「軽産物(重)」の塩素分配率は、それぞれ9%、22%、30%であった。「1-5mm」では、「軽産物(軽)」の塩素分配率が最も高かったが、「5-15mm」では、「軽産物(重)」の塩素分配率が最も高かった。

図表 126 湿式ジグ選別試験における産物物回収量

粒群	投入量	回収量	選別ロス分
1-5mm	22.14kg	21.37kg	3.47%
5-15mm	24.89kg	23.88kg	4.05%

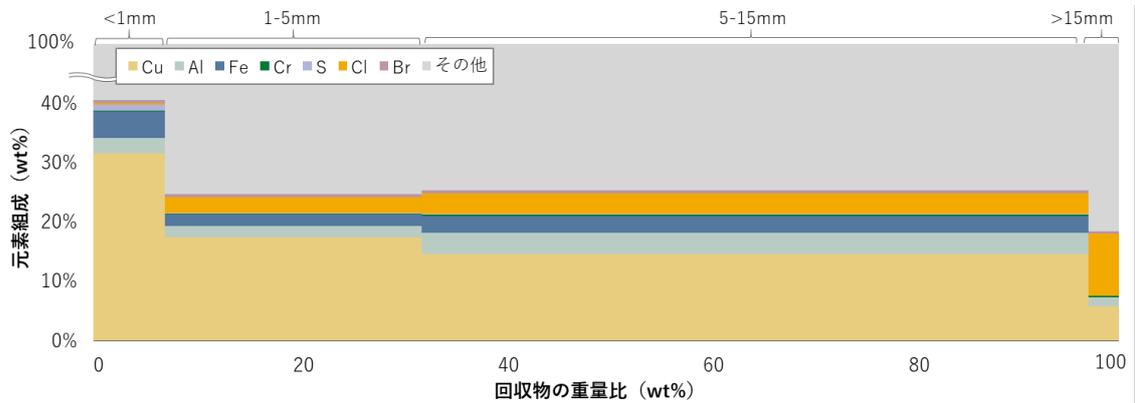
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 127 要素技術実証における回収物の外観



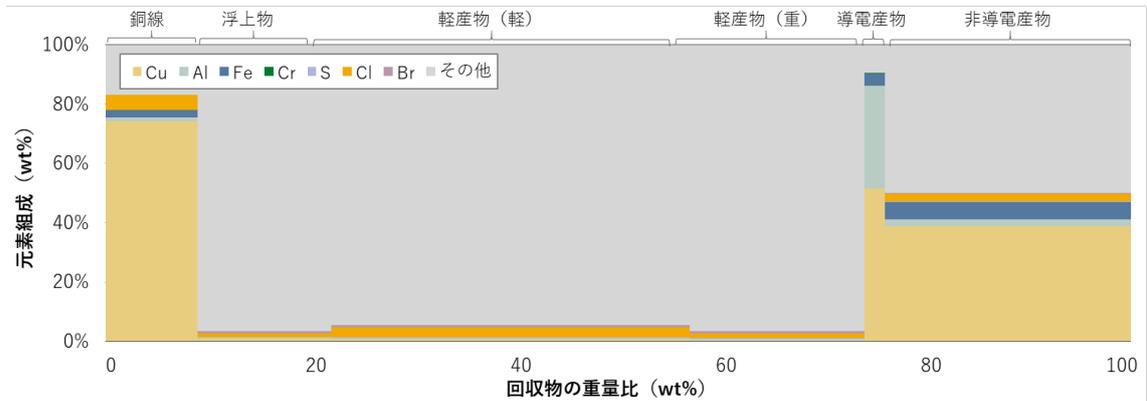
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 128 選別試験における産物の回収重量比と元素組成（粒群別）



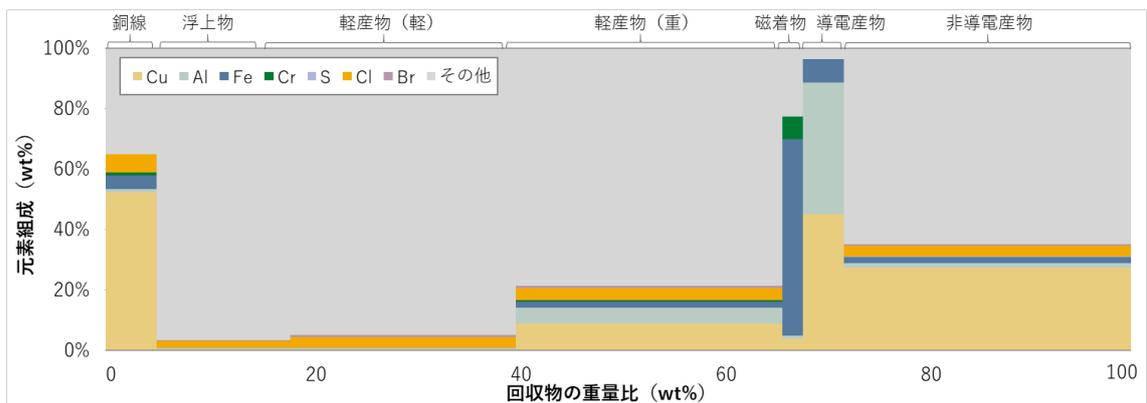
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 129 選別試験における産物の回収重量比と元素組成（1-5mm）



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 130 選別試験における産物の回収重量比と元素組成（5-15mm）



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

#### 4.3.2.2 回収した産物の評価

##### (1) 銅製錬想定原料

図表 131 は銅製錬への供給を想定した産物の評価結果である。評価対象は、「<1mm」、「銅線」、「導電産物」とした。「銅線」、「導電産物」の銅品位は 50%程度であった。「1-5mm・銅線」の銅品位は 74%であり、故銅グレードで販売できる可能性がある。また、「導電産物」は、金及び銀を、製錬事業者の評価される水準まで濃縮していた。一方、「導電産物」はアルミニウムを 40%程度含んでいる。アルミニウムは銅製錬の忌避元素であるため、比重選別などによって、事前に分離する必要がある。「<1mm」の銅品位は 32%であり、「銅線」、「導電産物」と比較すると品位は低い。一方、金が 7g/t 含まれている。金の評価によって、有価で販売できる可能性がある。

図表 131 銅製錬想定原料の成分分析結果

		金	銀	銅	アルミ	鉄	クロム
<1mm		7.0 g/t	164 g/t	32%	2.7%	4.4%	0.14%
1-5mm	銅線	1.1 g/t	174 g/t	74%	1.3%	2.4%	0.07%
	導電産物	5.0 g/t	854 g/t	52%	35%	4.3%	0.0092%
5-15mm	銅線	0.0 g/t	18 g/t	53%	1.1%	4.4%	0.86%
	導電産物	2.6 g/t	463 g/t	45%	43%	7.7%	0.10%

(注) データバーの上限値：金-5g/t、銀-400g/t、その他（銅、アルミ、鉄、クロム）-100%  
金及び銀の上限値は 3.3.2.1 の目標品位をもとに設定

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

##### (2) 原燃料代替品等想定原料

図表 132、図表 133 は、原燃料代替品として供給することを想定した産物の評価結果である。評価対象は、「浮上物」、「軽産物（軽）」、「軽産物（重）」とした。これら産物は、事前に塩素を除去すれば、セメント産業などに供給できる可能性がある（「5-15mm・軽産物（重）」を除く）。

セメント産業に投入する原燃料は、クロム含有率が極めて低い必要がある。回収物のクロム含有率は、「5-15mm・軽産物（重）」を除き、40ppm 未満であった。これは、4.2.1 で検討した規格案の第 1 等級を満たす水準である。回収物は、クロムを管理する観点で、付加価値の高い原料として供給できる可能性がある。また、硫黄や臭素の含有率は、それぞれ目標値（いずれも 1%）を満たした。一方、塩素の含有率は、目標値（0.8%）を満たさなかった。「1-5mm・浮上物」の塩素含有率は 1.3%であり、規格案の第 4 等級を満たしたが、それ以外の産物は、いずれも等級外であった。付加価値の高い原料として供給するためには、塩素を分離する必要がある。

鉄鋼電炉に投入する原燃料は、銅含有率が極めて低い必要がある。「1-5mm・軽産物（軽）」は、今回評価対象とした産物のうち、最も銅含有率が低い（0.39%）。原料として使用する鉄スクラップの銅品位が、0.1%や 0.3%で管理されることを考慮すると、銅含有率を下げる必要がある。また、硫黄の含有率は目標値（1%）を満たしたが、塩素の含有率は、目標値（0.8%）を満たさなかった。セメント産業を想定した場合と同様に、塩素を分離する必要がある。

図表 132 原燃料代替品等想定原料の成分分析結果（金属成分）

		金	銀	銅	アルミ	鉄	クロム	
1-5mm	浮上物	0.0 g/t	8.8 g/t	0.55%	0.0%	0.86%	0.0036%	第1等級
	軽産物（軽）	0.0 g/t	1.3 g/t	0.52%	0.0%	0.62%	0.0023%	第1等級
	軽産物（重）	0.0 g/t	1.0 g/t	0.52%	0.0%	0.39%	0.0013%	第1等級
5-15mm	浮上物	0.0 g/t	2.2 g/t	0.36%	0.0%	0.44%	0.0022%	第1等級
	軽産物（軽）	0.0 g/t	1.3 g/t	0.23%	0.0%	0.57%	0.0037%	第1等級
	軽産物（重）	2.0 g/t	8.1 g/t	5.2%	2.2%	8.9%	0.40%	等級外

(注) データバーの上限値：金-5g/t、銀-10g/t、その他（アルミ、鉄、銅、クロム）-10%  
金及び銀の上限値は 3.3.2.1 の目標品位をもとに設定

再生資源規格案におけるクロム含有量基準は次の通り。

第1等級：300ppm 以下、第2等級：1,000ppm 以下、等級外：1,000ppm より大きい

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 133 原燃料代替品等想定原料の成分分析結果（硫黄・ハロゲン・総発熱量）

		硫黄	塩素	臭素	総発熱量	
1-5mm	浮上物	0.11%	1.3%	第4等級	0.55%	6,870 kcal/kg
	軽産物（軽）	0.20%	3.4%	等級外	0.90%	6,080 kcal/kg
	軽産物（重）	0.18%	1.6%	等級外	0.70%	5,670 kcal/kg
5-15mm	浮上物	0.11%	2.3%	等級外	0.15%	8,330 kcal/kg
	軽産物（軽）	0.15%	3.4%	等級外	0.70%	7,150 kcal/kg
	軽産物（重）	0.14%	3.9%	等級外	0.69%	3,190 kcal/kg

(注) データバーの上限値：硫黄、臭素-1%、塩素-0.8%、総発熱量-7,000kcal/kg

硫黄及び総発熱量の上限値は 3.3.2.1 の目標品位・目標水準をもとに設定

再生資源規格案における塩素含有量基準は次の通り。

第1等級：500ppm 以下、第2等級：1,500ppm 以下、第3等級：5,000ppm 以下

第4等級：15,000ppm 以下、等級外：15,000ppm より大きい

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 4.3.2.3 選別プロセス改善に向けた課題

4.3.1.1、4.3.1.2をもとに、選別プロセス改善に向けた課題を検討した。

まず、銅の分配状況に注目した。「5-15mm・軽産物（重）」の銅分配率は16%であった。銅製錬原料の回収量を増やし、原燃料代替品から銅を分離するため、銅は「軽産物（重）」ではなく、「重産物」に分配されることが望ましい。

「5-15mm・軽産物（重）」の銅分配率が高い原因は、ハーネスが樹脂と絡まったためであると考えられる。銅線は事前に分離したが、完全には回収できず、一部は湿式ジグ選別機に投入された。選別操作のなかで、残存したハーネスが樹脂と絡まり、「5-15mm・軽産物（重）」に分配された可能性がある。そこで、破碎条件を見直すことが、上記課題の解決につながる可能性がある。

「1-5mm・軽産物（重）」の銅分率は0.4%であった。細かく破碎することによって、ハーネスが樹脂と絡まりにくくなり、ハーネスは「重産物」に分配されたと考えられる。なお、過剰に破碎することで、ジグ選別機の適用粒径外にならないよう、注意する必要がある。

また、「1-5mm」、「5-15mm」ともに、銅は「非導電産物」に53%分配された。ダスト中に残存した銅の有効利用のためには、銅は「導電産物」に分配される必要がある。銅が「導電産物」に分配されるよう、渦電流選別の条件の見直しや、比重選別（乾式・湿式）との組合せを検討する必要がある。

次に、塩素の分配状況に注目した。塩素は、「浮上物」、「軽産物（軽）」、「軽産物（重）」のいずれにも分配された。付加価値の高い原燃料代替品を回収するためには、塩素含有量が少ない「浮上物」を回収する必要がある。

塩素は主にポリ塩化ビニル（PVC）に由来すると考えられる。PVC樹脂の真比重は約1.4、軟質塩ビ製品の比重は1.1~1.3とされる<sup>43</sup>。湿式ジグ選別は水（比重1.0）を媒体として利用したため、PVC樹脂は「軽産物（軽）」または「軽産物（重）」に分配されると考えられる。しかし、結果として、「浮上物」にもPVCが分配されている。

ジグ選別機に投入した試料には、中空になった被覆線（PVC樹脂使用）が含まれていた。これは、破碎や銅線回収などの前処理により、ハーネスから銅線が抜けたものであると考えられる。こうした中空内部に気泡が残存してしまい、被覆線の見かけ比重が小さくなったことが、「浮上物」の塩素含有率が高い原因であると考えられる。そこで、被覆線の中空内部にも、気泡が残存しないようにする必要がある。まずは被覆線が試料中に残存しないよう、事前にハーネスを取り除くことが有効と考えられる。また、ハーネスを完全に取り除くことは難しい場合には、中空の内部にも溶媒を満たす必要があり、中空となる体積が減るよう破碎条件を工夫すること、前段で攪拌や試料の押しつぶしを行うこと、試料の濡れ性を改善すること、といった対策が必要になると考えられる。

また、投入した試料の一部に、厚みのない（薄い）粒子が含まれていた。これら粒子は、水中での向きによって、沈降速度にばらつきが生じてしまい、比重に基づく選別ができないことがある。そのため、可能な限り塊状やペレット状に近い形となるよう、破碎条件や整粒工程を工夫する必要がある。

<sup>43</sup> 塩ビ工業・環境協会ウェブサイト「塩ビ製品の实用特性」

[https://www.vec.gr.jp/enbi/enbi2\\_3.html#:~:text=%E6%AF%94%E9%87%8D%EF%BC%88%E5%AF%86%E5%BA%A6%Ef%BC%89.%E3%81%A6%E3%81%84%E3%81%BE%E3%81%99%Ef%BC%88%E5%9B%B3%E8%A1%A814%Ef%BC%89%E3%80%82](https://www.vec.gr.jp/enbi/enbi2_3.html#:~:text=%E6%AF%94%E9%87%8D%EF%BC%88%E5%AF%86%E5%BA%A6%Ef%BC%89.%E3%81%A6%E3%81%84%E3%81%BE%E3%81%99%Ef%BC%88%E5%9B%B3%E8%A1%A814%Ef%BC%89%E3%80%82)（2022年2月閲覧）

## 4.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）

### 4.4.1. 情報連携システムの概要

#### 4.4.1.1 情報連携アプリ「Moira」の概要

本事業の実証に用いた試作システムは、株式会社ムスビメ（旧 株式会社エスエルネット）にアプリの開発を委託し、2021年10月に自動販売機処理記録システム「Moira」としてリリースした。本アプリは、ブラウザ上で活用できるプログレッシブウェブアプリ（PWA）として公開しており、スマートフォン等の端末にインストールしなくても活用できる。

本システムは、事業初年度より検討してきた仕様に沿って構築されている。「Moira」で操作できる各メニューの入力情報や記録方法について図表 134 に整理した。なお、図表 52 に示したように、アプリの構築に際しては、情報の管理方法と入力方法を重視して設計した。

情報管理については、自動販売機とポンベ、出荷単位の3種類のQRコードを活用することで、各コードに紐づく情報を管理する方法とした。また、入力方法にはQRコードとカメラを活用するほか、そのほかにも選択式の入力とすることで作業員の負荷を減らし、誤入力を防止する設計としている。図表 134 に示した通り、QRコードが付いているものはQR読取、カメラマークがついているものは撮影によって入力可能であるため、手入力が必要な部分は一部である。銘板に記載されたシリアル番号やモデル番号のほか、伝票番号等は手入力が必要だが、この点も省力化を目指して後述するOCR技術活用の検討を進めた。

アプリの仕様や入力方法は、現場視察を含めて中間処理事業者ともたびたび調整を行ってきたことから、適正な記録と作業工数の低減を両立した設計が実現できたと考えている。

図表 134 各メニューにおける入力情報と入力時期

	アプリによる実証フロー			従来のフロー(例)
	入力時期	入力情報	記録方法	
排出	本実証では対象外だが、QR貼付及び伝票番号等の入力は排出者側で実施されると、中間処理側の負担が減るほか、入荷時の照合作業も可能となる。			(一部は電子マニフェスト活用)
入荷	入荷～解体前 (QRは事前に貼付)	① 伝票番号等 ② 上記に紐づく個体	① 手入力(OCR活用可能) ② 各個体のQR読込	(一部は納品書と現品の照合)
個体登録	解体前	① 対象となる個体 ② 製品モデル ③ 型番・品番 ④ フロンの種類	① 各個体のQR読込 ② プルダウン選択+個体撮影 ③ 手入力(OCR活用可能) ④ プルダウン選択	✓ 管理表に型番等を手書き ✓ 手書きの表をPCに入力
ポンベ計量・フロン回収	フロン回収前(①②) フロン回収後(③)	① 回収ポンベ ② 上記に紐づく個体 ③ ポンベ世代・重量	① ポンベのQRコード読込 ② 各個体のQRコード読込 ③ 手入力+目盛りの撮影	
部品回収(事前解体)	部品回収前(①) 部品回収後(②)	① 対象となる個体 ② 回収した部品	① 各個体のQR読込 ② リストからの選択 +回収した部品の撮影	—
破碎	破碎前	① 対象となる個体 ② 破碎日 ③ 選別方法	① 各個体のQR読込+撮影 ② カレンダーから選択 ③ プルダウン選択	✓ 破碎日程を管理・記録
出荷	出荷前	① 対象となる製品 ② 対象品の破碎日 ③ 重量	① 製品のQRコード読込 ② カレンダーから選択 ③ 手入力	✓ 納品書等を発行
検品	本実証では対象外だが、納品物に貼り付けたQRを読み込むことで、破碎物に含まれた個体の解体記録及びCr/Cu比率の把握が可能となる。			✓ 納品先で目視等の品質チェック

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

#### 4.4.1.2 情報連携アプリ「Moira」による情報記録方法

##### (1) ログイン及びホーム画面

「Moira」を起動すると、図表 135 に示すログイン画面が表示される。管理者により発行されたユーザーID とパスワードを入力すると、ホーム画面に遷移する。なお、ユーザーID に事業者もしくは事業所を紐づけることで、ユーザーごとに表示されるメニュー等を変更することもできる。

ログイン後に表示されるホーム画面では、自動販売機の解体に係る 7 つのメニューが用意されており、実施する作業をタップすることで情報入力画面に進むことができる。

図表 135 「Moira」のログイン・ホーム画面



(出所) 自動販売機処理記録システム「Moira」

## (2) 入荷

使用済み自動販売機が入荷した際には、「入荷」メニューをタップする。「入荷」メニューでは、図表 136 の左図のように伝票番号の入力画面が表示される。伝票番号を入力すると、「自動販売機複数選択」画面に遷移し、「追加」をタップすると「自動販売機選択」画面に移行する。

ここで「QR スキャン」タップするとカメラが起動し、予め自動販売機に貼り付けておいた QR コードを読み取ることで、入力した伝票番号に個体が紐づけられる。QR コードの読取後は「自動販売機複数選択」画面に戻るため、追加で個体を紐づける場合はさらに「追加」をタップし、個体の追加を完了する場合には「完了」をタップする。

そのため、「Moira」での情報入力を開始する前に、各個体にタックシール等に印刷した QR コードを貼り付けておく必要がある。QR コードは (8) で示すように管理者メニューから出力が可能であるが、今回の実証試験では活用する QR コードの枚数が少なかったため、予めタックシールに印刷した QR コードを実証を行う中間処理業者に郵送した。

「入荷」メニューは、一度に入荷した個体をまとめて管理することを目的に設定しており、伝票番号に限らず、例えば日付やトラックのナンバープレート等を入力することで、同じ日や同じ便で入荷した個体を一括りにして管理することができる。排出事業者側との連携が実現し、排出事業者側で出荷する個体の登録作業を行われれば、「入荷」メニューは中間処理事業者側での検品作業としても活用することができる。

図表 136 「Moira」の入荷画面



(出所) 自動販売機処理記録システム「Moira」

### (3) 個体登録

入荷処理が完了した後は、「個体登録」メニューをタップする。「個体登録」メニューでは、図表 137 の左図に示すように「自動販売機選択」画面が表示される。ここで「入荷」の際と同様に自動販売機に貼り付けた QR コードを読み込み、対象となる自動販売機の情報入力を行う「個体登録」画面に遷移する。個体登録画面では、関連モデル（メーカー及びセレクション数）を選択するとともに、銘板に記載されたシリアル番号（個体番号）やモデル番号（型式）を入力し、フロンの種類を選択する。その後、必要に応じて個体登録時の自動販売機の写真を追加する。「写真追加」をタップすると「写真追加」画面に遷移し、端末内のファイルをアップロードするか、カメラマークを押すとカメラが起動し、その場で撮影することができる。

なお、モデルをメーカー及びセレクションで分類しているのは、今回の事業において各自動販売機に含有される忌避物質（クロム及び銅）の量を、メーカー及びセレクション数をもとに推計しているためである（4.3.1.3 参照）。仮に、自動販売機メーカーからモデル番号別の成分構成が公開されれば、より精緻に解体後や破碎後に含有される忌避物質の量を予測することができると考えられる。

図表 137 「Moira」の個体登録画面



(出所) 自動販売機処理記録システム「Moira」

#### (4) ボンベ計量・フロン回収

個体登録後は、一般的にフロン回収工程に進むと考えられることから、次工程はフロン回収に係るメニューとなる。「ボンベ計量」と「フロン回収」はセットで用いるフロン回収用のメニューであり、作業開始時等に「ボンベ計量」メニューをタップすることで、ボンベの重量を記録する。

図表 138 に示すように「ボンベ計量」メニューでは、まずボンベの選択画面が表示される。「Moira」では、管理画面において自動販売機とボンベ、再生資源の出荷用と 3 種類の QR コードを発行して活用する仕様となっている。ここではボンベの QR コードを読み取ることで、「ボンベ計量」画面でボンベの情報が表示される。ボンベは繰り返し再利用されるため、再利用されている回数を「世代」として入力するとともに、ボンベの重量を記録する。

その後、ボンベが満タンで交換が必要であれば、「満タンのためボンベ交換」ボタンを押すと、当該ボンベの世代が一つ進み、重量がゼロにリセットされる。交換が特に必要なければ、必要に応じてボンベの秤を写真で記録することで、後から誤入力の確認等を行うこともできる。

図表 138 「Moira」のボンベ計量の画面



(出所) 自動販売機処理記録システム「Moira」

実際にフロンを回収する際には、「フロン回収」メニューをタップする。図表 139 に示すように、フロン回収画面においても「ボンベ選択」画面が表示されるため、これから自動販売機を接続するボンベを選択する。ボンベを選択すると、「フロン回収」画面に遷移し、「吸い込む販売機選択」をタップすることで対象となる自動販売機を選択することができる(図表 139 ではサンプルとして「MURC」という名称のボンベを選択)。「自動販売機複数選択」画面では、「入荷」メニュー等と同様に QR コードで対象となる自動販売機を選択し、選択が完了した時点で「完了」ボタンをタップする。

回収が完了した時点で、再度「ボンベ計量」メニューをタップし、同様の手順で重量の記録を行う。重量が記録されると、アプリ側でフロン回収前の重量と回収後の重量の差分を自動計算して、対象となる自動販売機複数台から回収されたフロン重量を導出し、記録する仕組みとなっている。なお、フロン回収画面と、ボンベ選択画面を分けている理由としては、同一メニューにするとフロン回収をしている時間に、アプリを用いた他の作業ができなくなるためである。フロンの回収には数十分程度を要する場合もあることから、フロンを回収している時間に他の個体の部品回収作業等もできるようにするため、計量と回収のメニューを分ける設計とした。

フロンは一般的に、3～6台程度の自動販売機を同時に接続して一緒に回収されている。そのため、1台あたりの回収重量は不明確であり、各個体と回収重量が紐づかない点に情報管理の課題がある。「Moira」では、中間処理業者の作業フローを細かくヒアリングすることで設計したが、QRコードの読取回数が多くなるなどの課題もあり、そもそも中間処理業者側でフロンに関してどこまで記録する必要があるかも含めて、引き続き検討が必要であると考える。

図表 139 「Moira」のフロン回収の画面



(出所) 自動販売機処理記録システム「Moira」

## (5) 部品回収

フロンの回収が完了した後は、自動販売機からの部品回収工程へと進む。事業者によっては自動販売機からの事前解体をほとんど行わないケースもあるが、本事業では実証テーマ2で定めた規格を満たす解体方法の実現を目指しているため、「Moira」でもそれに合わせた解体部品の細分化と記録が可能な仕様とした。

図表 140 に示すように「部品回収」メニューをタップすると、他のメニューと同様に「自動販売機選択」画面に遷移する。そこで、解体を完了した個体に貼り付けられた QR コードを読み込むと、「部品回収」画面が表示される。「部品回収」画面で、回収した部品を選択した後に、「写真追加」をタップして解体が完了した筐体と、解体後の部品の撮影を行う。これらの解体証跡となる写真を個体と紐づけて管理することで、各個体の解体が適正に行われたことを示すことができる。

当初は解体した部品ごとに写真撮影を行うことを想定していたが、実証テーマ3とも連携して解体部品を選定していく中で、各解体部品の写真をすべて撮影することは作業工数的に現実的でないと判断したため、実証試験では解体した部品を1枚の写真に納まるように配置し、1回の撮影ですべての部品解体の証跡とする運用とした。これに伴い、部品選択画面もチェックボタン形式に変更し、蛍光灯の本数以外の手入力は不要となっている。なお、解体作業者の要望に沿って部品の選択肢は細かく調整しているほか、対象とする部品は管理画面でカスタマイズも可能である。

図表 140 「Moira」の部品回収の画面



(出所) 自動販売機処理記録システム「Moira」

## (6) 破碎

部品回収の後は破碎工程に進むため、破碎処理を行う前に「破碎」メニューをタップする。「破碎」メニューでは、他のメニューと同様にまずは破碎対象となる自動販売機を選択する必要があるため、「自動販売機複数選択画面」に遷移する。QRコードを用いて破碎する自動販売機を選択すると、図表 141 に示すように「破碎日」と「選別方法」を入力する「破碎」画面に遷移する。図表 141 では赤枠でアラートが出ているが、事前に個体登録や部品回収の入力が行われていないと、アラートが出るようになっている（図表 141 ではサンプル QR コードを用いているため、事前入力が十分に行われていない）。

破碎日はカレンダーから選択するほか、選別方法は予め登録していた選別方法から選択を行う。なお、再生資源（磁着物）への忌避物質含有量の導出に際しては、ここで選択する選別方法に忌避物質の分配率を紐づけておくことで、推計を行う方法を検討する。

図表 141 「Moira」の破碎の画面



(出所) 自動販売機処理記録システム「Moira」

## (7) 出荷

破碎後の出荷に関しては、「出荷」メニューをタップすると、出荷用の QR コードの入力画面に遷移する。QR コードを読み込むと、「出荷」画面で出荷対象となる販売単位に含まれる資源（磁着物）の破碎日及び重量の入力が求められる。これを入力し、出荷用の QR コードを納品側（素材産業側）に引き渡すことで、素材産業側で納品物に含まれる品質を確認することができる。

QR コードの引渡しについては、当初はフレコン等の荷姿ごとに QR コードを貼り付けることを想定していたが、今回主な対象とした鉄スクラップ（磁着物）の場合には、トラックにバラ積みで輸送されることが大半であることから、納品書等の引渡書類に QR コードを貼り付けることを想定している。

図表 142 「Moira」の出荷の画面



(出所) 自動販売機処理記録システム「Moira」

## (8) 管理メニュー

作業現場で活用するメニューとしては(1)～(7)の通りであるが、これとは別に各メニューの選択項目のカスタマイズや、QRコードの発行、記録情報の修正等が可能な管理者画面が用意されている。図表 143 に示すように、「reports」画面では、販売機、ポンペ、出荷におけるそれぞれの QR コードが出力できるほか、各 QR コードに紐づけられた情報 (timeline) が記録の時間軸に沿って閲覧可能であり、修正も可能である (但し、修正履歴は記録される)。

また、「maintenance」画面では、ユーザー管理のほか、入力画面で設定されているモデル名や対象部品等の管理やカスタマイズ等を行うことができる。

解体工程や解体手順等は中間処理業者によって異なることが想定されるため、こうしたカスタマイズ性が高い設計を意識したことが本アプリの特徴ともいえる。また、今回はクロムと銅に注目して検証を行ったため、例えば対象部品を自動車の銅含有部品に置き換えて記録を行えば、自動車リサイクル法第 31 条に規定された全部利用における銅管理等にも適用できると考えられる。

図表 143 「Moira」の管理者画面



(出所) 自動販売機処理記録システム「Moira」

## 4.4.2. 情報連携システムの実証

### 4.4.2.1 実証事業の概要

2021年10月15日に「Moira」がリリースしたことに合わせて、10月下旬より中間処理業者2社での情報連携システムの実証を行った。

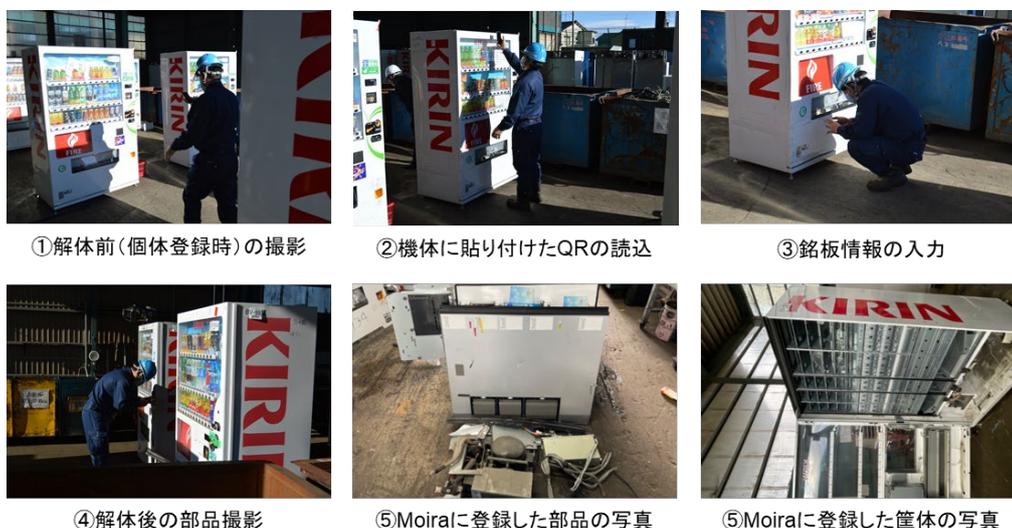
図表 50 に示した通り、各社においてブランク 30 台、解体パターン①30 台、解体パターン②3 台の合計 63 台（2 社で 126 台）を「Moira」を活用しながら解体し、その後不足する機能や入力上の課題等を整理した上で、アプリの更新を行った。なお、入力に支障が出るアプリの修正や更新については、63 台の解体完了を待たずに実施している。

その後、12月中旬に更新を行ったアプリで解体パターン②9 台の解体を行った。さらに、1月中旬には解体パターン③として、後述する OCR 技術が活用可能な端末を用いて実証を行った。各社での実証の様子を図表 144、図表 145 に示す。

図表 144 A 社での「Moira」活用の様子



図表 145 B 社での「Moira」活用の様子



#### 4.4.2.2 実証通じた情報連携システムの更新

##### (1) 情報連携アプリ「Moir」の更新履歴

2021年10月15日に「Moir」を公開したが、中間処理業者での実証を行った結果として、解体作業担当者からアプリに対する多様な要望が得られた。事前にアプリの内容については調整を行っていたものの、実際に活用を進める中で、正確な入力に大きな影響を与えるものもあった。こうした課題に対しては、アプリの更新で対応した。アプリの更新は10月の公開から12月の最終更新までに大きく分けて3回実施しており、ver.1.0～ver.4.0に大別している。更新の履歴を図表146に示す。

図表 146 「Moir」の更新の履歴

バージョン	公開日	変更点
Moir ver.1.0	2021年 10月15日	✓ プロトタイプ版として公開 (協力事業者にアプリの説明会を実施)
Moir ver.2.0	2021年 11月3日	✓ 個体登録画面に「フロンの種類」を追加 ✓ ボンベ計量画面に「満タンのためボンベ交換」ボタンを追加 ✓ 個体登録時に別画面へ移行してしまうバグを修正 ✓ その他、これまでに発覚していた細かいバグを修正 (協力事業者に改めて説明会を実施)
Moir ver.3.0	2021年 11月10日	✓ アプリ管理画面から入力情報の編集が可能になるよう修正 (但し、修正履歴はタイムラインとして記録) ✓ 部品回収画面でも製品モデルが選択できるように修正 ✓ 部品回収画面での部品の選択肢(冷却装置)を修正 ✓ 破碎前に登録漏れがないかを確認できるように修正
Moir ver.4.0	2021年 12月3日	✓ 蛍光灯がLEDの場合でも登録できるように修正 ✓ フロン選択時にフロン回収の必要がない個体を選んだ場合、アラートが出るように修正

