

令和4年度環境省委託業務

令和4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5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：用語定義を参照）。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た。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、製品の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、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、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：用語定義を参照）。

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、中間処理事業者と素材産業間で生じる情報（成分情報等）の非対称性を解消可能な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：用語定義を参照）。

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、シュレッダースクラップ（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、忌避物質品位に応じた品質等級の規格案を作成した。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、事前に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。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。また、破碎・選別工程の電力消費量を計測し、システム上で産物と紐づけることで、CO₂排出量が明らかな再生資源を生産するシステムを構築した。新たな忌避物質管理技術として、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）の実証を行い、磁着物から普通鋼を64%、クロム系ステンレス鋼を79%濃縮した産物を回収可能な条件を特定した。環境影響改善効果としてCO₂排出量削減効果を推計した結果、事業成果の普及により、機能単位（製品1tの50年間の使用と再生資源規格の等級を満たす再生資源を原料とした各種素材（普通鋼、銅、セメント等）生産）当たり自動販売機、自動車それぞれで、年間194kg、5,509kgのCO₂排出削減効果が見込まれた。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、CO₂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を進めていく必要がある。特に、情報連携システム構築に向けて、代表性のあるデータ計測方法の確立、簡便かつ改竄できない情報記録・伝達方法の確立、少量多品種に対応した静脈産業の入出荷管理のあり方を変えていくことが、循環経済型ビジネスの確立に向けた課題となる。

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 FY2022, draft standards for the classes 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 "Moira" worked effectively; it was able to calculate the number of repellent substances contained in iron scraps by recording product numbers, removed parts, etc. and the electrical consumption for each raw material for steel-making by installing power loggers to shredding and sorting machines. Besides, sorting technologies that separate stainless steel in magnetic materials were demonstrated. In electromagnetic sorter, sorting conditions which were mostly able to separate carbon steels and martensitic stainless steels from magnetic materials, were identified. As a result, it is expected that the annual carbon dioxide (CO₂) emission will be reduced by 194 kg-CO₂ and 5,509 kg-CO₂ for vending machines and automobiles per functional unit (production of various materials (carbon steel, copper, cement, etc.) using recycled resources that meet the grades of recycled resource standards and uses 1 ton of products (vending machines and automobiles) for 50 years).

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 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
飯野智之 太平洋セメント（株） 環境事業部 営業企画グループ サブリーダー
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
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
武藤恭宗 太平洋セメント（株） 中央研究所 資源・環境研究部 環境技術チーム

（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（株） 事業統括室 室長
萩原慎一郎 リバーホールディングス（株） アドバイザー

(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) 持続可能社会部長	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
村中潤	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体を指す。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。 ソーティングセンター1.0 は普通鋼電炉向けのスクラップ、ソーティングセンター2.0 は普通鋼電炉及び主要な非鉄製錬業向けのスクラップを主な回収対象物とする。 ソーティングセンター3.0 は上記に加えて、セメント産業等向けの原燃料の提供も考慮し、選好物質のみでなく、忌避物質も管理対象とする。 ソーティングセンター4.0 は、中間処理事業者と素材産業（普通鋼電炉、非鉄製錬、セメント等）が、スクラップ中の選好・忌避物質の情報等を共有することで、取引成立の障害となりうる情報の非対称性が解消された中間処理を指す。
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。
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。
検知可能領域	電磁式ファインダー中の電磁センサーが試料の物性を有意に検知することができる仮想領域。検知可能領域内に存在する、または検知可能領域内を通過する試料の形状・金属種（導電率・透磁率）の影響を受けて、電磁式ファインダーの観測データが変化するものと想定している。1つの資料であっても、検知可能領域内に入らない部分は電磁センサーに影響を与えないと想定している。
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。

用語	定義・説明等
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。
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。
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。
GHG	Greenhouse Gas。温室効果ガス。

(注) 本文中の元素標記は漢字・仮名で統一した。なお、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. 事業第2年度までの実施内容・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）	6
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）	7
2.2.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）	9
2.2.5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）	11
2.2.6. 事業における環境影響改善効果・CO ₂ 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	16
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）	16
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）	17
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）	18
2.3.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）	18
2.3.5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）	19
2.3.6. 事業における環境影響改善効果・CO ₂ 排出量削減効果の評価	19
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	19
2.3.8. その他業務内容	19
3. 実施事項	20
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）	20
3.1.1. マテリアルフロー推計の実施	20
3.1.2. 技術仕様の特定に関する検討	23
3.1.3. 規格案の導入効果に関する検討	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. 解体・破碎・選別処理の実施	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	28
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）	31
3.3.1. 解体・破碎・選別処理の実施	31
3.3.2. 標準解体方法の検討	37
3.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）	39
3.4.1. 情報連携システム及び記録項目の改善検討	39
3.4.2. 中間処理工程におけるシステムの有効性及び作業負荷の検証	48
3.5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）	49
3.5.1. 電磁式ファインダーにおける選別条件の検討	49
3.5.2. 電磁式ファインダーにおける試作機の仕様検討	55

3. 6. 事業における環境影響改善効果・CO ₂ 排出量削減効果の評価	56
3. 6. 1. 各効果の評価における共通の前提条件・シナリオの整理	56
3. 6. 2. 資源効率性向上効果の検討	58
3. 6. 3. 天然資源採掘量削減効果の検討	64
3. 6. 4. CO ₂ 排出量削減効果	66
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	70
3. 7. 1. 金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討	70
3. 7. 2. 出口戦略の検討	70
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 実証委託業務」の現地視察会の開催	72
3. 9. 共同実施者等との打合せ	72
3. 10. 評価審査委員会の出席	75
4. 結果及び考察	76
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）	76
4. 1. 1. マテリアルフロー推計の実施	76
4. 1. 2. 成分分析の実施	80
4. 1. 3. 技術仕様の特定に関する検討	81
4. 1. 4. 規格案の導入効果に関する検討	92
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）	93
4. 2. 1. 解体・破碎・選別処理の実施	93
4. 2. 2. 回収した再生資源の評価及び規格案の改善検討再生資源の規格案の策定	94
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）	102
4. 3. 2. 標準解体方法の検討	108
4. 4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）	114
4. 4. 1. 情報連携システム及び記録項目の改善検討	114
4. 4. 2. 中間処理工程におけるシステムの有効性及び作業負荷の検証	115
4. 5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）	119
4. 5. 1. 電磁式ファインダーにおける選別条件の検討	119
4. 5. 2. 電磁式ファインダーにおける試作機の仕様検討	142
4. 6. 事業における環境影響改善効果・CO ₂ 排出量削減効果の評価	143
4. 6. 1. 資源効率性向上効果の検討	143
4. 6. 2. 天然資源採掘量削減効果の検討	145
4. 6. 3. CO ₂ 排出量削減効果	147
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	150
4. 7. 1. 金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討	150
4. 7. 2. 出口戦略の検討	152
5. まとめ	158
5. 1. 実証成果	158
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）	158

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）	158
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）	159
5. 1. 4.	情報連携システムの検討（実証テーマ 4）	159
5. 1. 5.	磁着物の高度選別実証（実証テーマ 5）	160
5. 1. 6.	事業における環境影響改善効果・CO ₂ 排出量削減効果の評価	160
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	161
5. 2.	今後の課題	162
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）	162
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）	162
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）	163
5. 2. 4.	情報連携システムの検討（実証テーマ 4）	163
5. 2. 5.	磁着物の高度選別実証（実証テーマ 5）	164
5. 2. 6.	事業における環境影響改善効果・CO ₂ 排出量削減効果の評価	164
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	164
6.	付録	166
6. 1.	学会発表、著書・論文投稿、報道、特許等の実績	166
6. 2.	忌避物質品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級—第 1 部： 銅、クロム	167
6. 3.	忌避物質品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級—第 1 部：塩素、クロム	174
6. 4.	資源効率性向上効果の算定根拠	181
6. 5.	天然資源採掘量削減効果（天然資源節約効果）の算定根拠	210
6. 6.	CO ₂ 排出量削減効果の計算根拠	211

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。

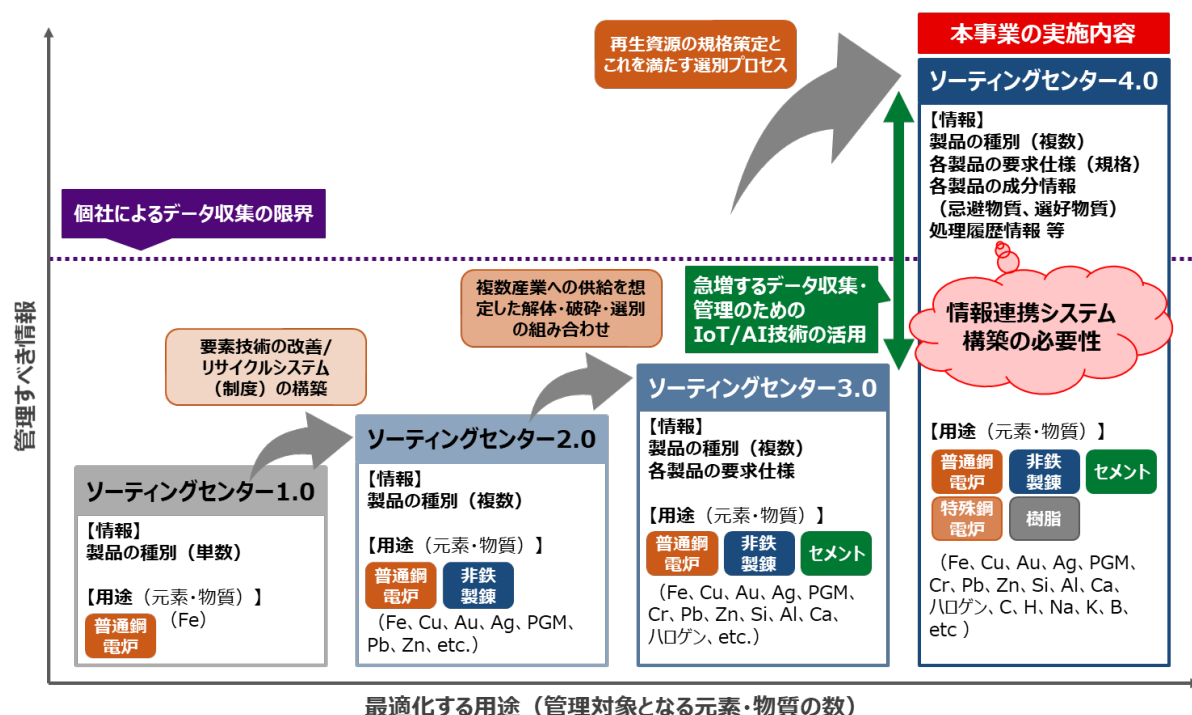
中国政府による廃棄物等の輸入規制以降、日本国内で処理が必要な使用済み製品やスクラップが増加している。従来、雑品等として国外で処理されていたスクラップを、既存の技術・システム（図表 1：ソーティングセンター1.0～2.0）で処理し続けると、一部の再生資源や破碎残渣、低品位基板等に忌避物質が集中し、鉄鋼・セメント産業等による資源循環を難しくさせる可能性がある。

処理困難物の一例として、製品の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存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¹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。

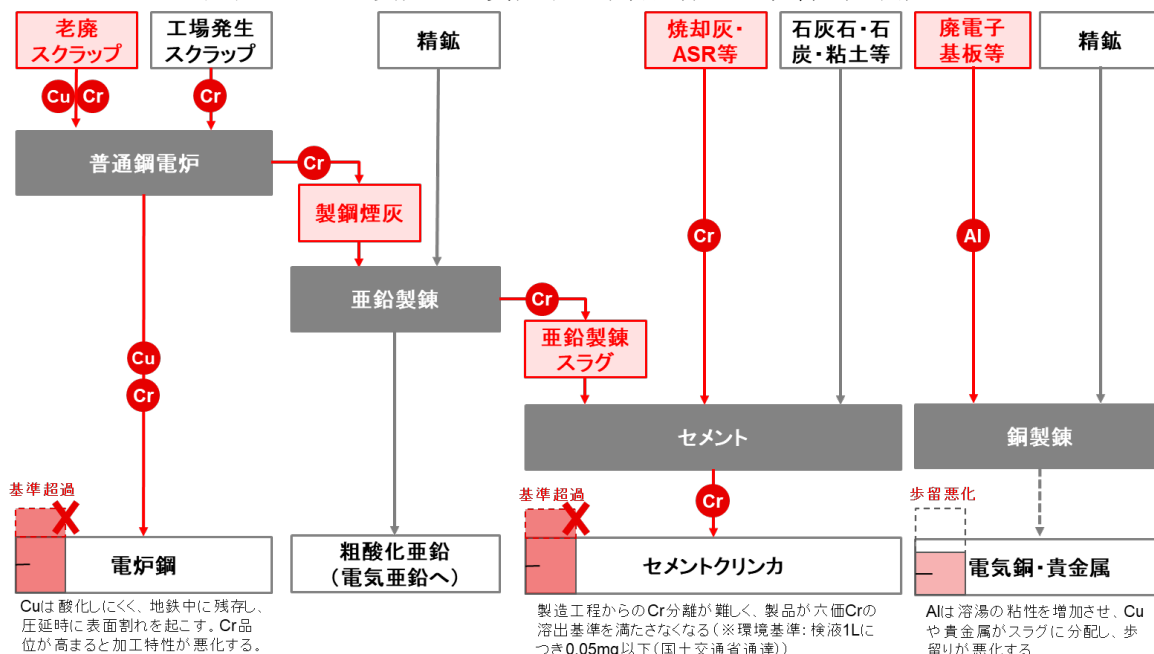
¹ 環境省「省 CO2 型リサイクル等高度化設備技術実証事業」（平成 30～31 年度）

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 再生資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）。

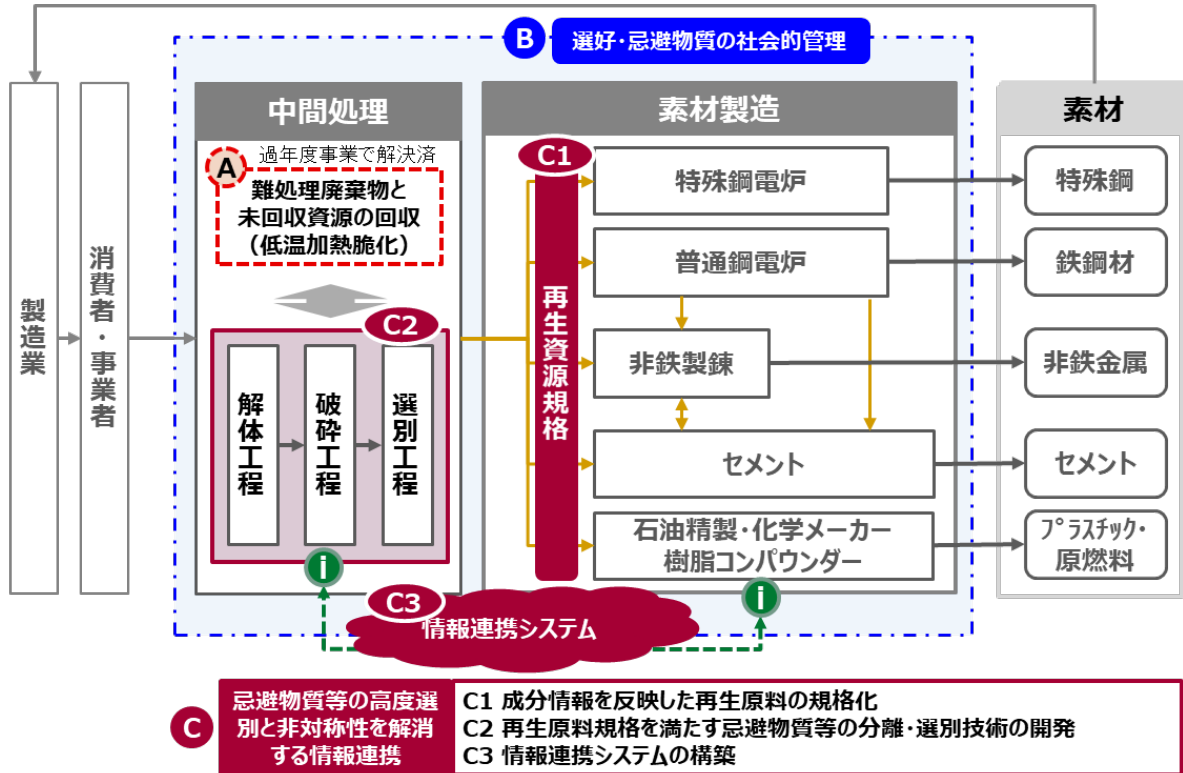
また、再生資源中の忌避物質の含有量が不明確であることで、情報の非対称性による「市場の失敗」が生じている。そこで、各素材産業の検収基準等から再生資源規格を具体化のうえ（図表 3：課題 C1）、これを満たす忌避物質等の分離プロセス（解体・破碎・選別工程）の見直しや要素技術の開発が必要になる（図表 3：課題 C2）。同時に、中間処理事業者と各素材産業間で客観的な取引を促すため、複数事業者で管理・運用可能な情報連携システムの構築が求められる（図表 3：課題 C3）。

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ンダー・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。

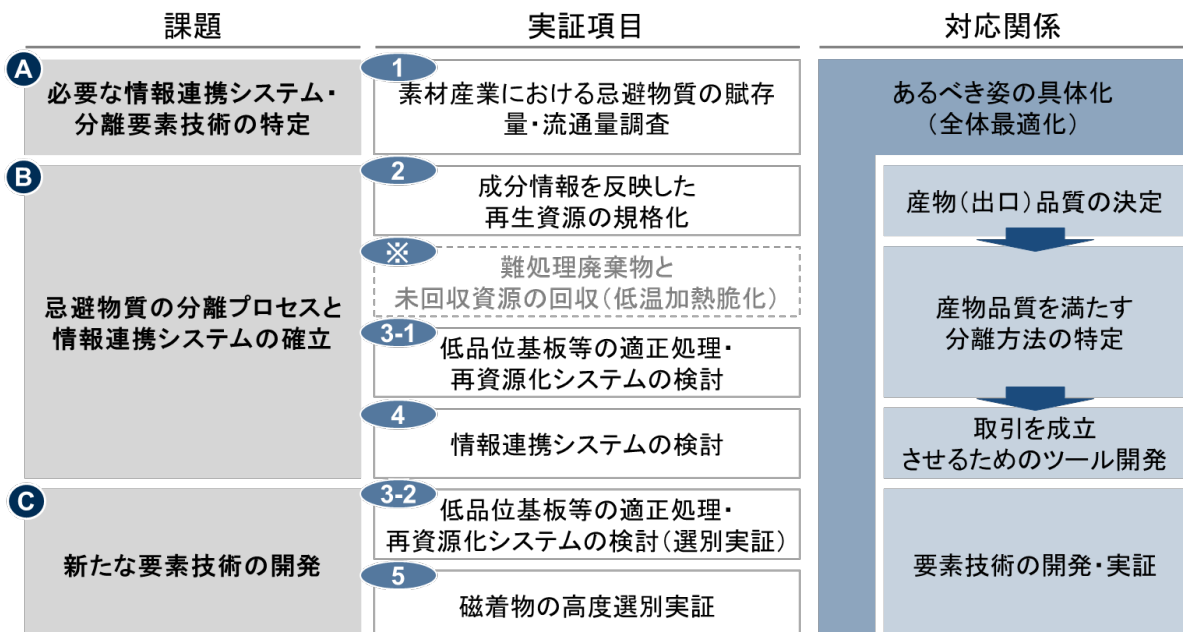
なお、事業の実施に際して、共同実施者等との打ち合わせを通じて、進捗確認や実証成果・課題に対する意見を交換した。また、現地視察会や評価審査会に参加し有識者からの助言を得ながら、円滑かつ効果的な事業実施に努めた。

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 CO₂ 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. 事業第2年度までの実施内容・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 事業第2年度までの実施内容と成果

事業初年度及び第2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。このうち、特にクロムを重点対象元素として取り上げ、廃棄物・副産物別の流通量にそれぞれの含有率を乗じることで、クロム純分換算の重量を算出し、マテリアルフロー図を作成した。

マテリアルフロー分析の結果、特殊鋼スクラップに含まれるクロムの半分程度は普通鋼電炉に流入していると推計された。このように普通鋼電炉に投入された特殊鋼スクラップが、電炉普通鋼や製鋼スラグ、普通鋼電炉ダストのクロム混入源になっていることが明らかになった。製鋼スラグはセメント産業、普通鋼電炉ダストは亜鉛製錬における主要なクロム混入源の1つであることがわかった。亜鉛製錬に投入された普通鋼電炉ダスト中のクロムはスラグに分配され、亜鉛製錬スラグの一部はセメント産業に投入される。非鉄製錬を経由して、普通鋼電炉ダストもセメント産業のクロム混入量の増加要因になっている可能性があることがわかった。

以上より、セメント産業に流入するクロムを削減するためには、普通鋼電炉に供給される製鋼原料（磁着物）から、特殊鋼スクラップを分離する必要があることが明らかになった。また、その他では、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と特定した。

銅製錬における主なクロム混入源はASR・SRであるとされた。そのため、セメント産業に銅製錬スラグを経由して流入するクロムを削減するには、ASR・SRからクロムを分離することが有効である可能性が明らかになった。

2.2.1.2 事業第2年度までの課題

事業第2年度まで、素材産業（鉄鋼、非鉄製錬、セメント）別に独立したマテリアルフロー分析を行ったが、一部、マテリアルバランスがとれていない箇所がある。全体像を俯瞰するためには、個別に作成したマテリアルフローの接続を行う必要があった。

また、クロムを対象としたマテリアルフロー推計の際に、一部、分析点数の少ない成分分析結果や文献値を使用している。推計精度を向上させるためには、代表性の高い成分情報の収集が必要である。特に、成分の変動が大きく、セメント産業の主たるクロム混入源である都市ごみ焼却灰や廃プラスチック（ASR・SR）等の成分情報の把握が求められる。また、クロム含有量は少ないものの、セメント生産に大量に使用されている石灰石等の実態解明も重要である。さらに、2.2.2で詳述する「成分情報を反映した再生資源の規格化」では、鉄スクラップ（シュレッダー）や廃プラスチック原燃料を対象に、忌避物質含有量に応じた規格の具体化を進めている。これらの規格を策定することが、セメントに流入するクロムの管理にどの程度貢献するか、評価することが求められた。

これまでクロムを中心に検討を進めてきたが、本年度事業では、クロム以外の忌避物質（例えば、規格案で分類等級を設定する銅、塩素等）を対象として、マテリアルフローの推計を進めていくうえでの課題を特定する必要があった。

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 事業第2年度までの実施内容と成果

事業第2年度は、国内主要企業（鉄鋼電炉事業者、セメント事業者）における製品のカタログ値（忌避物質の許容品位）及び製品あたりの原料投入重量等のデータを用いて鉄スクラップ（シュレッタースクラップ）における銅及びクロムの許容品位、廃プラスチック原燃料における塩素及びクロムの許容品位を推計した。推計結果をもとに、鉄スクラップ（シュレッタースクラップ）における銅品位に応じた品質等級規格案及びクロム品位に応じた品質等級規格案を作成した。

また、同様に廃プラスチック原燃料（セメント事業者向け）における塩素品位に応じた品質等級規格案及びクロム品位に応じた品質等級規格案を作成した。

2.2.2.2 事業第2年度までの課題

事業第2年度は国内主要企業（鉄鋼電炉事業者、セメント事業者）における製品のカタログ値（忌避物質の許容品位）及び原料使用比率の全国データ等を用いた推計をもとに品質等級規格案を作成した。上記の推計をもとに、素材産業の実態に沿った規格案を作成できたが、素材産業における実際の検収可否や既存規格（各社内基準等含む）との整合性を調査することが課題となった。

また、品質等級規格案を実際に事業者が活用できるよう、必要な事項（適用範囲、引用規格、用語及び定義、原則、忌避物質品位に応じた品質等級、分析試験、表示（品質等級の表示方法等）を明示、文書化する必要があった。将来的な規格案の導入に向けて、中間処理業及び素材産業において課題となる事項（対応する必要のある事項）についても整理する必要があった。これに加えて、事業第2年度に引き続き、中間処理業において、品質等級規格案における各品質等級の水準を満たす再生原料を実際に生産できるかどうか、実際の利用可能性についても確認することが課題となった。

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 事業第2年度までの実施内容と成果

破碎・選別後に回収した再生資源の忌避物質含有量を管理するには、解体工程で忌避物質を含む部位を適切に除去しておく必要がある。そこで、メーカーや年式によって構造や使用部材の変化が（自動車や家電等と比べると小さいと思われる）自動販売機をケーススタディとして取り上げ、自動販売機中の銅及びクロムを含む部品を特定した。使用済み自動販売機3台を対象に、最小部品単位まで分解し、成分分析を行った。

分析の結果、自動販売機中に、銅は主に冷却装置やリモコン、クロムは主にラックに使用されていることが明らかになった。こうした部品を取り外すことで、製鋼原料中の銅及びクロムの分離を目指した。銅やクロム含有部品を精緻に解体する方法、主な銅やクロム含有部品のみを解体する方法、特にこうした部品を解体しない方法の3通りで解体を実施した。

さらに、解体後の筐体を破碎・選別処理して、磁着物（製鋼原料）・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・クロム含有量は減少し、製鋼原料の品質が改善する傾向が確認された。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破碎・選別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。流動層選別装置及び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、それぞれ回収可能であることを確認した。

2.2.3.2 事業第2年度までの課題

自動販売機3台を対象に実施した、部品中の銅・クロム含有部品の特定結果をもとに、自動販売機のモデル（メーカー・セクション数）別に、銅・クロム含有量を推計した。具体的には、処理対象とする自動販売機のモデル（メーカー・セクション数）、事前に取り外した部品、破碎・選別時の磁着物回収率等から、回収される磁着物中の銅・クロム含有量を推定した。

こうして推定された銅・クロム含有量と、実際に解体・破碎・選別して得られた磁着物の成分値には乖離が生じていた。この要因として、推定値は事業第2年度に特定した銅・クロム含有部品のみを考慮している点が挙げられる。こうした部品のほかにも、自動販売機には銅・クロム含有部品が存在する可能性がある。また、自動販売機のモデル（メーカー・セクション数）別に、磁着物中の銅・クロム含有量を推定したが、自動販売機中の銅・クロム含有量は、年式や加熱・冷却方法等によって異なる可能性がある。

そこで、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で特定すること、年式や加熱・冷却装置の異なるモデルを対象に分析を行い、メーカー・セクション数に基づく銅・クロム含有量推定値の妥当性を確認する必要がある。また、磁着物中の銅・クロム含有量の推定方法が正しくとも、磁着物の成分を正確に分析できていない場合、推定値と実測値に乖離が生じる恐れがある。成分分析時のばらつきを軽減し、精度を向上できるような、サンプリング方法及び分析手法を検討することが求められた。

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を取り外せるような、標準的な解体方法の開発が期待された。加えて、解体治具の開発や、メーカーに対する易

解体設計の推進を働きかけていくことも課題であった。

湿式ジグ選別機では、銅が低比重側の産物にも分配された。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、単体分離性を向上させる必要がある。また、塩素は比重 1.0 未満の産物にも分配された。これは銅線が抜けた被覆線（PVC）の中空に気泡が残存した影響と考えられ、ハーネスの事前分離や中空内部に気泡を残さないような工夫が必要である。

さらに、回収物をマテリアルリサイクルの原料として利用するには、単一樹脂を回収できるまで選別する必要がある。事業第 2 年度の破碎・選別方法の組み合わせでは、単一樹脂を回収するのは困難であった。単一樹脂を回収するには、赤外線等を用いる必要がある。ただし、投資金額を考慮すると、解体の際に、特定樹脂を含む部品を取り外しておくほうが効果的な可能性がある。

以上より、まずは銅・クロムの管理を可能な標準解体方法が求められており、こうした解体方法によって、既述のハーネスの事前分離も同時に実現できる可能性がある。これに加えて、効率的に樹脂のマテリアルリサイクルを行うための標準解体方法の開発に向けた課題を整理していくことも必要であった。

2.2.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）

2.2.4.1 事業第2年度までの実施内容と成果

2.2.2 で検討す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、再資源化の障害となる忌避物質の成分管理を意識した解体は、一部の非鉄製錬向け再資源化原料を除いてあまり行われておらず、また再生資源の成分情報が明らかになっていない。そのため、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。

そこで、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・忌避物質の管理状況を複数事業者間で共同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。

事業第2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 (Progressive Web Apps) である「Moira」²を試作した。こうして試作したシステムについて、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。

磁着物中の銅・クロム含有量の低減を目指して、これら元素が含まれる部品を特定し、その解体情報を記録、また需要家に向けて提供できた。また、取引のために記録及び開示すべきデータ項目を具体化した。記録した情報を用いることで、後工程の原料メーカーが販売単位（購入したロット）に含まれる銅及びクロム量を推定できるようになった。

他方、実証を通じて、個体番号や型式の入力に要する工数の削減が課題となった。そこで、OCR (Optical Character Recognition/Reader) 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。OCR 機能によって読み込んだ情報の通信及び確認に時間を要したため、結果的に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では、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。

2.2.4.2 事業第2年度までの課題

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可能であることを実証した。他方、従来と比較して、情報を記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った。

事業第2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。しかし、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、アプリの更新作用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った。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

² 「Moira」はギリシャ神話の運命の三女神から名付けている。個々人の運命（寿命）は、Moirai（三女神：Moira の複数形）が糸を紡ぎ、割り当て、断ち切ることで定まるとされている。使用済み製品が再生資源に生まれ変わるまでの工程を断ち切ることなく、システム上で（糸のように）活動を記録・割り当てていくことを意識して名付けられた。

報の活用)等を検討し、課題を解決することが求められた。

さらに、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も期待される。例えば、中間処理工程における電力や燃料消費量を記録できれば、各中間処理事業者の CO₂排出量の把握や、リサイクル工程を含めたライフサイクル全体での CO₂排出量の把握に貢献できる。

また、事業出口の具体化のため、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、連携に必要な入力項目の追加等も検討していく必要があった。

2.2.5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）

2.2.5.1 事業第2年度までの実施内容と成果

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、磁着物中の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、普通鋼電炉で溶解される際、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いる。普通鋼電炉ダストは亜鉛製錬事業者が酸化亜鉛を製造する際の原料となるため、亜鉛製錬工程を経て発生する亜鉛製錬スラグにクロムが濃集してしまう。結果、クロムの混入を嫌うセメント事業者が亜鉛製錬スラグを原料として受け入れることを難しくしている（セメント事業者は、自社製品（セメント）から溶出する六価クロムが、溶出試験基準値を超えないように、セメント原料中のクロム濃度を厳しく管理しており、セメント原料へのクロムの混入を嫌う）。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。

そこで本事業初年度は、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ものの、処理能力や導入コストで他選別機よりも優位性のある電磁式ファインダーを選定し、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。

標準試料（均一な素材でできた立方体または直方体の試料）を複数種類（金属種、体積の異なる試料）用いた基礎試験の結果、電磁式ファインダー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。

本事業第2年度は、各選別装置における初年度の課題解決に取り組んだ。電磁式ファインダーでは、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））を用いた実証実験における測定条件を見直し、より優れた識別条件を模索した。

結果、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ができる可能性を明らかにした（分離効率88%）。また、コイル直径12.5mmの電磁センサーの観測値は、ベルトコンベアの接地面から0～10mmに存在する金属種の影響を受ける（10mm以上離れた場合、電磁センサーに与える影響は軽微である）ことを確認し、電磁センサーには、コイル直径等に応じた金属種の影響を受ける特定の範囲の存在可能性を明らかにした（本事業ではこれを「検知可能領域」と仮定している）。

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%）に選別できることを明らかにした。また、クロム/鉄ピーク強度比を一つの指標として閾値を設定すれば、表面粗度

の影響をほとんど受けず選別することができる（実試料の表面状態による影響を低減することができる）ことも明らかにした。

2.2.5.2 事業第2年度までの課題

事業第2年度までの課題は、実試料（特に普通鋼とクロム系ステンレス鋼）の識別精度の改善である。第2年度までの成果より、電磁センサーの近傍（ベルトコンベアの接地面から0～10mm）を通過する試料の形状や金属種が、観測データに影響を及ぼしていることを確認し、電磁センサーには、コイル直径等に応じた金属種の影響を受ける特定の範囲（検知可能領域）が存在する可能性が明らかになった。検知可能領域に存在する試料の金属種、体積の違いと観測値の相関をより詳細に把握することができれば、識別精度の改善に向けた試験条件を検討することができる。また、電磁センサー中の感度は、コイル直径の大きさに影響を受けると考えられる。より高感度のセンサーで検知すれば、金属種固有の因子（導電率・透磁率）が、電磁式ファインダーの観測値に及ぼす影響が大きくなり、識別精度が向上する可能性もある。

そこで、事業第2年度までに用いてきた電磁センサー（コイル直径12.5mm）よりも大きなコイル直径を用いて、電磁センサー中のコイル直径の大小が観測値に及ぼす影響を検証する必要があった。

2.2.6. 事業における環境影響改善効果・CO₂排出量削減効果の評価

2.2.6.1 事業第2年度までの実施内容と成果

事業初年度では、本事業における環境影響改善効果として、「資源効率性向上効果」および「天然資源採掘量削減効果」を評価した。また、CO₂排出量削減効果の評価も実施した。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、「自動販売機」を実証の対象としていたことから、各効果の評価においても同様に「自動販売機」を推計対象とした。

本事業で実装を目指す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。そのため、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」も推計対象とした。

具体的な推計方法は、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、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。天然資源投入量の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、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。CO₂排出量削減効果の推計では、「推計対象製品 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」を評価単位として推計を行った。

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。

事業第 2 年度の評価では、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、代表性の向上を意識した推計を行っており、環境影響改善効果、CO₂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 事業第2年度までの課題

事業第 2 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、CO₂排出量削減効果を推計したため、一部実態と乖離した仮定に基づいて推計を行った。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が求められた。

なお、事業第 2 年度の評価では、輸送や焼却処分等のプロセスを考慮していなかった。そのため、実態に即した評価を行うべく評価範囲の拡大を行うほか、実証データの活用や、最新データへの更新によって、具体性の向上、代表性の向上が必要であった。

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 事業第2年度までの実施内容と成果

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。

事業第2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、事業第2年度に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CO₂排出量を記録できるようにすれば、中間処理業におけるCO₂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。

事業第2年度まで、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、ASR中の炭素繊維強化プラスチック等が挙げられる。

他製品に横展開していくには、これら使用済み製品中の忌避物質含有部品等を特定し、標準解体方法と情報連携システム開発していく必要がある。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。

2.2.7.2 事業第2年度までの課題

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。事業第2年度まではクロムを対象に、流通状況の解明を試みたが、一層精緻化を進めるとともに、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。

また、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。まず、事業第2年度検討した規格案（シュレッタースクラップ、廃プラスチック原燃料）の発行に向けて取り組むことが求められた。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ことが必要になった。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、事業化の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ことが求められた。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った。

事業化に向けて、事業第2年度に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、規格案や分離プロセス（標準解体方法）、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た。

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）

2.3.1.1 マテリアルフロー推計の実施

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が、複数の素材産業間でこれらの情報は共有されておらず、またこれを再生原料の品質管理という観点から定期的に把握し、また改善していくための手段を持っていない。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のうち、事業第2年度までに推計を行った元素（銅、クロム、ハロゲン（塩素））を引き続きの対象とし、これらに加えて新たな元素（錫、鉛、ハロゲン（臭素））を主な推計対象元素の候補として、中間処理業から素材産業における流通量を調査した。特に、2.3.2の再生資源規格案で対象とする元素のうち、クロムについて重点的に調査を実施した。

2.3.1.2 成分分析の実施

2.3.1.1の実施に当たり、必要に応じて、成分情報の追跡が困難な素材を対象に、解体・破碎・選別処理を行い、取り外した部品や選別回収物等の成分分析を実施することとした。本年度事業では、共同実施者の協力を得て、より代表性の高い成分情報を入手する形で補完した。

2.3.1.3 技術仕様の特定に関する検討

2.3.1.1の推計結果を基に、各素材産業における再資源化忌避物質の主要な混入源を特定し、忌避物質の分離技術が必要な箇所を検証した。また、流通形態や各素材産業における要求水準を整理し、これを踏まえて、要求される技術仕様を検討した。

2.3.1.4 規格案の導入効果に関する検討

2.3.1.1の推計結果を基に、2.3.2で検討する再生資源規格案を導入することで、管理可能となる忌避物質の流通量（純分換算）を推計した。

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）

2.3.2.1 解体・破碎・選別処理の実施

2.3.3にて改善を検討するプロセス仕様案に基づいて、解体・破碎・選別処理を行い、実証で生産された再生資源の忌避物質品位を評価した。

2.3.2.2 回収した再生資源の評価及び規格案の改善検討

事業第2年度は国内主要企業（鉄鋼電炉事業者、セメント事業者）における製品のカタログ値（忌避物質の許容品位）及び原料使用比率の全国データ等を用いた推計結果、素材産業における実際の検収可否や既存規格との整合性調査をもとに品質等級規格案を作成した。鉄スクラップ（シュレッタースクラップ）における銅及びクロム品位に応じた品質等級規格案、また廃プラスチック原燃料（シュレッター処理等で得られる廃プラスチック原燃料）における塩素及びクロム品位に応じた品質等級規格案を作成した。

品質等級規格案を実際に事業者が活用できるよう、必要な事項（適用範囲、引用規格、用語及び定義、原則、忌避物質品位に応じた品質等級、分析試験、表示（品質等級の表示方法等）を明示、文書化した。このほか、将来的な規格案の導入に向けて、中間処理業及び素材産業において課題となる事項（対応する必要がある事項）についても整理した。

事業第2年度に引き続き、中間処理業において、各品質等級案の各品質等級水準を満たす再生原料の生産可能性を調査した。具体的には、実証テーマ③で生産された鉄スクラップ（磁着物）及び廃プラスチック原燃料（軽ダスト）の品位を分析し、品質等級規格案のどの品質等級に該当するものであるかを確認した。また、実際にセメント事業で取引されているシュレッターダスト（SR）の品位を分析し、品質等級規格案のどの品質等級に該当するものであるかを確認した。

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）

2.3.3.1 解体・破碎・選別処理の実施

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。事業第2年度まで、2.3.2で検討する再生資源規格案を充足できるよう、廃棄物等（使用済み自動販売機等）中の忌避物質含有部品の特定と、これら部品を事前解体する処理プロセスの実証を行った。

しかし、事前に解体した部品から推定される産物品位と、実際に回収した産物品位には乖離が生じていた。そこで、こうした差分の解消を目指し、忌避物質含有部品の追加特定を行い、選好・忌避物質の含有量が多い部品を追加で特定し、必要に応じて、解体・破碎・選別プロセス案の見直しを行った。そのうえで、産業廃棄物等（使用済み自動販売機）を対象に、解体・破碎・選別試験を実施した。

2.3.3.2 標準解体方法の検討

2.3.3.1の試験結果及び2.3.2.2の評価結果を踏まえて、規格案の各等級を充足するための、標準的な解体方法案の具体化を検討した。

2.3.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）

2.3.4.1 情報連携システム及び記録項目の改善検討

現在の取引では再生資源の成分情報が明らかにはなっておらず、素材産業側の客観的な評価が困難である。事業第2年度までは、中間処理業と各素材産業との間で客観的な取引を促すため、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・運用する情報連携システムの仕様案を検討し、実際に中間処理の現場で実証した。

情報連携システムの活用により、従来と比較して、情報を記録・入力する工数が必要となるため、使用端末やアプリの改善等により、こうした入力作業を効率化できる可能性を明らかにした。また、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ったため、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）等を検討した。

さらに、スクラップの品質管理のみでなく、中間処理工程におけるエネルギー消費量（もしくはCO₂排出量換算されたもの）をはじめ、非財務情報の開示に向けた記録項目の追加及び情報連携システムへの入力方法を検討した。

2.3.4.2 中間処理工程におけるシステムの有効性及び作業負荷の検証

2.3.3.1で処理を実施する際に、試作したシステムを用いて処理情報等の記録を行い、作業者の作業負荷を確認した。作業負荷の増加・軽減効果を検討したうえで、導入に向けて、情報記録方法や情報連携システム、記録に使用するデバイスの改善点を検討した。

2.3.5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）

検知可能領域に存在する試料の金属種、体積の違いと観測値の相関をより詳細に確認するべく、標準試料を用いた試験を実施した。

電磁センサーの感度はコイル直径に影響を受けると考えられる。そこで、検知可能領域と電磁センサーのコイル直径の関係を明らかにするため、直径の大きなコイルを搭載した電磁センサーを用いて、標準試料、実試料を対象とした試験も行った。また、これらの検討結果を踏まえ、クロム系ステンレス鋼やモーターコアを識別する電磁式ファインダーの試作機の仕様等を具体化するべく、3D カメラや AI 等を用いた体積測定プログラムの改良や開発の可能性を検討した。