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

##### (2) Moir ver.2.0

「Moir ver.1.0」では、フロンの種類が選択できなかったほか、フロン回収ボンベ交換時の入力作業の煩雑さ等が指摘された。そのため、図表147に示すように「個体登録」画面でフロンの種類に関して、「新冷媒」や「機器なし」等も含む10種類の項目から選択できるようにしたほか、「ボンベ計量」画面で「満タンのためボンベ交換」ボタンを追加した(図表138参照)。

また、最初の公開であったことから、細かなバグのほか、個体登録時に入力完了前に別画面に遷移してしまうという致命的なバグもあった。結果として解体作業員から正確に入力できないとの指摘があり、最初の63台の解体を待たずに「Moir ver.2.0」への更新を行った。なお、ver.2.0の公開に際しては、解体実証を依頼した2社それぞれに改めて修正箇所や使用方法の説明等を行った。

図表 147 「Moira ver.2.0」の更新箇所（フロン選択肢の追加）



(出所) 自動販売機処理記録システム「Moira」

### (3) Moira ver. 3.0

「Moira ver.2.0」への更新によって、解体工程の記録は問題なくできるようになったものの、依然として入力時に作業員が戸惑う箇所が複数存在することが判明した。結果として、ver.2.0と同様に最初の63台の解体の途中において、ver.3.0への更新も行っている。そのため、時間分析等に活用した動画撮影については、ver.3.0を活用して行った結果である。

ver.2.0の課題としては、例えば「個体登録」画面で入力を行うこととしていた「製品モデル」に関して、個体登録時点ではセレクション数が不明確との指摘があった。そのため、ver.3.0では解体を行う部品回収画面で改めて「製品モデル」の入力欄を設置することとした(図表140参照)。また、自動販売機の種類によっては、冷却装置のモーターファンだけが固定されていて取り外せないケースが多いとの指摘もあったことから、冷却装置をモーターファンの有無で2つに分けることで、モーターファンが取り外せなかった場合も区別して記録できるようにした(図表140参照)。

さらに、各工程で入力が適正に行われているか確認がしにくいとの意見があったことから、破碎前の自動販売機の種類選択画面において、適切に入力ができていない場合にはアラートを発出するようにした。この点は、図表141でも示した通りである。

入力情報の管理という観点では、作業員から誤って入力した際の修正方法等も把握しておきたいとの意見があった。情報のトレーサビリティの観点から、情報の修正を可能とすることは好ましくないため、図表148に示す通り管理者メニューからのみ記録した情報にアクセスし、入力情報の修正が行えるようにした。なお、その場合においても、情報を修正した履歴はタイムラインとして記録されるため、修正を行った日時や担当者等は把握可能である。

図表 148 「Moira ver.3.0」の更新箇所（管理者画面からの修正）



(出所) 自動販売機処理記録システム「Moira」

#### (4) Moira ver. 4.0

「Moira ver.3.0」まで概ねアプリの課題は修正できたと考えられるが、ver.4.0では各社が63台の解体を行った結果として、解体作業員から得られた課題をさらに反映した。

まず蛍光灯とLEDが入力で区別できないとの指摘を受け、部品回収画面にLEDを追加することで区別を明確化した(図表140参照)。また、フロン回収時に新冷媒やフロンのない個体を誤って登録することがないように、「個体登録」画面で「新冷媒」、「機器無し」、「法第41条充填なし」が選択されていた個体がフロン回収対象となった場合には、アラートが発出されるようにした。

ver.3.0までは、多様な解体パターンを想定し、選んだ選択肢によってほかの選択肢の入力を制限するような機能は持たせてこなかった。例えば、「部品回収」画面では、扉が開かずに部品回収ができない「カギ無し」という選択肢を用意しているが、「カギ無し」と解体部品の双方を選択することも現状では可能である。入力制限は実際には起こり得る入力パターンを制限してしまうことにもなりかねないが、解体作業者の入力ミスや、入力しやすさを向上させるためにも、運用を進めながら実装していくことが重要と考えられる。

なお、Moira ver.5.0まで更新を行うことを当初は想定していたが、ver.4.0を用いた作業の所感としてアプリの改良に関する主な要望はなかったことから、1月中旬の解体に際してはアプリの更新は行わず、OCR機能を持ったデバイスの有効性を検証することとした。

#### 4.4.2.3 光学文字認識技術活用の検討

「Moira」の実証において、解体作業員から最も多く挙げた要望が、個体番号や型式の入力作業の省力化である。動画分析等からもこれらの入力には1分～1分半程度の時間を要していることが分かっており、入力作業だけでなくスマートフォンに持ち替えるための軍手の取外し等も大きな手間となっていると考えられる。実際に、作業員からは音声入力等が活用できれば省力化できるとの意見のほか、小さい画面への入力作業が大きなストレスになるため、紙の様式にペンで記載する方が、負担が少ないとの意見もあった。

こうした課題に対応するため、当初はスマートフォンでの入力作業を行っていたものの、3回目の実証においてOCR機能を活用可能な端末（キーエンス「DX-A400」）を準備した。これにより、銘板に記載された個体番号や型式をレーザーで読取ることで、入力工数の低減を試みた。また、同機器では紙面に印刷された英数字の読取も可能であるため、「入荷」メニューにおける伝票番号の入力にも活用可能である。これにより、フロン回収時の重量入力や蛍光灯の回収本数の入力といった簡易な数字入力を除けば、手入力が不要となる。

OCR機能を活用した実証は、解体パターン②において各社で9台（合計18台）の解体を行った。結果として、すべての個体で個体番号や型式を問題なく読み取ることができた。自動販売機の排出事業者によっては、そもそも銘板が予め取り外されているケース等もあるが、こうした場合以外には手入力からの置換えが可能になると考えられる。

一方で、金属鋼板に彫刻表記された銘板では、印刷された場合に比べて近距離での読込が必要であったほか、作業環境（読取り時の明るさ等）等によっては、一部の英数字の読取が漏れてしまう場合もあり、読み直しが必要な場合もあった。端末側の設定として、入力文字列の桁数や文字種（英数字や記号等）を事前にフォーマット登録することで、読取り時の桁落ちを防止する機能もある。そのため、各メーカーにおける個体番号や型式の文字列パターンを整理できれば、読取精度の向上に繋げられる可能性がある。

図表 149 OCR機能を活用した銘板の読取の様子



(出所) 共同実施者提供

#### 4.4.2.4 付加機能の追加

##### (1) 「Moira」上でのクロム/銅含有量の導出（品質評価機能）

本実証では、中間処理業者のみでの実証であったために、検品時の品質評価に関する実証までは行っていない。一方で、再生資源の品質を評価するのは、再生資源の出荷先である原料メーカーである（磁着物の場合には電気炉メーカー等）。そのため、Moira では、出荷単位ごとに含有される忌避物質（クロム、銅）の量を各個体の事前解体工程から算出し、素材メーカーで確認できる機能を実装した。各個体及び各出荷単位の忌避物質含有量の測定方法については、実証テーマ3で示した通りである（4.3.1.3 参照）。

この測定方法を Moira に実装することで各出荷単位に含まれる忌避物質含有量と、実証テーマ2で検討した規格の範囲内に収まっているかを確認できるようにした。Moira の管理者メニューより「reports」メニューをタップすると、図表 150 に示すように「出荷塊評価」というメニューが表示される。これをタップすると、「出荷セット選択」画面が表示されるため、ここで出荷用のQRコードを読み取ると、4.4.1.2 (7) で指定した出荷単位に関して、図表 150 の右図に示すように総重量と各個体の銅、クロム含有量が表示される。さらに、出荷単位全体の合計値とクロム及び銅の含有率、規格内外の判定についても表示される（図表 150 はサンプルコードであるため、総重量や規格の基準値を入力していないため、「NaN」の表記となっている）。

図表 150 「Moira」の品質評価機能



(出所) 自動販売機処理記録システム「Moira」

現時点では、便宜的に管理者メニューに「出荷塊評価」メニューを紐づけているが、原料メーカー向けの ID を新たに設定し、「品質評価」メニューを選択できるようにすることも可能である。これにより、原料メーカー側で Moira によって再生資源の品質が確認できるようになる。また、中間処理業者側で品質評価情報算出後にオンデマンドで QR コードを発行する運用とすれば、QR コード自体に品質評価情報に入れ込むこともできる。これにより、Moira やインターネット環境がなくても品質情報を確認できるほか、発行した QR コードを別途メール等で複数の担当者に共有すること等も可能となる。

## (2) 「Moira」記録情報の抽出

「Moira」では、従来現場でのメモを事務所で PC に手入力してきた管理様式への代替も目的としているため、各社での管理方法に沿った Moira 記録情報の抽出も求められる。Moira 内部では、記録した情報が無作為に保存されている状況であるため、特定の様式に沿ったデータ抽出プログラムを別途作成した。

記録データの抽出は、管理者メニューに追加した「machine summary」もしくは「complete machine summary」から実施可能である。前者は QR コードを読み込むことで個別にデータを抽出するメニューであり、後者は記録されているデータのすべてを抽出するメニューとなる。現在は、各個体もしくは全個体での出力のみであるが、今後は中間処理事業者の要望に沿って、例えば解体作業日ごとに抽出するメニューを加えていくことも可能である。

図表 151 に示すように対象とする個体を選択するか、「complete machine summary」を選択すると、csv による出力データが得られる。この csv データをエクセルにインポートしたファイルが図表 152 である。本様式は、協力業者の既存の管理様式に沿った形式で整理しているが、今後様式の改善等も可能である。

図表 151 「Moira」によるデータ抽出機能



(出所) 自動販売機処理記録システム「Moira」

図表 152 抽出データのアウトプット（抜粋）

個体ID	関連モデル名	型式	No.	解体完了日	蛍光灯	電池	LED	リモコン	コインメック	ラック	冷却装置	冷却装置（モータ-除く）	ハンドルロック	カギ無し	フロンガス種類	充填日時	充填ボンベ別合計重量	充填ボンベNo.
H001	サンデン25	D255LP2B-HP	未設定	未設定	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	未設定	2021.11.11 15:45	<null>	B社ボンベ01
H002	富士電機30	F305LP2BLEED-HP	未設定	2022.02.07 14:27	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	未設定	2021.11.11 15:45	<null>	B社ボンベ01
H003	サンデン25	D205LSP2B-HP	未設定	2022.02.07 14:27	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	未設定	2021.11.11 15:45	<null>	B社ボンベ01
H004	富士電機30	F306KSP2B-HP	未設定	2022.02.07 14:27	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	未設定	2021.11.11 15:45	<null>	B社ボンベ01
H005	サンデン25	D255LP2B-HP	未設定	2022.02.07 14:27	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	未設定	2021.11.11 15:45	<null>	B社ボンベ01
H006	サンデン30	D306MP3LE-H	未設定	2022.02.07 14:27	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	未設定	2021.11.11 15:45	<null>	B社ボンベ01
H007	サンデン25	D204MP2LE-H	未設定	2022.02.07 14:27	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	未設定	2021.11.11 15:45	<null>	B社ボンベ01
H008	サンデン25	D205LSP2B-HP	08P5109885	2022.02.07 14:27	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	2021.11.11 15:45	<null>	B社ボンベ01
H009	サンデン25	D204LUP2B-HP	06P5106504	2022.02.07 14:27	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	2021.11.11 15:45	<null>	B社ボンベ01
H010	サンデン25	D204LUP2B-HP	12P5101842	2022.02.07 14:27	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	2021.11.11 15:45	<null>	B社ボンベ01
H011	サンデン25	D205LSP2B-HP	08P5109060	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	2021.11.11 15:45	<null>	B社ボンベ01
H012	富士電機30	F305MP2LE-H	105062157	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	2021.11.11 15:45	<null>	B社ボンベ01
H013	富士電機15	F155NPLE	未設定	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	未設定	2021.11.11 15:45	<null>	B社ボンベ01
H014	サンデン25	D204LUP2B-HP	03P5102373	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	2021.11.11 15:45	<null>	B社ボンベ01
H015	サンデン25	D255LP2B-HP	12P5102010	2022.02.10 15:20	4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	2021.11.11 15:45	<null>	B社ボンベ01
H016	その他20	NS-J20FV-LHP	1301520620	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H017	富士電機20	FE-K20F-LHPAP	205066826	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H018	その他24	NS-K25-LHPAP	1312512591	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H019	その他24	NS-L25-LHPAP	1405510473	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H020	その他24	NS-K36-LHPAP	1309530649	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H021	サンデン25	CVA-K25-LHP	31P6200118	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H022	サンデン25	CVA-L25-LHP	37P6203785	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H023	富士電機20	F-M20F-LHPAP	410065085	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H024	その他24	NS-L30F-LHPAP	未設定	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	未設定	<null>	<null>	
H025	その他24	NS-L25-LHPAP	1407510750	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H026	その他24	NS-K25-LHPAP	1401512754	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H027	その他24	NS-H30FV-HP	1110550599	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H028	その他24	NS-J30FV-LHP	1206550157	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H029	その他24	NS-K36-LHPAP	1309530732	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H030	その他24	NS-K36-LHPAP	1402531411	2022.02.10 15:20	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H031	富士電機25	D11W25S5PFH	103071324	未設定	4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H032	その他24	N-10WP30S6-HP-Z	1105570602	未設定	4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H033	その他24	N-10WP25S5-HP	1108530411	未設定	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<null>	<null>	<null>	
H034	富士電機30	F306MP2LE-H	107073397	未設定	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	HFC/R134a	2021.12.15 14:35	3.02	B社ボンベ01
H035	富士電機30	F306JSP2B-HPERA	804030767	未設定	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	HFC/R134a	2021.12.15 14:35	3.02	B社ボンベ01
H036	富士電機30	F306LSP2BLEED-HP	5033906	未設定	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	HFC/R134a	2021.12.15 14:35	3.02	B社ボンベ01
H037	富士電機30	F306LSP2BLEED-HP	3032543	未設定	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	HFC/R134a	2021.12.15 14:35	3.02	B社ボンベ01
H038	富士電機30	F305MP2LE-H	103069366	未設定	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	HFC/R134a	2021.12.15 14:35	3.02	B社ボンベ01
H039	サンデン25	D255MP2LE-H	17P5107535	未設定	0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	HFC/R134a	2021.12.15 14:35	3.02	B社ボンベ01

(出所) 株式会社ムスビメ作成

#### 4.4.2.5 作業性の検証

##### (1) QRコード（タックラベル）の耐久性

今回の実証では、使用済み自動販売機への貼付用、フロン回収ボンベ貼付用、再生資源貼付用の3種類のQRコードラベルを用意した。屋外での自動販売機の解体作業や保管を考慮し、耐水性の高いユポタックシールに熱転写で印字する方法を取った（ラベルプリンタとしては東芝テック「BA420T」を活用）。

結果として、耐水性に関しては問題がなかったものの、紫外線の影響により熱転写が薄れてしまい、判読不可能になってしまったものがあつた。今回解体から破砕までの保管期間が10日から20日となった30台のうち、2台についてはまったく読めない状態となっており、ラベルシールの検討が必要と考えられる。

また、3回目の実証で検証したOCR機能が十分に活用可能であれば、QRコードを読み取るように銘板に記載された個体番号を読み込むことができるため、使用済み自動販売機貼付用のタックシール自体を廃止する運用も検討できる（銘板をタックシールのように活用）。フロン回収ボンベ用及び再生資源貼付等のQRコードは引き続き必要となるが、保管状況が課題となる使用済み自動販売機貼付用のタックシールだけでも廃止できれば、課題は解決できる可能性がある。

図表 153 QRコード（タックラベル）の耐久性に関する課題



【自販機の保管状況】



【印字が薄くなったラベル】



【印字が薄くなったラベル②】



【読取が困難なラベル】

(出所) 共同実施者提供

## (2) 破砕前の QR コード（タックラベル）の読取り

「Moira」では破砕日を特定するために、破砕当日の破砕前に各個体に貼り付けられた QR コードを読み取る操作が必要になる。一方で、破砕前の保管状態としては、スペースの削減のために自動販売機を何段にも重ねて保管している場合があり、QR コードが隠れて読み込めない状況となる可能性がある。さらに、高い位置にまで積み上げられると、スキャンを行う端末が届かず、読み込みができない状況も想定される。

今回の実証では、限定された台数であったために、読み込みができるように保管することで対応したが、実際の運用においては保管方法の変更や QR コードの貼付位置等を工夫することで、改善が求められる可能性がある。

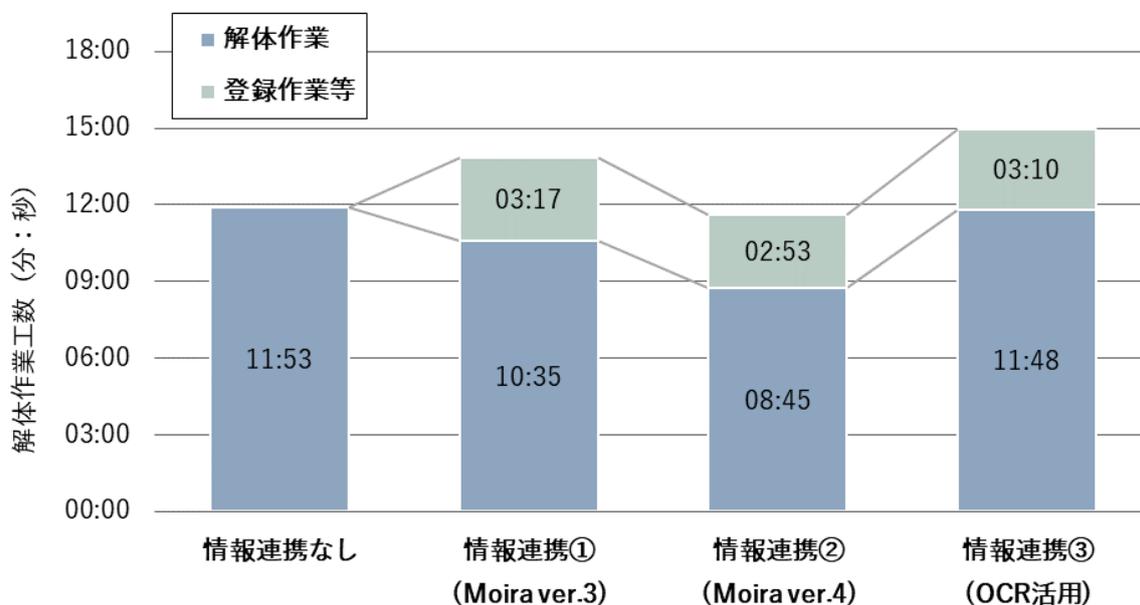
#### 4.4.2.6 作業負荷の確認

「Moira」の活用による新たな作業負荷を検証するため、図表 50 に示した解体パターン②における 4 回の実証に関して、各 3 台をサンプルに時間分析を行った、なお、時間分析の手順については 3.3.1.4 と同様に実施したほか、「Moira」への登録作業等が明確に確認できないサンプルについては除外している。

図表 153 に各実証における「Moira」への登録作業等の平均時間を整理した。この作業には、QR シールの貼付やアプリの登録操作、写真撮影等の作業を含んでいる。結果として、「Moira」を活用したいずれの回においても、概ね 3 分前後を登録作業等に要していることが分かった。情報連携①と②では、Moira の更新のみであったため大きな作業時間の改善は見込みにくい、OCR 機能を活用した情報連携③においても作業時間の削減は確認できなかった。この理由として、入力作業自体は省力化できたものの、4.4.2.3 で言及したように読み込んだ個体番号や型式に桁落ちがないかの確認や、読み直しに時間を要していることが挙げられる。今後、各メーカーにおける個体番号や型式のパターンを整理し、端末側で入力文字列の事前フォーマット登録を行う等の対策が実施できれば、確認作業の時間は短縮できると考えられる。

なお、解体作業においては、約 3 分の工数増加になるが、従来手書きで行っていた解体記録（主にフロン管理）に関して、手書きの様式を PC に入力する工数は削減ができる。PC への入力作業には、概ね 1 台当たり 63.5 秒ほど掛かっている<sup>44</sup>ことが見込まれるため、実質的な工数の増加としては約 2 分前後になると見込まれる。

図表 154 情報連携システムへの登録作業等に要する平均作業時間



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

<sup>44</sup> 従来の様式に沿って、10 台の自動車販売機のフロンに関する情報を PC に入力した時間を計測して算出

## 4.5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）

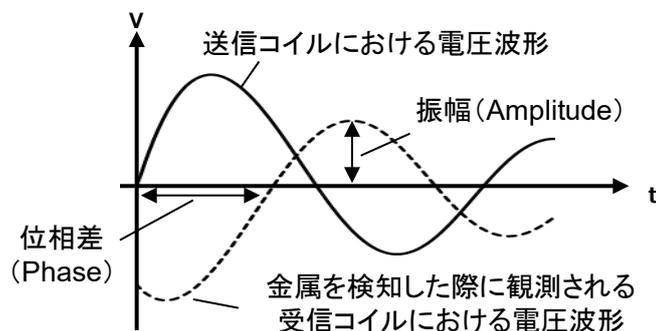
### 4.5.1. 電磁式ファインダーにおける選別条件の検討

#### 4.5.1.1 観測データに影響を与える要因分析

本実証で用いた電磁式ファインダーのメーカーであるシュタイナート社は、電磁センサーにおける観測データに関する詳細な情報を開示していない。そのため、電磁センサーにおける各観測データの理論式を既存文献等のレビューから推定した。

電磁センサーによる観測データである **Amplitude**、**Phase** は、電磁センサー中の受信コイルで観測される電圧波形の“振幅”と“送信コイルにおける電圧波形との位相のずれ（位相差）”を表したものと考えられる（図表 155）。その仮定のもと、電磁センサーの受信コイルで観測される振幅、位相差の理論式として図表 155 が推定された。ただし、参照した論文では、地雷探知機に使用されている電磁センサーをモデルとしている。そのため、電磁センサー中の受信コイル、送信コイル、試料が同軸にあり、それらが固定されているという条件で理論式を構築している（図表 156）。装置条件、試料・試料との距離が定まったとき、振幅は送信コイルの電圧の各周波数及び試料の半径、比透磁率、導電率によって決まることがわかる。

図表 155 電磁センサーで観測される電圧波形のイメージ図（当社仮定）



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 156 電磁センサーの受信コイルで観測される振幅、位相差の理論式

① 
$$V^{(s)} = 2\pi i \mu_0 I \omega \frac{R_s R_T}{(d_T^2 + R_T^2)^{1/2}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{2n(n+1)} \frac{P_n^1(d_T/[d_T^2 + R_T^2]^{1/2}) P_n^1(d_s/[d_s^2 + R_s^2]^{1/2})}{(d_T^2 + R_T^2)^{n/2} (d_s^2 + R_s^2)^{(n+1)/2}} X_n(ka) + i Y_n(ka)$$

装置条件、装置・試料との距離によって変化する項

装置条件、試料によって変化する項(応答関数)

② 
$$X_n(ka) + i Y_n(ka) = \frac{(2\mu_r + 1)ka \cosh(ka) - (2\mu_r + 1 + k^2 a^2) \sinh(ka)}{(\mu_r - 1)ka \cosh(ka) + (-\mu_r + 1 + k^2 a^2) \sinh(ka)}$$

※  $k = \sqrt{i\sigma\mu_0\omega}$

③ 
$$\varphi = \tan^{-1} \frac{Y_n(ka)}{X_n(ka)}$$

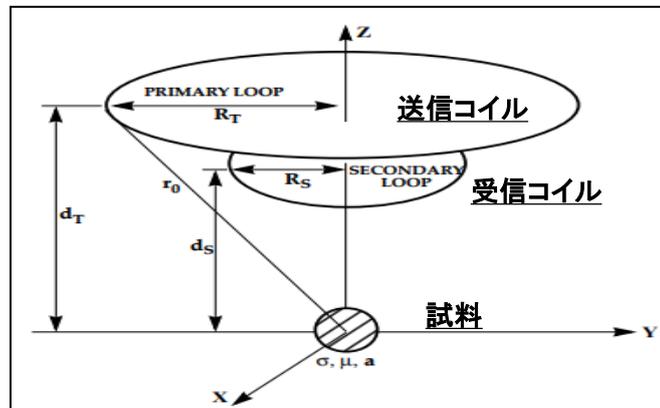
④ 
$$\varphi_d = \tan^{-1} \frac{Y_n(ka)}{X_n(ka)} - 90^\circ$$

$V_s$ : 受信コイルで出力される電圧 (V)	$X_n$ : 応答関数の実数部
$\mu_0$ : 真空の透磁率 (H/m)	$Y_n$ : 応答関数の虚数部
$I$ : 送信コイルを流れる定常電流 (A)	$a$ : 試料(球と仮定した場合)の半径 (m)
$\omega$ : 送信コイルの角周波数 (rad/s)	$\mu_r$ : 試料の比透磁率
$R_s$ : 受信コイルの半径 (m)	$k$ : 応答パラメータ
$R_T$ : 送信コイルの半径 (m)	$i$ : 虚数
$d_s$ : 試料中心から受信コイル中心までの距離 (m)	$\sigma$ : 試料の導電率 (S/m)
$d_T$ : 試料中心から送信コイル中心までの距離 (m)	$\omega$ : 送信コイルの電圧の角周波数 (rad/s)
$P_n^1$ : ルジャンドル多項式	$n$ : 定数

赤字: 試料由来のパラメータ、青字: 装置条件由来のパラメータ、黄字: 装置・試料との距離に由来するパラメータ

(出所) Claudio Bruschini ら、Phase angle based EMI object discrimination and analysis of data from a commercial differential two frequency system, Proceedings of SPIE- The international Society for optical Engineering, 2000 を参考に三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 157 理論式における試料と電磁センサーの位置関係



(出所) Claudio Bruschini ら、Phase angle based EMI object discrimination and analysis of data from a commercial differential two frequency system, Proceedings of SPIE- The international Society for optical Engineering, 2000 を参考に三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

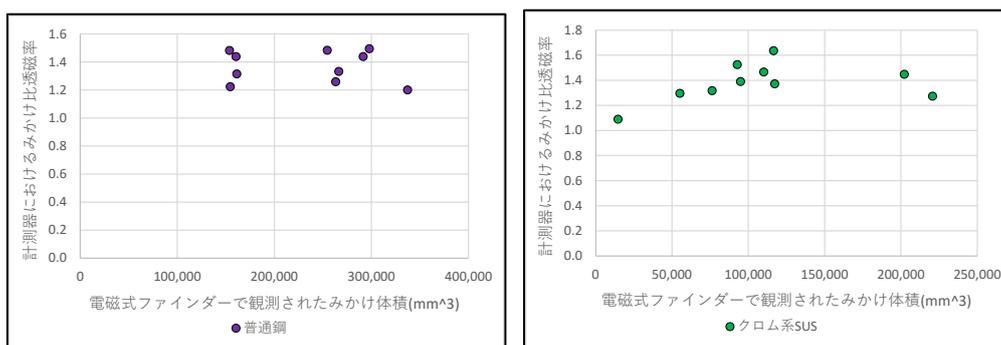
#### 4.5.1.2 観測データに影響を与える試料条件の検討

シュレッダースクラップ（普通鋼、クロム系ステンレス鋼）の磁化率を計測し、比透磁率<sup>45</sup>を算出した。算出された比透磁率と電磁式ファインダーで観測されたデータ（みかけの体積、位相平均値）との関係を図表 157、図表 158 にそれぞれ示す。

図表 157、図表 158 に示す通り、普通鋼、クロム系ステンレス鋼では比透磁率に特に変化がみられず、電磁式ファインダーにおける観測データとの相関はみられなかった。ただし、ここで示す比透磁率は、あくまで測定機におけるみかけの磁化率、比透磁率である。今回用いた磁化率測定計は、もともと地質学分野での使用が想定されており、露頭の岩石における単位体積当たりの磁化率を計測するものである。そのため、測定器の検知可能領域内全域に、分析対象の岩石だけが存在する（均質な物質だけが存在する）という前提で磁化率が計測されている。そのため、検知可能領域内に複数の系が存在する場合、計測される磁化率は、各系における真の磁化率とは異なるみかけの磁化率となる。例えば、センサーの検知可能領域内に空気やベルトといった物体があれば、それらの磁化率も含めた総合的な磁化率となると考えられる。また、比透磁率もみかけの磁化率から算出していることから、計測器におけるみかけの比透磁率となる。

シュレッダースクラップは不定形であることから、計測器と試料に隙間が生じる。そのため、測定される磁化率は、計測範囲内に存在する空気などの影響も受けたみかけの磁化率になると考えられる。電磁式ファインダーにおいても、電磁センサーの検知可能領域内におけるみかけの磁化率や比透磁率が観測データに影響を及ぼしていると考えられる。本試験の結果から、予め同一鋼種であると XRF 等によって把握されている磁着スクラップは、みかけ体積の大小に関わらず、みかけの比透磁率に大きな差はないことを確認できた。そのため、XRF 等で磁着スクラップが同一鋼種であると判断されているかぎり、みかけの比透磁率の違いによる影響を考慮せずに済むものと判断できる。

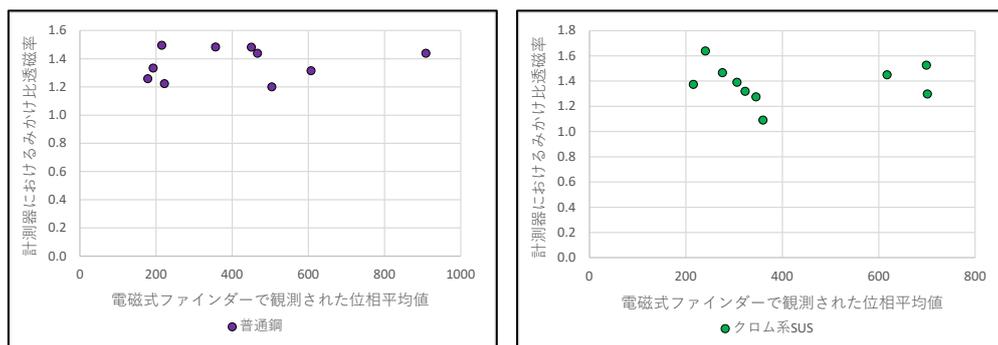
図表 158 みかけ比透磁率と電磁式ファインダーで観測された体積の関係



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

<sup>45</sup> 比透磁率  $\mu_r$  は磁化率  $\chi$  を用いて、 $\mu_r = 1 + \chi$  で表すことができる。

図表 159 みかけ比透磁率と電磁式ファインダーで観測された位相平均値の関係



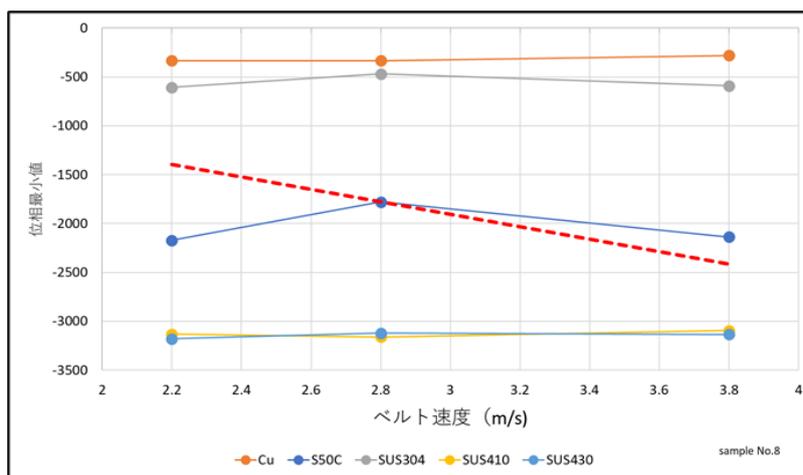
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

#### 4.5.1.3 観測データに影響を与える装置条件の検討

ベルト速度を増加させると、試料を貫く磁束密度の時間的変化量が増加し、試料中を流れる渦電流が増大することが想定される。そのため、本試験では、電磁センサーによる各観測値が（絶対値として）増加することが期待されていた。しかし、ベルト速度を変化させても、各金属種・形状において観測される位相最小値、位相平均値に大きな変化は見られず、ベルト速度変化による主要な観測データへの影響はほぼないことが確認された。（図表 160、図表 161）

有意差が確認されなかったことから、ベルト速度 1.7 倍（本試験における最大条件と最小条件の比）差では、今回用いた電磁式ファインダーの検出下限以下の誘起電流しか発生しなかったことが示唆された。今後、電磁センサーの検知精度を向上させれば、こうしたベルト速度変化も検知することが期待される。

図表 160 ベルト速度変化試験結果（位相最小値）

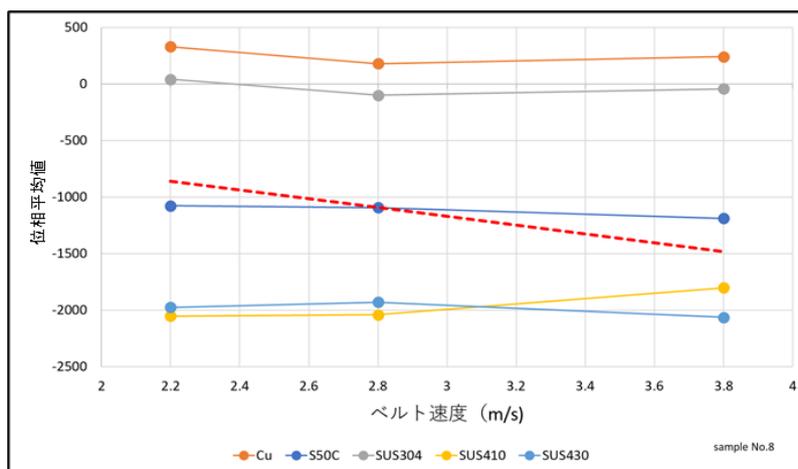


※代表例として、40 mm×40 mm×10 mm（直方体試料）における試験結果を図示。

※赤点線はベルト速度 2.8m/s を基準とした時に想定される位相最小値の変化

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 161 ベルト速度変化試験結果（位相平均値）



※代表例として、40 mm×40 mm×10 mm（直方体試料）における試験結果を図示  
 ※赤点線はベルト速度 2.8m/s を基準とした時に想定される位相最小値の変化  
 （出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