2.3.6. 事業における環境影響改善効果・CO₂ 排出量削減効果の評価

事業における環境影響改善効果として、資源回収による「天然資源採掘量削減効果」及び「資源効率性向上効果（回収した資源をより利用価値の高い資源とする効果）」が見込まれることから、これらの評価方法を明確化するとともに、CO₂ 排出削減量を算出した。

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の可能性を検討した。これに加えて、本年度事業で対象とした自動販売機のみでなく、自動車や家電・小型家電への応用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を検討した。

2.3.8. その他業務内容

以下を行った。

- 「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
- 共同実施者等との打合せ
- 評価審査委員会の出席
- 報告書の作成
- 実証事業の目標設定
- 関係者間の連携

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. マテリアルフロー推計の実施

3.1.1.1 マテリアルフロー推計の方法論

本調査では、忌避物質の流通構造を把握するために、マテリアルフロー分析（Material Flow Analysis）と呼ばれる手法を採用した。マテリアルフロー分析とは、一連のライフサイクルを対象に、明確なシステム境界線を設けて、対象物の流れを把握したうえで、評価・解析するものである。

マテリアルフロー分析の手法は、大きく3つに分類できる（「積み上げ法（Bottom Up Approach）」、「投入産出法（Input-Output Accounting Approach）」、「ハイブリッド法（Hybrid Approach）」）。これらには、それぞれ長所と短所があり、算出対象やデータの入手可能性等を踏まえて、最適な手法を選択する必要がある。

「積み上げ法」は、各種統計資料等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、注目している素材や元素レベルでの構成等を乗じることで推計を行う。多くの製品において、台数や個数の把握は困難であり、さらに同種の製品であっても個別製品ごとにその組成や材料構成は大きく異なる点を考慮できない点が課題である。

「投入産出法」は、産業連関表を援用する方法である。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描いた統計表である。「投入産出法」では、これを物量単位へと変換することによって、マテリアルフロー分析を実施する。部分的に物量への換算モジュールを実装する手法から、完全な物量ベースの投入算出表（Physical Input Output Table: PIOT）と呼ばれるものを用意する手法まで、数多くの分析事例がある。

「投入産出法」の利点は、マクロ経済を完全に網羅していることが担保されている産業連関表を基礎としているために、これを変換して推計するマテリアルフローも網羅性と完全性が担保される点にある。他方で、マクロ経済にとってバランスのとれた産業分類によって構成されているために、個別資源・元素・素材等のマテリアルフローを推計する、分類の粗い部分や、非常に分類が細かい部分が混在する等の問題点がある。なお、任意のシステムに対して、投入と産出だけを分析することで、詳細な情報を捨象する「トップダウン法」も存在する。

「ハイブリッド法」は、積み上げ法と投入産出法、また場合によっては純粋なトップダウン法のアプローチを適宜組み合わせた手法である。現状、単一の推計方法のみで、目標とするマテリアルフローを把握可能な情報は整備されていない。そのため、本調査では「ハイブリッド法」を採用する。具体的には、「積み上げ法」を基にしたボトムアップ的アプローチで推計を行いながら、ヒアリングを参考にトップダウン的に、つまり総量を統計情報等から得たうえで按分比率をヒアリング等から得ることで、一部の流通量を推計した。

3.1.1.2 課題の設定

本事業では、使用済み製品等から回収される再生原料の品質を管理することで、素材産業の資源効率向上を目指している。

しかし、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が、複数の素材産業間でこれらの情報は共有されておらず、またこれを再生原料の品質管理という観点から定期的に把握し、また改善していくための手段を持っていない。各素材産業に個別最適化された原料調達が進んだ場合、特定の産業に忌避物質が集中してしまう恐れがある。その結果、例えばセメント産業のように、様々廃棄物や副産物を受け入れている産業が、副産物や廃棄物を活用できなくなる可能性がある。

そこで、素材産業に投入される忌避物質（特に、複数産業を経由して流通されるもの）を対象に、その流通構造を解明し、管理すべき対象物を特定することを目指した。

3.1.1.3 バウンダリ・対象元素の設定

本調査で推計対象とする素材産業とは、国内での取扱量が多いベースメタルを中心に、鉄鋼電炉業、非鉄製錬業（銅製錬、鉛製錬、亜鉛製錬）を想定した。これに加えて、こうした素材産業から排出される副産物・廃棄物等を受け入れるセメント産業を基軸に考えることとした。

使用済み製品には、鉄や銅等のベースメタルのみでなく、プラスチックも使用されている。そのため、本来はプラスチック素材産業も推計対象にすることが望ましい。しかし、プラスチック素材産業（石油精製、化学メーカー等）のすべてを推計対象とした場合、非常に複雑なフローを推計することとなる。必要な成分情報等も膨大になり、データの入手可能性も課題となる。そのため、プラスチックは静脈側（プラスチックリサイクル産業）に限定して、推計対象にすることとした。

推計対象候補とする産業における忌避物質として、クロム、銅、錫、鉛、ハロゲン等が挙げられる。クロムはセメント製造工程及び電炉製鋼工程における忌避物質である。セメント製造工程で分離することが困難であり、クリンカ中に水溶性の六価クロムの状態で残存してしまう。その結果、国土交通省が定めるセメント製品の溶出試験基準を満たさず、セメント製品が出荷できなくなってしまう。また、鋼材中のクロムが増加すると、冷間加工や深絞り性を損なうことが知られている。銅や錫も電炉製鋼工程における忌避物質である。現状の電炉製鋼工程では除去できず、鋼材中にトランプエレメントとして残ってしまう³。銅や錫がトランプエレメントとして鋼材中に濃化すると、高温延性の低下によって連続鋳造スラブに割れが発生したり、熱間脆性により熱間圧延段階での割れの発生原因となったりする。

ハロゲンの中でもその存在量の大きさから、塩素に対する懸念は極めて大きいことが報告されている⁴。塩素が燃焼した際、塩化水素ガスが発生し、設備を腐食させる要因になるほか、セメント製品中の含有量が多くなると、セメントから塩化物が浸出して鉄筋コンクリートの鉄筋腐食を引き起こすことがある。また、非鉄製錬工程では、銅や銀がハロゲン化物として揮発さ

³ 水上義正, 武内美継, 野呂克彦, 「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

⁴ 齋藤優子, 熊谷将吾, 亀田知人, 吉岡敏明, 「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

れ、歩留まり悪化を引き起こす原因にもなりうる。

3.1.1.2 で記載した通り、特に複数産業間を流通する忌避物質の管理では容易ではない。先に挙げた忌避物質のうち、クロムの場合、鉄鋼電炉から排出される普通鋼電炉ダストにクロムが含まれ、それが非鉄製錬（亜鉛）で再資源化される際、今度は亜鉛製錬スラグ中にクロムが濃集する。そのスラグはセメント原料として利用されることになるが、クロムが濃集しているために、セメント製品に適用される溶出試験基準を満たさず、結果として出荷できなくなってしまう。このように、クロムは3業種以上にまたがって管理がもとめられる忌避物質であり、本事業で想定するような事業者間連携なしには忌避物質管理ができないため、優先的に取り組むべき忌避物質としてクロムを取り上げた。

これに加えて、流通量が大きく、忌避物質管理の必要性が大きいものとして、鉄鋼電炉の忌避物質である銅を取り上げたほか、多数の素材産業で問題視されているハロゲンのうち、特に存在量の大きい塩素を取り上げた。

また、推計の範囲（システムバウンダリ）は、中間処理業から各素材産業（鉄鋼電炉、非鉄製錬、セメント、プラスチックリサイクル産業）への流通量（バルク量・対象元素の含有純分量）、素材産業間で取引される副産物・廃棄物等（スラグ、ダストなど）に伴う流通量（バルク量・対象元素の含有純分量）を中心に検討することとした。

3.1.1.4 データの収集

マテリアルフロー推計に必要なデータは、主に各種統計書や論文等から収集した。文献値が不足している成分情報や、文献値の代表性が十分でないと考えられる場合には、共同実施者から成分情報の提供を受けた。

共同実施者でも成分情報を保有していない場合や、成分情報の共有が困難な場合には、代表的な試料の提供を受け、それを化学成分分析にかけて対象元素の含有量を明らかにした。

3.1.2. 技術仕様の特定に関する検討

3.1.2.1 成分分析結果を踏まえたマテリアルフロー図の作成

3.1.1.3 で検討したシステムバウンダリの範囲内を対象に、3.1.1.4 で整理並びに追加で収集した流通量や成分データをもとに、マテリアルフロー図（都市鉱山鉱床分布図）を作成した。

3.1.2.2 今後必要とされる分離技術に関する検討

3.1.2.1 の推計結果をもとに、各素材産業における再資源化忌避物質の主要な混入源を特定することで、今後の流通量把握に向けた重点評価ポイント（都市鉱山探査計画図）と、忌避物質の分離技術が必要とされる箇所を見い出すためのツール開発を目指した。

効果的に忌避物質を管理するためには、各素材産業に対する影響度の大きな混入源を把握する必要がある。そこで、推計対象範囲で流通する原料のうち、どの原料が特定の産業における忌避物質混入要因として、どの程度の影響を与えているか、直接的・間接的な影響の双方を考慮することとした。そのためには、マテリアルフロー推計結果のみでは十分でなく、追加での手法を採用することが求められる。

そこで、感度分析（特に大域的感度分析に類する）手法に注目した。Pianosi et al.⁵が実施した、環境モデルの感度分析手法に関する整理を参考に、本調査における影響度を評価手法を検討した。

Pianosi et al.によれば、感度分析を用いる目的によって、感度分析の方法論は、結果に対して無視できるほどの影響しか持たない変数を特定する **Screening**、結果に対して持つ影響に応じて順位を作る **Ranking**、重大もしくは極端な結果を導くインプット変数の範囲を特定する **Mapping** の3つのカテゴリに分類される。

本事業の目的を踏まえて、インプット変数にあたる忌避物質の混入要因が、どの程度重大な忌避物質の混入効果をもたらすのかを把握するための **Mapping** を行うこととした。具体的な手法として、目的とする値（素材産業への忌避物質流入量）とパラメータ（忌避物質の混入要因）の関係を視覚的に描き、また統計的な優位性を検定可能な感度分析手法である **Regional Sensitivity Analysis (RSA)** を用いた。

RSA とは、着目した結果を生み出すインプット変数の条件を、変数の確率分布から特定する手法である⁶。定性的なアウトプットに対しても適用可能であること、変数の影響度の大きさを測る **Ranking** にも利用できることが特徴である。本事業での **RSA** は、以下に示す5つの段階で実施した（図表5）。

⁵ F. Pianosi et al., “Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow,” *Environmental Modelling and Software*, vol. 79, pp. 214–232, May 2016, doi: 10.1016/j.envsoft.2016.02.008.

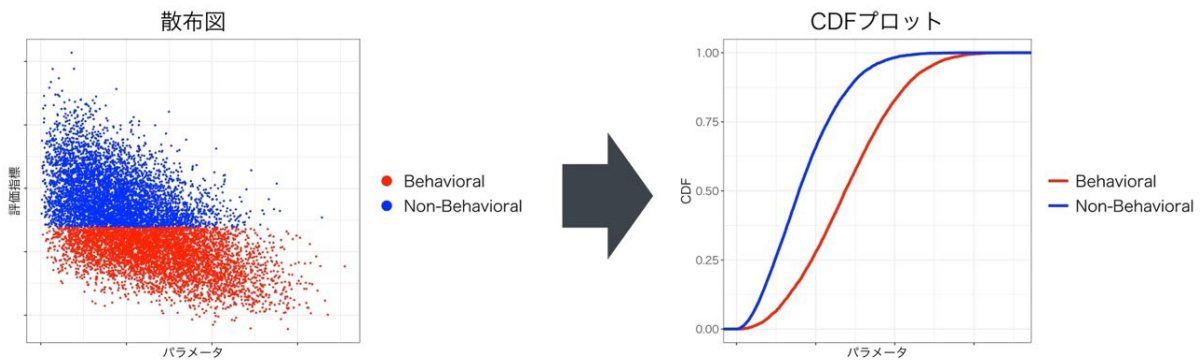
⁶ A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo, and M. Ratto, “Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models.” 2004.

図表 5 Regional Sensitivity Analysis (RSA) の実施フロー

- ① サンプルの抽出元となる事前パラメータの分布と、結果を二分するための境界値を設定する。
- ② モンテカルロのサンプリング設計に基づいたパラメータセットを用いて、モデルを実行する。
- ③ モデルの実行結果を、着目したいもの (Behavioral) とそれ以外 (Non-Behavioral) の 2 群に分割する。
- ④ 各パラメータ値について、二分したグループそれぞれの累積分布関数 (Cumulative Distribution Function : CDF) をプロットする (図表 6)。
- ⑤ 各グループについて、インプットの分布 (累積分布関数) に着目し、両者の間に有意な差があるかどうか検定 (コルモゴロフ・スミルノフ検定 : KS 検定) を行う。

(出所) X. Song, J. Zhang, C. Zhan, Y. Xuan, M. Ye, and C. Xu, “Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications,” J Hydrol (Amst), vol. 523, pp. 739–757, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.02.013.をもとに東京大学村上研究室作成

図表 6 散布図から累積分布関数 (CDF プロット) への変換



(出所) 東京大学村上研究室作成

図表 5 中の⑤で言及した二標本に対する KS 検定⁷を解説する。KS 検定とは、二つの母集団の確率分布が異なるものであるかを調べる仮説検定の一種である。

ここで、標本数 m の標本 X 、標本数 n の標本 Y について考える。 $F(x)$ 、 $G(x)$ をそれぞれの未知の分布関数として定義する。両側検定を行う場合、帰無仮説 H_0 、対立仮説 H_1 は、それぞれ以下のように表される。

$$H_0: F(x) = G(x) \quad \forall x \in \mathbb{R} \quad \text{式 1}$$

$$H_1: F(x) \neq G(x) \quad \exists x \in \mathbb{R} \quad \text{式 2}$$

次に、標本 X と標本 Y の累積分布 $S(x)$ をそれぞれ求め、上記の 2 つの累積分布の差の絶対値の最大値である検定統計量 $d_{m,n}$ を算出する。

$$d_{m,n} = \sup_x |S_n(x) - S_m(x)| \quad \text{式 3}$$

⁷ W. J. CONOVER, “PRACTICAL NONPARAMETRIC STATISTICS SECOND EDITION.” John Wiley & Sons, 1980.

m 、 n かつ有意水準によって算出される基準の値より $d_{m,n}$ が大きい場合、帰無仮説は棄却される。例えば、 $m > 20$ かつ $n > 20$ を満たし、有意水準を5%としたとき、以下の式を満たす場合に帰無仮説は棄却され、対立仮説 H_1 が採択される。

$$d_{m,n} > 1.36 \sqrt{\frac{m+n}{mn}} \quad \text{式 4}$$

検定統計量 $d_{m,n}$ は、着目したいサンプル集団とそれ以外のサンプル集団との間で、パラメータのCDFが示す最大のギャップを表している。すなわち、KS検定で有意を示しているパラメータについては、 $d_{m,n}$ を「着目する評価指標（今回は素材産業への忌避物質流入量）に対してあるパラメータ（今回は忌避物質の混入要因）が結果として持つ影響力の大きさ」として捉えることができる。

2つのCDFの位置関係によって、パラメータが評価指標に対して与える影響の方向性を認識することができる。例えば、着目したい結果群（Behavioral）のCDFが、それ以外の結果群（Non-Behavioral）に比べて右側に寄っている場合、そのパラメータの値が大きいほど着目したい結果を導きやすい傾向を持つことを示している。

一方、 $d_{m,n}$ は全てのパラメータを同時に動かした結果として出てくるデータセットをもとに計算されている。他のパラメータからの影響を受ける値となっているため、絶対的な値ではなく、他の指標と比較した際の相対的な値について論じるべきであることには注意が必要である。

RSAでは、着目したい結果とそれ以外の結果の境界を分析者が決定するため、基準の決定が主観的になりうることが課題である。これを解決する一つの方法として、着目するアウトプットの値を順序づけし、上から特定の数（たとえば10）のグループに分割したうえで、各グループの確率分布関数を比較することが挙げられる⁸。

RSAでは、変数間での高次の相互作用を分析することはできない。2つの分布に有意な差が見られなかったことが、投入変数が結果と無関係であることを直接意味するわけではない。KS検定の結果を解釈するうえでこの点には注意すべきである。

⁸ T. Wagener, D. P. Boyle, M. J. Lees, H. S. Wheater, H. v Gupta, and S. Sorooshian, “A framework for development and application of hydrological models,” *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 5, no. 1, pp. 13–26, 2001

3.1.3. 規格案の導入効果に関する検討

セメント産業に流入するクロムのうち、3.2 で検討する再生資源の規格案が仮に適用された場合、どの程度のクロム流通量に影響を与えることが可能であり、その結果、どの程度の再生資源でクロム品位を低下させることができるかを推計した。

3.2 では、セメント産業に流入するクロムを管理するため、鉄シュレッダースクラップ及び廃プラスチック原燃料（セメント産業向け）を対象とする規格案を策定した。このうち、鉄シュレッダースクラップは多様な使用済み製品から回収されるため、その品位は様々であり、代表的なクロム純分率の設定が困難である。こうした理由から、4.1.1 では、鉄スクラップの規格別ではなく、発生源別（加工、老廃）と用途別（自動車等）で推計を実施している。

他方、セメント産業に投入される廃プラスチック原燃料も、その性状は多種多様である。そのため、セメント産業で使用されている廃プラスチック原燃料すべての忌避物質含有量を把握することは容易ではない。そこで、4.1.3.1 (1) の結果より、セメント産業へのクロム混入に大きな影響を有する原料（ここではシュレッダーダストを想定）を評価対象に選定した。

現状及び規格案導入後にセメント産業に投入されるクロム（純分量）を推計し、この差分を規格案導入によって管理可能となる忌避物質（クロム）量とした。規格案導入後は3つのシナリオ（シュレッダーダストのうち、それぞれ20%、40%、60%が第1等級に従って取引される）を設定した。

シュレッダーダストが他の素材産業に投入され、こうした素材産業から発生するダストやスラグをセメント産業が活用している場合、シュレッダーダストを直接セメント中のクロム含有量を高めるだけでなく、こうした他産業を経由して間接的な影響を及ぼし得る。そこで、こうした他産業を経由して、セメントに投入されるクロムのうち、規格案の導入によって管理される重量を推計した。

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. 解体・破碎・選別処理の実施

3.3 では使用済み自動販売機を対象として、複数の方法（部品回収パターン）で解体したのち、破碎・選別処理を行い、鉄スクラップ、シュレッダーダスト（SR）、非鉄スクラップ（ミックスメタル）をそれぞれ回収した。それぞれの解体方法で、シュレッダー後の鉄スクラップ産物が、鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級規格案（図表 64 及び図表 65）のうち、どの等級（銅・クロムともに）に該当しているかを確認した。また同様に、シュレッダーダスト（SR）が、廃プラスチック原燃料の品質等級規格案（図表 66 及び図表 67）のうち、どの等級（塩素・クロムともに）に該当するかを確認した。

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 品質等級規格案の作成

事業第2年度に作成した品質等級規格案をもとに、素材産業における実際の検収可否や既存規格との整合性を調査した。これらの調査結果に加え、事業第2年度に実施した鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）中の銅及びクロムの許容品位（推計）、廃プラスチック原燃料における塩素及びクロムの許容品位（推計）をもとに、品質等級規格案を精査した。

既存規格との整合性調査では、本事業で作成した品質等級案と既存の類似規格等（鉄スクラップまたは廃プラスチック原燃料を対象に含み、忌避物質品位に応じた品質等級を定めるもの）の有無、及び類似規格等における品質等級との乖離の有無を整理した。

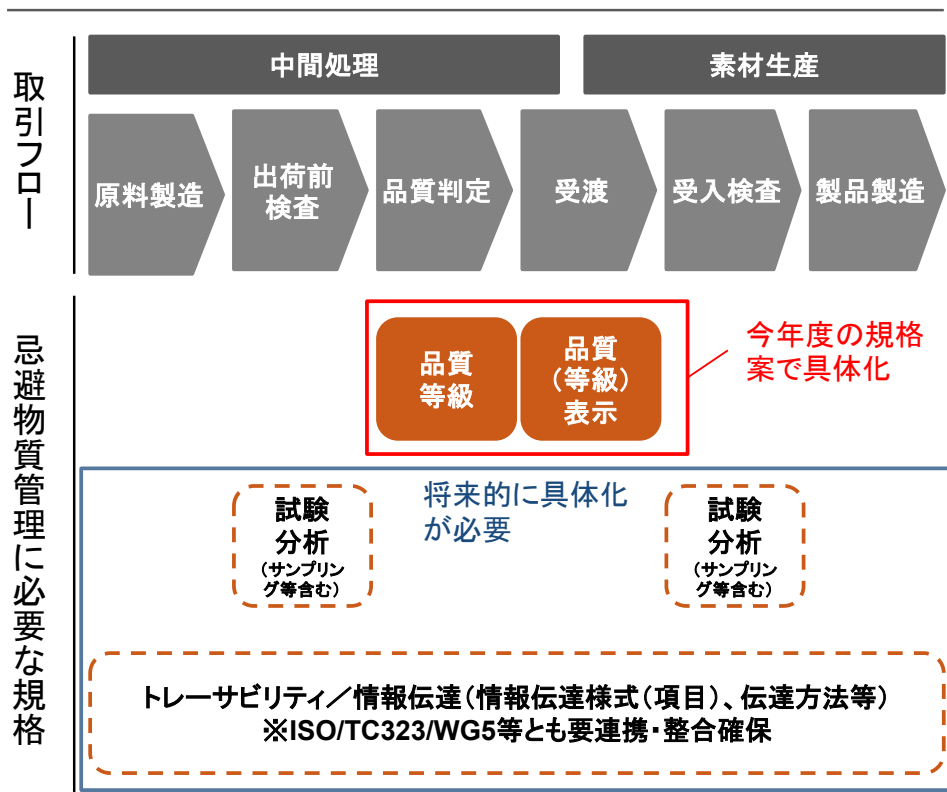
鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）を対象として含み、忌避物質品位に応じた品質等級を定める既存規格は確認できなかったが、鉄スクラップの忌避物質品位に関する基準を設けるものとして、自動車リサイクル法第31条に基づく全部再資源化制度があるため、同制度の忌避物質品位に関する事業者の内部基準等を確認し、本事業で作成した品質等級案との乖離の有無を整理した。

廃プラスチック原燃料を対象として含み、忌避物質品位に応じた品質等級を定める既存規格としてISO 21640:2021 (Solid recovered fuels — Specifications and classes)がある。ISO21640はSolid recovered fuels（廃棄物固形燃料）を対象とし、品質等級を定める規格である。両規格ともに塩素品位に応じた品質等級を定めているため、これらの整合性を確保する必要がある。ISO21640における塩素品位に応じた品質等級を整理し、本事業で作成する品質等級規格案をこれと整合するよう見直した。

本事業では、再生資源の品質等級、並びに、取引する再生資源に関する品質等級情報の表示事項を規定し、忌避物質が適切に管理された再生資源の取引及び使用の促進を図ることを目的として、品質等級及び品質等級の表示に関する文書として品質等級規格案を作成した。

規格文書案の作成にあたっては、分類基準を規定する既存規格及び製品中の化学成分の含有量の要求を規定した既存規格をもとに構成及び内容を作成した。また、上記で作成した内容が現場の実態と乖離していないかを確認するため、ユーザーとなる事業者（中間処理事業者、セメント事業者、普通鋼電炉事業者）にヒアリングを行った。ヒアリングを踏まえ、規格文書案の内容を見直した。

図表 7 規格文書案の対象範囲



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.2.2.2 忌避物質品位に着目した品質管理上の課題整理

本事業では品質等級規格案を作成したが、忌避物質品位に着目した厳密な品質管理を行うためには、この他にも対応すべき事項があると考えられる。そこで、本事業では、中間処理事業者、鉄鋼電炉事業者及びセメント事業者等へのヒアリングをもとに、品質管理上の課題を網羅的に整理した。

主に品質等級水準を満たす解体方法、破碎・選別ラインをどう構築するのか、品質等級をどのように判定するのか（試験分析方法、解体・破碎・選別プロセスの情報をもとにした判定方法等）、どのように検収を行うのか、トレーサビリティをどのように確保するのか、といった観点が課題になることが見込まれる。そのため、これらの観点から規格導入に向けた課題を整理した。

3.2.2.3 中間処理業における規格案への対応可能性検討

本事業では忌避物質品位に応じた品質等級規格案を作成し、中間処理業が目標とすべき忌避物質品位の水準を明確にした。中間処理事業者や素材産業（鉄鋼電炉事業者、セメント事業者）へのヒアリング等をもとに、中間処理事業者が各品質等級に該当する再生原料を生産する際の課題を整理した。

また、中間処理業における品質等級への対応可能性を検討する参考情報として、実操業に取引されているシュレッダーダスト（SR）の塩素及びクロムの品位を分析した。

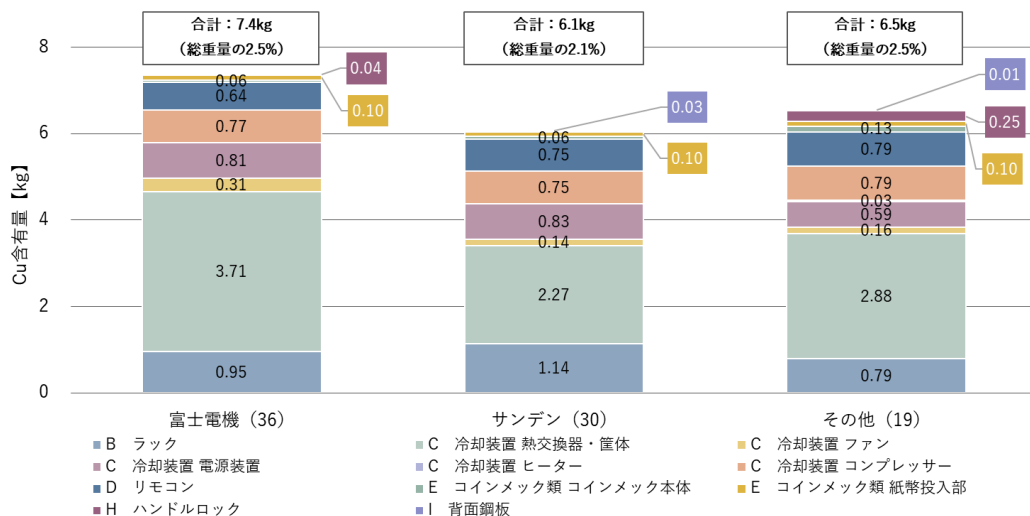
3.3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証テーマ3）

3.3.1. 解体・破碎・選別処理の実施

3.3.1.1 自動販売機中の忌避物質含有部品の追加特定及び部品中の忌避物質含有量の把握

事業第2年度は、自動販売機を対象に、事前に銅・クロム含有部品の特定を行った。その結果、自動販売機中には、銅は主に「ラック、冷却装置、リモコン」に、クロムは主に「ラック、ヒーター」に含まれることが明らかになった（図表8、図表9）。

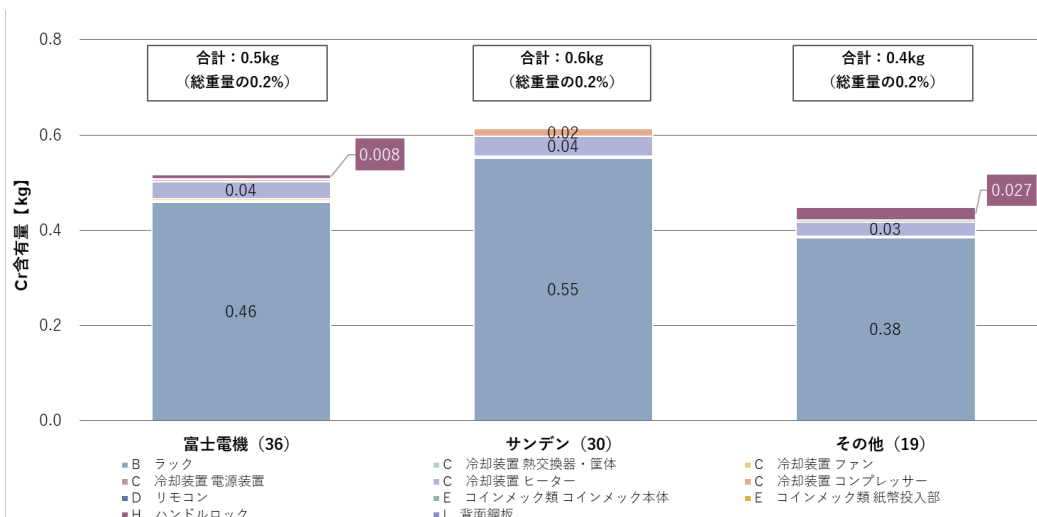
図表8 自動販売機における主な銅・クロム含有部品中の銅含有量（事業第2年度成果）



(注) () 中の数字は解体した自動販売機のセレクション数

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表9 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（事業第2年度成果）



(注) () 中の数字は解体した自動販売機のセレクション数

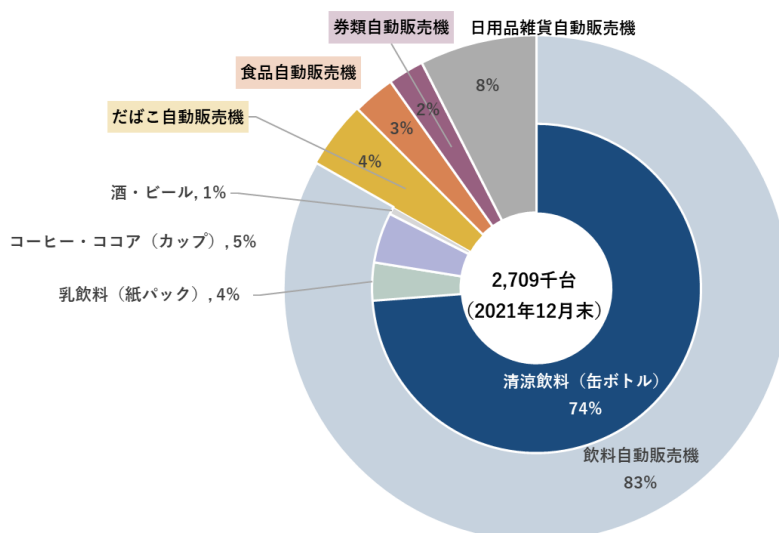
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

しかし、これらの部品を漏れなく解体した場合でも、筐体を破砕・選別して回収した磁着物中には銅やクロムが含まれていた（事業第2年度）。銅・クロム含有部品の特定は、過去調査⁹や特許情報、解体事業者へのヒアリングをもとに対象部品を選定したのち、これら部品の成分分析を行うことで行ったが、対象部品を選定する際に、銅・クロム含有部品を網羅できていなかった可能性がある。

そこで、文献やヒアリングにより、銅・クロムを使用した部品や、これら部品の搭載有無に関する追加調査を行った。そのうえで、本年度も追加で使用済み自動販売機を分解し、銅・クロムがどの部品に含まれているか確認した。自動販売機の取扱商品によって、構成部品や素材が異なる可能性がある。本年度も事業第2年度と同様に、最も普及台数が多く、中間処理事業者へのヒアリングでも入荷量が非常に多いとの回答があった「缶・ボトル用自動販売機」を対象とした（図表10）。共同実施先の中間処理事業（2社）が入荷した缶・ボトル用自動販売機（合計4台）を、作業の安全性等に配慮のうえ、可能な限り素材別になるまで分解し、各部品中の銅・クロム含有量を分析した（図表11）。

部品の分解方法や分析機器による誤差が生じないように、予め解体手順と最小部品単位までの解体可否を調整し、また標準試料を用いてハンドヘルド XRF¹⁰分析器の校正を行った。

図表 10 機種別・中身商品別の自動販売機普及台数



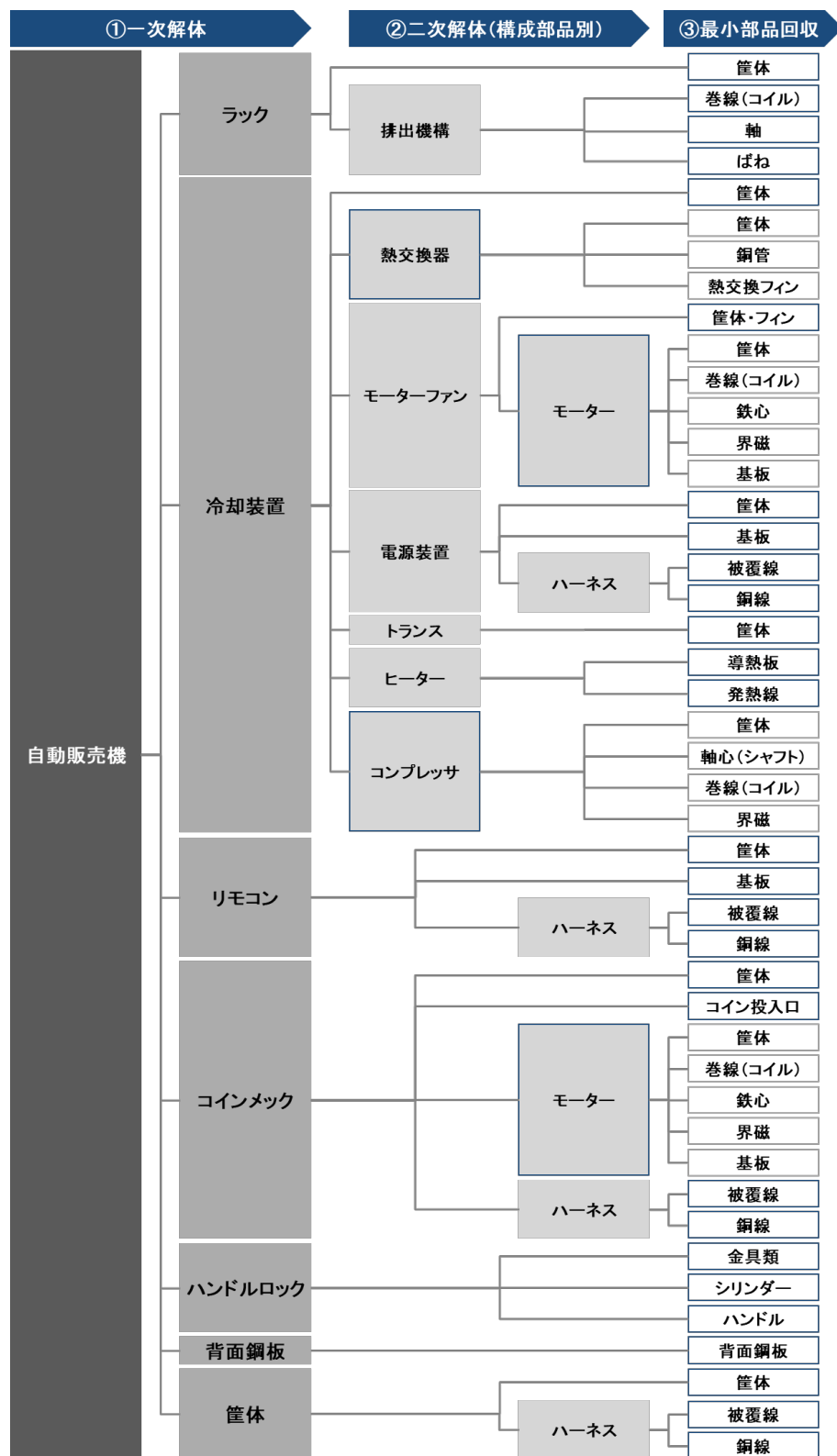
（注）自動サービス機（両替機、自動精算機、コインロッカー等）を除く

（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（2021年（令和3年）版）」
をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

⁹ 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）」（2004年）。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材と構成比を報告

¹⁰ XRF：X-ray Fluorescence（蛍光X線分析）

図表 11 自動販売機中の銅・クロム含有量把握のための分解方法及び最小部品単位



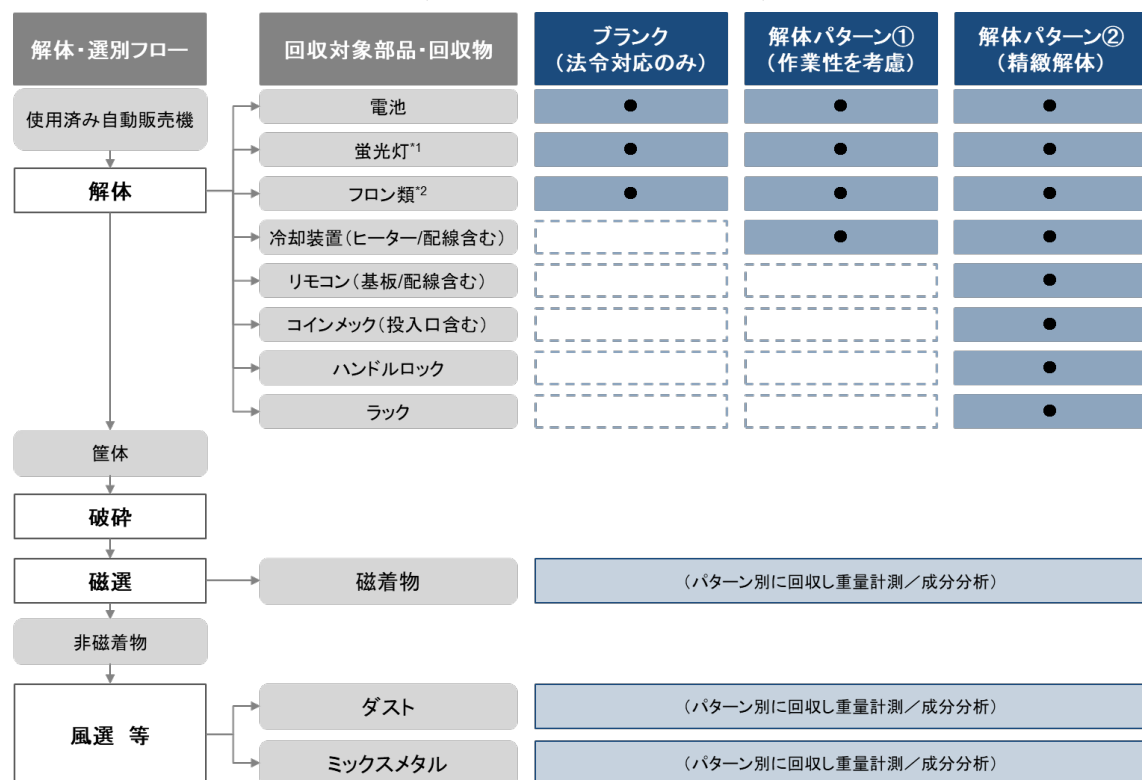
(注) 作業の安全性等を配慮し、青枠で囲んだ部品まで分解したうえで成分分析を実施
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.3.1.2 解体・破碎・選別パターンの検討

3.3.1.1で特定した銅・クロム含有部品と部品重量及び部品中の銅・クロム含有量を参考に、実証試験における解体パターンを検討した。「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（精緻解体）」では、本実証で把握できた銅・クロム含有部品（冷却装置（ヒーターや配線を含む）、リモコン（基板や配線を含む）、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、主な銅及びクロム含有量部品である冷却装置のみを取り外すこととした（図表 39）。

各パターンに従って解体した筐体は、同一の条件のもとそれぞれ破碎・選別を行うことで、解体方法が回収物（磁着物、ダスト、ミックスメタル）の銅・クロム含有量に与える影響を明らかにすることを目指した。共同実施事業者（2社）において、試験1回当たり、缶・ボトル用自動販売機を30台程度（10t程度）解体し、その後筐体を破碎・選別した。選別後に、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 12 各解体パターンにおける事前解体対象部品



(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 回収物のサンプリング・産物分析

磁着物の品質管理に加えて、中間処理事業者の採算性等を考慮するため、磁着物のみでなく、ミックスメタル及びダストも対象に成分の分析を実施した。解体パターン別に回収及び重量計測した磁着物、ミックスメタル、ダストのうち、一部を無作為に回収した。それぞれ 1~2kg 程度になるまで縮分を繰り返し、分析用サンプルとした。