#### 4.5.1.4 色調による選別可能性の検討

電磁式ファインダーでは、可視光カメラによって観測された色彩や明度等が色調値（Color Threshold lay）として 0~1 の範囲で計測される。

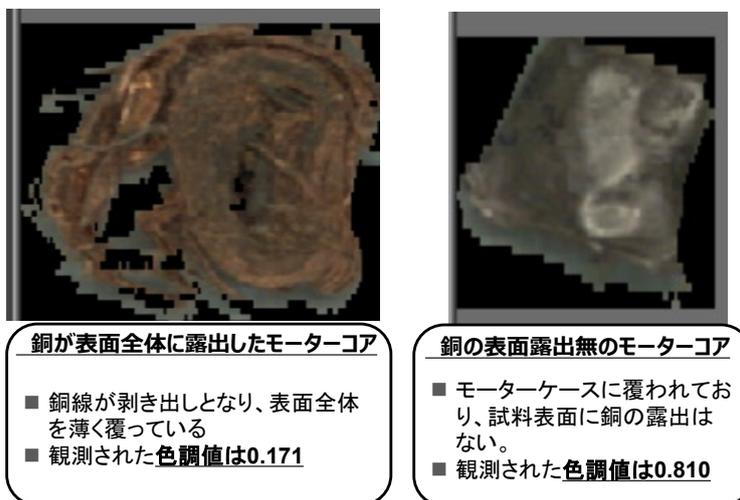
図表 161 に示す通り、モーターコアにおける銅線の露出割合の高い試料ほど、色調値が低く観測される傾向にあることが分かった。また、うまく試料を撮影できず、代わりにベルトコンベアを撮影してしまう例も確認された。その場合、ベルトコンベアの汚れを色調値として観測し、赤みがあった汚れを検知すると色調値が低く観測される傾向が確認された（図表 162）。

試料をうまく撮影することができなかった原因は、試料がベルトコンベア上を転がってしまい、可視光カメラの撮影位置からずれてしまったことによるものと考えられる。本実験で用いた電磁式ファインダーは、ベルトコンベア上を流れる試料を 3D レーザーが検知すると可視光カメラが起動して試料を撮影する仕組みとなっている。3D レーザーの検知後、試料がベルトコンベア上を転がってしまった場合、可視光カメラによる試料の撮影位置と実際の試料位置がずれてしまう。3D レーザーの検知位置と可視光カメラの撮影位置は数十cm離れている。ベルト速度を考慮すると 3D レーザーの検知位置と可視光カメラの撮影位置まで 0.2~0.3 秒程度の時間で移動していると考察される。ベルトコンベアの移動に伴う空気抵抗によって試料が転がっていると仮定すれば、このわずかな時間であっても数cm程度試料位置がずれる可能性はあると考えられる。そのため、可視光カメラで試料全体のおおよそ半分以上を捉えることができた条件のみを抽出し、各種スクラップにおいて観測された色調値を比較した。その結果を図表 163 に示す。モーターコアの色調値は 0.3~0.7 の範囲に集中し、磁着スクラップ（普通鋼、クロム系ステンレス鋼）の色調値は 0.6~0.9 の範囲に集中する傾向がみられた。両方で観測される色調値の範囲の傾向が異なることから、色調値に閾値を設定することで両者を選別することができる可能性が示唆された。

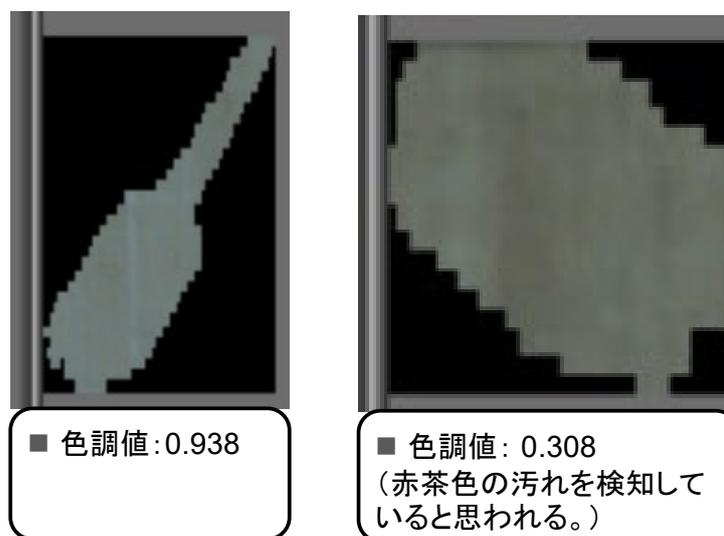
実際の操業で活用するためには、可視光カメラで試料の全体像を撮影できるような工夫が必要となる。モーターコアは丸みを帯びた形状をしているため、ベルトコンベア上を転がってしまう

事例が多く観測された。そのため、モーターコアを用いて試験した条件のうち、約半数の条件でしか可視光カメラが試料全体のおおよそ半分以上をとらえることができなかった。試料がベルトコンベア上を転がらないようにコンベア上に横棧を設ける、可視光カメラと 3D レーザーの位置を近づける等の対応が求められると考えられる。

図表 162 モーターコアにおいて観測される色調値

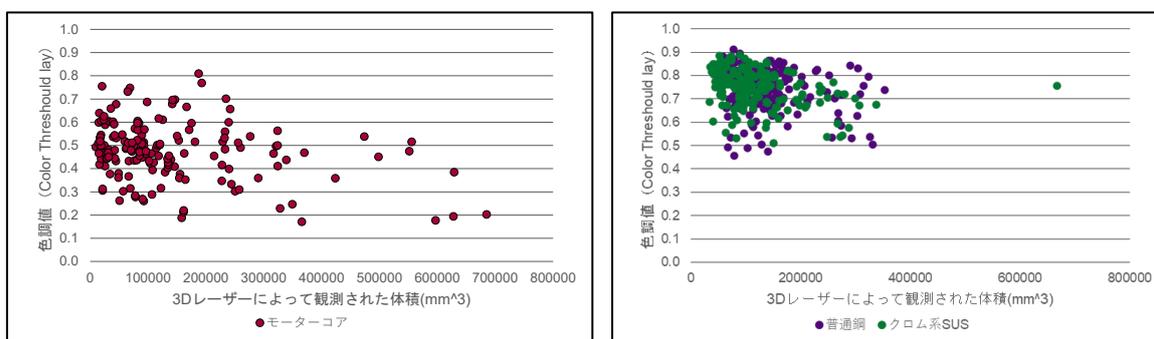


図表 163 可視光カメラで観測ができていない事例



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 164 各スクラップにおいて観測される色調値  
 (左：モーターコア、右：磁石スクラップ (普通鋼・クロム系ステンレス鋼))



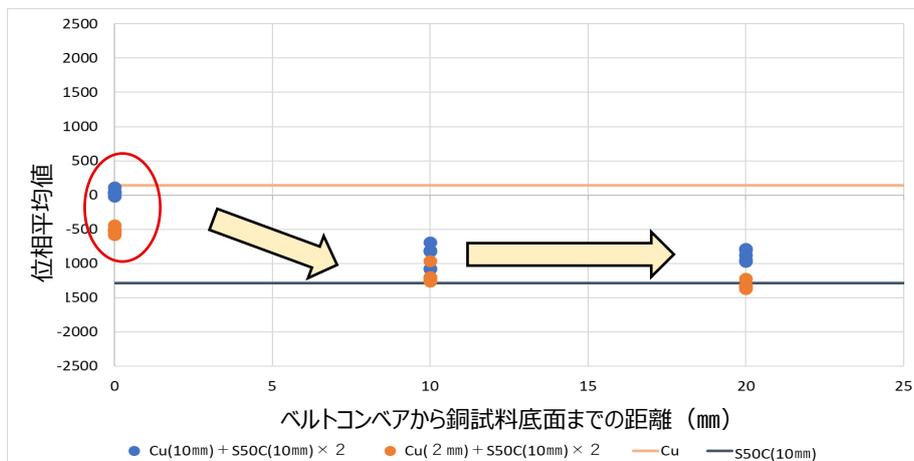
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

#### 4.5.1.5 実サンプルの形状・粒径による観測データへの影響の確認

二成分系試料を用いて、銅試料底面からの距離と、位相平均値の関係を確認した。その結果を図表 164 に示す。銅試料底面がベルトコンベアから 10mm 以上離れ、普通鋼 (S50C) だけがベルトコンベアに接する条件の場合、普通鋼 (S50C) 単体の標準試料で観測された位相平均値と近い値が観測された。つまり、仮にモーターコアのように 2 成分以上からなる試料であっても、1 成分がベルトコンベアから 10mm 以上離れていれば、その成分による電磁センサーへの影響は小さいことが示唆された。

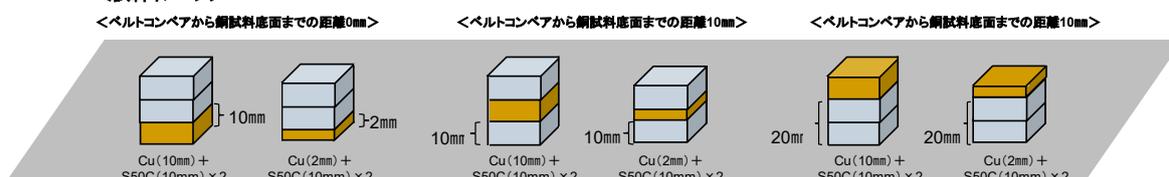
また、二成分系試料中の銅がベルトコンベアに接している条件で観測される位相平均値は、銅試料の厚さに応じて異なる傾向がみられた (図表 164 赤丸部分)。厚さ 10mm の銅試料を組み合わせで作成した 2 成分系試料の場合、銅単体の標準試料の場合とほぼ等しい位相平均値が観測された。一方、厚さ 2mm の銅試料を組み合わせで作成した 2 成分系試料の場合、それらよりも低い位相平均値が観測された。観測された位相平均値は、銅単体の標準試料において観測される位相平均値 (図表 164 中オレンジ線) と、普通鋼 (S50C) において観測される位相平均値 (図表 164 中灰色線) のおよそ中間に位置している。このことから、電磁センサーは、銅試料において発生した渦電流に限らず、銅試料の上に位置する普通鋼 (S50C) において発生した渦電流の影響も受けたと考えられる。つまり、本実証で用いた電磁センサーの検知可能領域に、異なる金属種が存在したことから、見かけの比透磁率・導電率が変化し、観測された位相平均値が変化したと考えられる。銅試料の厚みの異なる 2 種類の二成分系試料の模式図を図表 165 に示す。ベルトコンベア直下に設置されている電磁センサーは、ベルトコンベア接地面から 0~10mm に存在する金属種の影響を受けるものと推察された。

図表 165 二成分系試料（銅及び普通鋼（S50C））で観測される位相平均値

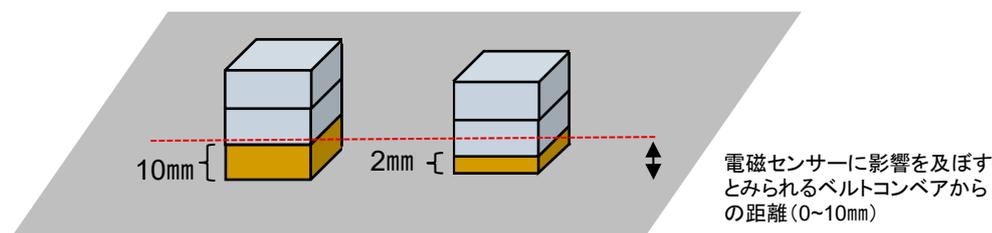


※図中の直線は、銅、普通鋼(S50C)の標準試料(単体)を測定した際の平均値を表す。

<試料イメージ>



図表 166 ベルトコンベアから銅試料底面までの距離 0mm 条件における各 2 成分系試料



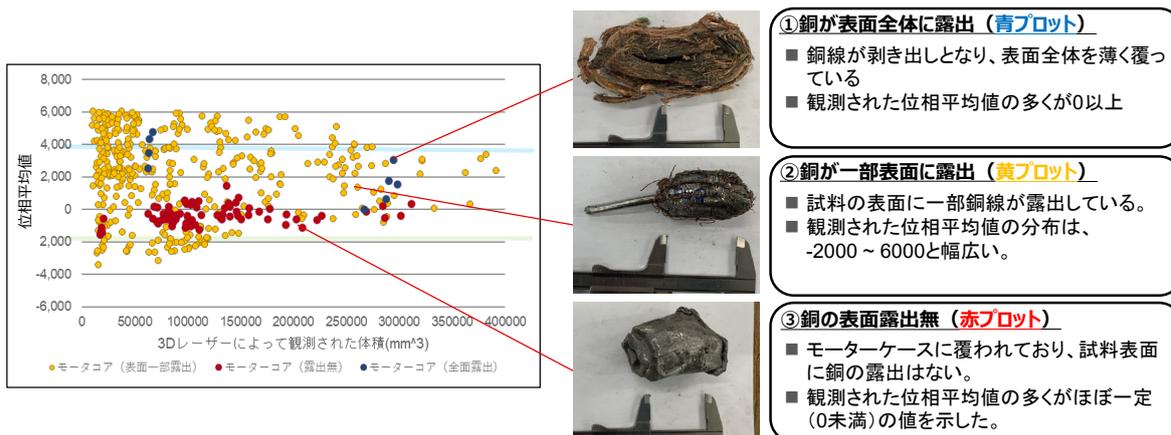
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

モーターコアにおいて観測された位相平均値の分布を図表 166 に示す。銅の露出が無いモーターコア（表面の金属が 1 種類）において観測される位相平均値は、ほぼ一定の値（0 未満）となった。一方、銅が一部表面に露出しているモーターコアの位相平均値の分布は、約  $-2000 \sim 6000$  と幅広い。予察試験の結果を踏まえると、分布にばらつきが生じる原因は、銅線の周りにある鉄部品（ローター）による影響が考えられる。銅が表面全体に露出しているモーターコアの位相平均値は 0 以上の値が観測される傾向にある（図表 166、青プロット）。また、磁着スクラップ（普通鋼）において観測される位相平均値は、0 以下の値が観測される傾向にあった（図表 167）。モーターコアの銅表面をより露出させ、ベルトコンベア底面に接するような工夫を行うことで、モーターコアにおいて観測される位相平均値を 0 以上で安定化させることが期待できる。モーターコアの観測値を安定させることができれば、位相平均値に閾値を設定することで、モーターコアと磁着スクラップ（普通鋼）を選別することが期待できる。

また、予察試験の結果から、ベルトコンベア直下に設置されている電磁センサーは、ベルトコンベア接地面から 0~10mm に存在する金属種の影響を受けるものと推察された。これは、本試験で用いた電磁センサーの検知可能領域であると考えられる。本試験で用いた電磁センサー中のコ

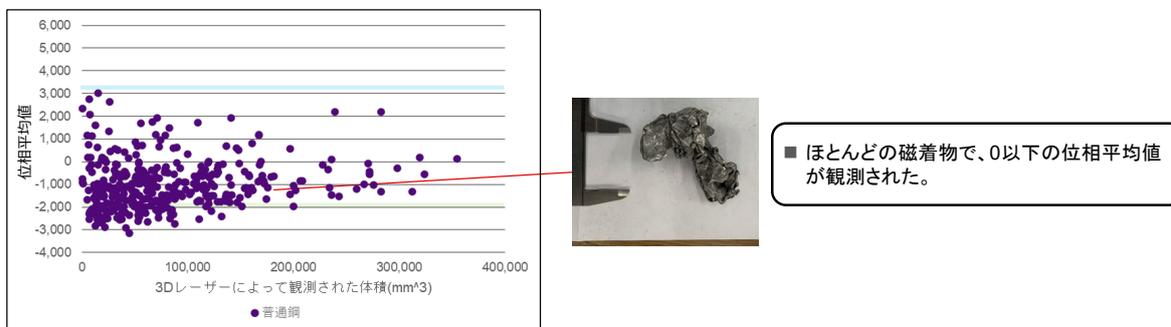
イルの直径は 12.5mm であることから、おおよそコイルの直径を半径とした半球が、ベルトコンベア上に存在する検知可能領域であると推察できる（検知可能領域が、受信コイルをドーム状に覆っている想定）。そのため、もしより大きなコイルを有する電磁センサーを活用すれば、電磁センサーの検知可能領域が拡大することから、試料表面に露出していない金属による影響を検知することが期待される。これをモーターコアの識別に適用すれば、モーターコアの表面を加工することなく、より安定した電磁センサーによる観測値を得ることができると考えられる。

図表 167 モーターコアにおいて観測される位相平均値



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 168 磁着スクラップ（普通鋼）において観測される位相平均値



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

## 4.5.2. 電磁式ファインダーにおける仕様検討

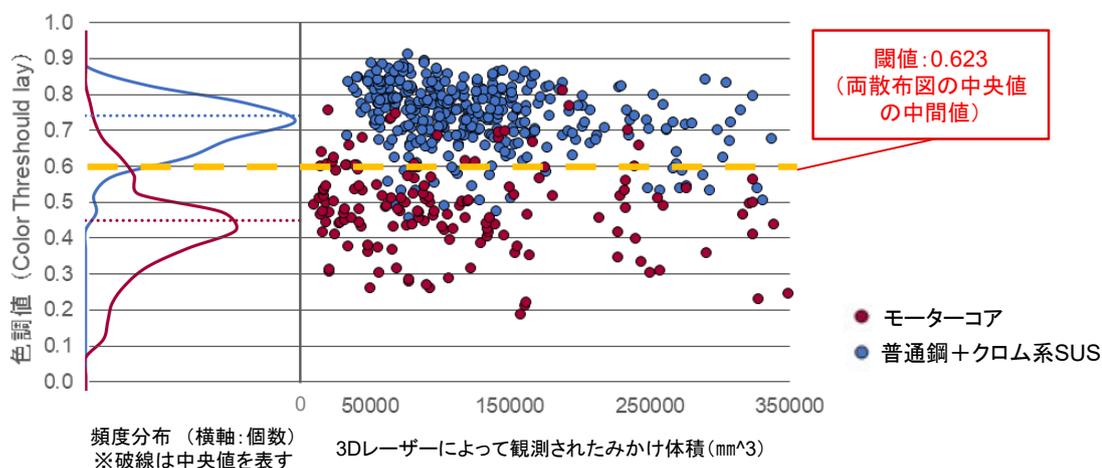
### 4.5.2.1 実サンプルを対象とした選別条件及び装置・前処理要件の特定

これまでの検討の結果、試料の色調値、位相平均値に着目することでモーターコアと磁着スクラップの選別可能性が示された。そこで、試料の色調値に着目した識別条件及び、色調値と位相平均値を組み合わせた場合における最適な識別条件をそれぞれ検討した。図表 168 にモーターコア及び磁着スクラップにおいて観測された色調値の分布を示す。図表 168 の頻度分布中の破線で示す通り、モーターコアにおいて観測された色調値の中央値は0.478、磁着スクラップ（普通鋼＋クロム系ステンレス鋼）では0.759である。そこで、両中央値の中間値を識別条件として設定（図表 169）し、両者の分配率を比較した。

色調値に着目した場合のモーターコア及び磁着スクラップ（普通鋼＋クロム系ステンレス鋼）の分配率を図表 170 に示す。色調値に着目して選別することで、個数ベースで約90%のモーターコアを取り除きながら、約98%の磁着スクラップを回収することのできる産物を得ることができた。

（分離効率<sup>46</sup>：88%）。さらに、図表 171 に示す通り、磁着スクラップの試料表面が光沢をもつ場合、色調値が低く観測される傾向にあり、モーターコア濃縮産物として誤認される場合があった。また、仮に銅が一部露出したモーターコアであっても、色調値が高く観測される試料も一部存在した。本装置で観測される色調値は、対象とする試料の色彩や明度を機械学習させ、設定した0~1の規格値が出力される。選別精度向上のためには、さらにモーターコアの色彩や明度を機械学習させ、出力される色調値の精度を向上させることが求められる。

図表 169 モーターコア及び磁着スクラップ（普通鋼＋クロム系ステンレス鋼）を選別する色調値の閾値



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

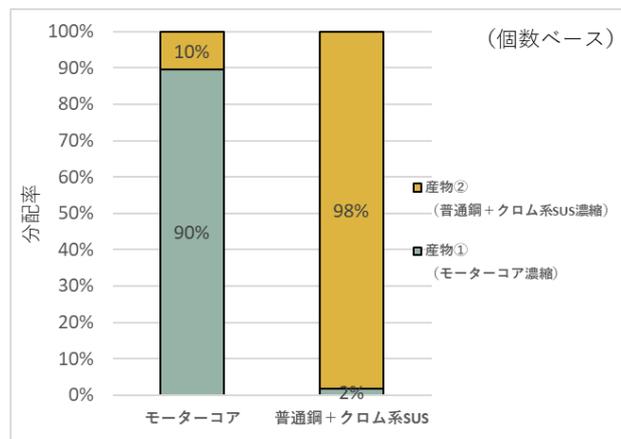
<sup>46</sup> 分離効率：目的成分の実収率・目的外成分の混入率

図表 170 色調値に着目した識別条件

	識別条件
	色調値
産物①（モーターコア濃縮）	0.623 未満
産物②（磁着スクラップ濃縮）	0.623 以上

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 171 色調値に着目した場合のモーターコア及び磁着スクラップ（普通鋼+クロム系ステンレス鋼）の分配率



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 172 産物①（モーターコア濃縮）に分配された磁着スクラップ（写真左）と、産物②（磁着スクラップ）に分配されたモーターコア（写真右）



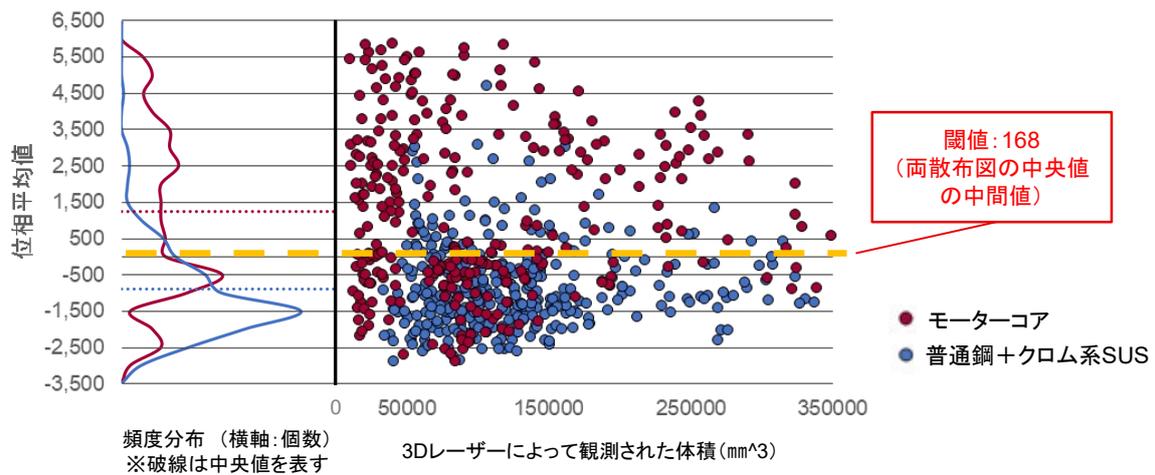
※可視光カメラによる観測写真

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 172 にモーターコア及び磁着スクラップにおいて観測された位相平均値の分布を示す。図表 172 に示す頻度分布の通り、モーターコアにおける位相平均値は - 500 付近で観測される条件が多かったが、中央値は 1237.966 であった。一方、磁着スクラップ（普通鋼+クロム系ステンレス鋼）における位相平均値は - 1500 付近で観測される条件が多く、- 902.251 が中央値となっている。

モーターコアの回収率をさらに向上させる条件を検討するべく、色調値と位相平均値を組み合わせた場合における識別条件を設定した(図表 173)。色調値に着目した識別条件に加えて、各試料で観測された位相平均値の中央値の中間値を識別条件として追加し、両試料の分配率を比較した。比較結果を図表 174 に示す。図表 173 に示す識別条件を適用すれば、磁着スクラップの回収率は下がるものの、約 95%のモーターコアを取り除いた産物を得ることができていることが分かった。

図表 173 モーターコア及び磁着スクラップ(普通鋼+クロム系ステンレス鋼)を選別する位相平均値の閾値



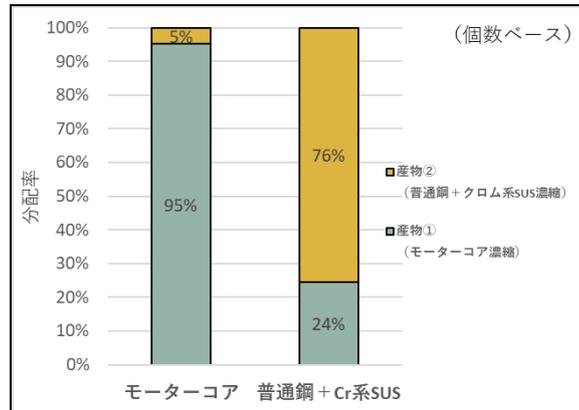
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 174 色調値及び位相平均値に着目した識別条件

	識別条件	
	色調値	位相平均値
産物① (モーターコア濃縮)	0.619 未満	-
	0.619 以上	168 以上
産物② (磁着スクラップ濃縮)	0.619 以上	168 未満

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

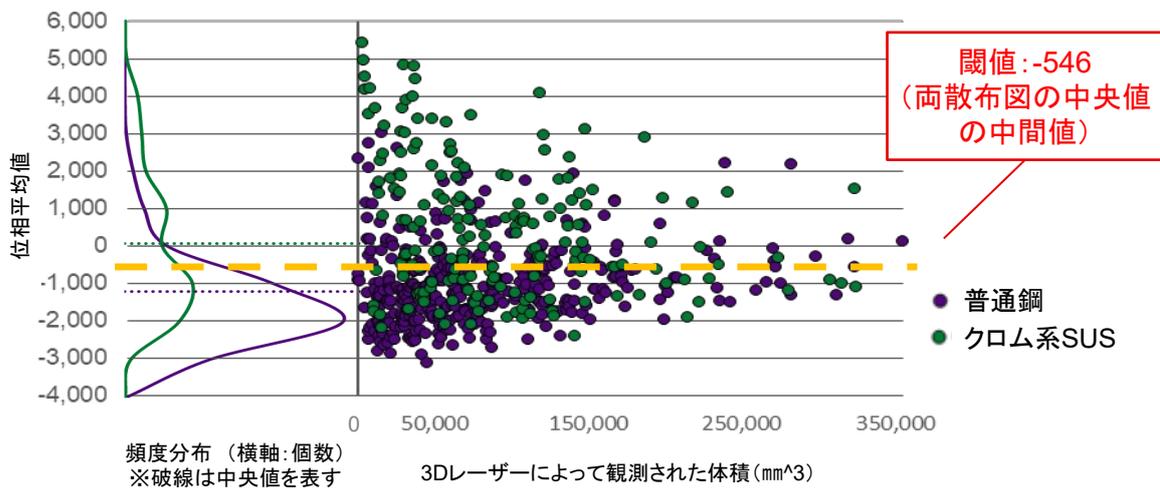
図表 175 色調値及び位相平均値に着目した場合の  
モーターコア及び磁着スクラップ（普通鋼＋クロム系ステンレス鋼）の分配率



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

次に、位相平均値に着目し、普通鋼とクロム系ステンレス鋼の選別条件を検討した。普通鋼とクロム系ステンレス鋼における位相平均値の分布を図表 175 に示す。図表 175 の頻度分布において破線で示す通り、普通鋼で観測された位相平均値の中央値は-1183.565、クロム系ステンレス鋼で観測された中央値は 88.991 であった。そこで、両中央値の中間値を識別条件として設定（図表 176）し、両者の分配率を比較した。比較結果を図表 177 に示す。図表 176 に示す識別条件を適用すれば、約 74%の普通鋼を回収しながら、63%のクロム系ステンレス鋼を取り除いた産物を得ることができていることが分かった（分離効率：37%）。

図表 176 磁着スクラップ（普通鋼）と  
磁着スクラップ（クロム系ステンレス鋼）の位相平均値



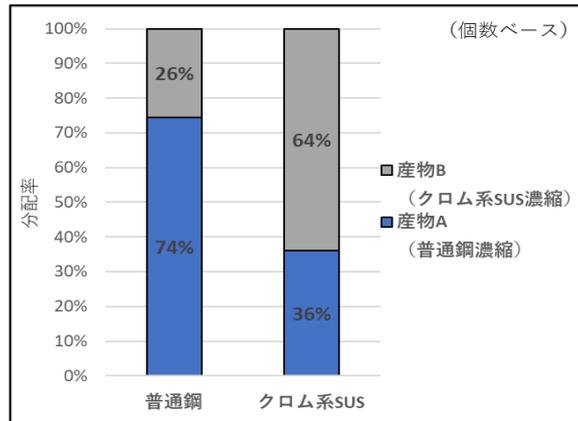
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 177 位相平均値に着目した識別条件

	識別条件
	位相平均値
産物 A (普通鋼濃縮)	- 546 未満
産物 B (クロム系ステンレス鋼濃縮)	- 546 以上

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 178 位相平均値に着目した場合の磁着スクラップ (普通鋼) と磁着スクラップ (クロム系ステンレス鋼) の回収率

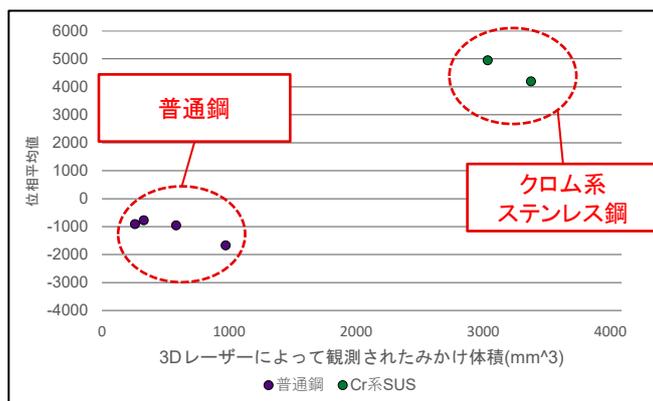


(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

両者の分離効率が低い原因は、観測された位相平均値のばらつきである。位相平均値がばらつく要因は、4.5.1.1 で検討した通り、試料半径、試料の比透磁率や導電率、試料と電磁センサーとの距離等が考えられる。ただし、理論式は試料の材質が均一かつ球状であるという前提のもと構築されている。4.5.1.5 で得られた結果から、電磁センサーの検知可能領域は、ベルトコンベア接地面から数 mm~10mm と推察された。今後、位相平均値のばらつきを抑制し、普通鋼とクロム系ステンレス鋼の分離効率を向上させるためには、みかけの比透磁率、導電率を安定させ、かつ実際の比透磁率、導電率に近づけることが望ましい。

今回用いた電磁式センサーの検知可能領域とみられる体積 (4,091mm<sup>3</sup>) よりも小さな見かけ体積を有する試料の位相平均値の分布を図表 178 に示す。本試験で用いたほとんどの試料の見かけ体積は検知可能領域よりも大きかったため、分布している試料の数は一部である。しかし、普通鋼では位相平均値 0 以下、クロム系ステンレス鋼では位相平均値 4000~5000 程度に分布する傾向が確認できた。これは、試料の見かけの比透磁率・導電率の違いのみで識別できる可能性を示唆している。今後は、これら検知可能領域以下の体積を持つ試料でこの識別可能性を検証していくことが望まれる。

図表 179 検知可能領域内における磁着スクラップ（普通鋼）と磁着スクラップ（クロム系ステンレス鋼）の位相平均値の分布



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

その実現に向けて装置条件を見直す場合、電磁センサーに用いるコイルの直径を大きくする等の対応が考えられる。コイルが大きくなることで、電磁センサーの検知領域が拡大し、検知領域に占める空気（試料とベルトコンベアの隙間、試料中の空隙）による影響が相対的に小さくなると考えられる。ただし、その場合試料の粒径も適切に管理しなければ、試料周囲にある空気の影響を受けてしまう恐れがある。試料に対する前処理を見直す場合、試料とベルトコンベアの接地面積を増やすためのプレス処理等の対応が考えられる。これも同様に適切な試料の厚さなどを考慮の上、前処理を行う必要があると考えられる。

これまでの検討の結果を図表 179 各選別方法における高度な選別の実現に向けた要求仕様にまとめた。また、各要求仕様を阻害する要因と要因発生抑制のための改善策も図表 180 に整理した。

図表 180 各選別方法における高度な選別の実現に向けた要求仕様

選別方法 (活用するセンサー)	選別対象	高度な選別の実現に向けた要求仕様	装置に関する要求仕様
色調値に着目した選別 (可視光カメラ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ モーターコア</li> <li>■ 磁着スクラップ (普通鋼、クロム系ステンレス鋼)</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 可視光カメラによる撮影時に、試料の約半分が撮影領域に存在すること</li> <li>② モーターコア表面の銅が十分に露出していること</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 400~760nm の可視光波長を観測できるカメラ</li> <li>■ 2.7~3.6m/s の範囲で速度可変なベルトコンベア</li> <li>■ 試料検知システム (3D レーザー等)</li> </ul>
位相値に着目した選別 (電磁センサー)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 磁着スクラップ (普通鋼)</li> <li>■ 磁着スクラップ (クロム系ステンレス鋼)</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>③ 電磁センサーの検知領域の全域を試料体積で占めること</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 電磁センサー (コイル直径 12.5 mm 以上)</li> <li>■ 試料検知システム (3D レーザー等)</li> </ul>

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 181 各要求仕様を阻害する要因と要因発生抑制のための改善策

要求仕様を阻害する要因		阻害要因の発生を抑制する改善策
Tier1	Tier2	
■ 空気抵抗による試料の転がり	■ 過大に設定されたベルト速度	■ 適切なベルト速度の設定
	■ 試料の高さ (空気抵抗を受ける面積)	■ ふるい分けなどによる粒度調整
	■ 試料形状(球・楕円体等)	■ プレスなどによる試料形状の改善(ベルトコンベアとの接地面を増やすような加工) ■ 仕切り等によるベルトコンベア上における試料の自由度移動領域の抑制
■ 銅表面の露出不足	■ 電磁センサーの検知可能領域の不足	■ より大きな検知可能領域を有する電磁センサーの活用
■ 試料とベルトコンベアの隙間	■ 試料形状(不定形)	■ プレスなどによる試料形状の改善(ベルトコンベアとの接地面を増やすような加工)
■ 試料中の空隙	■ 試料形状(不定形)	■ プレスなどによる試料形状の改善(ベルトコンベアとの接地面を増やすような加工)
■ 試料体積よりも大きい検知領域	■ 試料よりも大きい電磁センサーコイル	■ 選別対象の粒径を考慮した電磁センサーコイルの選定

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

#### 4.5.2.2 試作機の仕様具体化及び開発費用の検討

これまでの結果から、各選別における要求仕様は図表 181 のように整理された。

これらの部品を組み合わせ、試作機を開発する場合、その費用はベルトコンベアのベルト幅にも左右される。例えばベルト幅 600mm のものを想定すると、直径 12.5mm 幅のセンサーを 48 個敷き詰める必要がある。電磁センサー1 個当たりを 5 万円と見積もれば、小計 240 万円ほどの費用が見込まれる。また、エアバルブで 400~500 万円程度、それらを制御する電気制御システムにも数 10 万円程度の費用が見込まれる。その他の主要部品の費用も考慮すれば、開発費用は最低でも 1500 万円程度と見込まれる。

図表 182 試作機において必要となる主要部品とその要求仕様

必要となる主要部品	要求仕様
電磁センサー	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 位相値（もしくはそれに準じるデータ）を観測できること</li> <li>■ 分析対象における最小粒径以下のセンサーコイルを有するもの</li> </ul>
可視光カメラ	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 色調値（もしくはそれに準じるデータ）を観測できること</li> </ul>
ソーティングシステム	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 電磁センサー及び可視光カメラで得られた観測データを PC 等に出力できること</li> </ul>
ベルトコンベア	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 電磁センサーを必要数敷き詰めることができるだけのベルト幅を有するもの</li> <li>■ ベルト速度が可変であるもの</li> </ul>
エアバルブ	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ノズルピッチがセンサーコイルの直径と等しいもしくはその 1/2 の大きさのもの</li> </ul>

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 4.5.3. LIBS ソーターにおける選別条件の検討

#### 4.5.3.1 鉄・クロムの含有率と発光強度比の関係を示す検量線の直線性改善

鉄・クロムの含有率と、LIBS ソーターで観測される鉄・クロムのピーク強度比の関係性を示す検量線の直線性を改善するべく、標準試料を用いて最適なピーク波長を検討した。検討の結果、鉄では Fe I 366.974 nm、クロムでは Cr II 286.573 nm における発光強度を用いて検量線を作成することとした。特に鉄では、強度の高いイオン発光線<sup>47</sup>で自己吸収の影響が大きく検量線の直線性が低い傾向にあったため、強度の低い原子発光線<sup>48</sup>を採用した。

昨年度採用した鉄・クロムピーク強度比における検量線と今年度採用した鉄・クロムピーク強度比における検量線を図表 182 に示す。図表 182 に示す通り、昨年度と比べて直線性と感度（グラフ上の傾き）がともに改善されている。なお、この検討の過程において、スペクトル発光の際のエネルギー下位準位の高いものほど、自己吸収の度合い<sup>49</sup>が小さくなることを見出した（図表 183）。自己吸収とは、プラズマ内で発生した原子・イオン発光が同プラズマ内に存在する同種の基底・励起状態にある原子・イオンによって吸収され、再励起が起こる現象である。高いエネルギー準位に遷移する電子の数密度は低いエネルギー準位でのそれに比べて低い（Boltzmann 分布に従う）ため、こうした傾向が確認できたと考えられる。

今年度作成した検量線をもとに実試料を選別した結果を図表 184 に示す。図表 184 の左図は、LIBS ハンドヘルドで測定したクロム/鉄濃度比と LIBS ソーターで得られたクロム/鉄ピーク強度比の関係を示す。クロム/鉄ピーク強度比に閾値を設定することで、普通鋼とクロム系ステンレス鋼をほぼ完全に相互分離させることができることが分かった。図表 184 の右図が示す通り、分離効率は、クロム/鉄ピーク強度比閾値の範囲においておおよそ 97% を示しており、良好な相互分離を行えることが分かる。ただし、一部の試料では、その形状（線状・リング状等）、表面の塗装・メッキ等により LIBS ソーターの検知システムで正確な検知ができなかった。それらは、引き続きの課題である。

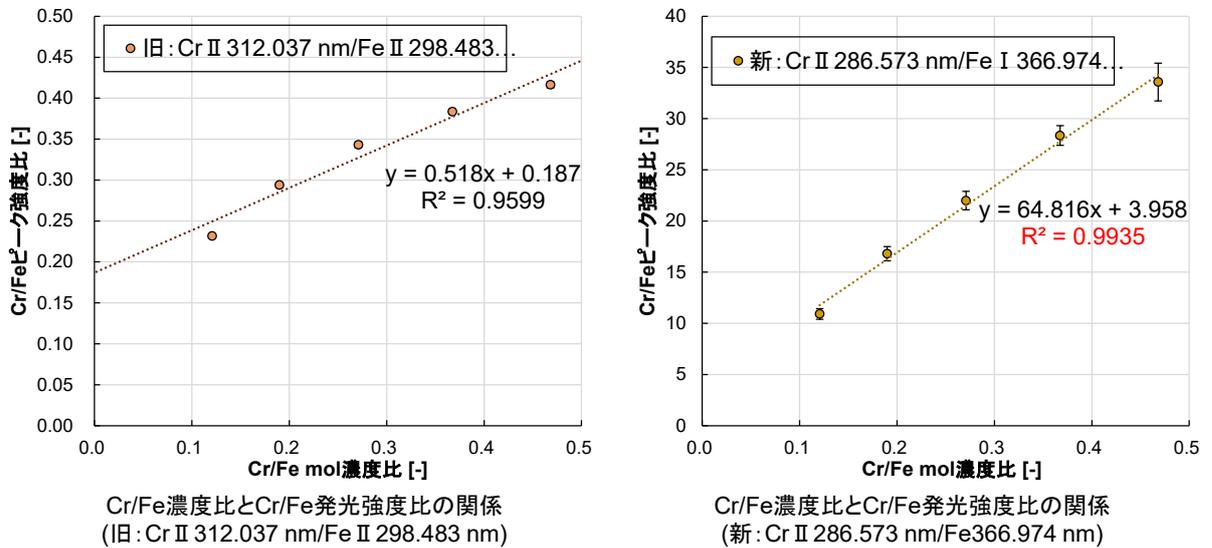
---

<sup>47</sup> 励起状態にあるイオンが脱励起した際に生じる光の波長

<sup>48</sup> 励起状態にある原子が脱励起した際に生じる光の波長

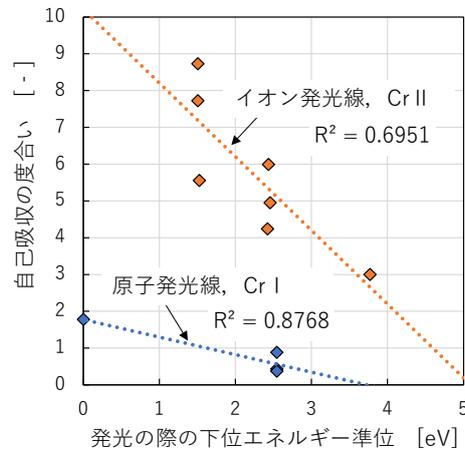
<sup>49</sup> ここでは、あるピーク波長で観測された発光強度と元素濃度の関係を二次関数近似した際に得られる二次項の係数を自己吸収の度合いとした。

図表 183 昨年度採用のクロム/鉄ピーク強度比における検量線と今年度採用のクロム/鉄発光強度比における検量線の比較



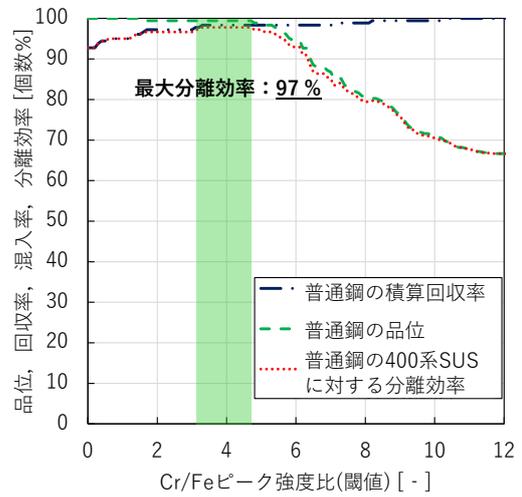
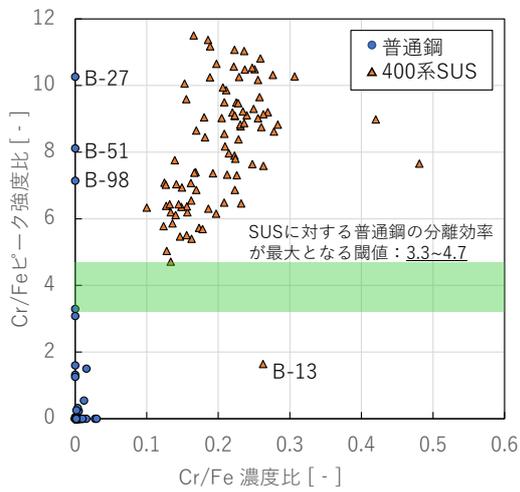
(出所) 早稲田大学大和田研究室作成

図表 184 自己吸収の度合いと発光の際の下位エネルギー準位の関係



(出所) 早稲田大学大和田研究室作成

図表 185 LIBS ソーターによる磁着スクラップ中の普通鋼と  
 クロム系ステンレス鋼の分離状況  
 (ベルト速度 : 1m/s, Cr II 286.573 nm 及び Fe I 366.895 nm)



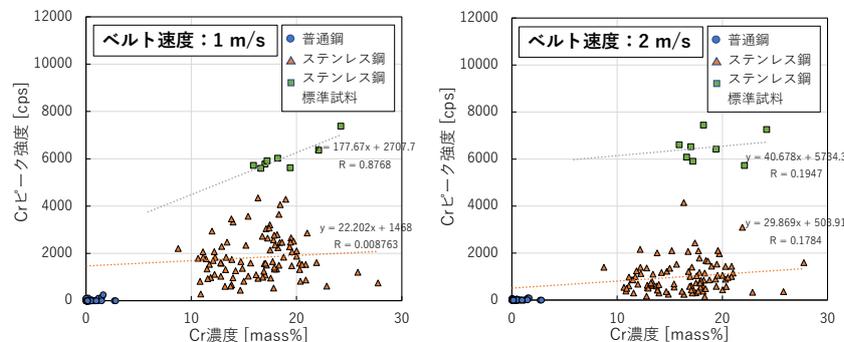
(出所) 早稲田大学大和田研究室作成

#### 4.5.3.2 ベルト速度向上に伴う選別精度低下要因と影響を軽減する前処理・装置条件の特定

各種ステンレス鋼のクロムピーク強度と、試料中のクロム濃度の関係を、ベルト速度別に図表 185 に示す。普通鋼ではクロムピーク強度はほとんど確認されず、ステンレス鋼では明瞭に検出された。ベルト速度を 1m/s から 2 m/s に増加させると、標準試料で観測される発光強度のばらつきが大きくなり、実試料で観測される発光強度も大幅に低下することが分かる。クロムピーク強度に閾値を設定した場合に得られる、普通鋼に対するクロム系ステンレス鋼の分離効率を図表 186 に示す。ベルト速度 2 m/s では 1 m/s に比べて、分離効率が 90 %以上となるクロムピーク強度の閾値範囲が狭くなることが分かる。また、その範囲を外れると分離効率が急激に低下する傾向も認められた。

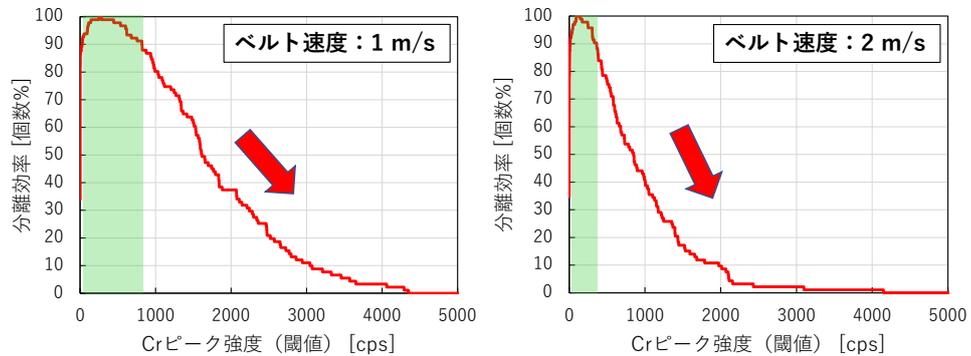
観測された各種ステンレス鋼のクロム/鉄ピーク強度比と、試料中のクロム/鉄濃度比の関係をベルト速度別に図表 187 に示す。ステンレス鋼標準試料と同実試料を比較すると、クロム/鉄ピーク強度比はほぼ同様の値を示している。また、クロムピーク強度を採用して検量線を作成した場合に比べて、実試料の不規則なバルク形状や表面状態の影響が緩和されたこと、ピーク強度比と濃度比の相関性（検量線としての直線性）が高まったことが分かる。クロム/鉄ピーク強度比に閾値を設定した場合に得られる、普通鋼に対するクロム系ステンレス鋼の分離効率を図表 188 に示す。クロム/鉄ピーク強度比で検量線を作成すると、クロムピーク強度の場合に比べて、普通鋼のステンレス鋼に対する分離効率が大きく向上することが分かった。また、ベルト速度を変化させると同分離効率が 90 %以上となるクロム/鉄ピーク強度比閾値範囲も大きくなることが分かった。

図表 186 異なるベルト速度における普通鋼・ステンレス鋼で観測されたクロムピーク強度  
(選択波長：Cr II 286.573 nm)



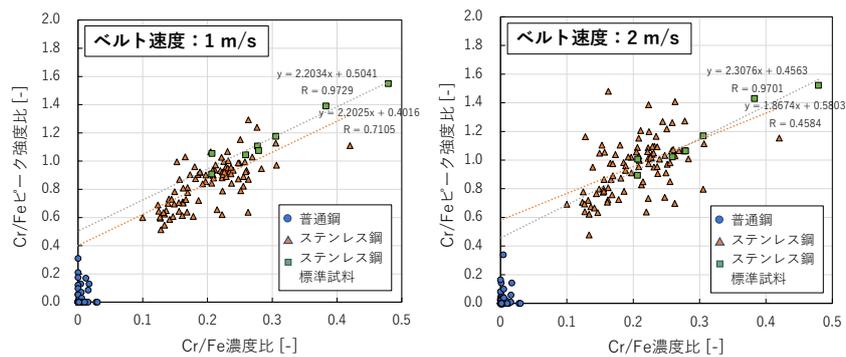
(出所) 早稲田大学大和田研究室作成

図表 187 異なるベルト速度における普通鋼のステンレス鋼に対する分離効率  
(選択波長：Cr II 286.573 nm)



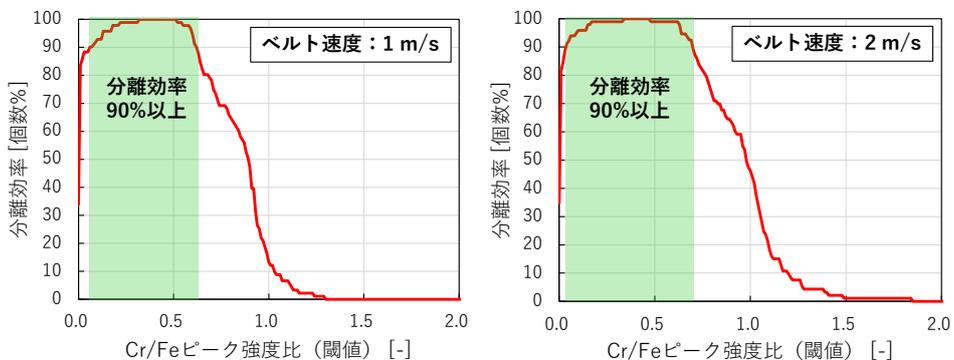
(出所) 早稲田大学大和田研究室作成

図表 188 異なるベルト速度における普通鋼・ステンレス鋼で  
観測されたクロム/鉄ピーク強度比  
(選択波長：Cr II 286.573 nm 及び Fe I 366.974 nm)



(出所) 早稲田大学大和田研究室作成

図表 189 異なるベルト速度における普通鋼のステンレス鋼に対する分離効率  
(選択波長：Cr II 286.573 nm 及び Fe I 366.974 nm)



(出所) 早稲田大学大和田研究室作成

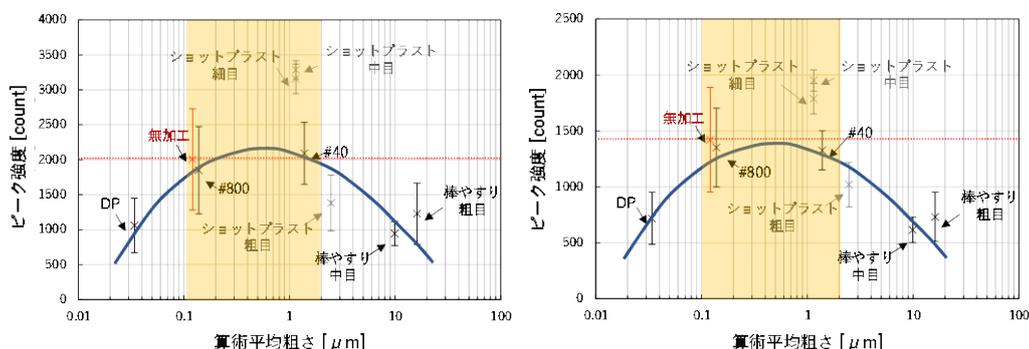
#### 4.5.3.3 表面状態や形状による選別精度への影響を低減する前処理・選別条件の特定

表面粗度の異なる各種試料のクロムと鉄のピーク強度と表面粗度（算術平均粗さ）の関係を図表 189 に示す。なお、図に示す近似曲線は、ショットブラスト処理を行った試料で観測されたデータを取り除いたものである（ショットブラスト処理を行った試料は、他の試料と比べてくすんだ変色が起きており、物理的な表面構造変化以外の変化が起きているためと考えられたため）。

図表 189 では、クロム・鉄いずれも、算術平均粗さ 0.1~2.0  $\mu\text{m}$  程度の表面でピーク強度が最大を示している。この範囲が、金属試料における LIBS の最適表面粗度範囲と考えられる。ピーク強度と表面粗度の関係は、実試料においても同様の傾向であったことから、こうした微小な表面の凹凸が LIBS で観測される発光強度に影響を与えることが分かった。

図表 190 に、本試験で使用した試料のクロム/鉄ピーク強度比と表面粗度の関係を示す。クロム・鉄それぞれのピーク強度と表面粗度の関係と異なり、クロム/鉄ピーク強度比はショットブラストを含むすべての試料においてほぼ一定値を示し、表面粗度による影響が小さいことが示唆された。このことから、ピーク強度比をもとに検量線を作成することで、試料表面粗度の影響を低減できることが分かった。照射するレーザーエネルギーの僅かな変動や各種試料状態の影響を低減させるために検知対象各元素のピーク強度比を使用することは従来行われてきたが、試料の表面粗度の影響も低減できることが本実証で明らかとなった。

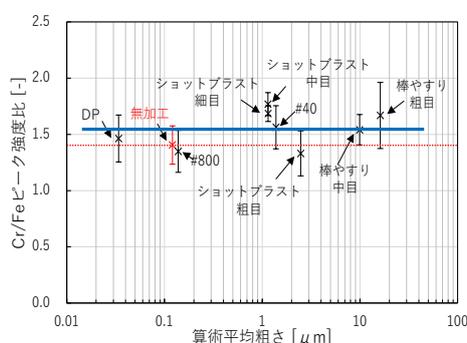
図表 190 ステンレス標準試料における発光強度と表面算術平均粗さの関係  
(選択波長：Cr II 286.573 nm (左図)、Fe II 244.524 nm (右図))



(出所) 早稲田大学大和田研究室作成

図表 191 ステンレス標準試料における Cr/Fe ピーク強度比と表面算術平均粗さの関係

(選択波長：Cr II 286.573 nm 及び Fe II 244.524 nm)



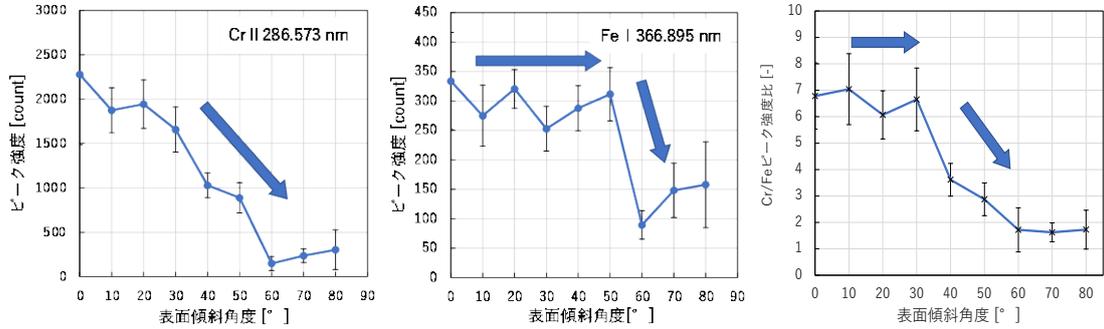
(出所) 早稲田大学大和田研究室作成

水平に置かれた平滑試料表面の傾斜角度を変えてレーザー照射した際に得られる各クロム・鉄ピーク強度を図表 191 に示す。クロムのイオン発光線 (Cr II 286.573 nm) におけるピーク強度 (図左) は、傾斜角度が大きくなるに従って漸次低下してゆき、鉄の原子線 (Fe I 366.895 nm) におけるピーク強度 (図中央) は傾斜角度 50° 付近まではほぼ一定を保つがそれ以上では急激に低下する傾向が認められた。クロム/鉄ピーク強度比 (図右) は、クロム・鉄それぞれのピーク強度比の変化から推定されるように、傾斜角度が大きくなるに従って漸次低下する傾向がみられた。

観測されたピーク強度から推計されるプラズマ温度 (計算値) と試料表面傾斜角度との関係を図表 192 に示す。傾斜角度の増大とともにプラズマ温度の低下傾向が認められた。図表 191 と比較すると、クロムのピーク強度はプラズマ温度とほぼ同様の傾向を示していることが分かる。ただし、鉄のピーク強度において傾斜角度 50° 付近まで一定値を保つことの原因特定は引き続きの課題となった。プラズマ内の鉄中性原子の存在割合が傾斜角度とともに漸増することに関係すると思われるが、50° 付近での急激な減少傾向の原因は不明である。LIBS 分析におけるピーク強度と試料表面傾斜の関係は、従来多くの研究がなされてきた。過去の研究でも本事業で得られたクロムのピーク強度の挙動と同様の傾向が得られているが、その原因について言及されたものは少ない。早稲田大学の過去の成果では、表面傾斜の増大によって、レーザーの照射面積が増えその分だけエネルギー密度が低下すること、形成されるプラズマが一つの塊でなく二方向に分岐すること等が示されている<sup>50)</sup>。

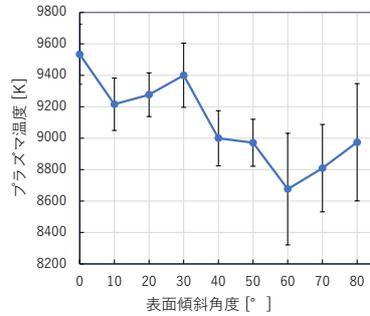
<sup>50) 1)</sup> S. Owada, T. Hatano, R. Togawa, K. Wagatsuma, S. Kashiwakura, and T. Nakamura: Influence of Various Parameters in LIBS for the Application to Sorting, Sensor Based Sorting & Control 2016, Aachen, pp. 1-10, 2016

図表 192 クロムピーク強度 (左)、鉄ピーク強度 (中央)、クロム/鉄ピーク強度比 (右) と  
試料表面傾斜角度との関係



(出所) 早稲田大学大和田研究室作成

図表 193 形成されるプラズマの温度と試料表面傾斜角度との関係



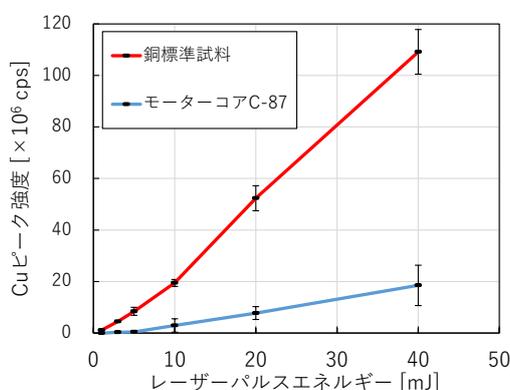
(出所) 早稲田大学大和田研究室作成

#### 4.5.3.4 モーターコアの識別条件の検討

図表 193 に、レーザーパルスエネルギーと銅のピーク強度の関係を示す。レーザーパルスエネルギーが 1 mJ の場合、銅標準試料では銅のピーク強度がほとんど検知されず、モーターコアでは銅のピーク強度が全く検知されなかった。レーザーパルスエネルギーがおおよそ 10mJ 以上になると、銅標準試料・モーターコアいずれの場合でも、銅のピーク強度がレーザーパルスエネルギーに対してほぼ比例的に増加する傾向が確認された。ただし、その増加率は前者で  $2.3 \times 10^6$  cps/mJ、後者で  $0.4 \times 10^6$  cps/mJ と大きく異なる。これは、試料の表面が大きく影響したと考えられる。標準試料表面は平滑であるのに対し、モーターコア中の銅線は複雑に絡み合っている。銅線の凹凸が、プラズマの生成を妨げたと考えられる。以上より、モーターコアの銅線の凹凸の影響を無視するためには、少なくとも 10mJ 以上のレーザーパルスエネルギーが必要であることが分かった。

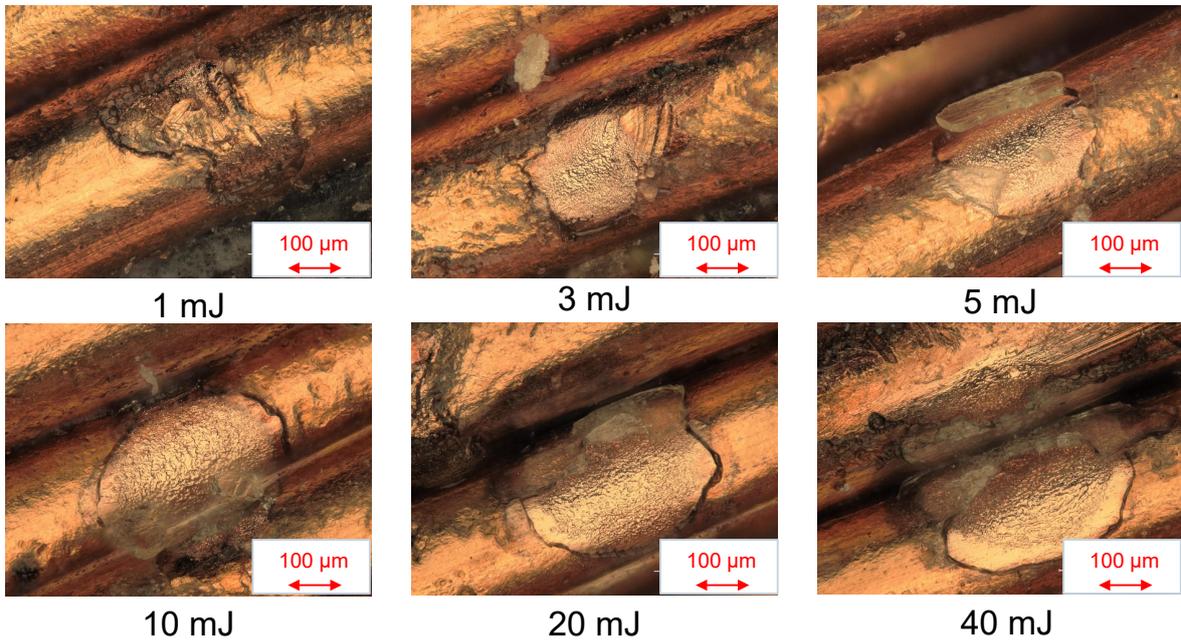
より詳細な考察を行うべく、異なるレーザーパルスエネルギーでモーターコアにレーザーを照射し、得られたレーザー痕を顕微鏡で観察した。その観察像を図表 194 に示す。銅のピーク波長を検知することのできなかつた 1 mJ におけるレーザー痕は単に銅線の一部がアブレイズ（蒸発除去）されたことが確認できる。一方、3 mJ 以上のレーザー痕には、銅が一度アブレイズされて蒸発し、その後銅線上に再凝縮した痕跡（白い凝縮相）が認められる。また、レーザーパルスエネルギーの増大とともにその領域が広がっていることも確認できる。LIBS におけるピーク検知とこのようなアブレイズ現象との関係に関する考察も今後深めるべき課題として認識された。

図表 194 銅標準試料・モーターコアにおける  
銅のピーク強度とレーザーパルスエネルギーの関係



(出所) 早稲田大学大和田研究室作成

図表 195 異なるパルスエネルギーで照射されたモーターコア銅線上のレーザー痕



(出所) 早稲田大学大和田研究室作成

## 4.6. 事業における環境影響改善効果・CO<sub>2</sub>排出量削減効果の評価

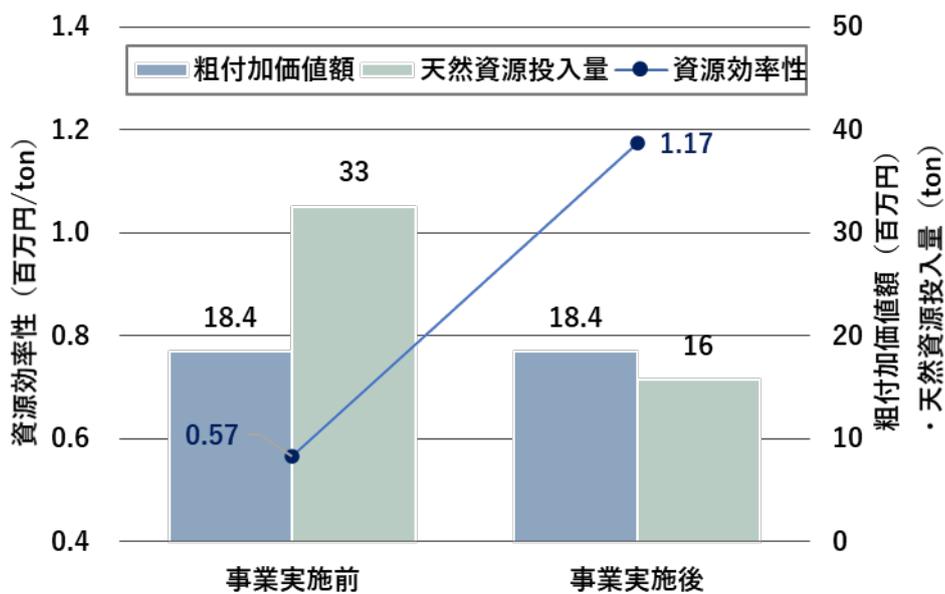
### 4.6.1. 資源効率性向上効果の検討

推計対象（自動販売機、自動車）における粗付加価値額の合計、天然資源投入量の合計と、それらから算出された資源効率性を図表 195 に示す。事業実施前後で天然資源投入量が減少し、粗付加価値額が増加すると推計され、資源効率性が約 2 倍向上すると推計された。

また、各推計対象における資源効率性を図表 196、図表 197 に示す。自動車の場合、事業実施前に回収されると想定した二次原料（鉄原料）の品質が第 2 等級規格を満たしていなかったことから、天然資源由来の原料による希釈が行われると仮定した。また、本推計では事業実施後に回収されると想定した二次原料（鉄原料）の品質が改善されると推計されたため、天然資源由来の原料による希釈は行われないと仮定した。結果、本事業実施前後で、天然資源投入量が大幅に削減され、資源効率性が向上すると推計された。一方、自動販売機の場合、事業実施前に回収される二次原料の品質が第 2 等級規格を満たしていると推計されたため、天然資源由来の原料による希釈は行われないと仮定した。ただし、天然資源投入量は自動車と自動販売機で大きく変わらない結果となっている。これは、自動車と比べて自動販売機の方が機能単位あたりの銅回収量が多いと推計されたためである。本推計では、天然資源投入量を TMR で評価している。銅の TMR 係数（金属 1t 当たりの TMR）は、鉄のそれと比べて約 58 倍大きい。そのため、銅の回収量の差が天然資源投入量に大きく影響したと考えられる。