このうち、磁着物の分析にはハンドヘルド XRF 分析器を用いた。磁着物 100 個程度を対象に、試料表面に汚れ等が付着している場合、十分に汚れを落としたのち X 線を照射し、銅やクロム等の成分値を測定した。ミックスメタルの分析対象元素は、銅・クロムに加えて、非鉄製錬の評価対象となる金、銀と、熱交換器やラックの回収に随伴して産物中の品位が変わると予想されるアルミニウム、鉄とした。なお、ミックスメタルは各事業者・各パターン別にそれぞれ 2 点分析を行った。

銅は JIS M 8121、クロムは JIS M 8212 に基づいた方法で分析した。その他の成分も、JIS に規定された方法もしくは JIS に準拠する方法で分析を行った。ダストの分析対象元素は、ミックスメタルで対象とした 6 元素（金、銀、銅、アルミニウム、クロム、鉄）に加えて、原燃料の評価を行うため、硫黄、塩素、臭素とした。さらに、総発熱量の評価を行った（図表 13）。なお、ダストは各事業者・各パターン別にそれぞれ 2 点分析を行った。

3.2.2.1 では、再生資源の規格案として、鉄シュレッダースクラップ中の銅及びクロム、廃プラスチック原燃料中のクロム及び塩素を対象に、品質等級を検討している。そこで、回収物の品位が、これら品質等級を充足しているか確認した。

図表 13 回収物の評価対象項目及び分析方法

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①	ブランク	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		解体パターン①	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		解体パターン②	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	ダスト②	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	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-
分析方法	ダスト	JIS M 8082に準じてマットを作製後に粉碎。 これをフッ化水素酸処理した後に王水を加え分解し、ICP-OESで分析							JIS Z 7302 -7準拠	※1	※2	JIS Z 7302 -2準拠
	ミックスメタル	JIS M 8111	JIS M 8111	JIS M 8121	JIS M 8220 準拠	JIS M 8224	JIS M 8212	-	-	-	-	-

(注)

*1 エシユカ法により塩素を抽出した後、イオンクロマトグラフ法により塩素定量

*2 酸素ボンブ法により臭素を吸収液に吸収させ、イオンクロマトグラフ法により臭素定量

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.3.2. 標準解体方法の検討

3.3.2.1 解体・破碎・選別パターン別の回収物の評価

3.3.1.3の成分分析結果に基づき、磁着物、ミックスメタル、ダストの評価を実施した。標準解体方法の具体化に向けて、解体パターン別に、管理対象元素である銅及びクロムが、どの回収物（事前回収部品、磁着物、ミックスメタル、ダスト）に分配されているか確認した。

3.3.2.2 忌避物質含有量推定方法の検討

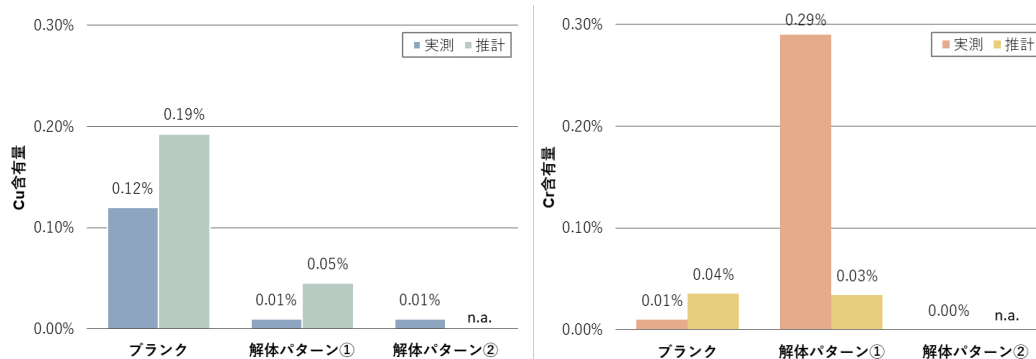
事業第2年度では、部品中の銅・クロム含有量をもとに、メーカー・セクション数別に、自動販売機1台当たりの銅・クロム含有量原単位を設定した。実際に解体及び分析していない自動販売機は、セクション数をもとに、当該型番での銅・クロム含有量を推定した。ここから自動販売機の型番別の銅・クロム含有量（総重量）と、解体時に取り外した部品中に含まれる銅・クロム含有量が推定可能となる。これらの差分が、破碎・選別工程に投入される銅・クロムの総重量になる。

破碎・選別工程に投入される銅・クロムの総重量に、過去操業データ等をもとに設定した事業者別の磁着物回収比と磁着物への銅・クロム分配率を乗じることで、磁着物中の銅・クロム含有量を推定した。こうして推定した磁着物中の銅・クロム含有量（推定値）と、実際に解体・破碎・処理後に回収した磁着物を分析した実測値には乖離が生じていた（図表14）。

乖離が生じた要因として、パターン別の回収物品位の推定精度が十分でないことが考えられる。事業第2年度の推計では、自動販売機1台当たりの銅・クロム含有量原単位の設定に際して、自動販売機中の熱交換器やラック、ハーネス等は、セクション数に応じて大きくなる（長くなる）という仮定を置いた。しかし、セクション数以外にも、部品の大きさや個数に影響を与える要因はあり得る。例えば、省エネルギーの観点から、ヒートポンプの採用等が進み、部品構成が変化した（ヒーターの搭載がなくなった）場合、製品中の銅・クロム含有量に影響する可能性がある。

事業第2年度は、こうした要因を考慮しないために、推定値が正しく反映されていない可能性があった。そこで、本年度事業では、3.3.1.1の銅・クロム含有部品の追加特定結果を参考に、メーカーへのヒアリングを通じて、必要に応じて、忌避物質含有量の推定方法を見直すこととした。

図表 14 解体パターン別の磁着物の銅・クロム含有量（事業第2年度結果）



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.3.2.3 標準解体方法（案）の検討及び開発に向けた課題整理

3.3.2.1の評価を踏まえて、自動販売機を破碎・選別後の回収物に含まれる銅及びクロムを管理するための標準解体方法（案）の検討を行った。各回収物の重量及び品位をもとに、3.3.1.2で実施した3つの解体パターンを評価した。主に普通鋼電炉及びセメント産業に供給する再生資源の利用価値向上（忌避物質管理による効果）と、主に非鉄製錬に供給する再生資源の品位低下による影響を検討した。上記の検討をもとに、銅・クロムを管理可能な解体プロセスを検討するとともに、今後の標準解体方法の開発・実践に向けた課題を整理した。

3.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）

3.4.1. 情報連携システム及び記録項目の改善検討

3.4.1.1 耐久性の高いシールの検討

事業第2年度では、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、再生資源貼付用に、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した。ラベルプリンタとして、東芝テック「BA420T」を用いた。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、判読不可能になったものがあった（図表15）。

図表 15 令和3年度実証事業でのQRコードラベルの劣化状況



（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

こうした課題に対応するため、本年度事業では、解体作業場の環境下においても長期間劣化しないラベルシールを検討した。

ラベル仕様の検討に際して、実証実施先の事業者へのヒアリングに加えて、既に解体現場でQRコードを活用している事業者や、耐候性ラベルシールを製造・販売している事業者へのヒアリングを行った。ヒアリング結果を踏まえて、ラベルシールを調達の上でQRコードの印刷を行い、中間処理事業者における実証試験で活用することで、劣化状況等を確認した。

3.4.1.2 CO₂ 排出量算定に必要な情報記録機能の追加

(1) 破碎・選別工程における電力消費量の把握方法の検討

事業第2年度では、情報連携システム「Moirā」を開発し、システム上に製品個体別の事前解体部品や破碎日時を記録することで、鉄スクラップの品質管理を実現した（図表 16）。今後はスクラップの品質管理だけでなく、その他の非財務情報（CO₂ 排出量）等を付加することで、スクラップの付加価値を一層高めることができると期待される。そこで、本年度事業では、リサイクル工程（再生資源の生産工程）を含めた、ライフサイクル全体での CO₂ 排出量の把握に貢献するため、自動販売機を対象に、破碎・選別に係る CO₂ 排出量の算定を目指した。

CO₂ 排出量を漏れなく算定するためには、電力消費量と燃料消費量を記録する必要がある。電力消費量の計測は、電力ロガーを設置することで対応可能と考えられる。同様に、燃料消費量を把握するためには、重機の燃料タンク等に燃料消費計を設置する必要がある。電力の場合、高圧電力を使用している際には変圧等が必要となるが、電力ロガーは（対応するものを選定すれば）概ねどのような配線にも設置可能であると考えられる。他方、燃料消費計は、エンジンと燃料タンク間に流量センサーを設置する必要がある、重機によって対応していない可能性もある。

本年度実証では、電力ロガーでの情報記録及び記録したデータの発信と、再生資源との紐づけ可能な情報連携システムの仕様を具体化することを念頭に、まずは電力消費量のみを記録することとした。電力消費量を問題なくロガーから情報を取り出し、再生資源と紐づけることができれば、燃料消費計からも同様な仕組みで情報を取り出すことができると考えられる。

破碎・選別工程での電力消費量の把握には、事業所の消費電力等を含む、中間処理事業者全体の電力消費量ではなく、破碎・選別ライン単体で電力消費量を把握する仕組みの構築が不可欠である。多くの中間処理事業者は、工場全体もしくは建屋（場合によっては大型設備）ごとでしか電力消費量を把握していない。また、高頻度の場合でも1日単位でしか電力消費量を確認していないものと考えられる。そのため、本事業では新たに適切な位置にロガーを設置することとした。正確な計測にはモーター等の数だけロガーが必要となるため、すべての電力消費機器を対象にすることは困難であった。そこで、電力消費の大きな装置を対象に、電力消費量を記録し、システム上で管理することを目指した（図表 17）。

図表 16 令和3年度事業で開発した情報連携システム「Moira」の概要

「Moira」による情報記録フロー			
	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。		
入荷	入荷～解体前	① 伝票番号等 ② 上記に紐づく個体	① 手入力(音声入力検討) ② 各個体のQR読込 
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(音声入力検討) ④ プルダウン選択
ボンベ計量・フロンの回収	フロン回収前(①②) フロン回収後(③)	① 回収ボンベ ② 上記に紐づく個体 ③ ボンベ世代・重量	① ボンベの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 
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
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。		

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 17 電力消費量記録のためのログー設置対象装置・電力

	A社		B社	
	設置箇所	電力	設置箇所	電力
破碎	シュレッダー	数千kW	プレシュレッダー	数百kW
	搬送関連装置	数十kW	シュレッダー	数千kW
	破碎関連ユニット①	数kW×3台	破碎関連ユニット①	数十kW
	破碎関連ユニット②	数kW×2台	破碎関連ユニット②	数十kW
選別	集塵機	数十kW	集塵機	数百kW
	搬送関連装置①	数十kW	選別機①(コンベア等含む)	数十kW
	搬送関連装置②	数kW	選別機②(コンベア等含む)	数十kW
	搬送関連装置③＋選別機①	数kW・数十kW		
	搬送関連装置④＋選別機②	数kW×3台		
	搬送関連装置⑤	数kW×7台		
	選別関連装置	数kW×3台		

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

(2) 電力ロガーの選定

中間処理事業者 2 社に設置する電力消費量計測を行うロガーを検討した。

「Moirai」のデータとの照合が可能な記録頻度や、データの記録方式及び入手可否（アクセスおよび編集可能なサーバへのアウトプット等）といった仕様を満たしている機器を選定した。電力ロガーから出力するデータの様式や、システムとの接続性を検討し、日置電機「クランプオンパワーロガー PW3360」シリーズを活用することとした（図表 18）。

本機は、測定器情報や測定情報、測定データを csv にて出力することができる（図表 19）。また、日置電機が提供する既存サービスでは、記録したデータを 1 時間毎もしくは 1 日毎に、オンライン上で取り出すことも可能である。

図表 18 日置電機「クランプオンパワーロガーPW3360」シリーズの製品仕様

製品イメージ	
測定ライン (測定可能回路数)	50/60 Hz、単相 2 線、単相 3 線、三相 3 線/三相 4 線 電流のみ 1～3CH
測定項目	電圧/電流実効値、電圧/電流基本波値、電圧/電流基本波位相角、周波数(U1)、電圧/電流波形ピーク、有効電力、無効電力、皮相電力、力率または変位力率、有効電力量、無効電力量、電気料金表示、有効電力デマンド量・値、無効電力デマンド量・値、力率デマンド、パルス入力、その他
電圧レンジ	AC600V（有効測定範囲: 90V～780V）
電流レンジ	AC500.00mA～5.0000kA まで AC50.000mA～5.0000A (漏れ電流のみ)
電力レンジ	300.00 W～9.0000 MW
データ記録	SD メモリカード/内部メモリへリアルタイム保存
保存インターバル時間	1～30 秒、1～60 分、14 切替え
寸法・質量	180W×100H×67.2Dmm（830g）

（出所）日置電機ウェブサイト等より三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 19 「クランプオンパワーロガーPW3360」シリーズで出力した csv (イメージ)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	HIOKI PW3360(Ver3.10)	S/N:180418879												
2	FOLDER	20031800												
3	WIRING	3P3W2M												
4	OPERATION	RMS												
5	FREQUENCY	50Hz												
6	THD													
7	INTERVAL	60min												
8	U RANGE	600V												
9	I RANGE	500A												
10	SENSOR	9661(500A)												
11	VT(PT)	60												
12	CT	40												
13	PULSE	1												
14	ENERGY COST	0												
15														
16	2020/3/18 10:00	START												
17	Date	Etime	Status	Freq_Avg[Hz]	U1_Avg[V]	Ufnd1_Avg[V]	Udeg1_Avg[V]	WP+[Wh]	WP-[Wh]	WQLAG[varh]	WQLEAD[varh]	Ecost	WP+dem[Wh]	WP-dem[Wh]
18	2020/3/31 10:00	312:00:00	0	5.00E+01	6.61E+03	6.61E+03	0.00E+00	8.83E+07	0.00E+00	2.00E+04	-6.09E+07	0.00E+00	1.50E+06	0.00E+00
19	2020/3/31 11:00	313:00:00	0	5.00E+01	6.63E+03	6.63E+03	0.00E+00	8.98E+07	0.00E+00	2.00E+04	-6.19E+07	0.00E+00	1.50E+06	0.00E+00
20	2020/3/31 12:00	314:00:00	0	5.00E+01	6.62E+03	6.62E+03	0.00E+00	9.13E+07	0.00E+00	2.00E+04	-6.30E+07	0.00E+00	1.50E+06	0.00E+00
21	2020/3/31 13:00	315:00:00	0	5.00E+01	6.67E+03	6.67E+03	0.00E+00	9.28E+07	0.00E+00	2.00E+04	-6.40E+07	0.00E+00	1.50E+06	0.00E+00
22	2020/3/31 14:00	316:00:00	0	5.00E+01	6.60E+03	6.60E+03	0.00E+00	9.43E+07	0.00E+00	2.00E+04	-6.50E+07	0.00E+00	1.50E+06	0.00E+00
23	2020/3/31 15:00	317:00:00	0	5.00E+01	6.62E+03	6.62E+03	0.00E+00	9.56E+07	0.00E+00	2.00E+04	-6.60E+07	0.00E+00	1.33E+06	0.00E+00
24	2020/3/31 16:00	318:00:00	0	5.00E+01	6.63E+03	6.63E+03	0.00E+00	9.62E+07	0.00E+00	2.00E+04	-6.64E+07	0.00E+00	6.30E+05	0.00E+00
25	2020/3/31 17:00	319:00:00	0	5.00E+01	6.60E+03	6.60E+03	0.00E+00	9.62E+07	0.00E+00	2.00E+04	-6.64E+07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
26	2020/3/31 18:00	320:00:00	0	5.00E+01	6.61E+03	6.61E+03	0.00E+00	9.62E+07	0.00E+00	2.00E+04	-6.64E+07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
27	2020/3/31 19:00	321:00:00	0	5.00E+01	6.63E+03	6.63E+03	0.00E+00	9.62E+07	0.00E+00	2.00E+04	-6.64E+07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
28	2020/3/31 20:00	322:00:00	0	5.00E+01	6.68E+03	6.68E+03	0.00E+00	9.62E+07	0.00E+00	3.00E+04	-6.64E+07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
29	2020/3/31 21:00	323:00:00	0	5.00E+01	6.68E+03	6.68E+03	0.00E+00	9.62E+07	0.00E+00	3.00E+04	-6.64E+07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
30	2020/3/31 22:00	324:00:00	0	5.00E+01	6.65E+03	6.65E+03	0.00E+00	9.62E+07	0.00E+00	3.00E+04	-6.64E+07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
31	2020/3/31 23:00	325:00:00	0	5.00E+01	6.57E+03	6.57E+03	0.00E+00	9.62E+07	0.00E+00	3.00E+04	-6.64E+07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

(出所) 日置電機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

なお、シュレッダー（破砕機）は高圧電力（数千V）を使用するため、日置電機「クランプオンパワーロガー PW3360」の測定範囲外にあたる（有効電圧レンジが780Vまでであるため）。両社ともシュレッダーの電流測定部には、変成器が設置されていた。計器用変成器は、交流回路の高電圧・大電流を低電圧・小電流に変換する機器で、計器用変圧器（VT）および変流器（CT）の総称である。JIS C 1731 では、計器用変成器の役割を、あらゆる高電圧・大電流を100V・5Aに変換して計器に接続するものとしている。

計器用変成器と組み合わせて使用する電力量計の計量装置の乗率は、3種類がJISに規定されている（10の整数べき倍、合成変成倍（R倍）、合成変成比の1/10倍（D倍））。今回、試験実施先に設置されていた計器用変成器は10の整数べき乗倍であったため、計量装置に記載された倍数を掛けて、変成前の消費電力量に換算した。

また、電力ロガーに接続するクランプオンセンサは、それぞれ測定可能導体径や定格一次電流が定まっている（図表21）。そこで、設置箇所の空間的な余裕や電流値を考慮して、それぞれクランプを選定した（図表20）。

図表 20 ロガー・クランプオンセンサの設置箇所と種類

	A社		B社	
	設置箇所	設置ロガー・クランプ	設置箇所	設置ロガー・クランプ
破碎	シュレッダー	PW3360-1台+9660×3本	プレシュレッダー	PW3360×2台+9669×6本
	搬送関連装置	PW3360-1台+9661×3本	シュレッダー	PW3360×1台+9694×3本
	破碎関連ユニット①	PW3360-1台+9661×3本	破碎関連ユニット①	PW3360×1台+9661×3本
	破碎関連ユニット②	PW3360-1台+9661×3本	破碎関連ユニット②	PW3360×1台+9661×3本
選別	集塵機	PW3360-1台+9661×3本	集塵機	PW3360×1台+9669×3本
	搬送関連装置①	PW3360-1台+9661×3本	選別機①（コンベア等含む）	PW3360×1台+9661×3本
	搬送関連装置②	PW3360-1台+9661×3本	選別機②（コンベア等含む）	PW3360×1台+9661×3本
	搬送関連装置③+選別機①	PW3360-1台+9661×3本		
	搬送関連装置④+選別機②	PW3360-1台+9661×3本		
	搬送関連装置⑤	PW3360-1台+9661×3本		
	選別関連装置	PW3360-1台+9661×3本		

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 21 本事業で使用したクランプオンセンサ

	9694	9660	9661	9669
外観	 コード長 3m	 コード長 3m	 コード長 3m	 コード長 3m
測定可能導体径	φ 15mm	φ 15mm	φ 46mm	φ 55mm, 80×20mm プスパー
定格一次電流	AC5A	AC100A	AC500A	AC1000A
確度	振幅 (45～66Hz)	±0.3% rdg.	±0.3% rdg.	±1.0% rdg.
		±0.02% f.s.	±0.02% f.s.	±0.01% f.s.
	位相 (45～5kHz)	±2° 以内	±1° 以内	±0.5° 以内
周波数特性 40Hz～5kHz (確度からの偏差)	±1.0% 以内			±2.0% 以内
外部磁界の影響 (AC 400 A/mの磁界にて)	0.1A 相当以下			1A 相当以下
導体位置の影響	±0.5% 以内			±1.5% 以内
対地間最大定格電圧	CAT III 300V rms	CAT III 300V rms	CAT III 600V rms	CAT III 600V rms
最大入力電流 (45～66Hz)	50A 連続	130A 連続	550A 連続	1000A 連続
寸法 (mm)	46 W×135H×21D	46 W×135H×21D	78 W×152H×42D	99.5 W×188H×42D
質量	230g	230g	380g	590g