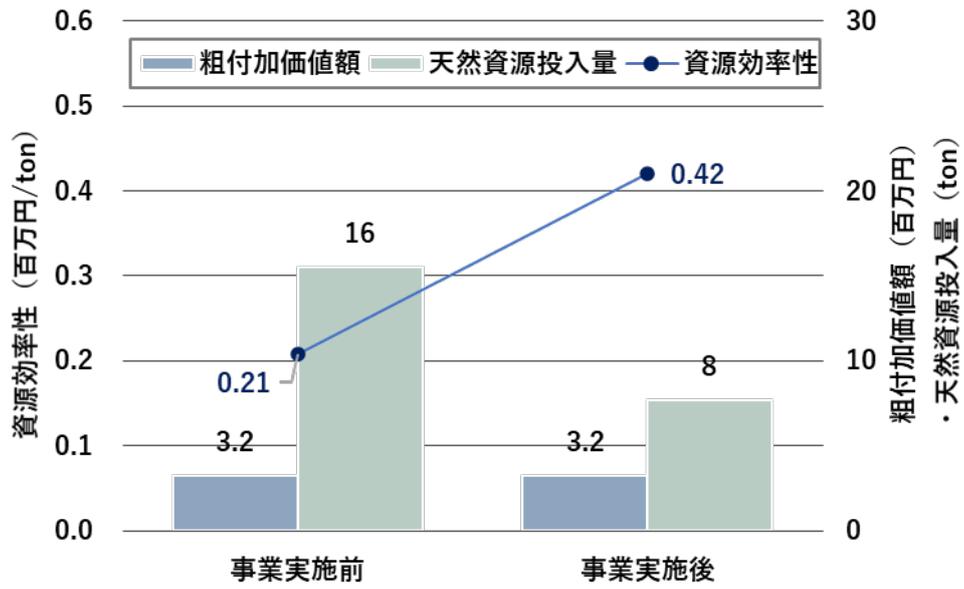
また、本推計において、自動販売機は製造後、無料で設置され、販売される飲料によって収益を得るモデルを想定した。飲料の販売による粗付加価値額は考慮していないため、自動車と比べて粗付加価値額が低い結果となっている。

図表 196 推計対象（自動販売機、自動車）における資源効率性



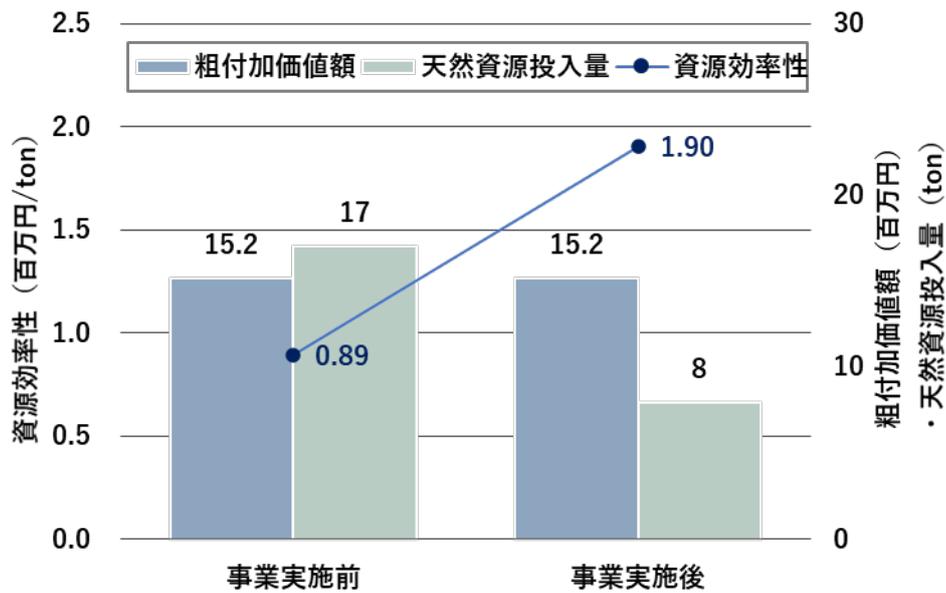
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 197 自動販売機における資源効率性



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 198 自動車における資源効率性向上効果



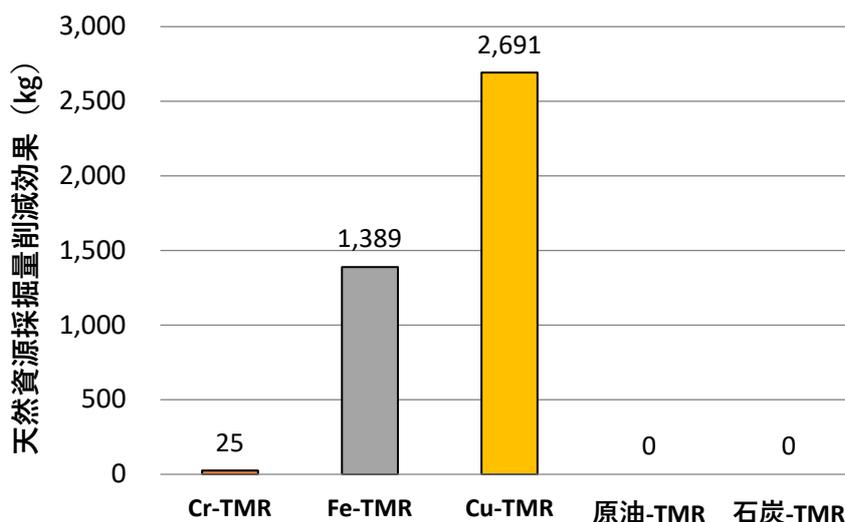
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

#### 4.6.2. 天然資源採掘量削減効果の検討

本事業実施前後における天然資源採掘量削減効果を図表 198 に示す。事業が普及することによって、特に鉄、銅に係る天然資源採掘量が削減されると推計された。

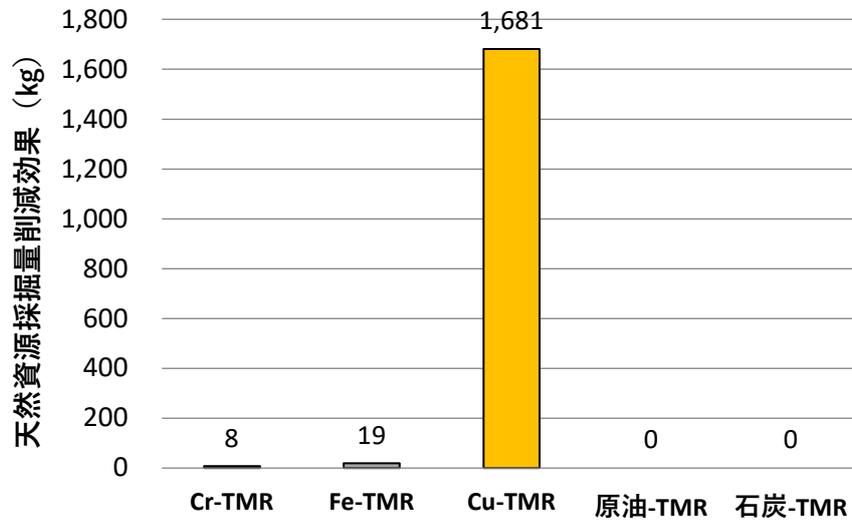
また、各推計対象における天然資源採掘量削減効果を図表 199、図表 200 に示す。自動車の場合、事業実施前に回収されると想定した二次原料（鉄原料）の品質が第 2 等級規格を満たしていなかったことから、天然資源由来の原料による希釈が行われると仮定した。また、本推計では事業実施後に回収されると想定した二次原料（鉄原料）の品質が改善されると推計されたため、天然資源由来の原料による希釈は行われないと仮定した。結果、本事業実施前後で、特に鉄に係る天然資源採掘量削減効果が大きいと推計された。一方自動販売機の場合、自動車の場合よりも銅の回収量が多いと推計されたため、自動車と比べて銅の天然資源採掘量削減効果が大きくなっている。先述の通り、銅の TMR 係数は鉄の約 58 倍であることから、回収量が鉄と比べて少なくても、天然資源採掘量削減効果に与える効果が大きいと考えられる。

図表 199 事業実施前後（全国）における天然資源採掘量削減効果



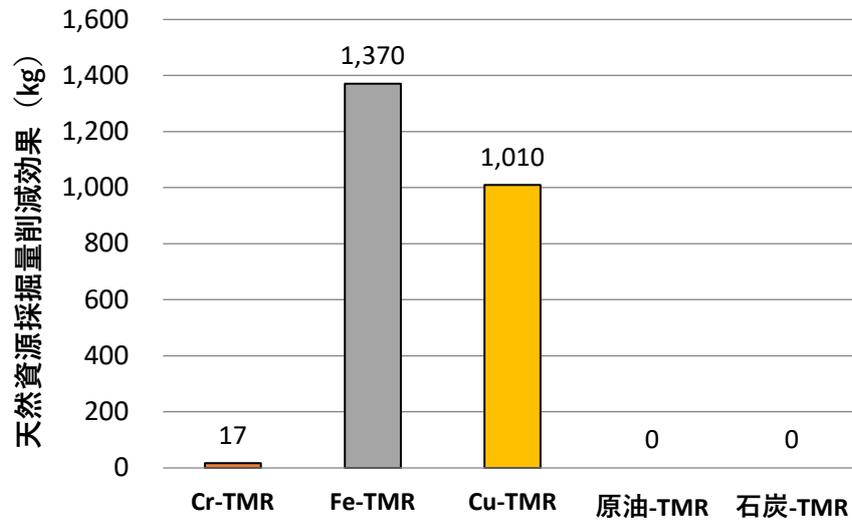
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 200 自動販売機（全国）における天然資源採掘量削減効果



(出所) 三菱UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 201 自動車（全国）における天然資源採掘量削減効果



(出所) 三菱UFJ リサーチ&コンサルティング作成

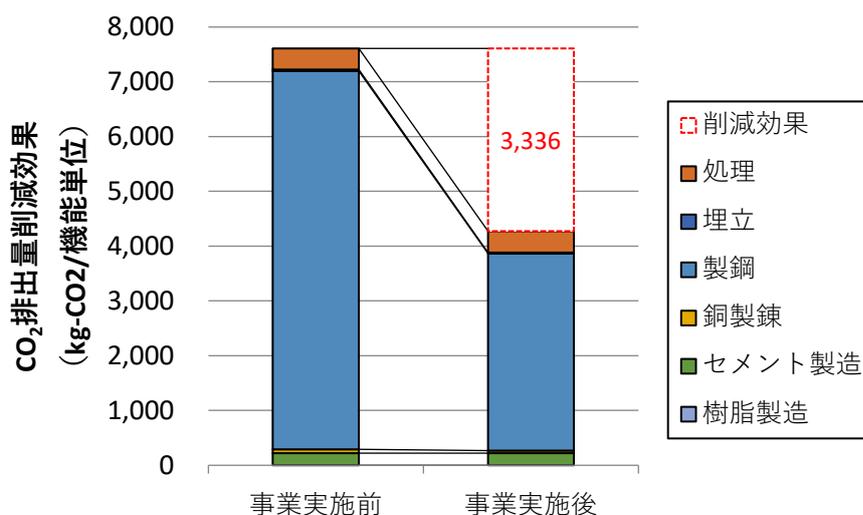
### 4.6.3. CO<sub>2</sub> 排出量削減効果

本事業実施前後における CO<sub>2</sub> 排出量削減効果を図表 201 に示す。また、各推計対象における CO<sub>2</sub> 排出量削減効果を全国、コンソーシアム別にそれぞれ図表 202、図表 203、図表 204、図表 205 に示す。

自動販売機と自動車で改善効果が大きく異なる理由は、二次資源に対する天然資源による希釈の有無である。自動販売機の場合、事業実施前に回収されると想定した二次原料の品質が既に第 2 等級規格を満たす水準であったことから、天然資源由来の原料による希釈が発生しないと仮定した。一方自動車の場合、事業実施前に回収されると想定した二次原料（鉄原料）の品質が第 2 等級規格を満たしていなかったことから、天然資源由来の原料（銑鉄）による希釈が行われたと仮定した。銑鉄の CO<sub>2</sub> 排出原単位は、ほかの天然資源由来の原料と比べても特に大きいため、銑鉄の投入有無によって CO<sub>2</sub> 排出量が大きく変わる。本推計では事業実施後に回収されると想定した二次原料（鉄原料）の品質が改善され、天然資源由来の原料による希釈は行われないと仮定した。そのため、本事業の導入前後で CO<sub>2</sub> 排出量は大きく削減されると推計された。

つまり、受入基準を満たす忌避物質の少ない二次原料を共有することができれば、天然資源による希釈が不要となるため、CO<sub>2</sub> 排出量削減効果が大きくなると推計された。

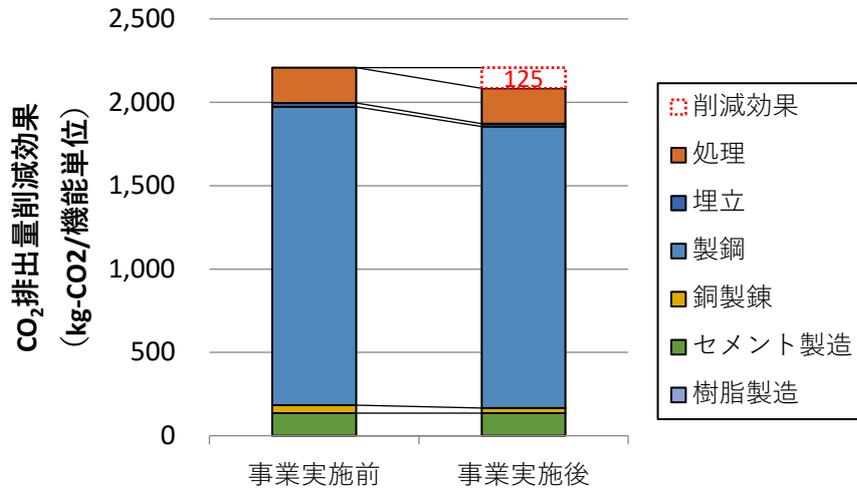
図表 202 事業実施前後における CO<sub>2</sub> 排出量削減効果<sup>51</sup>（全国）



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

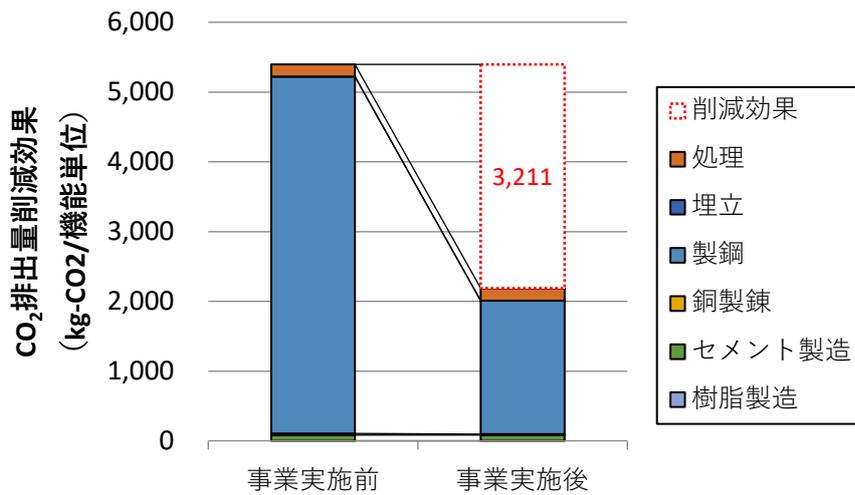
<sup>51</sup> 機能単位：製品 1t の 50 年間の使用と本事業で設定した再生資源規格の第 2 等級を満たす二次資源を原料とした素材（普通鋼、非鉄金属、クロム系ステンレス鋼、セメント、樹脂）生産

図表 203 事業実施前後における CO<sub>2</sub> 排出量削減効果（自動販売機・全国）



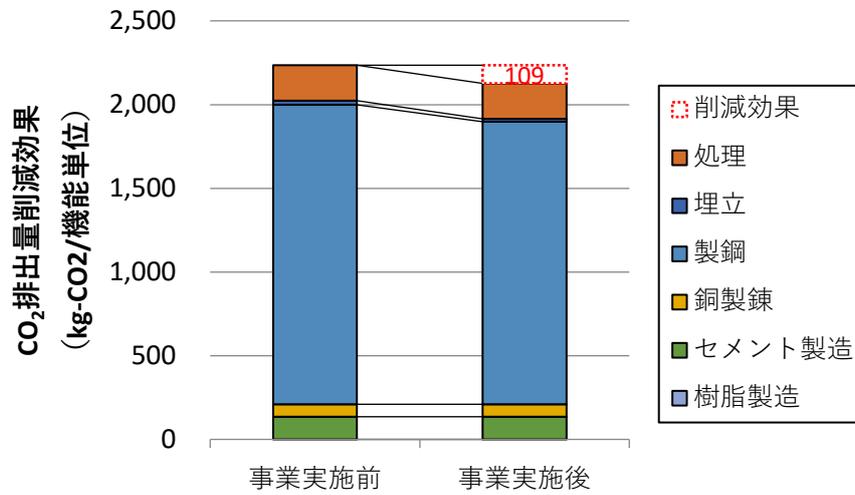
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 204 事業実施前後における CO<sub>2</sub> 排出量削減効果（自動車・全国）



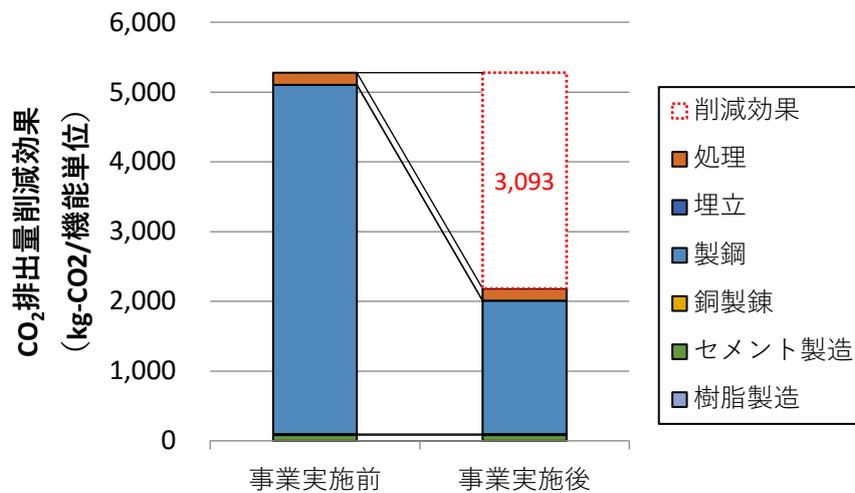
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 205 事業実施前後における CO<sub>2</sub> 排出量削減効果（自動販売機・コンソーシアム内）



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 206 事業実施前後における CO<sub>2</sub> 排出量削減効果（自動車・コンソーシアム内）



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

## 4.7. 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討・出口戦略の検討

### 4.7.1. 金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討

4.3の実証結果より、忌避物質を含む部品を特定し、事前に解体することで、回収物の品質を管理できる可能性が明らかになった。推計値と実測値の差分解消は課題であるものの、忌避物質含有部品情報の蓄積と、標準的な解体方法の開発が進めば、他の使用済み製品でも同様に、忌避物質を管理した再生資源の回収が期待される。また、4.4で実証した情報連携システムでは、製品の個体情報や部品の解体情報、破碎・選別方法と、再生資源のロット情報を問題なく紐づけることが確認できた。こうして、トレーサビリティが担保された再生資源の回収が可能になった。

本年度は、忌避物質の管理を目的に情報記録を行ったが、各工程でのCO<sub>2</sub>排出量を紐づけることができれば、中間処理事業者のScope1やScope2の記録にも活用できる可能性がある。さらには、再生資源利用者（各種素材産業など）がScope3を算定する際にも活用でき、より付加価値の高い再生資源の供給ができる（図表207：応用①）。

使用済み自動販売機では、銅やクロムを含む部品として、冷却装置やリモコンなどを回収対象とした。情報連携システムにおける部品回収画面は、簡便にカスタマイズ可能な設計となっている。そのため、他の製品であっても、忌避物質を含む部品を特定できれば、現状のシステムを応用できる可能性がある。例えば、自動車リサイクル法の全部利用では、除去推奨銅含有部品が指定されている。こうした情報を活用することで、使用済み自動車から、銅の品質を管理した鉄スクラップを回収できると考えられる（図表207：応用②）。

本事業では、スマートフォンへの入力やOCRによって個体情報を読み取っている。他の使用済み製品でも同様な手法で、個体情報を読み取ることができる。こうして読み取った個体情報は、他のデータベースとも連携可能であり、より付加価値の高い情報活用につながる可能性がある（図表207：応用③）。

次年度以降、自動販売機に留まらず、他の使用済み製品における忌避物質含有部品情報の整備実態、これら忌避物資を管理するため解体手法に関するガイドライン、既存のデータベースの運用状況などを調査することで、他の製品への応用可能性を一層具体化することが求められる。

図表 207 自動車における情報連携システムの応用イメージ

**情報連携システム(Moira)の応用例**

販売機：ZZ001  
関連モデル  
富士電機25

回収対象部品は自動車のCu部品や樹脂部品にもカスタマイズ可能

本数

- リモコン
- コインメック類
- ラック
- 冷却装置
- 冷却装置 (モーターファン除く)
- ハンドルロック
- カギ無し

写真追加

写真無しで完了

【個体別解体部品登録画面】

**応用①：中間処理業におけるScope1及び2関連情報記録支援**

- 解体・破碎工程でのCO2排出量が合わせて記録出来れば、核廃棄物に**リサイクル工程での排出量を紐づけられる可能性**。
- LCAにおけるCO2排出量把握や、再生素材利用者のScope3導出にも寄与。

**応用②：自動車リサイクル・全部再資源化における管理支援ツール**

- 全部利用では除去推奨Cu含有部品が指定されており、これらをMoiraに登録すれば、**現状のシステムを応用可能**と考えられる。
- また、ステンレス等のCr濃度の高い部品を特定すれば、Crへの横展開も可能となる。

(出所) 豊通リサイクル株式会社ASR再資源課事業部

**応用③：ASR削減に向けた資源回収インセンティブ制度支援ツール(JARS連携を視野)**

- バンパーやガラスを登録すれば、資源回収インセンティブ制度にも応用可能である。**重量計測やJARSとの連携が実現すればより精緻なトレースも可能に**。

(出所) 経済産業省、環境省

**応用④：その他使用済み機器(産廃等)の中間処理管理ツール**

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

## 4.7.2. 出口戦略の検討

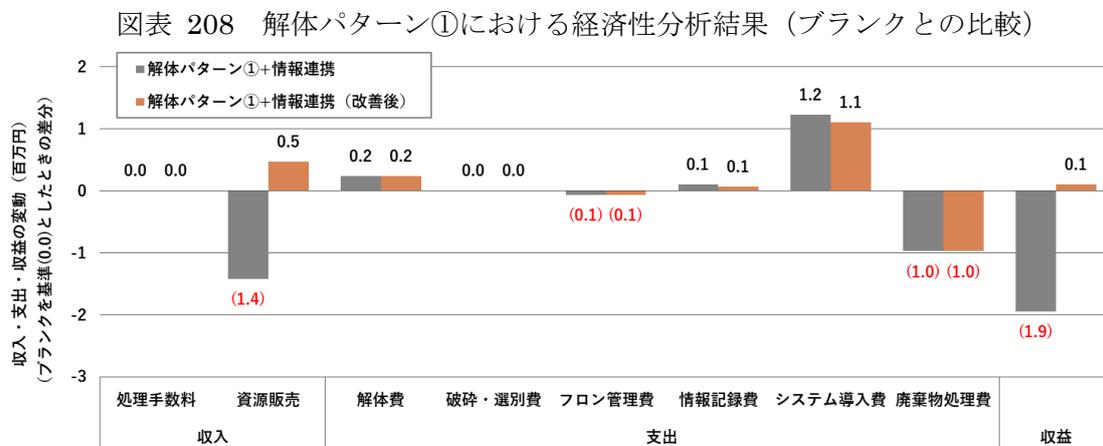
### 4.7.2.1 採算性分析

「ブランク」、「解体パターン①・情報連携あり」を対象に、それぞれ採算性分析を行い、「ブランク」との差分を整理した（図表 208）。 図中、灰色のグラフは現状想定される前提条件での採算性分析結果の比較、橙色のグラフは想定される課題を解決したあとに期待される採算性分析結果の比較である。

現状のままでは、「解体パターン①・情報連携あり」は、「ブランク」と比較して、採算性が悪化すると試算された。資源販売収入が減少すること、解体や情報記録、システム導入に追加的な費用が必要なことが、主な採算性悪化の要因として挙げられる。資源販売収入の減少は、磁着物・ミックスメタルの回収量の減少、ミックスメタルの販売単価の減少による影響が大きい。磁着物の単価は、「ブランク」と比較して 2 円/kg しか上昇しないとの前提を置いた（新断バラとシュレッダーC の差分）。そのため、磁着物の販売単価の増加幅より、選別回収物の重量の減少や、ミックスメタル単価の低下による影響が顕著に表れたと考えられる。

フロン管理のための紙面への手入力や人力による PC への入力作業が削減した結果、フロン管理費を削減できた。一方、QR の貼り付けやスマートフォンへの入力等によって、情報記録に追加的な費用が掛かった。フロン管理に要する作業時間は 1 分 49 秒かかるが、情報記録には 2 分 53 秒ほど要していた。情報記録による作業時間を 1 分程度削減できれば、現在フロン管理に必要な工数と相殺できる可能性が示唆された。また、システム導入費用は採算性に大きく影響しており、1 社あたりの導入費用を削減することが期待される。

そこで、磁着物の販売単価がさらに 10 円値上げされ（69 円/kg、ブランクと比較して 12 円/kg 上昇）、情報記録に要する時間を 1 分削減でき、使用する会社が増えることでシステム運用費（システム導入費用の内数）を 10% 値下げすると仮定して試算を行った。その結果、「ブランク」と比較して、大きな収益が得られると期待される（図表 208 中、「解体パターン①・情報連携（解体後）」）。なお、ダストの塩素・クロム含有量は大きな改善が見込めなかったため、処理単価は一定としており、事前に部品を回収することで、ダスト回収量が減少したことが、廃棄物処理費の削減につながっている。また、事前回収した部品の販売・処理費用は考慮しておらず、今後精査が必要である。



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

#### 4.7.2.2 事業成果の実装に向けた課題検討

事業化に向けて、資源販売額の増加、解体費用の削減、情報記録に要する工数の削減、システム導入費の削減が課題となる。

事前に部品回収を行うため、破碎・選別後の回収物の重量の減少は避けられない。主に磁着物を対象として、販売単価を高めていく必要がある。そのためには、購入者が再生資源の付加価値を認識できるような仕組みづくりが必要となる。

忌避物質の含有量に応じた再生資源規格は、素材生産事業者における購買判断の一助となる。規格に適合した再生資源であれば、素材生産事業者は安心して素材生産に使用することができるようになる。また、天然資源によって、忌避物質を希釈する必要もなくなる。このように、安定的な操業の実現や資源効率の向上から、素材生産事業者に対する付加価値向上につながると考えられる。また、上記に留まらず、カーボンニュートラリティ（炭素中立）の観点から、再生資源の付加価値を高めていくことも有効と考えられる。中間処理工程における CO<sub>2</sub> 発生量を記録できれば、素材生産事業者における Scope3 の算定根拠として活用できるようになる。今年度試作したシステムは忌避物質の管理を念頭に置いたものだが、こうした情報を追加できるよう、改善を行っていく必要がある。

解体費用の削減には、易解体設計の採用や標準解体方法の開発、解体に適した治具の開発などを進めていく必要がある。易解体設計を推進するためには、メーカー（今回は自動販売機メーカー）と連携していく必要がある。また、実際に易解体設計を採用した自動販売機が廃棄されるには、10年（耐用年数）以上かかると見込まれる。そのため、先んじて、標準解体方法の開発を進めることが重要である。まず、忌避物質を含む部品や、これら部品の位置・固定方法を把握することが必要である。次に、再生資源規格を満たす範囲で、これら部品を効率的に解体する方法を検討する必要がある。既存の解体工具や方法では、こうした部品の解体に時間を要してしまう場合には、新規の解体治具の開発も必要となると考えられる。

また、情報連携システムの利用に伴って、個体登録のための QR コードの貼り付けや型番の手入力、写真撮影、回収部品の選択などに時間を要する。一方、フロン回収をはじめからシステム上で管理できるため、従来はフロン管理に要していた工数を削減できる。時間分析の結果、情報連携システムの利用における工数を1分ほど削減できれば、フロン管理で効率化される分と相殺できることが分かった。そのため、情報連携システムにおける入力操作の効率化を進めていく必要がある。具体的には、個体登録回数の削減（事業者のヤード・処理フローに応じたカスタマイズ）、OCRによる型番の識別率・識別速度の向上（作業による再確認の負担軽減）、画像解析による回収部品の自動判別などを検討していく必要がある。

1 社あたりのシステム導入コストを低減するには、開発した情報連携システムを、多くの中間処理事業者が使用する必要がある。そのため、汎用性の高いシステムを構築することが重要課題となる。同時に、システム導入の動機付けにつながるような、規格開発や認証制度の構築、システムを利用して回収した再生資源の買取価格の増加を検討していく必要がある。成分情報が明らかかな再生資源を入手できることは、素材生産事業者にとっての便益になる。コンソーシアムでの事業化を目指すなかでは、システム導入費用に対して、中間処理事業者と素材生産事業者の費用負担に関する考え方を整理することも必要と考えられる。

#### 4.7.2.3 出口戦略の検討（ロードマップの整理）

本事業の成果は、図表 209 に示すようなコンソーシアムにおいて、事業化を目指している。これを念頭に、実証事業期間内で実施する取り組み（2020 年度～）、実証事業終了後に実施する取り組み（2023 年度～、2025 年度～）を整理した（図表 210）。

4.1 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証テーマ 1）では、金属をはじめとした、リサイクルシステムの阻害要因となりうる忌避物質として、クロムや銅を対象に、中間処理業から素材産業までの流通量を推計した。今後もこうした忌避物質の流通実態を明らかにし、改善が必要な個所・発生源の特定を進めていく必要がある。

上記で改善が必要とされた対象物を念頭に、忌避物質を管理可能な規格策定と分離プロセスの開発、また、取引を円滑に進めるための情報連携システムの実装を進めていく必要がある。本年度事業では、シュレッダースクラップと廃プラスチック原燃料を対象に策定した規格案を策定した。こうした規格案を、コンソーシアム内、また将来的には日本全国において活用を進めるため、規格原案の作成や JIS 化に向けた検討を進めていく。また、必要に応じて、その他の再生資源を対象に、忌避物質含有量に応じた規格を策定していくことも検討する。

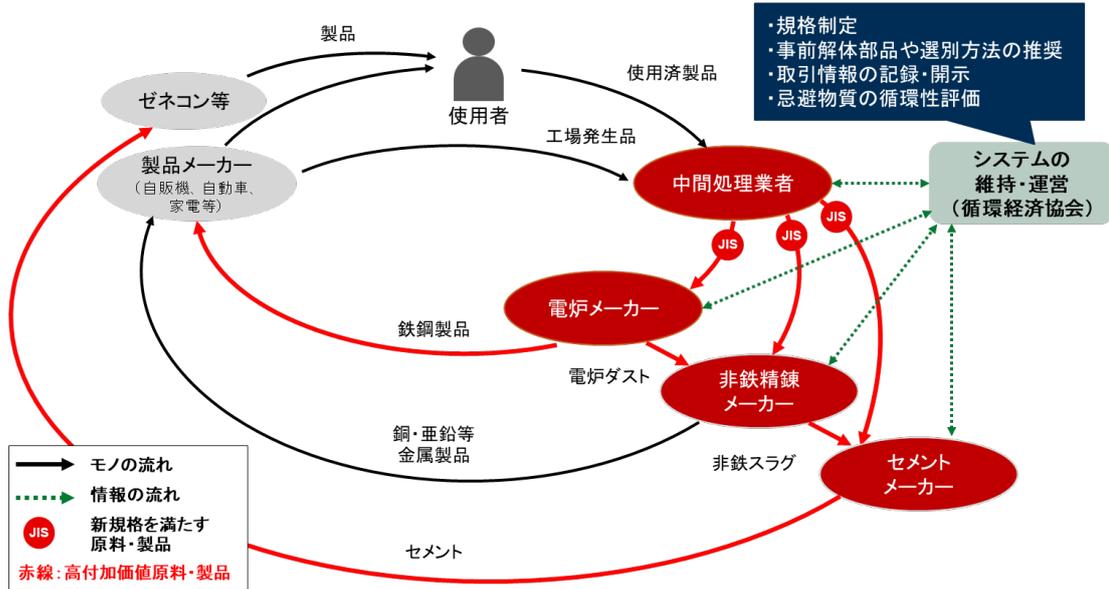
分離プロセスの実装を進めるためには、まず、忌避物質含有部品を正確に把握し、これら情報を蓄積したデータベースを構築していく必要がある。次に、こうした情報をもとに、複数の解体方法を実証し、再生資源規格と対応した再生資源を回収できるよう、標準解体方法の開発を進めていく必要がある。まずは自動販売機を対象に検討を行い、その後、自動車や家電、その他の使用済み製品への展開を目指す。また、2025 年以降は、プロセスの普及拡大に向けて、標準化や認証制度の導入を視野に入れた取り組みを進める予定である。

情報連携システムの構築に向けて、情報入力を効率化するための手法の開発、中間処理現場で問題なく使用できるようなデバイス・資材の検討を進める。また、再生資源の付加価値向上につながるよう、CO<sub>2</sub> 排出量などの情報を記録できるように、システム仕様の改善を進める。こうした改善を踏まえて、事業化検討を行うなかで、より多くの中間処理事業者に、低廉な価格で、安心して導入できるような、システムの管理・運営手法の検討を進めていく。こうして、2025 年度頃からの事業化を目指す。

解体方法の工夫では対応が難しく、既存の破碎・選別技術では、分離が困難な忌避物質等を対象に、新たな要素技術の開発を進める。今年度、4.5 磁着物の高度選別実証（実証テーマ 5）では、磁着物に混入するマルテンサイト系ステンレス鋼を対象に、新規の分離手法（電磁ファイnder、LIBS ソーター）を実証した。また、4.3.2 樹脂・金属成分を分離する要素技術の検討では、ダストをはじめ低品位基板などに含まれる金属・樹脂の分離を目指し、要素技術の実証を行った。こうした実証成果を踏まえて、今後、パイロット試験機の導入に向けた検討を進めていく。

2021 年 2 月に設立した一般社団法人循環経済協会には、本事業に参画する企業をはじめ、様々な中間処理事業者、素材生産事業者が参画している。同協会とも連携を進めながら、中間処理事業者・素材生産事業者によるコンソーシアムの構築、規格の発行やプロセスの標準化・認証、情報連携システムの運用・維持管理を目指していく。

図表 209 コンソーシアムにおける事業の実施



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 210 事業出口に向けたロードマップ (案)

	2020年度～	2023年度～	2025年度～
社会で必要とされる情報連携システム・要素技術の特定			
忌避物質の賦存量・流通量調査	Cr・Cu・Cl等を中心とした調査の実施	潜在的な忌避物質を対象とした調査の実施	
忌避物質の分離プロセスと情報連携システムの確立			
再生資源の規格化	規格原案の作成／標準化に向けた検討	規格案の公表・精査	新規規格の発行／規格の運用
忌避物質を分離する解体・破碎・選別プロセスの開発	プロセス仕様の特定／適用可能な製品の検討	事業化検討／プロセスの実装	普及拡大（標準化、認証等）
情報連携システム開発	システム仕様の特定／管理手法の検討	事業化検討／システムの実装	システムの運営・維持管理
新たな要素技術の開発			
磁着物の高度選別技術（電磁ファインダー／LIBS）	基礎検討／装置設計仕様案の特定	実用化検討／パイロット試験機での実証	実機導入
樹脂・金属の選別技術	有望技術の選定・実証	パイロット試験機での実証	実機導入
その他	追加的な要素技術の検討・開発等		

循環経済協会におけるコンソーシアム型ビジネスの実装（JISセンター4.0の実現）

基礎検討、技術開発に関する取り組み  
商用化、社会実装に関する取り組み

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

## 5. まとめ

### 5.1. 実証成果

#### 5.1.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証テーマ1）

本年度は鉄鋼電炉、非鉄製錬（銅、鉛、亜鉛）、セメント産業を対象に、中間事業者や素材産業間で流通する再生資源や廃棄物・副産物等の流通量を調査した。また、クロムを重点対象忌避元素として取り上げ、マテリアルフローを作成した。

マテリアルフロー分析の結果、普通鋼電炉には特殊鋼スクラップが流入しており、これが電炉普通鋼や製鋼スラグ、製鋼ダストのクロム混入源であることが明らかになった。製鋼スラグはセメント産業において、製鋼ダストは亜鉛製錬において、それぞれ最大のクロム混入源であった。亜鉛製錬に流入したクロムは、亜鉛製錬スラグとして、最終的にセメント産業に供給される。セメント産業に流入するクロムを管理するため、普通鋼電炉に供給される製鋼原料（磁着物）から、特殊鋼スクラップ（ステンレス鋼）を分離する必要があることが明らかになった。

また、都市ごみ焼却灰や石炭灰、銅製錬スラグ、廃プラスチック（ASR・SR）、建設発生土が、セメント産業における主なクロム混入源であること特定した（記載した順にクロム流入量が大きいもの）。銅製錬にもSR由来のクロムが流入していることから、銅製錬やセメント産業に供給されるASR・SRから、クロムを分離する必要がある。

#### 5.1.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証テーマ2）

本年度は、日本全体のマクロデータ等をもとに、シュレッダースクラップ（鉄鋼電炉向け）における銅の許容品位に関する規格案（図表 95）及びクロムの許容品位に関する規格案（図表 96）を作成した。また、同様に廃プラスチック原燃料（セメント事業者向け）における塩素の許容品位に関する規格案（図表 99）及びクロムの許容品位に関する規格案（図表 100）を作成した。

また、実証テーマ3の結果を踏まえ、本実証で作成した規格案が、中間処理業者にとって実現可能なものであるかを検討した。実証テーマ③の結果では、該当する産物が存在しない等級も一部存在したが、各再生資源の母材の違いによって変化するため、今後は自動販売機以外の母材から回収されるシュレッダースクラップや廃プラスチック原燃料の評価も行い、規格案の実現可能性を精査する必要がある。

#### 5.1.3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証テーマ3）

本年度は、使用済み自動販売機を対象に、銅及びクロムを含む部品を特定した。自動販売機では、銅は冷却装置やリモコン等、クロムはラック等に使用されていることが明らかになった。複数の解体方法でこれら部品の取り外しを行い、筐体を破碎・選別処理して、磁着物・ミックスメタル・ダストを回収した。銅・クロム含有部品を取り外すことで、磁着物の銅・クロム品位は低下し、製鋼原料としての品質は改善した。解体方法によって、磁着物の品質を管理できる可能性が示された。

また、使用済み自動販売機を処理した際のダストから、金属と樹脂を分離する技術の実証を行った。湿式ジグ選別装置を用いることで、金属（主に銅）が濃縮した産物と、樹脂が濃縮した産

物を、それぞれ回収することができた。特に、銅が濃縮した産物は、銅製錬原料として販売できる水準であることが分かった。

#### 5.1.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）

本年度は、自動販売機を対象とした解体方法等の情報連携システムとして、スマートフォン等で導入可能な PWA である「Moira」を試作した。また、中間処理事業者での解体実証を通じて、その有効性を確認した。磁着物における銅やクロムの混入率低減を目指して、それらの元素が含まれる部品を特定し、その解体情報を記録できたことは大きな成果である。さらに、記録した解体情報を用いることで、後工程の原料メーカーが販売単位に含まれる銅及びクロム量を確認可能なシステムも実装できた。

また、実証により明らかになった個体番号や型式の入力工数に関しては、OCR 機能によって銘板に記載された文字情報の読込が可能な端末を導入することで解決を試みた。本年度の実証では、OCR 機能により読み込んだ情報の確認等に時間を要したため、明確な工数削減効果は確認できなかった。しかし、実証に用いた使用済み自動販売機においては、OCR 機能により読込ができなかった個体はなく、入力作業の簡素化は実現できたため、今後の活用可能性が示された。

#### 5.1.5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）

本実証で検討した電磁式ファインダーを用いれば、個数ベースで約 90%のモーターコアを取り除きながら、約 98%の磁着スクラップを回収することのできる産物を得ることが示唆された（分離効率 88%）。つまり、全て同一のモーターコアと仮定した場合、磁着スクラップ濃縮産物において、銅品位を従来の 10 分の 1 に減らすことが期待できる。普通鋼とクロム系ステンレス鋼の選別においても、本実証で検討した電磁式ファインダーを用いれば、個数ベースでクロム系ステンレス鋼の 63%を取り除きながら、普通鋼の約 74%を回収することのできる産物を得ることが示唆された（分離効率 37%）。つまり、全て同一のクロム系ステンレス鋼と仮定した場合、普通鋼の回収率は低いものの、普通鋼濃縮産物においてクロム品位を約 63%減らすことが期待できる。

LIBS ソーターでは、選択するピーク波長を見直し、クロム/鉄濃度とクロム/鉄ピーク強度比の関係を示す検量線の直線性を改善した。改善した検量線のクロム/鉄ピーク強度比に閾値を設定することで、普通鋼とクロム系ステンレス鋼を高精度（分離効率 97%）に選別できることが分かった。また、LIBS ソーターにおいて、ベルト速度を増加させると、クロム、鉄それぞれのピーク強度のばらつきが大きくなる傾向が確認された。しかし、クロム/鉄ピーク強度比をもとに検量線を作成することで、試料の不規則なバルク形状や表面状態の影響が緩和され、直線性の高い検量線を作成することができた。これを用いれば、高ベルト速度であっても低ベルト速度と同様に試料を選別することができる可能性が示された。モーターコアのように複雑な形状の銅線にレーザーを照射し、十分な銅のピーク強度を得るためには、レーザーパルスエネルギーが 10mJ 以上必要であることを明らかにした。また、クロム・鉄それぞれのピーク強度が最大となる試料表面の算術平均粗さは 0.1~2.0 $\mu\text{m}$  の範囲であり、それより滑らかでも粗くてもピーク強度が低下することが判明した。一方、クロム/鉄ピーク強度比は、表面粗度の影響をほとんど受けずほぼ一定値を示すことも明らかとなった。

### 5.1.6. 事業における環境影響改善効果・CO<sub>2</sub>排出量削減効果の評価

本事業における環境影響改善効果として、自動販売機、自動車を対象に、資源効率性向上効果、天然資源採掘量削減効果を推計した。

事業実施前後で天然資源投入量が減少し、粗付加価値額が増加すると推計され、資源効率性が約2倍向上すると推計された。また、銅や鉄に係る天然資源採掘削減量が本事業を通じて減少することが推計された。CO<sub>2</sub>排出量削減効果でも同様に自動販売機、自動車を対象に推計を行った。自動車の場合、事業実施前に回収されると想定した二次原料（鉄原料）の品質が第2等級規格を満たしていなかったことから、天然資源由来の原料（銑鉄）による希釈が行われたと仮定して評価を行った。一方、事業実施後に回収されると想定した二次原料（鉄原料）の品質は改善されると想定されたため、天然資源由来の原料による希釈は行われないと仮定した。そのため、本事業の導入前後でCO<sub>2</sub>排出量は大きく削減されると推計された。

以上の結果から、忌避物質の管理が求められる理想的な社会において、本事業の推計対象に限らず、受入基準を満たす忌避物質の少ない二次原料を共有することができれば、天然資源による希釈が不要となるため、環境負荷低減効果が大きくなると推計された。

### 5.1.7. 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討・出口戦略の検討

本年度は、素材産業の要求水準に応じた再生資源規格案を策定するとともに、使用済み自動販売機を対象に、再生資源に含まれる忌避物質を管理する解体・分離プロセスと、再生資源中の成分情報を伝達する情報連携システムの実証試験を行った。これら事業成果を活用することで、中間処理事業者と素材産業間で円滑に成分情報などの共有が進み、情報の非対称性を解消することが期待され、再生資源の取引を活性化できる可能性が明らかになった。

追加的な解体作業や情報記録、また情報連携システムの導入により、一部の費用が増加すると見込まれる。しかし、再生資源の販売価格を向上し、情報連携システムの入力工数削減や運用費の低減を進めることで、採算性が確保できる可能性が明らかになった。

また、本年度実証した情報連携システムは、忌避物質の管理を念頭に置いていた。今後、解体・破碎工程でCO<sub>2</sub>排出量を記録できるようにすれば、中間処理業におけるCO<sub>2</sub>排出量の算定、再生資源利用者のScope3の算定に貢献できる可能性があり、情報連携システムの付加価値を高めることができる。また、その他の使用済み製品中の忌避物質含有部品等を特定することで、情報連携システムを他製品にも横展開できる。こうした応用可能性を考慮しながら、今後、規格案や解体・選別プロセス（要素技術）、情報連携システムを社会実装していくために必要な取り組みを、ロードマップに整理した。

## 5.2. 今後の課題

### 5.2.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証テーマ1）

本年度は鉄鋼、非鉄製錬、セメントでそれぞれ独立したマテリアルフロー図を作成しているが、一部にはマテリアルバランスが釣り合っていない箇所が存在する。推計した情報をもとに、全体像を俯瞰するため、マテリアルフローの接続を行う必要がある。また、クロムを対象にしたマテリアルフローでは、まだ解明できていない非鉄製錬やセメントにおけるクロムの流入源がある。特に、都市ごみ焼却灰に含まれるクロムが、どのような発生源に由来するのか明らかでない。本年度整理ができなかったフローの捕捉を進めていく必要がある。

また、実証テーマ2の規格案によって、忌避物質をどの程度社会的に管理することができるか、解明していく必要がある。そのため、クロムのみでなく、規格案で対象とした銅や塩素のマテリアルフローを推計し、規格案の導入による効果を明らかにする必要がある。

### 5.2.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証テーマ2）

本年度は、実証テーマ3の結果（自動販売機由来の産物の評価）をもとに、規格案が中間処理業者にとって充足可能なものであるかを確認した。その結果、シュレッダースクラップの規格案（銅、クロム）及び廃プラスチック原燃料の規格案（クロム）は、中間処理業者にとって充足可能なものであると確認できた。一方、廃プラスチックの規格案（塩素）が中間処理業者にとって充足可能なものであることを確認できていない。今後は、異なる処理方法（塩素が多く含まれる部品を特定し、これを事前に取り外す等）で回収された再生資源を評価し、中間処理業者にとって充足可能な規格案となっているかを改めて検証する必要がある。

なお、素材産業側にとっては、品位が保証された再生資源であることが重要である。本年度は等級を規格化したものの、再生資源が各等級の水準を満たすことを保証するための方法を検討していない。今後は、再生資源が各等級の水準を満たすことを保証するための方法として、再生資源の成分分析、管理方法等に関する規格の策定等を検討する必要がある。

また、将来的に規格を実用化することを見据え、素材産業側における規格案の実操業管理可能性を検討する。各素材産業が、規格に基づいて、原料の受入（仕分け）、品質確認（試料採取・分析）、検収（価格の決定）、原料の投入量・比の決定、中間製品の品質確認（試料採取・分析）、最終製品の品質確認（試料採取・分析）を行う場合を想定し、必要な作業手順（規格の活用方法）を具体化する必要がある。なお、このうち、特に規格導入によって作業手順が大きく変化するとみられるものとして、原料の受入、検収、原料の投入量・比の決定の工程を優先的に取り上げる必要がある。また、規格の導入によって作業負荷が増加する場合には、これを解決するための方策を立てる必要がある。

さらに、規格が幅広い事業者を受け入れられるものとなるよう、既存規格との整合をはかる必要がある。シュレッダースクラップや廃プラスチック原燃料中の忌避物質品位に関する既存規格を収集し、既存規格が要求または推奨する忌避物質品位の水準を整理する。

このほか、より広い範囲（コンソーシアム全体）で忌避物質を管理するため、今回対象外となった再生資源における規格案（非鉄製錬原料、非鉄スラグ等）の必要性も検討する必要がある。

### 5.2.3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証テーマ3）

本年度は、銅・クロム含有部品を特定するため、自動販売機を3台解体して、成分分析を行った。分析結果をもとに、自動販売機のメーカー・セクション別に、銅・クロムがどの程度含まれているか推計した。処理対象となる自動販売機のモデル（メーカー・セクション数）、取り外した部品、破碎・選別時の磁着物回収率などから、回収される磁着物の品位を推計した。

品位推計値は、一部実際に解体・破碎・選別して得られた産物の成分実測値と乖離した。推計値は、今回分析対象とした銅・クロム含有部品のみ考慮しており、このほかにも考慮すべき銅・クロムを含む部品が存在する可能性がある。また、メーカー・セクション数別に推計した、自動販売機中の銅・クロム含有量は、年式や加熱・冷却方法等を検討しておらず、実態と乖離していた可能性がある。自動販売機をさらに精緻に解体して、銅・クロム含有部品を追加的に特定すること、他の製品モデル中の銅・クロム含有量推計値の妥当性を確認することが必要であり、解体・分析台数を増やして検証が求められる。また、分析方法によるばらつきを軽減するため、産物のサンプリング方法及び分析手法等を検討する必要がある。

また、時間分析の結果、解体作業には数分～数十分を要することが明らかになった。事業採算性を向上させるため、解体時間の短縮は重要である。効率的に忌避物質含有部品が取り外せるような、標準的な解体方法の開発が必要となるほか、解体治具の開発や易解体設計の推進に向けて働きかけていくことも重要になる。

湿式ジグ選別機では、銅が低比重側の産物にも分配されていたことが課題である。これは、ハーネスが樹脂に絡まったことが要因であると考えられ、破碎条件を見直すことで、相互に絡みにくくする必要がある。また、塩素は浮上物（比重 1.0 未満）にも分配された。これは銅線が抜けて被覆線（PVC）の中空内部に気泡が残存した影響と考えられ、ハーネスの事前分離方法や中空内部に気泡を残さないような工夫が必要である。

### 5.2.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）

本年度に開発した情報連携アプリ「Moira」によって、特定部品の解体情報等を記録し、後工程に解体情報を伝達することが可能なことを実証した。一方で、従来と比較して情報を登録する工数が必要となることから、使用端末やアプリの改善等による入力作業の効率化が必要となる。本年度に活用した OCR 機能を有する端末等では効率化も期待できるが、端末独自の機能を最大限に活用するためには、PWA ではなく当該端末に最適化したアプリの開発も求められる。一方で、専用アプリとすると、本年度に実施したような度重なるアプリの更新に対応しにくくなることから、将来的にアプリの目指すべき方向性を再度検討することも必要となる。

また、個体情報の記録に活用した QR コードを印刷したシールが、紫外線の影響により判読不可能となる課題もあった。今後は耐久性の高いシールの利用や、QR コード以外の個体番号の記録方法（銘板情報の活用）等を検討することで、課題を解決する必要がある。

さらに、今後はスクラップの品質管理だけでなく、非財務情報の開示に向けた記録項目の追加等も検討できる。例えば、中間処理工程における CO<sub>2</sub> 排出量を個体別に記録することができれば、各中間処理業者の CO<sub>2</sub> 排出量の把握や、リサイクル工程を含めた LCA 全体での CO<sub>2</sub> 排出量の把握にも寄与できる。また、自動販売機以外の対象製品の増加も視野に入れ、自動車リサイクルシステム等の他のシステムとの連携可能性や、連携を踏まえた入力項目の追加等も検討していく必

要がある。

### 5.2.5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）

本試験で用いた電磁式ファインダーには、検知可能領域が存在し、その領域内に存在する試料の形状や金属種が、電磁式ファインダーの観測データに影響を及ぼしている可能性がある。本事業で用いた電磁センサーの検知可能領域をベルトコンベア上半径約 12.5 mmの半球であると仮定すると、今年度用意した標準試料のうち、検知可能領域よりも小さな試料は3条件（10 mm×10 mm×10 mm、20 mm×10 mm×10 mm、20 mm×20 mm×10 mm）だけである。電磁センサーにおける検知可能領域に存在する試料の形状、金属種、体積などが観測データに及ぼす影響を確認するためには、より小さな標準試料、もしくはより大きな直径の電磁センサーを用意し、試験を実施する必要がある。

LIBS ソーターでは、磁着スクラップ中の普通鋼、クロム系ステンレス鋼、モーターコアを識別するにあたり大きな課題はない。今後は、処理能力向上に向けたさらなる高ベルト速度条件における検討、LIBS におけるピーク検知と銅線等の複雑な形状におけるアブレーション現象との関係の検討等を行うことで、LIBS ソーターの実操業への適用可能性が広がると考えられる。

### 5.2.6. 事業における環境影響改善効果・CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の評価

今年度の評価では、忌避物質の管理が社会に浸透した理想条件における環境影響改善効果、CO<sub>2</sub> 排出量削減効果を推計した。そのため、例えば自動車等には現状あまり利用されていない電炉鋼板であっても、再資源化された後は自動車や自動販売機に等しく使用されると仮定している。次年度以降、関係者等へのヒアリングを実施し、より実態に即した条件でも推計を行い、理想条件との比較を合わせて行うことで、事業実施効果をより大きくすることのできる社会の在り方等についても言及できると良い。

また、より実態に即した評価を行うべく、評価範囲の拡大を行うことが望ましい。例えば、本推計では、各プロセス間で発生する輸送を考慮していない。また、本推計では SR などが直接埋立されることを想定しており、焼却処分等のプロセスを考慮していない。評価範囲等を再検討のうえ、より実態に即したプロセスを評価することが望まれる。

### 5.2.7. 事業における金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討・出口戦略の検討

今後の事業化に向けて、継続して社会で必要な情報連携システムや要素技術の特定を進める必要がある。本年度はクロムを対象に、流通状況の解明を試みたが、潜在的にリスクのある忌避物質を対象に、マテリアルフローを明らかにしていく必要がある。

こうした分析に基づき、忌避物質の分離プロセスと情報連携システムの確立を進めていく必要がある。本年度検討した規格案（シュレッダースクラップ、廃プラスチック原燃料）の発行に向けて取り組むとともに、その他の再生資源を対象に、忌避物質の含有量に応じた規格を検討していく必要がある。また、忌避物質を分離する解体・破碎・選別プロセスを確立するため、忌避物質含有部品の特定や、標準的な解体方法の開発を進めていく必要がある。さらに、情報連携システムの実装に向けて、情報記録の効率化や他のデータベースとの連携等を図っていく必要がある。並行して、既存の分離技術で忌避物質の分離ができない場合には、要素技術の開発や実装を進め

ていくことが求められる。

採算性分析の結果、資源販売額の増加、解体工数の削減、情報記録に要する工数の削減、システム導入費の削減が、事業化課題であることが明らかになった。これら課題を解決するため、再生資源の付加価値を向上するための規格・認証などの整備、標準解体方法の開発、システム入力作業の効率化、汎用性の高いシステムの実装とユーザー（中間処理事業者）に対する動機づけを検討していく必要がある。また、事業成果は、本年度対象とした自動販売機のみでなく、他の使用済み製品（自動車、家電等）にも応用が期待される。そこで、他の製品における忌避物質含有部品情報の整備実態、これら忌避物資を管理するための解体手法、既存データベースの運用状況などを調査し、応用可能性を明らかにする必要がある。

事業化に向けて、本年度策定したロードマップを必要に応じて細分化・精査しながら、各種取り組みを進めていく必要がある。特に、規格案を導入し、分離プロセスや情報連携システムの導入を進めるコンソーシアムを構築していくことが重要である。一般社団法人循環経済協会と連携して、こうしたコンソーシアムの実現に向けた関係者との調整や合意形成を進めていくことが求められる。

## 6. 付録

### 6.1. 資源効率性向上効果の算定根拠

資源効率性向上効果の内訳を図表 211 に示す。また、各プロセスにおける投入量、産出量、排出量及びその単価、算定時に用いた参考文献をそれぞれ図表 212、図表 213、図表 214、図表 215、図表 216、図表 217、図表 218 に示す。

図表 211 資源効率性向上効果の内訳

カテゴリ	参照番号	プロセス	粗付加価値額 (円)	粗付加価値額 (円)	粗付加価値額 (円)	
			(自動販売機)	(自動車)	(合計)	
A	1-A-1-1	採掘・選鉱等	採掘・選鉱 (クロム鉱石)	138	239	377
	1-A-1-2		採掘・選鉱 (鉄鉱石)	129	5,972	6,101
	1-A-1-3		採掘・選鉱 (銅鉱石)	5,582	5,942	11,524
	1-A-1-4		採掘 (原油)	2,640	1,171	3,811
	1-A-2-1	素材生産	普通鋼電炉製錬	72,087	72,342	144,429
	1-A-2-2		普通鋼高炉製錬	150	6,937	7,087
	1-A-2-3		銅製錬	458	485	943
	1-A-2-4		溶解・還元 (フェロクロム)	324	563	887
	1-A-2-5		特殊鋼電炉製錬	3,154	5,487	8,641
	1-A-2-6		精製 (原油)	1,264	560	1,824
	1-A-2-7		樹脂製造	26,107	11,577	37,684
	1-A-2-8		スラグ処理	426	451	877
	1-A-3	最終製品生産		393,196	300,949	694,145
	1-A-4	販売・サービス		0	0	0
	1-A-5	使用		0	0	0

	1-A-6	回収		0	0	0
	1-A-7	解体・破碎・選別		213,720	213,720	213,720
	1-A-8	埋立		3,634	182	3,816
	1-A-9	素材生産	セメント製造	4	129	133
B	1-B-1-1	採掘・選鉱等	採掘・選炭（石炭）	0	0	0
	1-B-2-1	素材生産	セメント製造	51	0	51
C	1-C-1-1	採掘・選鉱等	採掘・選鉱（クロム鉱石）	51	50	101
	1-C-1-2		採掘・選鉱（鉄鉱石）	0	47	47
	1-C-1-3		採掘・選鉱（銅鉱石）	1,993	3,786	5,779
	1-C-1-4		採掘（原油）	2,640	1,171	3,811
	1-C-2-1	素材生産	普通鋼電炉製錬	73,653	83,237	156,890
	1-C-2-2		普通鋼高炉製錬	56	55	111
	1-C-2-3		銅製錬	191	329	520
	1-C-2-4		溶解・還元（フェロクロム）	120	119	239
	1-C-2-5		特殊鋼電炉製錬	3,217	5,623	8,840
	1-C-2-6		精製（原油）	1,264	560	1,824
	1-C-2-7		樹脂製造	26,107	11,577	37,684
	1-C-2-8		スラグ処理	436	462	898
	1-C-3	最終製品生産		393,196	300,949	694,145
	1-C-4	販売・サービス		0	0	0
	1-C-5	使用		0	0	0
	1-C-6	回収		0	0	0
1-C-7	解体・破碎・選別		217,736	217,736	217,736	
1-C-8	埋立		3,634	182	3,816	

	1-C-9	素材生産	セメント製造	4	129	133
--	-------	------	--------	---	-----	-----

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 212 各プロセスへの投入量の算定根拠

参照番号	プロセス	原料等	a 投入量 (t) (自動販売機)	a 投入量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考文献
1-A-1-1	採掘・選鉱 (クロム鉱石)	-	-	-	投入物はなしとした。	
1-A-1-2	採掘・選鉱 (鉄鉱石)	-	-	-	投入物はなしとした。	
1-A-1-3	採掘・選鉱 (銅鉱石)	-	-	-	投入物はなしとした。	
1-A-1-4	採掘 (原油)	-	-	-	投入物はなしとした。	
1-A-2-1	普通鋼電炉製錬	鉄スクラップ	3.2	1.4	各推計対象における機能単位当たりの鉄製錬原料回収量を用いた。それらの詳細な推計方法は、3-1A-1-3、3-2A-1-3 で述べる。これに循環回数に乗じて投入量を算出した。 なお、循環回数 (4.6 回) は文献 3-1-1 から自動販売機の平均使用年数を算出し、評価時間 (50 年) をそれらで除すことで算出した。 (以下同様)	1-1-1 1-1-2
		銑鉄	-	1.4	希釈用に投入される天然資源を原料とした機能単位当たりの銑鉄生産量を用いた。これに循環回数に乗じて投入量を算出した。それらの詳細な推計方法は 3-1A-1-4、3-2A-1-4 で述べる。	
1-A-2-2	普通鋼高炉製錬	鉄鉱石 (精鉱)	0.041	1.6	採掘された鉄鉱石が全量投入されるとした。	
1-A-2-3	銅製錬	銅鉱石 (精鉱)	0.12	0.11	採掘された銅鉱石が全量投入されるとした。	
		銅スクラップ	0.033	0.016	各推計対象における機能単位当たりの銅製錬原料回収量を用いた。これに循環回数に乗じて投入量を算出した。それらの詳細な推計方法は、3-1A-1-7、3-2A-1-7 で述べる。	
1-A-2-4	溶解・還元 (フェロクロム)	クロム鉱石	0.019	0.027	採掘されたクロム鉱石が全量投入されるとした。	
1-A-2-5	特殊鋼電炉製錬	フェロクロム	0.017	0.024	生産されたフェロクロムが全量投入されるとした。	
		銑鉄	0.038	1.4	生産された特殊鋼向け銑鉄が全量投入されるとした。	
		クロム系ステンレス鋼スクラップ	0	0	事業実施前は回収されないと仮定した。	
1-A-2-6	精製 (原油)	原油	0.39	0.14	採掘された原油が全量投入されるとした。	
1-A-2-7	樹脂製造	ナフサ	0.38	0.14	生産されたナフサが全量投入されるとした。	
		樹脂 (二次原料)	0	0	事業実施前は回収されないと仮定した。	
1-A-2-8	スラグ処理	電炉スラグ (普通鋼)	0.32	0.27	生産した電炉スラグ (普通鋼) のうち、セメント製造、埋立に投入されるものを除いてすべて処理されると仮定した。	

		高炉スラグ	0.0025	0.10	生産した高炉スラグのうち、セメント製造に投入されるものを除いてすべて処理されると仮定した。	
		電炉スラグ（特殊鋼）	0.006	0.008	生産した電炉スラグ（特殊鋼）のうち、セメント製造、埋立に投入されるものを除いてすべて処理されると仮定した。	
		非鉄スラグ	0.052	0.036	生産した非鉄スラグのうち、セメント製造に投入されるものを除いてすべて処理されると仮定した。	
1-A-3	最終製品生産	-	-	-	推計対象製品（自動販売機・自動車）に使用された部品や素材の種類・原料投入量等は不明であった。そのため、最終製品生産に係るプロセスでは、推計対象製品の生産における粗付加価値額のみ産業連関表を用いて推計した（波及する部品生産等の粗付加価値額は考慮していない）。	
1-A-4	販売・サービス	最終製品	-	-	自動販売機の場合、製造後、無料で設置され、販売される飲料によって収益を得るモデルを想定した。飲料の販売による粗付加価値額は考慮していない。 自動車の場合、定数（1t）とした。	
1-A-5	使用	-	-	0.0	使用にかかるプロセスにおいて粗付加価値は発生しないとした。	
1-A-6	回収	使用済み製品	4.6	3.8	全量回収されるとした。	
1-A-7	解体・破碎・選別	解体部品	4.6	3.8	全量解体・破碎・選別されるとした。	
1-A-8	埋立	SR・ASR	0.72	0.02	各推計対象における機能単位あたりに発生したSR・ASR量を用いた。これに循環回数に乗じて投入量を算出した。 それらの詳細な推計方法は、3-1A-1-2、3-2A-1-2で述べる。	
		電炉スラグ（普通鋼）	0.017	0.015	生産した電炉スラグ（普通鋼）に、文献から得た埋立への投入率を乗じた推計した。	1-1-3
		電炉スラグ（特殊鋼）	0.0003	0.0005	生産した電炉スラグ（特殊鋼）に、文献から得た埋立への投入率を乗じた推計した。	1-1-3
		非鉄スラグ	0	0	生産した非鉄スラグに、文献から得た埋立への投入率を乗じた推計した。	1-1-3
1-A-9	セメント製造	セメント原燃料	0	0.065	各推計対象における機能単位当たりのセメント原燃料回収量を用いた。これに循環回数に乗じて投入量を算出した。 それらの詳細な推計方法は、3-1A-1-5、3-2A-1-5で述べる。	
		高炉スラグ	0.0090	0.34	生産した高炉スラグに、文献から得たセメント製造への投入率を乗じた推計した。	1-1-3
		非鉄スラグ	0.065	0.045	生産した非鉄スラグに、文献から得たセメント製造への投入率を乗じた推計した。	1-1-3
		電炉スラグ（普通鋼）	0.0051	0.0044	生産した電炉スラグ（普通鋼）に、文献から得たセメント製造への投入率を乗じた推計した。	1-1-3

1-B-1-1	採掘・選炭（石炭）	-	-	-	投入物はなしとした。
1-B-2-1	セメント製造	石炭（精炭）	-	0	採掘された石炭が全量投入されるとした。
1-C-1-1	採掘・選鉱（クロム鉱石）	-	-	-	投入物はなしとした。
1-C-1-2	採掘・選鉱（鉄鉱石）	-	-	-	投入物はなしとした。
1-C-1-3	採掘・選鉱（銅鉱石）	-	-	-	投入物はなしとした。
1-C-1-4	採掘（原油）	-	-	-	投入物はなしとした。
1-C-2-1	普通鋼電炉製錬	鉄スクラップ	2.9	1.6	各推計対象における機能単位当たりの鉄製錬原料回収量を用いた。これに循環回数を乗じて投入量を算出した。それらの詳細な推計方法は、3-1C-1-3、3-2C-1-3で述べる。
1-C-2-2	普通鋼高炉製錬	鉄鉱石（精鉱）	0.015	0.012	採掘された鉄鉱石が全量投入されるとした。
1-C-2-3	銅製錬	銅鉱石（精鉱）	0.043	0.068	採掘された銅鉱石が全量投入されるとした。
		銅スクラップ	0.058	0.029	各推計対象における機能単位当たりの銅製錬原料回収量を用いた。これに循環回数を乗じて投入量を算出した。それらの詳細な推計方法は、3-1C-1-7、3-2C-1-7で述べる。
1-C-2-4	溶解・還元（フェロクロム）	クロム鉱石	0.007	0.006	採掘されたクロム鉱石が全量投入されるとした。
1-C-2-5	特殊鋼電炉製錬	フェロクロム	0.006	0.005	生産されたフェロクロムが全量投入されるとした。
		銑鉄	0.014	0.011	生産された特殊鋼向け銑鉄が全量投入されるとした。
		クロム系ステンレス鋼スクラップ	0.035	0.063	事業実施前は回収されないと仮定した。
1-C-2-6	精製（原油）	原油	0.39	0.14	採掘された原油が全量投入されるとした。
1-C-2-7	樹脂製造	ナフサ	0.38	0.14	生産されたナフサが全量投入されるとした。
		樹脂（二次原料）	0	0	事業実施前は回収されないと仮定した。
1-C-2-8	スラグ処理	電炉スラグ（普通鋼）	0.32	0.27	生産した電炉スラグ（普通鋼）のうち、セメント製造、埋立に投入されるものを除いてすべて処理されると仮定した。
		高炉スラグ	0.001	0.001	生産した高炉スラグのうち、セメント製造に投入されるものを除いてすべて処理されると仮定した。
		電炉スラグ（特殊鋼）	0.006	0.008	生産した電炉スラグ（特殊鋼）のうち、セメント製造、埋立に投入されるものを除いてすべて処理されると仮定した。
		非鉄スラグ	0.12	0.082	生産した非鉄スラグのうち、セメント製造に投入されるものを除いてすべて処理されると仮定した。
1-C-3	最終製品生産	各種部品	4.6	3.8	推計対象製品（自動販売機・自動車）に使用された部品や素材の種類・原料投入量等は不明であった。そのため、最終製品生産に係るプロセスでは、推計対象製品の生産における粗付加価値額のみ産業連関表を用いて推計した（波及する部品生産等の粗付加価値額は考慮していない）。