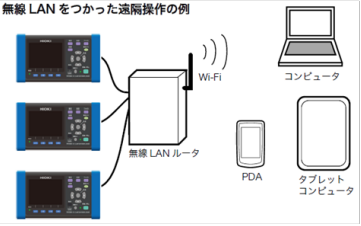
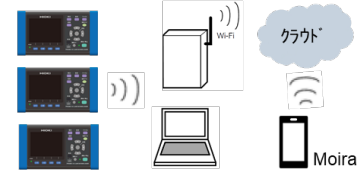
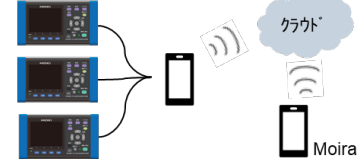
(出所) 日置電機株式会社カタログより引用

(3) 電力ロガーからのデータ取得方法の検討

電力ロガーで記録した消費電力量データは、「Moira」が接続可能なクラウド上にアップロードする必要がある。そこで、電力ロガーの設置箇所やロガー間の物理的距離、途中の遮蔽物等を考慮して、最適なデータ取得方法を検討する必要がある。特に、中間処理事業者の現場では、建屋が金属製であることも多く、情報通信が途絶してしまう恐れがある。具体的には、LAN 通信を活用する方法、SIM 回線を活用する方法、Wi-fi 付 SD カードを活用する方法を検討した。実証先の中間処理事業者において、電力ロガーの設置箇所や遮蔽物、距離、Wi-Fi や SIM 通信の強度を確認した結果、SIM 回線を活用する方法を選定した（図表 22）。

クランプオンセンサで計測した電力消費量は、電力ロガー中の SD カードに蓄積される。1 日に 1 度、これら SD カードに蓄積されたデータを、FTP サーバ機能を活用して、小型 PC（ボード PC（商品名：Raspberry Pi））上のシステムが収集する。小型 PC には SIM カードを挿入可能であるため、SD カードから収集したデータを、クラウドを経由して、「Moira」が接続可能なサーバにアップロードする（図表 23）。電力ロガーの設置箇所に応じて、A 社には 1 台、B 社には 2 台の小型 PC を設定した（図表 24、図表 25）。

図表 22 電力ロガーからのデータ取得方法の検討

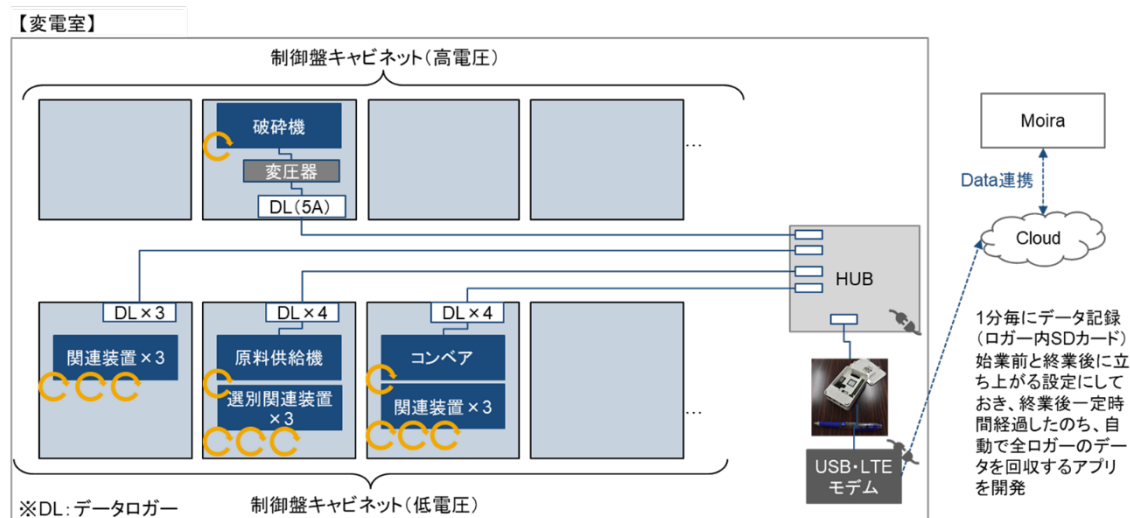
方法	詳細
LAN通信を活用①	無線LANルータに複数のロガーを接続して、FTPサーバ機能を活用してPCにデータを転送する。ファイル(csv)単位でしかデータを転送できないため、計測時間を1時間ごと等に設定することで、こまめにデータを収集する。 
LAN通信を活用②	ロガーからルータへの接続が困難な場合は無線化が必要。ロガーにイーサネットコンバータを取り付けて、無線LANルータとPCと接続したネットワークを構築する。ファイル単位でしかデータ収集できない点は同様に課題である。 
SIM回線を活用	無線LANルータに複数のロガーを接続して、FTPサーバ機能を活用してPC(SIMカードを搭載可能なもの)にデータを転送する。PCから直接クラウドにデータを送信する。ロガーの近傍に設置できない場合、複数のPCが必要になる。 
Wi-fi付SDカードを使用	ロガーに装着するSDカードをWi-fi付にすることで、SDカードを取り外さなくてもPCにデータを転送できるようにする。ファイル単位でしかデータ収集できない点は同様に課題である。また、通信距離が短いため、PCを持ち運びながらデータを集める必要がある。 

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 23 電力ロガーのログデータを収集・サーバに送信するクローラーロボットの動作仕様

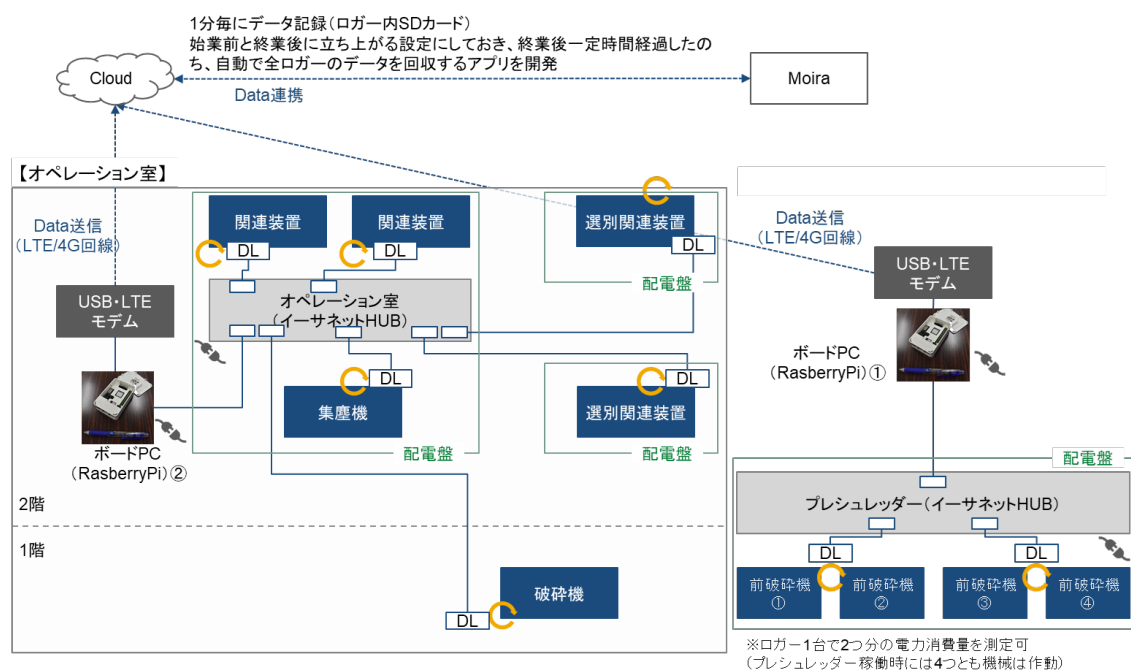
- ① 1日1回（各社の終業時刻の15分後）にロボットが起動
- ② 電力ロガーには時刻を自己修正する機能がないため、正しい時刻と各電力ロガーの時刻の「誤差」を記録
- ③ 予め設定された各社の電力ロガーのIPアドレスの順番に、FTP経由で当日分データをコピー
※IPアドレス：A社（192.168.1.101～112）、B社（192.168.1.201～208）
- ④ コピーしたログデータ（1日1台のパワーロガーから約720レコード）のレコード毎のタイムスタンプを、②で得られた「誤差」を加味して修正し、サーバにアップロード
- ⑤ サーバにアップロードされたログデータをJSON形式に加工。REST(http)にてデータベースに登録

図表 24 電力ロガー及びデータ取得デバイスの設置イメージ（A社）



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 25 電力ロガー及びデータ取得デバイスの設置イメージ（B社）



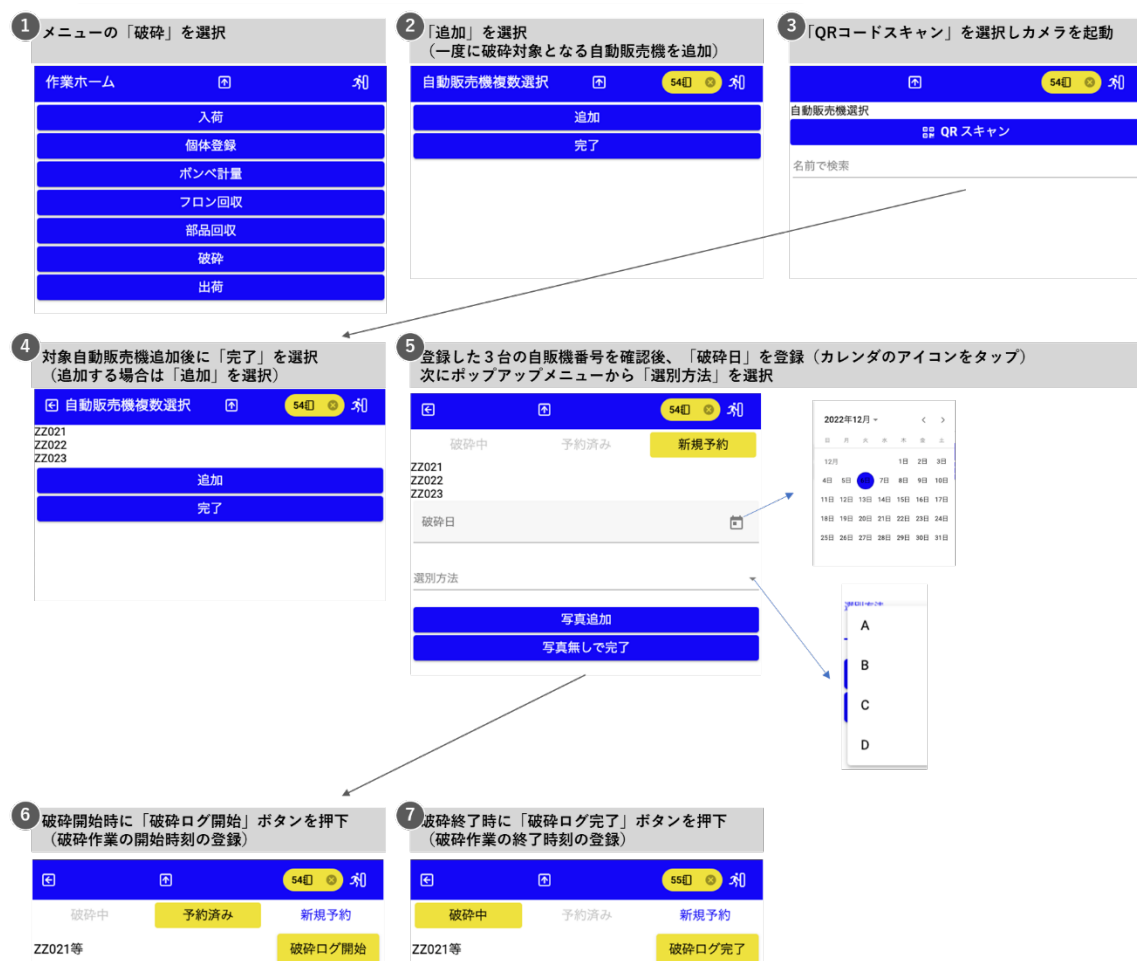
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

(4) アプリへの CO₂ 排出量導出機能の実装

電力ロガーで記録した消費電力量を「Moira」で記録した破碎日時と紐づけ、個体ごとの CO₂ 排出量を導出する機能を実装した。現在は、管理メニューにおいて銅及びクロムの含有量を原料メーカー（磁着スクラップの納入先）で確認できる仕様になっている。同様の画面で各ロットの CO₂ 排出量と各個体の CO₂ 排出量（各ロットの CO₂ 排出量を処理台数で按分した数値）を確認できるようにした。

事業第 2 年度に開発した「Moira」は、「破碎」タスクにおいて、これから破碎工程に投入する自動販売機を選択できるようにしていた。しかし、選択後にすぐ破碎機に投入されるとは限らない。電力ロガーで計測した電力消費量と正確に紐づけるためには、破碎機への投入時刻を厳密に記録する必要がある。そこで、「破碎タスク」に、開始時刻と終了時刻を記録できるようにした。破碎する自動販売機を登録し、破碎日と選別方法を入力するまでは事業第 2 年度の「Moira」と同様であるが、登録（「予約済み」）された自動販売機を破碎機に投入するタイミングで「破碎ログ開始」、破碎・選別が完了したタイミングで「破碎ログ終了」を入力できるようにした（図表 26）。

図表 26 「Moira」上での破碎開始・終了時刻の記録方法



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.4.2. 中間処理工程におけるシステムの有効性及び作業負荷の検証

実際に、使用済み自動販売機を対象に、解体・破砕・選別工程での情報と、CO₂排出量の算定に必要な電力消費量（経時データ）を記録し、改良した「Moira」の有効性及作業者の負荷を確認した。3.3.1.2 で検討した 3 種類の解体パターン（ブランク、解体パターン①（作業性を考慮）。解体パターン②（精緻解体））別で、それぞれ自動販売機 30 台ほどを解体し、筐体を破砕・選別した。改良版の「Moira」及び電力ロガーによる電力消費量の計測は、これら 3 つのパターンすべてで行うこととした（図表 27）。

図表 27 システムの有効性・作業負荷を検証する解体パターン

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）	解体パターン② （精緻解体）
フロン類、電池、蛍光灯	冷却ユニット （ファン等も回収）	ラック、冷却ユニット リモコン、コインメック、 ハンドルロック
30台 （情報連携システム実施）	—	—
—	30台 （情報連携システム実施）	—
—	—	30台 （情報連携システム実施）

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.5.1. 電磁式ファインダーにおける選別条件の検討

本実証では、Steinert 社製の電磁式ファインダーを用いて各種試験を行った（図表 28）。本装置は、電磁センサーの交換が可能であり、本事業では直径 12.5mm と直径 25mm のコイルを有する電磁センサーを用いて試験を行った。装置には、電磁センサーに加えて、3D レーザーカメラ、可視光カメラも搭載されており、電磁センサーで観測されるデータに加えて、試料のみかけ体積等も観測することができる（図表 29）。本実証では、電磁センサーで観測されるデータのうち、特に Phase（位相差値）に着目し、Mean Phase（位相差平均値）、Max Phase（位相差最大値）、Min Phase（位相差最小値）の観測値を確認した。

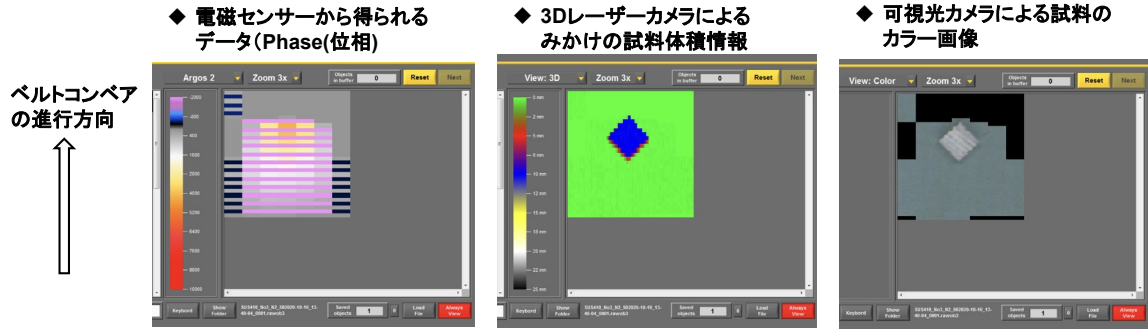
なお、実試料は LIBS ハンドヘルドを用いて、予め組成分析を実施し、得られた組成等をもとに普通鋼、クロム系ステンレス鋼、ニッケル系ステンレス鋼、モーターコアに分類した。

The diagram illustrates the X-ray sorting system for plastic waste. It shows the material flow from the Vibrating Feeder through the Belt, guided by various sensors (3D Laser Sensor, Colour Camera, XRT Sensor, X-Ray, PC X-Ray, Induction Sensor, Valve Bar, Splitter Bar) and actuators (M, V, S). The system is designed to sort waste into Drop Fraction and Eject Fraction. Key components include the 3D Laser Sensor, Colour Camera, XRT Sensor, X-Ray, PC X-Ray, Induction Sensor, Valve Bar, and Splitter Bar. The material flow is indicated by green arrows, and the system parameters are listed in the table below.

Parameter	Value
Belt Speed	2,4 m/s
Pressure	4,8> BAR

49

図表 29 本実証に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

図表 30 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

$$\textcircled{1} \quad V^{(s)} = 2\pi i \mu_0 I \omega \underbrace{\frac{R_s R_T}{(d_T^2 + R_T^2)^{1/2}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{2n(n+1)} \frac{P_n^1(d_T/[d_T^2 + R_T^2]^{1/2}) P_n^1(d_s/[d_s^2 + R_s^2]^{1/2})}{(d_T^2 + R_T^2)^{n/2} (d_s^2 + R_s^2)^{(n+1)/2}}}_{\text{装置条件、装置・試料との距離によって変化する項}} \underbrace{X_n(ka) + i Y_n(ka)}_{\text{装置条件、試料によって変化する項(応答関数)}}$$

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

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

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

※ $k = \sqrt{i\sigma\mu_0\mu_r\omega}$

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
μ_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)
ω : 送信コイルの角周波数 (rad/s)	μ_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)	σ : 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)	ω : 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 31 本実証に用いた標準試料の形状

NO.	縦 (mm)	横 (mm)	高さ (mm)	体積 (mm ³)	NO.	縦 (mm)	横 (mm)	高さ (mm)	体積 (mm ³)
1	5	5	2	50	13	20	10	10	2,000
2	5	5	4	100	14	20	20	10	4,000
3	5	5	5	125	15	20	30	10	6,000
4	5	5	6	150	16	20	40	10	8,000
5	5	5	8	200	17	20	50	10	10,000
6	5	5	10	250	18	40	30	10	12,000
7	10	10	2	200	19	40	40	10	16,000
8	10	10	4	400	20	40	50	10	20,000
9	10	10	6	600	21	40	60	10	24,000
10	10	10	8	800	22	40	40	20	32,000
11	10	10	10	1,000	23	40	40	40	64,000
12	20	20	20	8,000	24	40	40	60	96,000

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 32 本実証に用いた標準試料の金属種

金属種	対応JIS規格
銅	JIS H3100 C1020P
普通鋼 (S50C)	JIS G4051 S50C
普通鋼 (SS400)	JIS G3101 SS400
マルテンサイト系ステンレス鋼	JIS G4303、G4304 SUS410
フェライト系ステンレス鋼	JIS G4303、G4304 SUS430
オーステナイト系ステンレス鋼	JIS G4303、G4304 SUS304

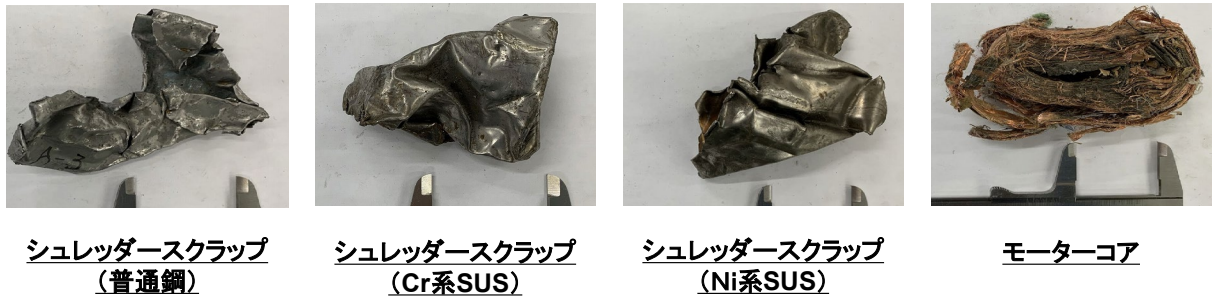
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 33 本実証に用いた実試料の概要

サンプル種別	概要
普通鋼	自動車・小型家電・産業廃棄物等をフィードとしてシュレッダープラントにて破砕・選別した磁着物。そのうち、ハンドヘルドLIBSによって普通鋼と判断されたもの。試料数181個、重量1.3～762g。
クロム系 ステンレス鋼	自動車のマフラー類のみをシュレッダー破砕・磁選した磁着物。そのうち、ハンドヘルドLIBSによってクロム系ステンレス鋼と判断されたもの。試料数95個、重量5.2～431g。
ニッケル系 ステンレス鋼	自動車のステンレスマフラー類のみをシュレッダー破砕・磁選した非磁着物を渦電流選別した導電産物。そのうち、ハンドヘルドLIBSによってニッケル系ステンレス鋼と判断されたもの。試料数81個、重量5.3g～364g。
モーターコア	自動車、小型家電、産業廃棄物等から手選別で回収したモーターコア。大きさ、形状等様々なものが存在する。個数100個、重量28～1,402g。

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 34 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

3.5.1.2 標準試料を用いた試料体積変化試験 (電磁センサー直径 12.5mm 条件)

試験では、図表 32 に示す各金属種の標準試料を複数種類用いて観測データを取得した。試験 1-①では、ベルトコンベアに接する試料底面積 (100mm²) が同一で、試料の高さ (ベルトコンベア垂直方向の大きさ) が異なる試料を複数種用いた (図表 35)。

試験 1-②、試験 1-③では、試料の高さ (5, 10mm) が同一で、ベルトコンベアに接する試料底面積が異なる試料を複数種用いた (図表 36、図表 37)。試験 1-①、試験 1-②では、事業第 2 年度の実証で想定された検知可能領域 (半径 12.5mm の半球体積 (4,091mm³)) の範囲内で体積条件を変化させ、観測データと体積条件の相関を確認した。

試験 1-③では、想定した検知可能領域の範囲内外で使用する試料の体積の大きさを変化させ、検知可能領域内外における、観測データと体積条件の相関を確認した。

なお、いずれの試験も試行回数は 3 回とした。

図表 35 試料 1-①に用いた試料の形状

NO.	形状			No.7 を 1 とした場合の体積比
	縦(mm)	横(mm)	高さ(mm)	
7	10	10	2	1
8	10	10	4	2
9	10	10	6	3
10	10	10	8	4
11	10	10	10	5

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 36 試料 1-②に用いた試料の形状

NO.	形状			No.1 を 1 とした場合の体積比
	縦(mm)	横(mm)	高さ(mm)	
1	5	2	5	1
2	5	4	5	2
3	5	5	5	2.5
4	5	6	5	3
5	5	8	5	4
6	5	10	5	5

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 37 試料 1-③に用いた試料の形状

NO.	形状			No.7 を 1 とした場合の体積比
	縦(mm)	横(mm)	高さ(mm)	
7	2	10	10	1
8	4	10	10	2
9	6	10	10	3
10	8	10	10	4
11	10	10	10	5
13	20	10	10	10
14	20	20	10	20
15	20	30	10	30

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.5.1.3 標準試料を用いた試料体積変化試験（電磁センサー直径 25mm 条件）

電磁センサーの直径が大きい場合、感度が向上し、電磁センサーの検知可能領域が拡大することが想定される。そこで、ここでは仮に半径 25mm の半球体積 ($32,725\text{mm}^3$) を検知可能領域と想定し、その前後の体積を有する試料を用いて試験を行った。

試験 2-①では、試料の高さ (10mm) が同一で、ベルトコンベアに接する試料底面積が異なる試料を複数種用いた (図表 38)。試験 2-②では、ベルトコンベアに接する試料底面積 ($1,600\text{mm}^2$) が同一で、試料の高さが異なる試料を複数種用いた (図表 39)。また、25mm 直径の電磁センサーにおいて分析値に影響を与えるベルトコンベアからの距離を確認するべく、二成分系試料 (図表 40、図表 41) を用いた試験 2-③も実施した。なお、いずれの試験も試行回数は 3 回とした。

図表 38 試料 2-①に用いた試料の形状

NO.	形状			No.11 を 1 とした場合の体積比
	縦(mm)	横(mm)	高さ(mm)	
11	10	10	10	1
13	20	10	10	2
14	20	20	10	4
15	20	30	10	6
16	20	40	10	8
17	20	50	10	10
18	40	30	10	12
19	40	40	10	16
20	40	50	10	20
21	40	60	10	24

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 39 試料 2-②に用いた試料の形状

NO.	形状			No.16 を 1 とした場合の体積比
	縦(mm)	横(mm)	高さ(mm)	
19	40	40	10	1
22	40	40	20	2
23	40	40	40	4
24	40	40	60	6

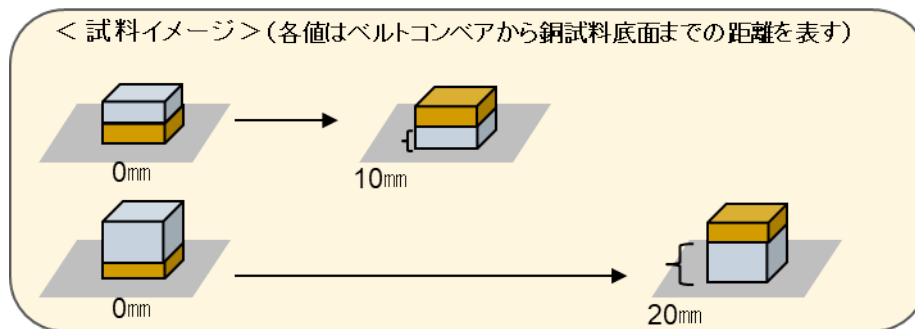
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 40 試験 2-③に用いた試料の形状

組み合わせる 標準試料	■ ①-1 銅 (40mm×40mm×10mm) ■ ②普通鋼 (S50C) (40mm×40mm×10mm) ■ ③普通鋼 (S50C) (40mm×40mm×20mm)
試料形状	パターン A : ①銅、②普通鋼 (S50C) の組み合わせ ■ 下から順に①銅、②普通鋼 (S50C) ■ 下から順に②普通鋼 (S50C)、①銅 パターン B : ①銅、③普通鋼 (SPCC) ×2 個の組み合わせ ■ 下から順に①銅、③普通鋼 (S50C) ■ 下から順に③普通鋼 (S50C)、①銅

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 41 試験 2-③に用いた試料形状パターンのイメージ図



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.5.1.4 実試料の選別可能性確認試験（電磁センサー直径 25mm 条件）

試験では、図表 33 で示した本事業第 2 年度までに使用したものと同様の実試料（普通鋼・クロム系ステンレス鋼・ニッケル系ステンレス鋼、モーターコア）を使用し、25mm 直径のセンサーコイルを搭載した電磁式ファインダーを用いて観測値を確認した。なお、試験の試行回数は 2 回とした。

3.5.2 電磁式ファインダーにおける試作機の仕様検討

3.5.1 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。

3.6. 事業における環境影響改善効果・CO₂排出量削減効果の評価

3.6.1. 各効果の評価における共通の前提条件・シナリオの整理

3.6.1.1 推計対象の設定

環境影響改善効果（資源効率性向上効果、天然資源採掘量削減効果）、CO₂排出量削減効果の評価は、共通の推計対象を選定して実施した。各効果の評価を同様の前提条件に立って行うべく、共通のシナリオを設定した。

本実証事業では、メーカーや用途による設計種別が多様化しておらず設計の構造が簡便であること、個別製品での回収が容易なこと等に着目し、「自動販売機」を実証の対象としている。本事業の環境影響改善効果、CO₂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。

なお、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ている。そこで、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く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」を推計対象として追加した。

3.6.1.2 シナリオの設定

各効果を推計するにあたり、本事業実施後に、中間処理産物・素材生産量等に生じる変化について共通に以下の3つのシナリオを設定した。

(1) 社会全体波及パターン

- 本事業実施後、使用済み製品等の包括的中間処理が社会全体に実装され、中間処理産物・素材生産量等が以下のシナリオのように変化する仮定を設定する。
 - 使用済み製品から回収された二次資源（普通鋼電炉製錬原料、銅製錬原料、アルミニウム製錬原料、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¹¹される。そのため、銅スクラップ、アルミスクラップ、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、普通鋼電炉製錬原料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、アルミニウムも選別され、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製錬原料のクロム品位が低下することで、鉄鋼材の副産物である普通鋼電炉ダスト、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

¹¹ 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

る(⑩、⑪、⑫、⑬、⑭)。普通鋼電炉製錬原料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)

(2) コンソーシアム内波及パターン

- 社会全体波及パターンと同様のシナリオがコンソーシアム内にのみ波及し、忌避物質がコンソーシアム内で高度に管理されることを想定する。

(3) 現状維持パターン

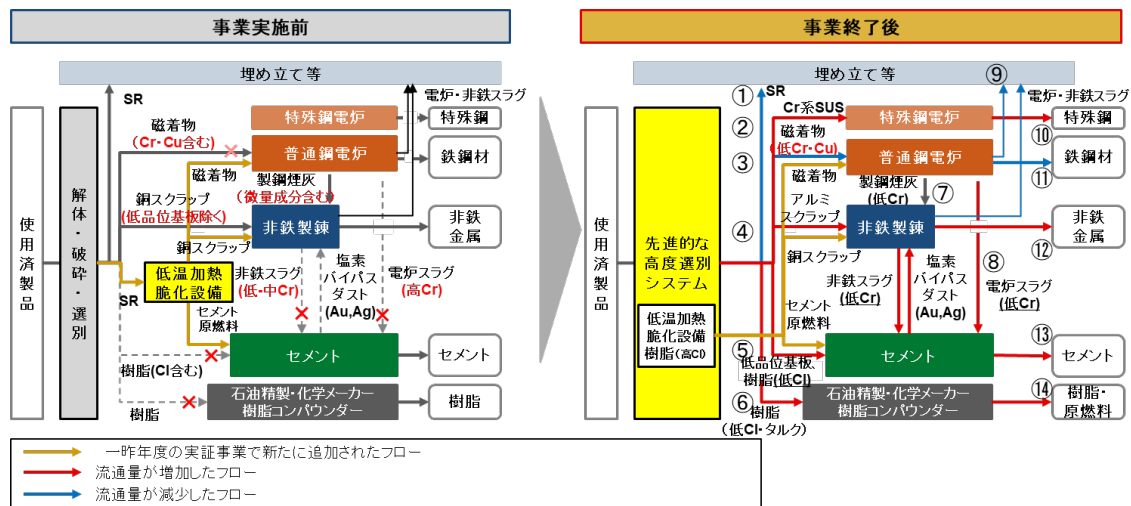
- 使用済み製品等の包括的中間処理が実装されず、忌避物質の管理が行われない社会を想定する。

3.6.1.3 事業第2年度からの主な変更点

本年度は、事業第2年度と比較してより実態に即した評価を行うべく、評価範囲の拡大を行った。具体的には、事業第2年度の推計では各プロセス間で発生する輸送や、SR等の焼却処分プロセスを評価範囲に追加した。

また、事業第2年度から推計に使用したデータの見直しを行った。具体的には、技術的・地理的・時間的代表性および確実性を向上させるため、代表性の低い代替データを、政府統計や業界統計といった代表性の高い統計データや実測データへの置き換えを検討した。

図表 42 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、本事業における「資源効率性」は「粗付加価値額／天然資源投入量」と定義した。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。天然資源投入量は、「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。

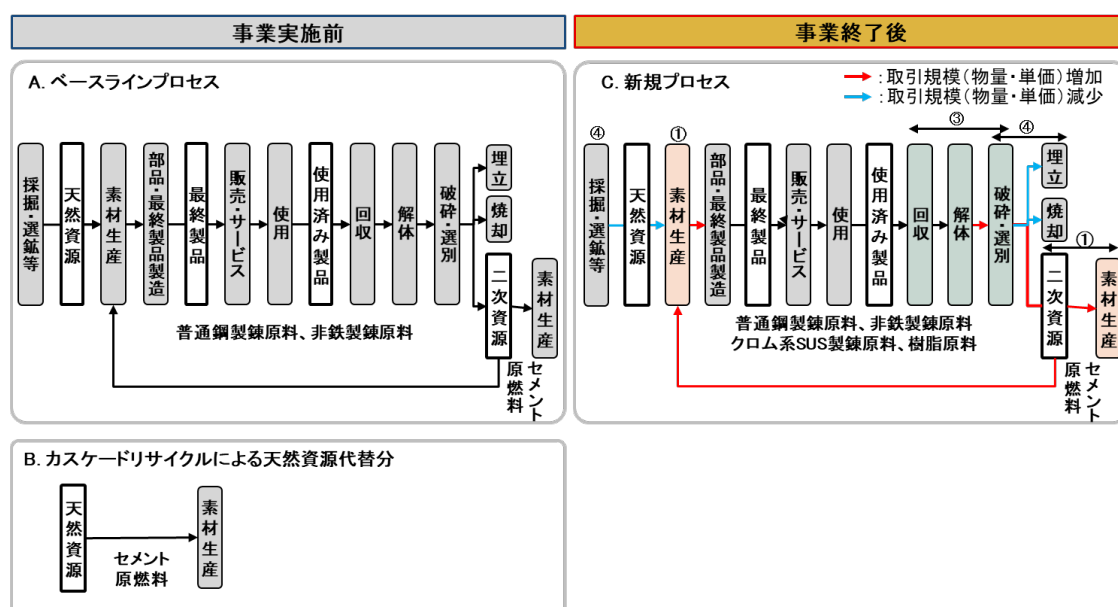
事業実施前後における資源効率性を比較し、その向上率を本事業における資源効率性向上効果と定義した。

3.6.2.2 評価単位・評価時間・評価範囲

本年度はより実態に即したプロセスを評価すべく、評価範囲等を見直した。事業第2年度の推計では推計範囲から除外していた、天然資源の採掘拠点から生産拠点への輸送、解体した使用済み製品の部素材の処理業者への輸送、SR等の焼却処分のプロセスを推計範囲に追加した。

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¹²（回収されたセメント原燃料によるセメント生産）」とした。その他に回収された二次資源（普通鋼製錬原料、銅製錬原料、アルミニウム製錬原料、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されると仮定した。本推計における評価時間は、50年と設定した。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、焼却、埋立、各プロセス間の輸送とした（図表43）。

図表 43 資源効率性向上効果の評価範囲



（注）素材生産には、普通鋼、銅、アルミニウム、クロム系ステンレス鋼、樹脂、セメントの生産を含む。また、鉄、銅、アルミニウム、クロム系ステンレス鋼生産時に発生するスラグ処理、各プロセス間の輸送も本推計の範囲に含める。

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

¹² 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

評価範囲に設定した各プロセスにおける活動量（製品の投入量・産出量・排出量）と単価に係る情報を収集し、原材料費、売上高、処理費用をそれぞれ推計した。「資源効率性」は「粗付加価値額／天然資源投入量」と設定している。「粗付加価値額」は、プロセスごとに売上高から原材料費、処理費用を差し引いた額を積み上げ、その合計額を粗付加価値額として算出した。

「天然資源投入量」は、製品製造に必要なクロム鉱石、鉄鉱石、銅鉱石、ボーキサイト、原油、石炭の投入量を、関与物質総量（TMR：Total Materials Requirement）に基づき評価した（図表 45）。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によって、本事業における資源効率性向上効果を評価した。

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。推計対象製品である自動販売機・自動車に使用された部品や素材の種類・原料投入量等のデータは不明であった。波及する部品生産等の粗付加価値額は考慮せず、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。

図表 44 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）

カテゴリ	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・排出される金銭						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)	
A	1-1	採掘・選鉱等	採掘・選鉱 (Cr鉱石)	鉱山事業者	—	Cr鉱石 (精鉱)	—	0.004	0.008	—	53,121	—	—	217	—	217
	1-2		採掘・選鉱 (鉄鉱石)	鉱山事業者	—	鉄鉱石 (精鉱)	—	0.009	0.021	—	17,322	—	—	156	—	156
	1-3		採掘・選鉱 (銅鉱石)	鉱山事業者	—	銅鉱石 (精鉱)	—	0.026	2.588	—	366,824	—	—	9,686	—	9,686
	1-4		採掘・選鉱 (ボーキサイト)	鉱山事業者	—	ボーキサイト (精鉱)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1-5		採掘 (原油)	石油開発事業者	—	原油	—	0.084	0.648	—	93,952	—	—	7,908	—	7,908
	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	0.70	0.646	0.074	48,062	140,000	5,220	33,842	90,451	387	55,963
						製鋼煙灰	—	—	0.013	—	—	20,000	—	—	258	—
	2-2		普通鋼高炉製錬	普通鋼高炉事業者	鉄鉱石 (精鉱)	鉄鉄	0.009	0.008	—	17,322	33,380	—	156	273	—	123
						高炉スラグ	—	0.003	—	—	2,548	—	—	6	—	—
	2-3		銅製錬	非鉄製錬事業者	銅鉱石 (精鉱)	電気銅	0.026	0.016	—	366,824	1,067,550	—	9,686	16,804	—	-486
						銅スクラップ	0.007	0.025	—	1,067,600	569	—	7,618	14	—	—
	2-4		溶解・還元 (フェロクロム)	フェロクロム製錬事業者	Cr鉱石	フェロクロム	0.004	0.004	—	53,121	124,542	—	217	461	—	244
	2-5		特殊鋼電炉製錬	特殊鋼電炉事業者	フェロクロム	特殊鋼	0.004	0.012	0.001	124,542	300,000	5,225	461	3,623	7	3,154
						鉄鉄	0.008	—	—	—	—	—	—	—	—	—
						Cr系SUSスクラップ	0	—	—	43,000	—	—	0	—	—	—
	2-6		精製 (原油)	化学メーカー	原油	ナフサ	0.084	0.083	—	93,952	92,286	—	7,908	7,682	—	-226
	2-7		樹脂製造	樹脂コンパウンダー	ナフサ	樹脂	0.083	0.192	—	92,286	208,000	—	7,682	39,849	—	32,167
						樹脂 (二次原料)	0	—	—	50,000	—	—	0	—	—	—
	2-8		スラグ処理	スラグ処理事業者	電炉スラグ (普通鋼)	路盤材等	0.069	0.082	—	-5,000	1,064	—	-346	87	—	426
						高炉スラグ	0.001	—	—	942	—	—	1	—	—	—
						電炉スラグ (特殊鋼)	0.001	—	—	-5,000	—	—	-6	—	—	—
						非鉄スラグ	0.011	—	—	1,280	—	—	14	—	—	—
	3	最終製品生産	最終製品メーカー	各種部品	最終製品	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	309,455
	4	販売・サービス	サービス提供者	—	最終製品	使用済み製品	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
	5	使用	ユーザー	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
	6	回収	回収事業者	使用済み製品	使用済み製品	—	1	1	—	—	—	—	—	—	—	0
	7	解体・破碎・選別 ※回収・解体・破碎・選別は同一事業者が実施と仮定	中間処理事業者	解体部品	鉄スクラップ	SR	1	0.64	0.16	-177,577	48,062	22,904	-177,577	30,948	3,595	212,548
					銅スクラップ	—	—	0.0071	—	—	1,067,600	—	—	7,618	—	—
					セメント原燃料	—	—	0	—	—	-7,000	—	—	0	—	—
					Cr系SUSスクラップ	—	—	0	—	—	43,000	—	—	0	—	—
					樹脂 (二次原料)	—	—	0	—	—	70,000	—	—	0	—	—
	8	埋立	最終処分事業者	SR	—	—	0.16	—	—	-22,904	—	—	-3,595	—	—	3,636
					電炉スラグ (普通鋼)	—	0.004	—	—	-10,992	—	—	-41	—	—	—
					電炉スラグ (特殊鋼)	—	6.9E-05	—	—	-10,992	—	—	-1	—	—	—
					非鉄スラグ	—	0	—	—	-10,992	—	—	0	—	—	—
	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	0	0.00041	—	-7,000	10,700	—	0	4	—	4
					高炉スラグ	—	0.002	—	—	3,000	—	—	6	—	—	—
					非鉄スラグ	—	0.014	—	—	0	—	—	0	—	—	—
					電炉スラグ (普通鋼)	—	0.001	—	—	300	—	—	0	—	—	—

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 45 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	(3)

(注)

- (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)
- (出所) 上記をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.6.2.4 追加シナリオ