1-C-4	販売・サービス	-	-	-	自動販売機の場合、製造後、無料で設置され、販売される飲料によって収益を得るモデルを想定した。飲料の販売による粗付加価値額は考慮していない。 自動車の場合、定数(1t)とした。
1-C-5	使用	-	-	0.0	使用かかるプロセスにおいて粗付加価値は発生しないとした。
1-C-6	回収	使用済み製品	4.6	3.8	全量回収されるとした。
1-C-7	解体・破碎・選別	解体部品	4.6	3.8	全量解体・破碎・選別されるとした。
1-C-8	埋立	SR・ASR	0.7	0.0	各推計対象における発生したSR・ASR量を用いた。それらの詳細な推計方法は、3-1C-1-2、3-2C-1-2で述べる。
		電炉スラグ(普通鋼)	0.017	0.015	生産した電炉スラグ(普通鋼)に、文献から得た埋立への投入率を乗じた推計した。
		電炉スラグ(特殊鋼)	0.0003	0.0005	生産した電炉スラグ(特殊鋼)に、文献から得た埋立への投入率を乗じた推計した。
		非鉄スラグ	0	0	生産した非鉄スラグに、文献から得た埋立への投入率を乗じた推計した。
1-C-9	セメント製造	セメント原燃料	0	0.065	各推計対象における機能単位当たりのセメント原燃料回収量を用いた。これに循環回数を乗じて投入量を算出した。 それらの詳細な推計方法は、3-1C-1-5、3-2C-1-5で述べる。
		高炉スラグ	0.0033	0.0027	生産した高炉スラグに、文献から得たセメント製造への投入率を乗じた推計した。
		非鉄スラグ	0.065	0.045	生産した非鉄スラグに、文献から得たセメント製造への投入率を乗じた推計した。
		電炉スラグ(普通鋼)	0.0051	0.0044	生産した電炉スラグ(普通鋼)に、文献から得たセメント製造への投入率を乗じた推計した。

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 213 各プロセスの産出量の算定根拠

参照番号	プロセス	製品等	b 産出量 (t) (自動販売機)	b 産出量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考文献
1-A-1-1	採掘・選鉱 (クロム鉱石)	クロム鉱石 (精鉱)	0.019	0.027	文献からフェロクロム 1t 生産あたりに必要なクロム鉱石量を得て、1-A-2-4 のフェロクロム生産量に乗じて推計した。	1-1-4
1-A-1-2	採掘・選鉱 (鉄鉱石)	鉄鉱石 (精鉱)	0.041	1.571	文献から銑鉄 1t 生産あたりに必要な鉄鉱石量を得て、1-A-2-2 の銑鉄生産量に乗じて推計した。	1-1-4
1-A-1-3	採掘・選鉱 (銅鉱石)	銅鉱石 (精鉱)	0.12	0.11	文献から電気銅 1t 生産あたりに必要な銅鉱石量を得て、1-A-2-3 の電気銅生産量に乗じて推計した。	1-1-4
1-A-1-4	採掘 (原油)	原油	0.39	0.14	文献から樹脂 1t 生産あたりに必要な原油量を得て、1-A-2-7 の樹脂生産量に乗じて推計した。	1-1-4
1-A-2-1	普通鋼電炉製錬	鉄鋼材	3.0	2.5	自動販売機の場合、実証テーマ③A 社「ブランク」で得られた鉄の総量から、自動販売機 1t の生産に必要な鉄量を推計した。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。 自動車の場合、文献から 1t の生産に必要な鉄量を推計した。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。	1-1-5
1-A-2-2	普通鋼高炉製錬	銑鉄	0.038	1.4	文献から特殊鋼 1t 生産あたりに必要な銑鉄量を得て、1-A-2-5 の特殊鋼生産量に乗じて推計した。	1-1-4
		高炉スラグ	0.012	0.44	文献から銑鉄 1t 生産あたりに生産される高炉スラグ量を得て、1-A-2-2 の銑鉄生産量に乗じて推計した。	1-1-4
1-A-2-3	銅製錬	電気銅	0.072	0.051	自動販売機の場合、実証テーマ③A 社「ブランク」で得られた銅の総量から、自動販売機 1t の生産に必要な銅量を推計した。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。 自動車の場合、文献から 1t の生産に必要な銅量を推計した。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。	1-1-5
		非鉄スラグ	0.12	0.082	文献から電気銅 1t 生産あたりに生産される非鉄スラグ量を得て、1-A-2-3 の電気銅生産量に乗じて推計した。	1-1-4
1-A-2-4	溶解・還元 (フェロクロム)	フェロクロム	0.017	0.024	文献から特殊鋼 1t 生産あたりに必要なフェロクロム量を得て、1-A-2-5 の特殊鋼生産量に乗じて推計した。	1-1-4
1-A-2-5	特殊鋼電炉製錬	特殊鋼	0.055	0.079	自動販売機の場合、実証テーマ③A 社「ブランク」で得られたクロムの総量から、自動販売機 1t の生産に必要なステンレス鋼量を推計した (本推計では SUS410 と仮定した)。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。 自動車の場合、文献から 1t の生産に必要なステンレス鋼量を推計した。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。	1-1-6

1-A-2-6	精製（原油）	ナフサ	0.38	0.14	文献から樹脂 1t 生産あたりに必要な樹脂量を得て、1-A-2-7 の樹脂生産量に乗じて推計した。	1-1-4
1-A-2-7	樹脂製造	樹脂	0.88	0.32	自動販売機の場合、実証テーマ③A 社「ブランク」で得られた樹脂の総量から、自動販売機 1t の生産に必要な樹脂量を推計した。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。 自動車の場合、文献から 1t の生産に必要な樹脂量を推計した。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。	1-1-5
1-A-2-8	スラグ処理	路盤材等	0.38	0.32	スラグ処理に投入された各種スラグの合計とした。	
1-A-3	最終製品生産	最終製品	-	3.8	推計対象製品（自動販売機・自動車）に使用された部品や素材の種類・原料投入量等は不明であった。そのため、最終製品生産に係るプロセスでは、推計対象製品の生産における粗付加価値額のみ産業連関表を用いて推計した（波及する部品生産等の粗付加価値額は考慮していない）。	
1-A-4	販売・サービス	最終製品	-	3.8	自動販売機の場合、製造後、無料で設置され、販売される飲料によって収益を得るモデルを想定した。飲料の販売による粗付加価値額は考慮していない。 自動車の場合、定数（1t）とした。	
1-A-5	使用		-	0.0	使用段階において粗付加価値は発生しないとした。	
1-A-6	回収	使用済み製品	4.6	3.8	全量回収されるとした。	
1-A-7	解体・破碎・選別	鉄スクラップ	3.0	1.7	各推計対象における機能単位当たりの鉄製錬原料回収量を用いた。それらの詳細な推計方法は、3-1A-1-3、3-2A-1-3 で述べる。これに循環回数に乗じて投入量を算出した。	
		銅スクラップ	0.033	0.016	各推計対象における機能単位当たりの銅製錬原料回収量を用いた。これに循環回数に乗じて投入量を算出した。 それらの詳細な推計方法は、3-1A-1-7、3-2A-1-7 で述べる。	
		セメント原燃料	0	0.065	各推計対象における機能単位当たりのセメント原燃料回収量を用いた。これに循環回数に乗じて投入量を算出した。 それらの詳細な推計方法は、3-1A-1-5、3-2A-1-5 で述べる。	
		クロム系ステンレス鋼スクラップ	0	0	事業実施前は回収されないと仮定した。	
		樹脂（二次原料）	0	0	事業実施前は回収されないと仮定した。	
1-A-8	埋立	-	-	-	埋立から産物は発生しないと仮定した	
1-A-9	セメント製造	セメント	0.0019	0.0032	廃プラ、非鉄スラグ等、製鋼スラグ由来のセメント生産量の原単位にそれぞれの投入量に乗じて推計した。	
1-B-1-1	採掘・選炭（石炭）	石炭（精炭）	-	0	文献からセメント 1t 生産あたりに必要な石炭量を得て、セメント製造量に乗じて推計した。	1-1-7

1-B-2-1	セメント製造	セメント	-	0	1-C-9のセメント生産量と1-A-9のセメント生産量の差分とした。
1-C-1-1	採掘・選鉱（クロム鉱石）	クロム鉱石（精鉱）	0.007	0.006	文献からフェロクロム 1t 生産あたりに必要なクロム鉱石量を得て、1-C-2-4のフェロクロム生産量に乗じて推計した。
1-C-1-2	採掘・選鉱（鉄鉱石）	鉄鉱石（精鉱）	0.015	0.012	文献から銑鉄 1t 生産あたりに必要な鉄鉱石量を得て、1-C-2-2の銑鉄生産量に乗じて推計した。
1-C-1-3	採掘・選鉱（銅鉱石）	銅鉱石（精鉱）	0.043	0.068	文献から電気銅 1t 生産あたりに必要な銅鉱石量を得て、1-C-2-3の電気銅生産量に乗じて推計した。
1-C-1-4	採掘（原油）	原油	0.39	0.14	文献から樹脂 1t 生産あたりに必要な原油量を得て、1-C-2-7の樹脂生産量に乗じて推計した。
1-C-2-1	普通鋼電炉製錬	鉄鋼材	3.0	2.5	自動販売機の場合、実証テーマ③A社「ブランク」で得られた鉄の総量から、自動販売機 1t の生産に必要な鉄量を推計した。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。 自動車の場合、文献から 1t の生産に必要な鉄量を推計した。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。
1-C-2-2	普通鋼高炉製錬	銑鉄	0.014	0.011	文献から特殊鋼 1t 生産あたりに必要な銑鉄量を得て、1-C-2-5の特殊鋼生産量に乗じて推計した。
		高炉スラグ	0.0043	0.0035	文献から銑鉄 1t 生産あたりに生産される高炉スラグ量を得て、1-C-2-2の銑鉄生産量に乗じて推計した。
1-C-2-3	銅製錬	電気銅	0.072	0.051	自動販売機の場合、実証テーマ③A社「ブランク」で得られた銅の総量から、自動販売機 1t の生産に必要な銅量を推計した。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。 自動車の場合、文献から 1t の生産に必要な銅量を推計した。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。
		非鉄スラグ	0.116	0.082	文献から電気銅 1t 生産あたりに生産される非鉄スラグ量を得て、1-C-2-3の電気銅生産量に乗じて推計した。
1-C-2-4	溶解・還元（フェロクロム）	フェロクロム	0.0063	0.0051	文献から特殊鋼 1t 生産あたりに必要なフェロクロム量を得て、1-C-2-5の特殊鋼生産量に乗じて推計した。
1-C-2-5	特殊鋼電炉製錬	特殊鋼	0.055	0.079	自動販売機の場合、実証テーマ③A社「ブランク」で得られたクロムの総量から、自動販売機 1t の生産に必要なステンレス鋼量を推計した（本推計では SUS410 と仮定した）。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。 自動車の場合、文献から 1t の生産に必要なステンレス鋼量を推計した。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。
1-C-2-6	精製（原油）	ナフサ	0.38	0.14	文献から樹脂 1t 生産あたりに必要な樹脂量を得て、1-C-2-7の樹脂生産量に乗じて推計した。

1-C-2-7	樹脂製造	樹脂	0.88	0.32	自動販売機の場合、実証テーマ③A社「ブランク」で得られた樹脂の総量から、自動販売機1tの生産に必要な樹脂量を推計した。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。 自動車の場合、文献から1tの生産に必要な樹脂量を推計した。これに循環回数に乗じて産出量を算出した。
1-C-2-8	スラグ処理	路盤材等	0.44	0.36	スラグ処理に投入された各種スラグの合計とした。
1-C-3	最終製品生産	最終製品	4.6	3.8	推計対象製品（自動販売機・自動車）に使用された部品や素材の種類・原料投入量等は不明であった。そのため、最終製品生産に係るプロセスでは、推計対象製品の生産における粗付加価値額のみ産業連関表を用いて推計した（波及する部品生産等の粗付加価値額は考慮していない）。
1-C-4	販売・サービス	最終製品	4.6	3.8	自動販売機の場合、製造後、無料で設置され、販売される飲料によって収益を得るモデルを想定した。飲料の販売による粗付加価値額は考慮していない。 自動車の場合、定数（1t）とした。
1-C-5	使用	-	-	0.0	使用段階において粗付加価値は発生しないとした。
1-C-6	回収	解体部品	4.6	3.8	全量回収されるとした。
1-C-7	解体・破碎・選別	鉄スクラップ	2.9	1.6	各推計対象における機能単位当たりの鉄製錬原料回収量を用いた。それらの詳細な推計方法は、3-1C-1-3、3-2C-1-3で述べる。これに循環回数に乗じて投入量を算出した。
		銅スクラップ	0.058	0.029	各推計対象における機能単位当たりの銅製錬原料回収量を用いた。これに循環回数に乗じて投入量を算出した。 それらの詳細な推計方法は、3-1C-1-7、3-2C-1-7で述べる。
		セメント原燃料	0	0.065	各推計対象における機能単位当たりのセメント原燃料回収量を用いた。これに循環回数に乗じて投入量を算出した。 それらの詳細な推計方法は、3-1C-1-5、3-2C-1-5で述べる。
		クロム系ステンレス鋼スクラップ	0.035	0.063	各推計対象における機能単位当たりのクロム系ステンレス鋼精錬原料回収量を用いた。これに循環回数に乗じて投入量を算出した。 それらの詳細な推計方法は、3-1C-1-7、3-2C-1-7で述べる。
		樹脂（二次原料）	0	0	各推計対象における機能単位当たりの樹脂原料回収量を用いた。これに循環回数に乗じて投入量を算出した。 それらの詳細な推計方法は、3-1C-1-8、3-2C-1-8で述べる。
1-C-8	埋立	-	-	-	埋立から産物は発生しないと仮定した。
1-C-9	セメント製造	セメント	0.0019	0.0032	廃プラ、非鉄スラグ等、製鋼スラグ由来のセメント生産量の原単位にそれぞれの投入量に乗じて推計した。

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 214 各プロセスの排出量の算定根拠

参照番号	プロセス	不用品等	c 排出量 (t) (自動販売機)	c 産出量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考文献
1-A-1-1	採掘・選鉱 (クロム鉱石)	尾鉱等	0.038	0.054	1-A-1-1 クロム鉱石 (精鉱) の産出量にクロム含有率、クロムの TMR 係数を乗じて算出した TMR から、1-A-1-1 クロム鉱石 (精鉱) の産出量を差し引いて推計した。	1-1-4 1-1-8
1-A-1-2	採掘・選鉱 (鉄鉱石)	尾鉱等	0.096	3.638	1-A-1-2 鉄鉱石 (精鉱) の産出量に鉄含有率、鉄の TMR 係数を乗じて算出した TMR から、1-A-1-2 鉄鉱石 (精鉱) の産出量を差し引いて推計した。	1-1-4 1-1-8
1-A-1-3	採掘・選鉱 (銅鉱石)	尾鉱等	12	10	1-A-1-3 銅鉱石 (精鉱) の産出量に銅含有率、銅の TMR 係数を乗じて算出した TMR から、1-A-1-3 銅鉱石 (精鉱) の産出量を差し引いて推計した。	1-1-4 1-1-8
1-A-1-4	採掘 (原油)	油性廃棄物等	3.0	1.1	1-A-1-4 銅鉱石 (精鉱) の産出量に銅含有率、銅の TMR 係数を乗じて算出した TMR から、1-A-1-4 銅鉱石 (精鉱) の産出量を差し引いて推計した。	1-1-4 1-1-8
1-A-2-1	普通鋼電炉製錬	電炉スラグ (普通鋼)	0.34	0.29	文献から鉄鋼材 1t 生産あたりに生産される電炉スラグ (普通鋼) 量を得て、1-A-2-1 の鉄鋼材生産量に乗じて推計した。	1-1-3
		製鋼煙灰	0.06	0.05	文献から鉄鋼材 1t 生産あたりに生産される製鋼煙灰量を得て、1-A-2-1 の鉄鋼材生産量に乗じて推計した。	1-1-3
1-A-2-2	普通鋼高炉製錬	—	—	—	本推計では特になしとした。	
1-A-2-3	銅製錬	—	—	—	本推計では特になしとした。	
1-A-2-4	溶解・還元 (フェロクロム)	—	—	—	本推計では特になしとした。	
1-A-2-5	特殊鋼電炉製錬	電炉スラグ (特殊鋼)	0.0064	0.0091	文献から特殊鋼 1t 生産あたりに生産される電炉スラグ (特殊鋼) 量を得て、1-A-2-5 の特殊鋼生産量に乗じて推計した	1-1-3
1-A-2-6	精製 (原油)	—	—	—	本推計では特になしとした。	
1-A-2-7	樹脂製造	—	—	—	本推計では特になしとした。	
1-A-2-8	スラグ処理	—	—	—	本推計では特になしとした。	
1-A-3	最終製品生産	—	—	—	本推計では特になしとした。	
1-A-4	販売・サービス	—	—	—	本推計では特になしとした。	
1-A-5	使用	使用済み製品	4.6	3.8	全量回収・廃棄されると仮定した。	
1-A-6	回収	—	—	—	本推計では特になしとした。	
1-A-7	解体・破碎・選別	SR・ASR	0.72	0.023	各推計対象における発生した SR・ASR 量を用いた。それらの詳細な推計方法は、3-1A-1-2、3-2A-1-2 で述べる。	
1-A-8	埋立	—	—	—	本推計では特になしとした。	

1-A-9	セメント製造	—	—	—	本推計では特になしとした。
1-B-1-1	採掘・選炭（石炭）	—	—	—	本推計では特になしとした。
1-B-2-1	セメント製造	—	—	—	本推計では特になしとした。
1-C-1-1	採掘・選鉱（クロム鉱石）	尾鉱等	0.014	0.011	1-C-1-1 クロム鉱石（精鉱）の産出量にクロム含有率、クロムの TMR 係数を乗じて算出した TMR から、1-C-1-1 クロム鉱石（精鉱）の産出量を差し引いて推計した。
1-C-1-2	採掘・選鉱（鉄鉱石）	尾鉱等	0.035	0.029	1-C-1-2 鉄鉱石（精鉱）の産出量に鉄含有率、鉄の TMR 係数を乗じて算出した TMR から、1-C-1-2 鉄鉱石（精鉱）の産出量を差し引いて推計した。
1-C-1-3	採掘・選鉱（銅鉱石）	尾鉱等	4.2	6.6	1-C-1-3 銅鉱石（精鉱）の産出量に銅含有率、銅の TMR 係数を乗じて算出した TMR から、1-C-1-3 銅鉱石（精鉱）の産出量を差し引いて推計した。
1-C-1-4	採掘（原油）	油性廃棄物等	3.0	1.1	1-C-1-4 銅鉱石（精鉱）の産出量に銅含有率、銅の TMR 係数を乗じて算出した TMR から、1-C-1-4 銅鉱石（精鉱）の産出量を差し引いて推計した。
1-C-2-1	普通鋼電炉製錬	電炉スラグ（普通鋼）	0.34	0.29	文献から鉄鋼材 1t 生産あたりに生産される電炉スラグ（普通鋼）量を得て、1-C-2-1 の鉄鋼材生産量に乗じて推計した。
		製鋼煙灰	0.059	0.051	文献から鉄鋼材 1t 生産あたりに生産される製鋼煙灰量を得て、1-C-2-1 の鉄鋼材生産量に乗じて推計した。
1-C-2-2	普通鋼高炉製錬	—	—	—	本推計では特になしとした。
1-C-2-3	銅製錬	—	—	—	本推計では特になしとした。
1-C-2-4	溶解・還元（フェロクロム）	—	—	—	本推計では特になしとした。
1-C-2-5	特殊鋼電炉製錬	電炉スラグ（特殊鋼）	0.0064	0.0091	文献から特殊鋼 1t 生産あたりに生産される電炉スラグ（特殊鋼）量を得て、1-C-2-5 の特殊鋼生産量に乗じて推計した
1-C-2-6	精製（原油）	—	—	—	本推計では特になしとした。
1-C-2-7	樹脂製造	—	—	—	本推計では特になしとした。
1-C-2-8	スラグ処理	—	—	—	本推計では特になしとした。
1-C-3	最終製品生産	—	—	—	本推計では特になしとした。
1-C-4	販売・サービス	使用済み製品	—	—	本推計では特になしとした。
1-C-5	使用	—	—	0	全量回収・廃棄されると仮定した。
1-C-6	回収	—	—	—	本推計では特になしとした。
1-C-7	解体・破碎・選別	SR・ASR	—	0.0	各推計対象における発生した SR・ASR 量を用いた。それらの詳細な推計方法は、3-1C-1-2、3-2C-1-2 で述べる。
1-C-8	埋立	—	—	—	本推計では特になしとした。
1-C-9	セメント製造	—	—	—	本推計では特になしとした。

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 215 各プロセスの投入量の単価

参照番号	プロセス	製品等	単価 (円/t) (自動販売機)	単価 (円/t) (自動車)	算定の考え方	参考文献
1-A-2-1	普通鋼電炉製錬	鉄スクラップ	25,167	25,167	文献より 2020 年関東・中部・関西三地区の価格を平均して推計した。	1-2-1
		銑鉄	33,380	33,380	2020 年の日本の輸出量と輸出額から推計した。	1-2-2
1-A-2-2	普通鋼高炉製錬	鉄鉱石 (精鉱)	14,332	14,332	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	1-2-2
1-A-2-3	銅製錬	銅鉱石 (精鉱)	211,374	211,374	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	1-2-2
		銅スクラップ	700,200	700,200	文献より 2020 年銅建値を引用した。	1-2-3
1-A-2-4	溶解・還元 (フェロクロム)	クロム鉱石	33,688	33,688	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	1-2-2
1-A-2-5	特殊鋼電炉製錬	フェロクロム	124,542	124,542	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計 (高炭素フェロクロム) した。	1-2-2
		銑鉄	-	-	高炉メーカーが銑鉄と特殊鋼の両方を合わせて生産している場合を想定した。	
		クロム系ステンレス鋼スクラップ	30,000	30,000	文献より引用した。	1-2-4
1-A-2-6	精製 (原油)	原油	31,363	31,363	2020 年の WTI 原油価格 (\$/bbl) に 2020 年の米ドル相場と原油密度を乗じて算出した。	
1-A-2-7	樹脂製造	ナフサ	46,893	46,893	文献より 2020 年の国産ナフサ価格の平均を推計した。	1-2-5
		樹脂 (二次原料)	50,000	50,000	文献より引用した。	1-2-6
1-A-2-8	スラグ処理	電炉スラグ (普通鋼)	-5,000	-5,000	ヒアリング等より推計した。	
		高炉スラグ	936	936	複数の文献 (土木工事設計材料単価表等) の平均を採用した。	
		電炉スラグ (特殊鋼)	-5,000	-5,000	ヒアリング等より推計した。	
		非鉄スラグ	1,280	1,280	文献より引用した。	1-2-7
1-A-8	埋立	SR・ASR	-22,904	-22,904	文献より引用した。	1-2-8
		電炉スラグ (普通鋼)	-10,392	-10,392	複数の自治体のスラグ処理費用を平均して算出した。	
		電炉スラグ (特殊鋼)	-10,392	-10,392	複数の自治体のスラグ処理費用を平均して算出した。	
		非鉄スラグ	-10,392	-10,392	複数の自治体のスラグ処理費用を平均して算出した。	
1-A-9	セメント製造	セメント原燃料	-7,000	-7,000	公的なデータが得られなかったため文献より廃プラ E の取引価格と仮定して使用した。	1-2-9
		高炉スラグ	3,000	3,000	ヒアリング等より推計した。	
		非鉄スラグ	0	0	ヒアリング等より推計した。	
		電炉スラグ (普通鋼)	300	300	ヒアリング等より推計した。	

1-B-2-1	セメント製造	石炭（精炭）	6,999	6,999	文献より 2020 年度のオーストラリア、南アフリカの平均価格の平均を採用した。	1-2-10
1-C-2-1	普通鋼電炉製錬	鉄スクラップ	25,167	25,167	文献より 2020 年関東・中部・関西三地区の価格を平均して推計した。	
1-C-2-2	普通鋼高炉製錬	鉄鉱石（精鉱）	14,332	14,332	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	
1-C-2-3	銅製錬	銅鉱石（精鉱）	211,374	211,374	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	
		銅スクラップ	700,200	700,200	文献より 2020 年銅建値を引用した。	
1-C-2-4	溶解・還元（フェロクロム）	クロム鉱石	33,688	33,688	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	
1-C-2-5	特殊鋼電炉製錬	フェロクロム	124,542	124,542	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計（高炭素フェロクロム）した。	
		銑鉄	-	-	高炉メーカーが銑鉄と特殊鋼の両方を合わせて生産している場合を想定した。	
		クロム系ステンレス鋼スクラップ	30,000	30,000	文献より引用した。	
1-C-2-6	精製（原油）	原油	31,363	31,363	2020 年の WTI 原油価格（\$/bbl）に 2020 年の米ドル相場と原油密度を乗じて算出した。	
1-C-2-7	樹脂製造	ナフサ	46,893	46,893	文献より 2020 年の国産ナフサ価格の平均を推計した。	
		樹脂（二次原料）	50,000	50,000	文献より引用した。	1-2-6
1-C-2-8	スラグ処理	電炉スラグ（普通鋼）	-5,000	-5,000	ヒアリング等より推計した。	
		高炉スラグ	936	936	複数の文献（土木工事設計材料単価表等）の平均を採用した。	
		電炉スラグ（特殊鋼）	-5,000	-5,000	ヒアリング等より推計した。	
		非鉄スラグ	1,280	1,280	文献より引用した。	
1-C-8	埋立	SR・ASR	-22,904	-22,904	文献より引用した。	1-2-8
		電炉スラグ（普通鋼）	-10,392	-10,392	複数の自治体のスラグ処理費用を平均して算出した。	
		電炉スラグ（特殊鋼）	-10,392	-10,392	複数の自治体のスラグ処理費用を平均して算出した。	
		非鉄スラグ	-10,392	-10,392	複数の自治体のスラグ処理費用を平均して算出した。	
1-C-9	セメント製造	セメント原燃料	-7,000	-7,000	公的なデータが得られなかったため文献より廃プラ E の取引価格と仮定して使用した。	1-2-9
		高炉スラグ	3,000	3,000	ヒアリング等より推計した。	
		非鉄スラグ	0	0	ヒアリング等より推計した。	
		電炉スラグ（普通鋼）	300	300	ヒアリング等より推計した。	

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 216 各プロセスの産出量の単価

参照番号	プロセス	製品等	単価 (円/t) (自動販売機)	単価 (円/t) (自動車)	算定の考え方	参考文献
1-A-1-1	採掘・選鉱 (クロム鉱石)	クロム鉱石 (精鉱)	33,688	33,688	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	1-2-2
1-A-1-2	採掘・選鉱 (鉄鉱石)	鉄鉱石 (精鉱)	14,332	14,332	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	1-2-2
1-A-1-3	採掘・選鉱 (銅鉱石)	銅鉱石 (精鉱)	211,374	211,374	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	1-2-2
1-A-1-4	採掘 (原油)	原油	31,363	31,363	2020 年の WTI 原油価格 (\$/bbl) に 2020 年の米ドル相場と原油密度を乗じて算出した。	
1-A-2-1	普通鋼電炉製錬	鉄鋼材	140,000	140,000	文献より冷延鋼板の価格 (2022 年 1 月) を採用した。	1-2-11
1-A-2-2	普通鋼高炉製錬	銑鉄	33,380	33,380	2020 年の日本の輸出量と輸出額から推計した。	1-2-2
		高炉スラグ	2,547	2,547	セメント向け販売量とスラグ処理費用で按分して推計した。	
1-A-2-3	銅製錬	電気銅	700,233	700,233	文献より 2020 年の銅建値の平均を採用した。	1-2-12
		非鉄スラグ	569	569	セメント向け販売量とスラグ処理費用で按分して推計した。	
1-A-2-4	溶解・還元 (フェロクロム)	フェロクロム	124,542	124,542	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計 (高炭素フェロクロム) した。	1-2-2
1-A-2-5	特殊鋼電炉製錬	特殊鋼	300,000	300,000	文献より SUS430 の価格を引用した。	1-2-13
1-A-2-6	精製 (原油)	ナフサ	46,893	46,893	文献より 2020 年の国産ナフサ価格の平均を推計した。	1-2-5
1-A-2-7	樹脂製造	樹脂	156,647	156,647	文献より 2020 年のポリプロピレンの販売単価を引用した。	1-2-14
1-A-2-8	スラグ処理	路盤材等	1,064	1,064	複数企業の公表価格の平均 (円/m <sup>3</sup> ) に文献出た密度を乗じて推計した。	1-2-15
1-A-3	最終製品生産	最終製品	-	-	-	
1-A-4	販売・サービス	最終製品	0	3,421,229	自動販売機の場合、製造後、無料で設置され、販売される飲料によって収益を得るモデルを想定したため 0 とした。また、自動車の価格は文献から引用した。	1-2-14
1-A-7	解体・破碎・選別	鉄スクラップ	25,167	25,167	文献より 2020 年関東・中部・関西三地区の価格を平均して推計した。	1-2-1
		銅スクラップ	700,200	700,200	文献より 2020 年銅建値を引用した。	1-2-3
		セメント原燃料	-7,000	-7,000	公的なデータが得られなかったため文献より廃プラ E の取引価格と仮定して使用した。	1-2-9
		クロム系ステンレス鋼スクラップ	30,000	30,000	文献より引用した。	1-2-4
		樹脂 (二次原料)	50,000	50,000	文献より引用した。	1-2-6
1-A-8	埋立	-	-	-		
1-A-9	セメント製造	セメント	10,700	10,700	文献より 2018 年東京におけるセメント価格を引用した。	1-2-16

1-B-1-1	採掘・選炭（石炭）	石炭（精炭）	6,999	6,999	文献より 2020 年度のオーストラリア、南アフリカの平均価格の平均を採用した。	1-2-10
1-B-2-1	セメント製造	セメント	10,700	10,700	文献より 2018 年東京におけるセメント価格を引用した。	1-2-16
1-C-1-1	採掘・選鉱（クロム鉱石）	クロム鉱石（精鉱）	33,688	33,688	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	1-2-2
1-C-1-2	採掘・選鉱（鉄鉱石）	鉄鉱石（精鉱）	14,332	14,332	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	1-2-2
1-C-1-3	採掘・選鉱（銅鉱石）	銅鉱石（精鉱）	211,374	211,374	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	1-2-2
1-C-1-4	採掘（原油）	原油	31,363	31,363	2020 年の WTI 原油価格（\$/bbl）に 2020 年の米ドル相場と原油密度を乗じて算出した。	
1-C-2-1	普通鋼電炉製錬	鉄鋼材	140,000	140,000	文献より冷延鋼板の価格（2022 年 1 月）を採用した。	1-2-11
1-C-2-2	普通鋼高炉製錬	銑鉄	33,380	33,380	2020 年の日本の輸出量と輸出額から推計した。	1-2-2
		高炉スラグ	2,547	2,547	セメント向け販売量とスラグ処理費用で按分して推計した。	
1-C-2-3	銅製錬	電気銅	700,233	700,233	文献より 2020 年の銅建値の平均を採用した。	1-2-12
		非鉄スラグ	1,280	1,280	セメント向け販売量とスラグ処理費用で按分して推計した。	
1-C-2-4	溶解・還元（フェロクロム）	フェロクロム	124,542	124,542	2020 年の日本の輸入量と輸入額から推計（高炭素フェロクロム）した。	1-2-2
1-C-2-5	特殊鋼電炉製錬	特殊鋼	300,000	300,000	文献より SUS430 の価格を引用した。	1-2-13
1-C-2-6	精製（原油）	ナフサ	46,893	46,893	文献より 2020 年の国産ナフサ価格の平均を推計した。	1-2-5
1-C-2-7	樹脂製造	樹脂	156,647	156,647	文献より 2020 年のポリプロピレンの販売単価を引用した。	1-2-14
1-C-2-8	スラグ処理	路盤材等	1,064	1,064	複数企業の公表価格の平均（円/m <sup>3</sup> ）に文献出た密度を乗じて推計した。	1-2-15
1-C-3	最終製品生産	最終製品	-	-	-	
1-C-4	販売・サービス	最終製品	0	3,421,229	自動販売機の場合、製造後、無料で設置され、販売される飲料によって収益を得るモデルを想定したため 0 とした。また、自動車の価格は文献から引用した。	1-2-14
1-C-7	解体・破碎・選別	鉄スクラップ	25,167	25,167	文献より 2020 年関東・中部・関西三地区の価格を平均して推計した。	1-2-1
		銅スクラップ	700,200	700,200	文献より 2020 年銅建値を引用した。	1-2-3
		セメント原燃料	-7,000	-7,000	公的なデータが得られなかったため文献より廃プラ E の取引価格と仮定して使用した。	1-2-9
		クロム系ステンレス鋼スクラップ	30,000	30,000	文献より引用した。	1-2-4
		樹脂（二次原料）	50,000	50,000	文献より引用した。	1-2-6
1-C-9	セメント製造	セメント	10,700	10,700	文献より 2018 年東京におけるセメント価格を引用した。	1-2-16

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 217 各プロセスの排出量の単価

参照 番号	プロセス	製品等	単価 (円/t) (自動販売機)	単価 (円/t) (自動車)	算定の考え方	参考文献
1-A-1-1	採掘・選鉱 (クロム鉱石)	尾鉱等	-	-	尾鉱等の処理費用はかかからないと仮定した。	
1-A-1-2	採掘・選鉱 (鉄鉱石)	尾鉱等	-	-	尾鉱等の処理費用はかかからないと仮定した。	
1-A-1-3	採掘・選鉱 (銅鉱石)	尾鉱等	-	-	尾鉱等の処理費用はかかからないと仮定した。	
1-A-1-4	採掘 (原油)	油性廃棄物等	-	-	油性廃棄物等の処理費用はかかからないと仮定した。	
1-A-2-1	普通鋼電炉製錬	電炉スラグ (普通鋼)	5,232	5,232	セメント向け販売量、スラグ処理費用、埋立費用で按分して推計した。	
		製鋼煙灰	20,000	20,000	ヒアリング等より推計した。	
1-A-2-5	特殊鋼電炉製錬	電炉スラグ (特殊鋼)	5,237	5,237	スラグ処理費用、埋立費用で按分して推計した。	
1-A-7	解体・破碎・選別	SR・ASR	22,904	22,904	文献より引用した。	1-2-8
1-C-1-1	採掘・選鉱 (クロム鉱石)	尾鉱等	-	-	尾鉱等の処理費用はかかからないと仮定した。	
1-C-1-2	採掘・選鉱 (鉄鉱石)	尾鉱等	-	-	尾鉱等の処理費用はかかからないと仮定した。	
1-C-1-3	採掘・選鉱 (銅鉱石)	尾鉱等	-	-	尾鉱等の処理費用はかかからないと仮定した。	
1-C-1-4	採掘 (原油)	油性廃棄物等	-	-	油性廃棄物等の処理費用はかかからないと仮定した。	
1-C-2-1	普通鋼電炉製錬	電炉スラグ (普通鋼)	-	-	セメント向け販売量、スラグ処理費用、埋立費用で按分して推計した。	
		製鋼煙灰	-	-	ヒアリング等より推計した。	
1-C-2-5	特殊鋼電炉製錬	電炉スラグ (特殊鋼)	-	-	スラグ処理費用、埋立費用で按分して推計した。	
1-C-7	解体・破碎・選別	SR・ASR	-	-	文献より引用した。	1-2-8

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 218 資源効率性推計時に用いた参考文献

記号	参考文献名
1-1-1	ダイドーグループホールディングス、2021、統合報告書 2021
1-1-2	一般財団法人自動車検査登録情報協会、2021、公開統計情報
1-1-3	鉄鋼スラグ協会、2021、鉄鋼スラグ統計年報（2020 年度版）
1-1-4	JEMAI-LCA データベース
1-1-5	鐵と鋼 Vol.100 No.6, 山末ら、2014、使用済み自動車から得られる鉄スクラップの関与物質総量
1-1-6	井上宜治、2003、自動車排気系用ステンレス鋼の現状と今後の展望
1-1-7	セメント協会、2020、セメントハンドブック
1-1-8	原田幸明ほか、2001、金属の関与物質総量の概算
1-2-1	一般社団法人 日本鉄リサイクル工業会 HP より
1-2-2	財務省貿易統計
1-2-3	一般社団法人 日本電線工業会 HP より
1-2-4	大畑商事 HP より（2021 年 12 月閲覧）
1-2-5	三協化学 HP より
1-2-6	株式会社旭リサーチセンター、2019、日本のプラスチックリサイクルの現状と課題
1-2-7	久保和幸ら、2008、熔融スラグ等の舗装への適用性評価に関する研究（2）
1-2-8	経済産業省、2013、中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会自動車リサイクル専門委員会 許可基準等検討小委員会 産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル小委員会自動車リサイクルWG 許可基準等検討タスクフォース 第2回合同会 資料4
1-2-9	大瀧商店 HP より
1-2-10	THE WORLD BANK より
1-2-11	産業新聞 鉄鋼市場価格
1-2-12	JX 金属 HP より

1-2-13	MURC 過去調査等より
1-2-14	経済産業省生産動態統計
1-2-15	林野庁、2016、森林整備保全事業施工パッケージ型積算方式の基準
1-2-16	一般社団法人セメント協会、2019、セメント供給の現状について（第2回道路における建設資材調達に関するありかた委員会 資料4）

（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

## 6.2. 天然資源採掘量削減効果（天然資源節約効果）の算定根拠

天然資源採掘量削減効果の内訳を図表 219、図表 220 に示す。

図表 219 天然資源採掘量削減効果（自動販売機）の内訳

天然資源を代替する二次資源	二次資源によって代替される天然資源相当量				TMR 係数			天然資源採掘量削減効果 (kg)
	参照番号	項目	数値	単位	参照番号	数値	単位	
クロム	1-1-1	クロム	0.000875	t	1-2-1	8.9	t/metal-t	8
鉄	1-1-2	鉄	0.003697	t	1-2-2	5.1	t/metal-t	19
銅	1-1-3	銅	0.005603	t	1-2-3	300	t/metal-t	1,681
樹脂	1-1-6	原油	0	L	1-2-6	0.0074	t/L	0
セメント原燃料	1-1-7	石炭	0	t	1-2-7	12.4	t/t	0

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 220 天然資源採掘量削減効果（自動車）の内訳

天然資源を代替する二次資源	二次資源によって代替される天然資源相当量				TMR 係数			天然資源採掘量削減効果 (kg)
	参照番号	項目	数値	単位	参照番号	数値	単位	
クロム	1-1-1	クロム	0.001908	t	1-2-1	8.9	t/metal-t	17
鉄	1-1-2	鉄	0.268720	t	1-2-2	5.1	t/metal-t	1,370
銅	1-1-3	銅	0.003365	t	1-2-3	300	t/metal-t	1,010
樹脂	1-1-6	原油	0	L	1-2-6	0.0074	t/L	0
セメント原燃料	1-1-7	石炭	0	t	1-2-7	12.4	t/t	0

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

### 6.3. CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の計算根拠

CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の推計に用いた各プロセスにおける活動量、排出原単位、その算定根拠、算定時に用いた参考文献をそれぞれ図表 221、図表 222、図表 223、図表 224、図表 225、図表 226、図表 227 に示す。

図表 221 各プロセスにおける活動量（全国）

カテゴリ	プロセス	活動量			
		参照番号	項目	数値	単位
A	処理	3-1A-1-1	使用済み製品処理量（アロケーション後）	8.36	t/機能単位
	埋立	3-1A-1-2	発生した SR・ASR の埋立量	0.74	t-SR・ASR/機能単位
	鉄鋼電炉	3-1A-1-3	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	6.21	t-鉄/機能単位
	鉄鋼高炉	3-1A-1-4	希釈用に投入される天然資源を原料とした機能単位当たりの銑鉄生産量	1.63	t-鉄鋼/機能単位
	セメント製造	3-1A-1-5	投入された原燃料向け樹脂量	0.06	t-原燃料/機能単位
		3-1A-1-6	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	12.04	t-セメント/機能単位
	銅製錬	3-1A-1-7	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	0.05	t-銅/機能単位
B	セメント製造	3-1B-1-1	代替された天然資源由来の燃料量	0.00	t-原燃料/機能単位
		3-1B-1-2	代替された天然資源由来のセメント生産量	24.84	t-セメント/機能単位
	銅製錬	3-1B-1-3	代替された天然資源由来の銅生産量	0.04	t-銅/機能単位
	ステンレス鋼製錬	3-1B-1-4	代替された天然資源由来のステンレス鋼生産量	0.10	t-ステンレス鋼/機能単位
	樹脂（PP）製造	3-1B-1-5	代替された天然資源由来の樹脂生産量	0	t-樹脂/機能単位
C	処理	3-1C-1-1	使用済み製品処理量（アロケーション後）	8.36	t/機能単位
	埋立	3-1C-1-2	発生した SR・ASR の埋立量	1	t-SR・ASR/機能単位
	鉄鋼電炉	3-1C-1-3	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	4.10	t-鉄/機能単位
	セメント製造	3-1C-1-4	回収された原燃料向け樹脂量	0.06	t-原燃料/機能単位
		3-1C-1-5	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	36.88	t-セメント/機能単位

	銅製錬	3-1C-1-6	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	0.09	t-銅/機能単位
	ステンレス鋼製錬	3-1C-1-7	回収されたステンレス鋼製錬原料由来のステンレス鋼生産量	0.10	t-ステンレス鋼/機能単位
	樹脂製造	3-1C-1-8	回収された樹脂原料由来の樹脂生産量	0	t-樹脂/機能単位
D	鉄鋼電炉	3-1D-1-1	従来プロセスによって代替された機能単位あたりの鉄鋼生産量	2.11	t-鉄鋼/機能単位

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 222 各プロセスにおける活動量 (コンソーシアム内)

カテゴリ	プロセス	活動量			
		参照番号	項目	数値	単位
A	処理	3-2A-1-1	使用済み製品処理量 (アロケーション後)	8.36	t/機能単位
	埋立	3-2A-1-2	発生した SR・ASR の埋立量	0.74	t-SR・ASR /機能単位
	鉄鋼電炉	3-2A-1-3	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	6.21	t-鉄/機能単位
	鉄鋼高炉	3-2A-1-4	希釈用に投入される天然資源を原料とした機能単位当たりの鉄鉄生産量	0.00	t-鉄鋼/機能単位
	セメント製造	3-2A-1-5	投入された原燃料向け樹脂量	0.06	t-原燃料/機能単位
		3-2A-1-6	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	0.00	t-セメント/機能単位
	銅製錬	3-2A-1-7	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	0.05	t-銅/機能単位
B	セメント製造	3-2B-1-1	代替された天然資源由来の燃料量	0.00	t-原燃料/機能単位
		3-2B-1-2	代替された天然資源由来のセメント生産量	36.88	t-セメント/機能単位
	銅製錬	3-2B-1-3	代替された天然資源由来の銅生産量	0.04	t-銅/機能単位
	ステンレス鋼製錬	3-2B-1-4	代替された天然資源由来のステンレス鋼生産量	1.10	t-ステンレス鋼/機能単位
	樹脂 (PP)製造	3-2B-1-5	代替された天然資源由来の樹脂生産量	0.00	t-樹脂/機能単位
C	処理	3-2C-1-1	使用済み製品処理量 (アロケーション後)	8.36	t/機能単位
	埋立	3-2C-1-2	発生した SR・ASR の埋立量	0	t-SR・ASR /機能単位
	鉄鋼電炉	3-2C-1-3	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	4.38	t-鉄/機能単位

	セメント製造	3-2C-1-4	回収された原燃料向け樹脂量	0.06	t-原燃料/機能単位
		3-2C-1-5	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	36.88	t-セメント/機能単位
	銅製錬	3-2C-1-6	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	0.09	t-銅/機能単位
	ステンレス鋼製錬	3-2C-1-7	回収されたステンレス鋼製錬原料由来のステンレス鋼生産量	1.10	t-ステンレス鋼/機能単位
	樹脂製造	3-2C-1-8	回収された樹脂原料由来の樹脂生産量	0	t-樹脂/機能単位
D	鉄鋼電炉	3-2D-1-1	従来プロセスによって代替された機能単位あたりの鉄鋼生産量	1.83	t-鉄鋼/機能単位

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 223 各プロセスにおける排出原単位

カテゴリ	プロセス	活動量			
		参照番号	項目	数値	単位
A	処理	3-A-2-1	使用済み製品処理 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	46	CO <sub>2</sub> -kg/t
	埋立	3-A-2-2	埋立処理 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	33	CO <sub>2</sub> -kg/t
	鉄鋼電炉	3-A-2-3	(二次資源由来の) 粗鋼製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	580	CO <sub>2</sub> -kg/t
	鉄鋼高炉	3-A-2-4	(天然資源由来の) 銑鉄製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	1,854	CO <sub>2</sub> -kg/t
	セメント製造	3-A-2-5	(二次資源由来の) セメント原燃料 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	61	CO <sub>2</sub> -kg/t
		3-A-2-6	(二次資源由来の) セメント製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量 (アロケーション後)	6	CO <sub>2</sub> -kg/t
	銅製錬	3-A-2-7	(二次資源由来の) 銅製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	546	CO <sub>2</sub> -kg/t
B	セメント製造	3-B-2-1	(天然資源由来の) セメント原燃料 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	286	CO <sub>2</sub> -kg/t
		3-B-2-2	(天然資源由来の) セメント製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量 (アロケーション後)	6	CO <sub>2</sub> -kg/t
	銅製錬	3-B-2-3	(天然資源由来の) 銅製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	1,175	CO <sub>2</sub> -kg/t
	ステンレス鋼製錬	3-B-2-4	(天然資源由来の) ステンレス鋼製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	2,900	CO <sub>2</sub> -kg/t
	樹脂 (PP) 製造	3-B-2-5	(天然資源由来の) 樹脂製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	626	CO <sub>2</sub> -kg/t
C	処理	3-C-2-1	使用済み製品処理 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	46	CO <sub>2</sub> -kg/t

	埋立	3-C-2-2	埋立処理 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	33	CO <sub>2</sub> -kg/t
	鉄鋼電炉	3-C-2-3	(二次資源由来の) 粗鋼製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	580	CO <sub>2</sub> -kg/t
	セメント製造	3-C-2-4	(二次資源由来の) セメント原燃料 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	61	CO <sub>2</sub> -kg/t
		3-C-2-5	(二次資源由来の) セメント製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量 (アロケーション後)	6	CO <sub>2</sub> -kg/t
	銅製錬	3-C-2-6	(二次資源由来の) 銅製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	546	CO <sub>2</sub> -kg/t
	ステンレス鋼製錬	3-C-2-7	(二次資源由来の) ステンレス鋼製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	930	CO <sub>2</sub> -kg/t
	樹脂製造	3-C-2-8	(二次資源由来の) 樹脂製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	205	CO <sub>2</sub> -kg/t
D	鉄鋼電炉	3-D-2-1	(二次資源由来の) 粗鋼製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	580	CO <sub>2</sub> -kg/t

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 224 各プロセスにおける活動量の算定の考え方 (自動販売機)

活動量			
参照番号	項目	算定の考え方	参考文献
3-1A-1-1	使用済み製品処理量 (アロケーション後)	1 循環目は定数 (1t) とした。これに循環回数に乗じて活動量を算出した。 なお、循環回数 (4.6 回) は文献 3-1-1 から自動販売機の平均使用年数を算出し、評価時間 (50 年) をそれらで除すことで算出した。(以下同様)	3-1-1
3-1A-1-2	発生した SR の埋立量	実証テーマ③A 社「ブランク」で得られたダスト量を活用して機能単位あたりに発生した SR 量を推計した。ここでは SR が全量埋め立てられると仮定した。得られた 1 循環当たりの活動量に循環回数に乗じることで、活動量を推計した。	
3-1A-1-3	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	実証テーマ③A 社「ブランク」で得られた磁着物中の鉄量を活用して機能単位あたりの鉄製錬原料回収量を推計した。それを粗鋼製造 1t 当たりの鉄製錬原料投入量で除して粗鋼生産量を算出した。粗鋼製造 1t 当たりの鉄製錬原料投入量は、文献 3-1-2 から得た鉄製錬原料投入量を文献 3-1-3 から得た粗鋼生産量で除して算出した。 得られた 1 循環当たりの活動量に循環回数に乗じることで、活動量を推計した。	3-1-2 3-1-3
3-1A-1-4	希釈用に投入される天然資源を原料とした機能単位当たりの銑鉄生産量	実証テーマ③A 社「ブランク」で得られる鉄製錬原料の品質が第 2 等級規格を満たしていることから、0 とした。	

3-1A-1-5	投入された原燃料向け樹脂量	実証テーマ③A社「ブランク」で得られる樹脂の品質がセメント原燃料向けの品質を満たしていないとみられることから、0とした。	
3-1A-1-6	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	機能単位あたりのセメント産業向け電炉スラグ回収量をセメント製造1t当たりの電炉スラグ投入量で除して算出した。それぞれ、文献3-1-4、3-1-5を参考に以下式で算出した。 ※機能単位あたりの電炉スラグ回収量＝セメント産業における電炉スラグ投入量×（機能単位当たりの鉄製錬原料回収量（事業実施前）/鉄製錬原料投入量） ※セメント製造1t当たりの電炉スラグ投入量＝セメント産業における電炉スラグ投入量/セメント生産量 得られた1循環当たりの活動量に循環回数を乗じることで、活動量を推計した。	3-1-4 3-1-5
3-1A-1-7	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	実証テーマ③A社「ブランク」で得られる銅製錬原料から機能単位あたりの銅製錬原料回収量を推計し、それを/電気銅製造1t当たりの銅製錬原料（スクラップ）投入量で除して算出した。得られた1循環当たりの活動量に循環回数を乗じることで、活動量を推計した。 なお、電気銅製造1t当たりの銅製錬原料投入量は、銅製錬原料（スクラップ）投入量を電気銅生産量で除して算出した（文献3-1-6）。	3-1-6
3-1B-1-1	代替された天然資源由来の燃料量	3-1C-1-5における活動量から3-1A-1-5における活動量を差し引いて算出した。	
3-1B-1-2	代替された天然資源由来のセメント生産量	3-1C-1-6における活動量から3-1A-1-6における活動量を差し引いて算出した。	
3-1B-1-3	代替された天然資源由来の銅生産量	3-1C-1-7における活動量から3-1A-1-7における活動量を差し引いて算出した。	
3-1B-1-4	代替された天然資源由来のステンレス鋼生産量	3-1C-1-8と同値とした。	
3-1B-1-5	代替された天然資源由来の樹脂生産量	3-1C-1-9と同値とした。	
3-1C-1-1	使用済み製品処理量（アロケーション後）	1循環目は定数（1t）とした。これに循環回数を乗じて活動量を算出した。	
3-1C-1-2	発生したSRの埋立量	1A-1-2と同値とした。	
3-1C-1-3	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	実証テーマ③A社「解体パターン①」で得られた磁着物中の鉄量と実証テーマ⑤の磁着スクラップからのステンレス鋼と普通鋼の分離効率から機能単位あたりの鉄製錬原料回収量を推計した。それを粗鋼製造1t当たりの鉄製錬原料投入量で除して粗鋼生産量を算出した。 得られた1循環当たりの活動量に循環回数を乗じることで、活動量を推計した。	
3-1C-1-4	回収された原燃料向け樹脂量	実証テーマ③A社「解体パターン①」で得られる樹脂の品質がセメント原燃料向けの品質を満たしていないとみられることから、0とした。	

3-1C-1-5	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	機能単位あたりのセメント産業向け電炉スラグ回収量をセメント製造 1t 当たりの電炉スラグ投入量で除して算出した。 なお、機能単位あたりのセメント産業向け電炉スラグは、鉄製錬原料中のクロム量の減少に伴い増加すると仮定した。 得られた 1 循環当たりの活動量に循環回数を乗じることで、活動量を推計した。	
3-1C-1-6	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	実証テーマ③A 社「解体パターン①」で得られる銅製錬原料から機能単位あたりの銅製錬原料回収量を推計し、それを/電気銅製造 1t 当たりの銅製錬原料（スクラップ）投入量で除して算出した。得られた 1 循環当たりの活動量に循環回数を乗じることで、活動量を推計した。	
3-1C-1-7	回収されたステンレス鋼製錬原料由来のステンレス鋼生産量	実証テーマ③A 社「解体パターン①」で得られた磁着物中の鉄量と実証テーマ⑤の磁着スクラップからのステンレス鋼と普通鋼の分離効率から機能単位あたりのステンレス鋼製錬原料回収量を推計した。得られた 1 循環当たりの活動量に循環回数を乗じることで、活動量を推計した。	3-1-4
3-1C-1-8	回収された樹脂原料由来の樹脂生産量	本推計では 0 とした。	
3-1D-1-1	従来プロセスによって代替された機能単位あたりの鉄鋼生産量	3-1A-1-3 における活動量から 3-1C-1-3 における活動量を差し引いて算出した	

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 225 各プロセスにおける活動量の算定の考え方（自動車）

活動量			
参照番号	項目	算定の考え方	参考文献
3-2A-1-1	使用済み製品処理量（アロケーション後）	1 循環目は定数（1t）とした。これに循環回数を乗じて活動量を算出した。 なお、循環回数（3.8 回）は文献 3-2-1-から自動販売機の平均使用年数を算出し、評価時間（50 年）をそれらで除すことで算出した。（以下同様）	3-2-1
3-2A-1-2	発生した ASR の埋立量	文献 3-2-2、3-2-3 より機能単位あたりに発生した ASR 量を推計した。ここでは ASR が全量埋め立てられると仮定した。得られた 1 循環当たりの活動量に循環回数を乗じることで、活動量を推計した。	3-2-2 3-2-3
3-2A-1-3	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	文献 3-2-2 から自動車からの鉄製錬原料回収量を推計した。また、過去の MURC 調査から自動車由来の磁着スクラップ中のクロム含有率を 0.6%と仮定した。	3-2-2

		クロム含有率が第2等級規格(0.3%)を満たしていないことから、第2等級を満たすよう天然資源を原料として生産された銑鉄で希釈されると仮定し、粗鋼生産量を推計した。得られた1循環当たりの活動量に循環回数を乗じることで、活動量を推計した。	
3-2A-1-4	希釈用に投入される天然資源を原料とした機能単位当たりの銑鉄生産量	回収される磁着スクラップ中のクロム含有率を第2等級規格におけるクロム含有量基準で除して、希釈率を推計した。文献3-2-2から推計される自動車中の鉄製錬原料回収量に希釈率を乗じて算出した。	3-2-2
3-2A-1-5	投入された原燃料向け樹脂量	文献3-2-3より原燃料向け樹脂量を推計した。	3-2-3
3-2A-1-6	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	機能単位あたりのセメント産業向け電炉スラグ回収量をセメント製造1t当たりの電炉スラグ投入量で除して算出した。それぞれ、文献3-1-4、3-1-5を参考に以下式で算出した。 ※機能単位あたりの電炉スラグ回収量=セメント産業における電炉スラグ投入量×(機能単位当たりの鉄製錬原料回収量(事業実施前)/鉄製錬原料投入量) ※セメント製造1t当たりの電炉スラグ投入量=セメント産業における電炉スラグ投入量/セメント生産量 得られた1循環当たりの活動量に循環回数を乗じることで、活動量を推計した。	3-2-4 3-2-5
3-2A-1-7	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	文献3-2-2から機能単位あたりの銅製錬原料回収量を推計し、それを/電気銅製造1t当たりの銅製錬原料(スクラップ)投入量で除して算出した。得られた1循環当たりの活動量に循環回数を乗じることで、活動量を推計した。 なお、電気銅製造1t当たりの銅製錬原料投入量は、銅製錬原料(スクラップ)投入量を電気銅生産量で除して算出した(文献3-1-6)。	3-2-2
3-2B-1-1	代替された天然資源由来の燃料量	3-2C-1-5における活動量から3-2A-1-5における活動量を差し引いて算出した。	
3-2B-1-2	代替された天然資源由来のセメント生産量	3-2C-1-6における活動量から3-2A-1-6における活動量を差し引いて算出した。	
3-2B-1-3	代替された天然資源由来の銅生産量	3-2C-1-7における活動量から3-2A-1-7における活動量を差し引いて算出した。	
3-2B-1-4	代替された天然資源由来のステンレス鋼生産量	3-2C-1-8と同値とした。	
3-2B-1-5	代替された天然資源由来の樹脂生産量	3-2C-1-9と同値とした。	
3-2C-1-1	使用済み製品処理量(アロケーション後)	1循環目は定数(1t)とした。これに循環回数を乗じて活動量を算出した。	
3-2C-1-2	発生したASRの埋立量	3-2A-1-2と同値とした。	
3-2C-1-3	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	3-2A-1-3、実証テーマ③A社「解体パターン①」で得られた磁着スクラップの回収増減率、実証テーマ⑤の磁着スクラップからのステンレス鋼と普通鋼の分離効率から機能単位あたりの鉄製錬原料回収量を推計	

		した。それを粗鋼製造 1t 当たりの鉄製錬原料投入量で除して粗鋼生産量を算出した。なお、推計の結果、ここではクロム含有率が第 2 等級規格を満たしていると推計されたため、銑鉄による希釈は考慮していない。得られた 1 循環当たりの活動量に循環回数に乗じることで、活動量を推計した。	
3-2C-1-4	回収された原燃料向け樹脂量	3-2A-1-5 と同値とした。	
3-2C-1-5	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	機能単位あたりのセメント産業向け電炉スラグ回収量をセメント製造 1t 当たりの電炉スラグ投入量で除して算出した。 なお、機能単位あたりのセメント産業向け電炉スラグは、鉄製錬原料中のクロム量の減少に伴い増加すると仮定した。 得られた 1 循環当たりの活動量に循環回数に乗じることで、活動量を推計した。	
3-2C-1-6	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	実証テーマ③A 社「解体パターン①」で得られた銅製錬原料回収増加率から機能単位あたりの銅製錬原料回収量を推計し、それを/電気銅製造 1t 当たりの銅製錬原料（スクラップ）投入量で除して算出した。得られた 1 循環当たりの活動量に循環回数に乗じることで、活動量を推計した。	
3-2C-1-7	回収されたステンレス鋼製錬原料由来のステンレス鋼生産量	実証テーマ③A 社「解体パターン①」で得られた磁着物中の鉄量と実証テーマ⑤の磁着スクラップからのステンレス鋼と普通鋼の分離効率から機能単位あたりのステンレス鋼製錬原料回収量を推計した。得られた 1 循環当たりの活動量に循環回数に乗じることで、活動量を推計した。	
3-2C-1-8	回収された樹脂原料由来の樹脂生産量	本推計では 0 とした。	
3-2D-1-1	従来プロセスによって代替された機能単位あたりの鉄鋼生産量	3-2A-1-3 における活動量から 2C-1-3 における活動量を差し引いて算出した	

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 226 各プロセスにおける排出原単位の算定の考え方

排出原単位			
参照番号	項目	算定の考え方	参考文献
3-A-2-1	小型家電・家電処理 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	小型家電及び家電の破碎・選別処理にかかる CO <sub>2</sub> 排出量が等しいとして、参考文献 3-3-1 より本項目における原単位を引用した。	3-3-1
3-A-2-2	埋立処理 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	参考文献 3-3-2 より本項目における原単位を引用した。	3-3-2

3-A-2-3	(二次原料由来の) 粗鋼製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	参考文献 3-3-3 より本項目における原単位を引用した。	3-3-3
3-A-2-4	セメント製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量 (アロケーション後)	ポルトランド 1t の生産に係る CO <sub>2</sub> 排出量のうち、電炉スラグが原料に占める割合でアロケーションを行った。ポルトランド 1t の生産に係る CO <sub>2</sub> 排出量は参考文献 3-3-4 より本項目における原単位を引用し、炉スラグが原料に占める割合は参考文献 3-3-5 を参考に設定した。	3-3-4 3-3-5
3-A-2-5	(二次原料由来の) 銅製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	参考文献 3-3-6 より本項目における原単位を引用した。	3-3-6
3-A-2-6	(二次原料由来の) ステンレス鋼製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	参考文献 3-3-7 より本項目における原単位を引用した。	3-3-7
3-A-2-7	(二次原料由来の) 樹脂製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	参考文献 3-3-8 より本項目における原単位を引用した。	3-3-8
3-B-2-1	セメント製造 1t 当たりの天然資源燃料由来の CO <sub>2</sub> 排出量	ポルトランド 1t の生産に当たり、化石エネルギー起源の燃焼によって排出される CO <sub>2</sub> 量を参考文献 3-3-4 より引用した。	3-3-4
3-B-2-2	セメント製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量 (アロケーション後)	ポルトランド 1t の生産に係る CO <sub>2</sub> 排出量のうち、電炉スラグが原料に占める割合でアロケーションを行った。ポルトランド 1t の生産に係る CO <sub>2</sub> 排出量は参考文献 3-3-4 より本項目における原単位を引用し、炉スラグが原料に占める割合は参考文献 3-3-5 を参考に設定した。	3-3-4 3-3-5
3-B-2-3	(天然資源由来の) 銅製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	参考文献 3-3-9 より本項目における原単位を引用した。	3-3-9
3-B-2-4	(天然資源由来の) ステンレス鋼製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	参考文献 3-3-7 より本項目における原単位を引用した。	3-3-7
3-B-2-5	(天然資源由来の) 樹脂製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	参考文献 3-3-10 より本項目における原単位を引用した。	3-3-10 3-3-11 3-3-12
3-C-2-1	小型家電・家電処理 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	小型家電及び家電の破砕・選別処理にかかる CO <sub>2</sub> 排出量が等しいとして、参考文献 3-3-1 より本項目における原単位を引用した。	3-3-1

3-C-2-2	埋立処理 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	参考文献 3-3-2 より本項目における原単位を引用した。	3-3-2
3-C-2-3	(二次原料由来の) 粗鋼製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	参考文献 3-3-3 より本項目における原単位を引用した。	3-3-3
3-C-2-4	セメント製造 1t 当たりのセメント原燃料由来の CO <sub>2</sub> 排出量	ポルトランド 1t の生産に当たり、(化石起源) 廃棄物等の燃焼によって排出される CO <sub>2</sub> 量を参考文献 3-3-4 より引用した。	3-3-4
3-C-2-5	セメント製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量 (アロケーション後)	ポルトランド 1t の生産に係る CO <sub>2</sub> 排出量のうち、電炉スラグが原料に占める割合でアロケーションを行った。ポルトランド 1t の生産に係る CO <sub>2</sub> 排出量は参考文献 3-3-4 より本項目における原単位を引用し、炉スラグが原料に占める割合は参考文献 3-3-5 を参考に設定した。	3-3-4 3-3-5
3-C-2-6	(二次原料由来の) 銅製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	参考文献 3-3-6 より本項目における原単位を引用した。	3-3-6
3-C-2-7	(二次原料由来の) ステンレス鋼製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	参考文献 3-3-7 より本項目における原単位を引用した。	3-3-7
3-C-2-8	(二次原料由来の) 樹脂製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	参考文献 3-3-8 より本項目における原単位を引用した。	3-3-8
3-D-2-1	(二次原料由来の) 粗鋼製造 1t 当たりの CO <sub>2</sub> 排出量	参考文献 3-3-3 より本項目における原単位を引用した。	3-3-3

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 227 CO<sub>2</sub> 排出量削減効果算定時に用いた参考文献

記号	参考文献名
3-1-1	ダイドーグループホールディングス、2021、統合報告書 2021
3-1-2	鉄源協会、2021、わが国の鉄スクラップ国内需給
3-1-3	鉄源協会、2021、鉄鋼生産高推移
3-1-4	セメント協会、2021、セメントハンドブック (2021 年度版)
3-1-5	鉄鋼スラグ協会、2021、鉄鋼スラグ統計年報 (2020 年度版)

3-1-6	経済産業省、2021、生産動態統計年報 鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計編（2020年）
3-2-1	一般財団法人自動車検査登録情報協会、2021、公開統計情報
3-2-2	鐵と鋼 Vol.100 No.6, 山末ら、2014、使用済み自動車から得られる鉄スクラップの関与物質総量
3-2-3	経済産業省、2022、産業構造審議会産業技術環境分科会 廃棄物・リサイクル小委員会自動車リサイクルワーキンググループ 中央環境審議会循環型社会部会自動車リサイクル専門委員会合同会議、2020、自動車リサイクル制度の施行状況の評価・検討に関する報告書
3-2-4	鐵鋼スラグ協会、2021、鐵鋼スラグ統計年報（2020年度版）
3-2-5	経済産業省、2021、生産動態統計年報 鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計編（2020年）
3-3-1	LCA日本フォーラム、2006、LCAデータベース2020年度1版検索「破砕・選別(家電)混合処理」
3-3-2	長田守弘ら、2012、自動車破砕残渣（ASR）の資源化・処理に関するライフサイクルアセスメント
3-3-3	河瀬玲奈ら、2014、2050年における世界の鉄鋼部門からのCO <sub>2</sub> 排出量削減ポテンシャルの推計
3-3-4	セメント協会、2020、セメントのLCIデータの概要
3-3-5	セメント協会、2020、セメントハンドブック
3-3-6	JEMAI-LCAデータベース
3-3-7	ISSF、2018、ステンレスとCO <sub>2</sub> ：事実と科学的観察
3-3-8	海洋プラスチック問題対応協議会（JaIME）、2019、プラスチック製容器包装再商品化手法およびエネルギーリカバリーの環境負荷評価
3-3-9	METI、2019、産業構造審議会 産業技術環境分科会 地球環境小委員会 資源・エネルギーWG 資料7-3
3-3-10	LCA日本フォーラム、2003、LCAデータベース2020年度1版検索「オレフィン製造プロピレン」
3-3-11	LCA日本フォーラム、2003、LCAデータベース2020年度1版検索「ナフサ」
3-3-12	LCA日本フォーラム、2003、LCAデータベース2020年度1版検索「原油」

（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成





令和3年度環境省委託業務

令和3年度<脱炭素型金属リサイクルシステムの早期社会実装化に向けた実証事業>  
(包括的中間処理(ソーティングセンター4.0)の実現に向けた  
再資源化技術・システム実証)委託業務

成果報告書

令和4年3月

委託先:三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社  
(連絡先:持続可能社会部 清水・小川・迫田・園原・千賀)

※無許可の転載・掲載を禁じます。