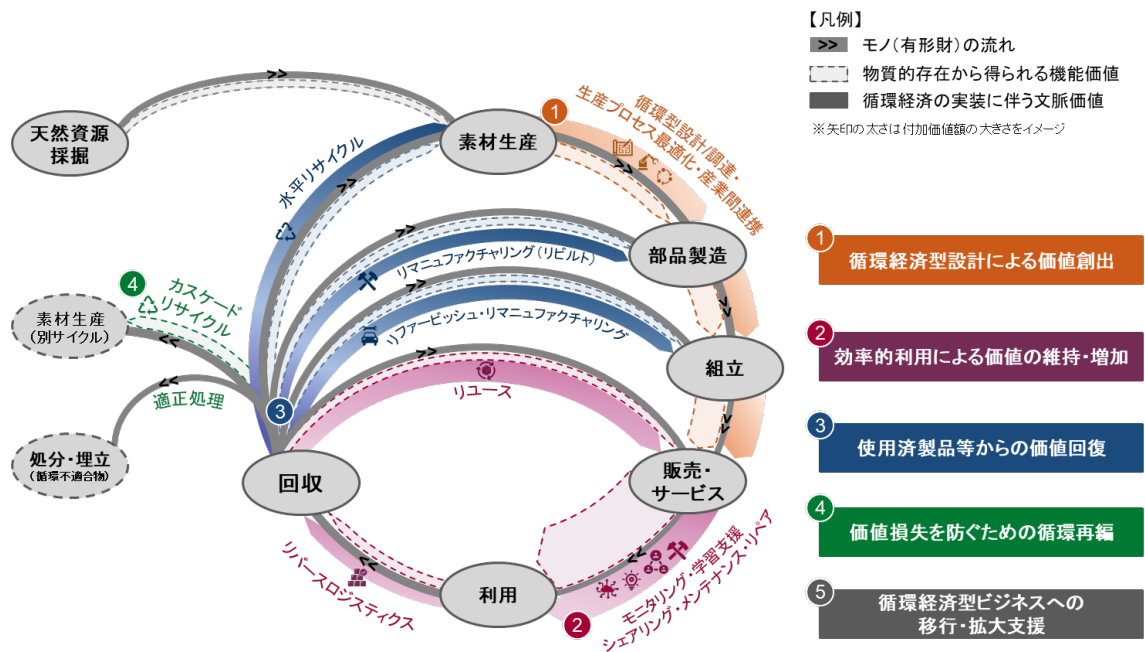
社会全体で資源効率性を高める取り組みを、図表 79 に整理した。資源効率性を向上させる要素としては、「①バリューチェーン 1 回当たりで提供する利用価値を最大化」、「②稼働率を向上しキャパシティを最大化」、「③使用済み製品に残存する価値を最大化」、「④投入／排出される資源を最小化」の 4 つが考えられる。

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、リファーマービッシュ、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 46 資源効率性を向上させる要素



(出所) 一般社団法人循環経済協会資料を引用

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。天然資源投入量は、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

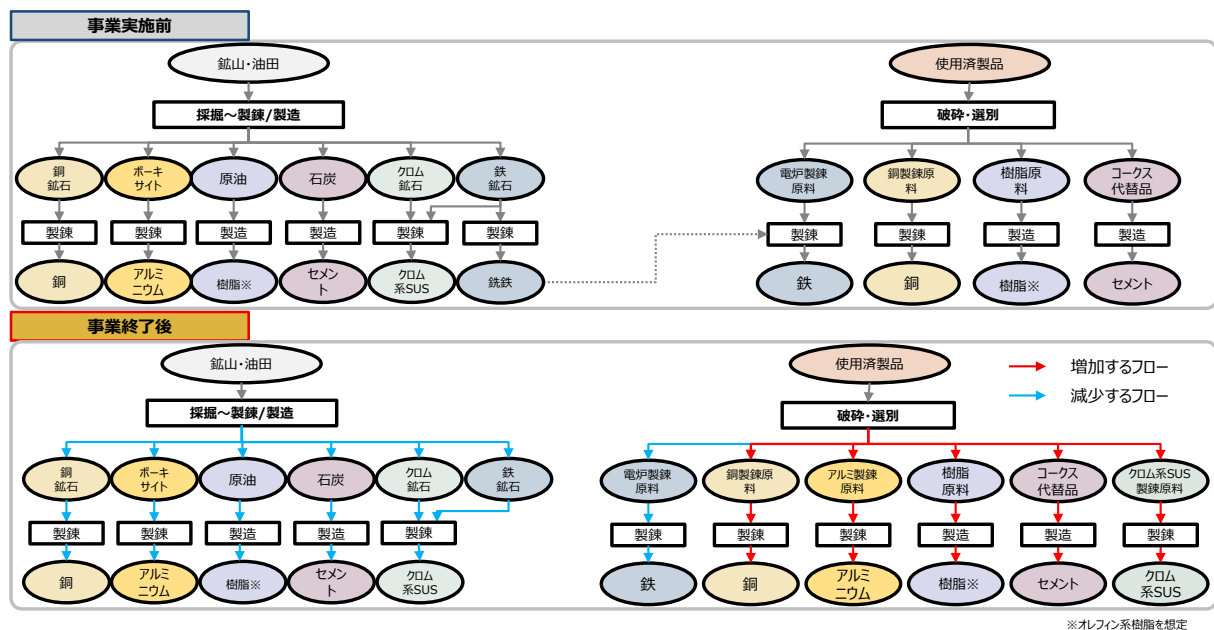
資源効率性向上効果の評価と同様の評価単位・評価時間・評価範囲を設定した。前述の通り、本年度はより実態に即したプロセスを評価すべく、評価範囲等を見直した。事業第2年度の推計では推計範囲から除外していた、天然資源の採掘拠点から生産拠点への輸送、解体した使用済み製品の部素材の処理業者への輸送SR等の焼却処分プロセスを推計範囲に追加した。

本推計における評価単位は、「製品1tの50年間の使用と、使用済み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。その他に回収された二次資源（普通鋼電炉製錬原料、銅製錬原料、アルミニウム製錬原料、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されると仮定した。本推計における評価時間は、50年と設定した。本推計における評価範囲は、使用済み製品の破碎・選別、焼却、埋立、普通鋼電炉製錬、非鉄（銅・アルミ）製錬、ステンレス鋼製錬、セメント製造、樹脂製造、および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。各天然資源生産時に生じる輸送プロセスを追加し推計を行った。

3.6.3.3 インベントリ・評価方法

「天然資源採掘削減量」は、製品製造に必要な各天然資源の関与物質総量（TMR：Total Materials Requirement）に基づき評価した。本事業実施後には、各種天然資源の使用量と（普通鋼スクラップと特種鋼スクラップが選別されるため）普通鋼電炉製錬原料の使用量が減少し、一方で普通鋼電炉製錬原料以外の二次資源の回収量は増加することとなる（図表 80）。事業実施前後におけるクロム鉱石、鉄鉱石、銅鉱石、ボーキサイト、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 47 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

資源効率性向上効果の評価と同様のシナリオを設定した。

3.6.4. CO₂ 排出量削減効果

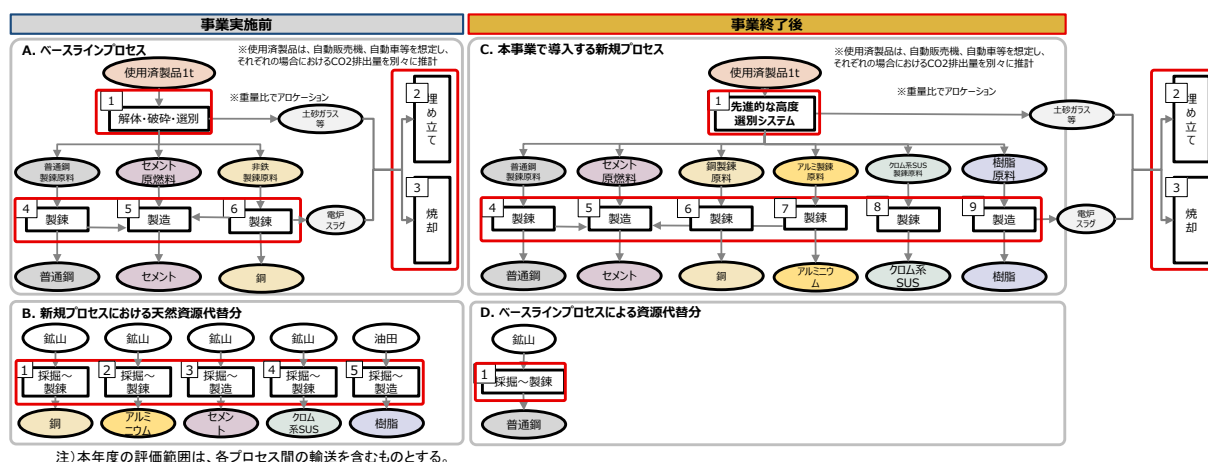
3.6.4.1 評価単位・評価時間・評価範囲

本推計における評価単位は、「使用済み製品 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、銅、アルミニウム、クロム系ステンレス鋼、セメント、樹脂）生産」と設定した（図表 48）。使用済み製品は自動販売機及び自動車を選定し、それぞれの場合における CO₂ 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。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、廃棄が行われると仮定した。

前述の通り、本年度はより実態に即したプロセスを評価すべく、事業第 2 年度から評価範囲を見直し、各天然資源生産時に生じる輸送プロセスを追加し推計を実施した。本推計における評価範囲は、使用済み製品の破碎・選別、焼却、埋立、普通鋼電炉製錬、非鉄（銅・アルミ）製錬、ステンレス鋼製錬、セメント製造、樹脂製造、および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。評価範囲に含まれる各単位プロセスの構成は、我が国の代表的な素材生産シナリオ、解体・破碎・選別シナリオを採用した。

本年度は、天然資源別の輸入相手国の設定を見直し、貿易統計及び港湾統計の海上出入貨物表等の各種統計データから、各天然資源の輸入上位国からの輸入量が合計で 5 割以上となる輸入状況を想定、これら輸入上位国からの天然資源輸入を想定した。また、事業第 2 年度は推計対象から除外していた輸送プロセスを評価範囲に追加した。港湾統計の品目別海上出入貨物表を用いて、上記の輸入上位国及び我が国において品目別に取扱量の最も多い港湾を代表港湾に設定し、両港湾間の船舶による海上輸送を想定した。

図表 48 CO₂ 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

評価範囲に設定した各プロセスにおける活動量、排出原単位を整理し、インベントリを整備した（図表 49、図表 50）。データの収集、整備は、技術的・地理的・時間的 대표性の確保にできる限り配慮した。事業第 2 年度までに入手した情報の代表性を精査し、より代表性の高い情報を適用した。

具体的には、入手済みの情報を①悉皆統計データ（政府統計等）、②代表性の高いデータ（業界統計データ等）、③代表性の高い代替データ（代表性の高い文献値、実測データをもとに推計したデータ等）、④代表性の低い代替データ（当社独自の仮定を設定して推計したデータ等）のいずれかに区分のうえ、より代表性の高い情報に代替した。

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、本事業の成果がコンソーシアム内で波及した場合における CO₂ 排出量削減効果と、日本全国に波及した場合における CO₂ 排出量削減効果をそれぞれ算出した。

図表 49 CO₂排出量削減効果のインベントリ（自動販売機）

カテゴリ	プロセス	活動量				排出原単位				排出量 (CO ₂ -kg/機能単位)
		参照番号	項目	数値	単位	参照番号	項目	数値	単位	
A	処理	A-1-1	使用済み製品処理量（アロケーション後）	1.0	ton/機能単位	A-2-1	使用済み製品処理1t当たりのCO ₂ 排出量	36	CO ₂ -kg/ton	36
	埋立	A-1-2	発生したSRの埋立量	0.157	ton-SR/機能単位	A-2-2	埋立処理1t当たりのCO ₂ 排出量	31	CO ₂ -kg/ton	4.8
	焼却	A-1-3	発生したSRの焼却量	0.000	ton-SR/機能単位	A-2-3	焼却処理1t当たりのCO ₂ 排出量	94	CO ₂ -kg/ton	0.0
	鉄鋼電炉	A-1-4	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	0.635	ton-鉄/機能単位	A-2-4	(二次資源由来の) 粗鋼製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	417	CO ₂ -kg/ton	264
	鉄鋼高炉	A-1-5	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	ton-鉄鋼/機能単位	A-2-5	(天然資源由来の) 鉄鉄製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	2,310	CO ₂ -kg/ton	0.0
	セメント原燃料	A-1-6	投入された原燃料向け樹脂量	0.000	ton-原燃料/機能単位	A-2-6	(二次資源由来の) セメント原燃料1ton当たりのCO ₂ 排出量	60	CO ₂ -kg/ton	0.0
	セメント製造	A-1-7	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	1.66	ton-セメント/機能単位	A-2-7	(二次資源由来の) セメント製造1ton当たりのCO ₂ 排出量（アロケーション後）	10	CO ₂ -kg/ton	17
	銅製錬	A-1-8	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	0.007	ton-銅/機能単位	A-2-8	(二次資源由来の) 銅製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	988	CO ₂ -kg/ton	7.1
B	セメント製造	B-1-1	代替された天然資源由来のセメント生産量	3.4024	ton-セメント/機能単位	B-2-1	(天然資源由来の) セメント製造1tonあたりのCO ₂ 排出量（アロケーション後）	10	CO ₂ -kg/ton	34
	銅製錬	B-1-2	代替された天然資源由来の銅生産量	0.0056	ton-銅/機能単位	B-2-2	(天然資源由来の) 銅製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	1,634	CO ₂ -kg/ton	9.2
	アルミニウム製錬	B-1-3	代替された天然資源由来のアルミニウム生産量	0.0000	ton-Al/機能単位	B-2-3	(天然資源由来の) アルミニウム製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	7,230	CO ₂ -kg/ton	0.0
	ステンレス鋼製錬	B-1-4	代替された天然資源由来のSUS生産量	0.0076	ton-SUS/機能単位	B-2-4	(天然資源由来の) ステンレス鋼製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	2,874	CO ₂ -kg/ton	22
	樹脂（PP）製造	B-1-5	代替された天然資源由来の樹脂生産量	0	ton-樹脂/機能単位	B-2-5	(天然資源由来の) 樹脂製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	630	CO ₂ -kg/ton	0.0
C	処理	C-1-1	使用済み製品処理量（アロケーション後）	1.0	ton/機能単位	C-2-1	使用済み製品処理1t当たりのCO ₂ 排出量	36	CO ₂ -kg/ton	36
	埋立	C-1-2	発生したSRの埋立量	0.107	ton-SR/機能単位	C-2-2	埋立処理1t当たりのCO ₂ 排出量	31	CO ₂ -kg/ton	3.3
	焼却	C-1-3	発生したSRの焼却量	0.000	ton-SR/機能単位	C-2-3	焼却処理1t当たりのCO ₂ 排出量	94	CO ₂ -kg/ton	0.0
	鉄鋼電炉	C-1-4	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	0.633	ton-鉄/機能単位	C-2-4	(二次資源由来の) 粗鋼製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	417	CO ₂ -kg/ton	264
	セメント原燃料	C-1-5	投入された原燃料向け樹脂量	0.000	ton-原燃料/機能単位	C-2-5	(二次資源由来の) セメント原燃料1ton当たりのCO ₂ 排出量	60	CO ₂ -kg/ton	0.0
	セメント製造	C-1-6	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	5.0623	ton-セメント/機能単位	C-2-6	(二次資源由来の) セメント製造1ton当たりのCO ₂ 排出量（アロケーション後）	10	CO ₂ -kg/ton	51
	銅製錬	C-1-7	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	0.013	ton-銅/機能単位	C-2-7	(二次資源由来の) 銅製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	988	CO ₂ -kg/ton	13
	アルミニウム製錬	C-1-8	回収された銅製錬原料由来のアルミニウム生産量	0.000	ton-Al/機能単位	C-2-8	(二次資源由来の) アルミニウム製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	306	CO ₂ -kg/ton	0.0
	ステンレス鋼製錬	C-1-9	回収されたステンレス製錬原料由来のステンレス鋼生産量	0.008	ton-SUS/機能単位	C-2-9	(二次資源由来の) ステンレス鋼製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	979	CO ₂ -kg/ton	7.5
	樹脂製造	C-1-10	回収された樹脂原料由来の樹脂生産量	0	ton-樹脂/機能単位	C-2-10	(二次資源由来の) 樹脂製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	197	CO ₂ -kg/ton	0.0
D	鉄鋼電炉	D-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	0.0014	ton-鉄鋼/機能単位	D-2-1	(天然資源由来の) 粗鋼製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	2,282	CO ₂ -kg/ton	3.3

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 50 CO₂ 排出量削減効果のインベントリ（自動車）

カテゴリ	プロセス	活動量				排出原単位				排出量 (CO ₂ -kg/機能単位)
		参照番号	項目	数値	単位	参照番号	項目	数値	単位	
A	処理	A-1-1	使用済み製品処理量（アロケーション後）	1.000	ton/機能単位	A-2-1	使用済み製品処理1t当たりのCO ₂ 排出量	36	CO ₂ -kg/ton	36
	埋立	A-1-2	発生したSRの埋立量	0.006	ton-SR/機能単位	A-2-2	埋立処理1t当たりのCO ₂ 排出量	31	CO ₂ -kg/ton	0.19
	焼却	A-1-3	発生したSRの焼却量	0.000	ton-SR/機能単位	A-2-3	焼却処理1t当たりのCO ₂ 排出量	94	CO ₂ -kg/ton	0.00
	鉄鋼電炉	A-1-4	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	0.875	ton-鉄/機能単位	A-2-4	（二次資源由来の） 粗鋼製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	417	CO ₂ -kg/ton	364
	鉄鋼高炉	A-1-5	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	0.432	ton-鉄鋼/機能単位	A-2-5	（天然資源由来の） 鉄鉄製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	2,310	CO ₂ -kg/ton	999
	セメント原燃料	A-1-6	投入された原燃料向け樹脂量	0.017	ton-原燃料/機能単位	A-2-6	（二次資源由来の） セメント原燃料1ton当たりのCO ₂ 排出量	60	CO ₂ -kg/ton	1.0
	セメント製造	A-1-7	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	1.174	ton-セメント/機能単位	A-2-7	（二次資源由来の）セメント製造1ton当たりのCO ₂ 排出量（アロケーション後）	10	CO ₂ -kg/ton	12
	銅製錬	A-1-8	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	0.004	ton-銅/機能単位	A-2-8	（二次資源由来の） 銅製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	988	CO ₂ -kg/ton	4.2
B	セメント製造	B-1-1	代替された天然資源由来のセメント生産量	2.4495	ton-セメント/機能単位	B-2-2	（天然資源由来の）セメント製造1tonあたりのCO ₂ 排出量（アロケーション後）	10	CO ₂ -kg/ton	24
	銅製錬	B-1-2	代替された天然資源由来の銅生産量	0.0033	ton-銅/機能単位	B-2-3	（天然資源由来の） 銅製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	1,634	CO ₂ -kg/ton	5.4
	アルミニウム製錬	B-1-3	代替された天然資源由来のアルミニウム生産量	0.0000	ton-Al/機能単位	B-2-3	（天然資源由来の） アルミニウム製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	7,230	CO ₂ -kg/ton	0.00
	ステンレス鋼製錬	B-1-4	代替された天然資源由来のステンレス鋼生産量	0.0166	ton-SUS/機能単位	B-2-4	（天然資源由来の） SUS製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	2,874	CO ₂ -kg/ton	48
	樹脂（PP）製造	B-1-5	代替された天然資源由来の樹脂生産量	0.0000	ton-樹脂/機能単位	B-2-5	（天然資源由来の） 樹脂製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	630	CO ₂ -kg/ton	0.00
C	処理	C-1-1	使用済み製品処理量（アロケーション後）	1.0000	ton/機能単位	C-2-1	使用済み製品処理1t当たりのCO ₂ 排出量	36	CO ₂ -kg/ton	36
	埋立	C-1-2	発生したSRの埋立量	0.0061	ton-SR/機能単位	C-2-2	埋立処理1t当たりのCO ₂ 排出量	31	CO ₂ -kg/ton	0.19
	焼却	C-1-3	発生したSRの焼却量	0.0000	ton-SR/機能単位	C-2-3	焼却処理1t当たりのCO ₂ 排出量	94	CO ₂ -kg/ton	0.00
	鉄鋼電炉	C-1-4	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	0.3170	ton-鉄/機能単位	C-2-4	（二次資源由来の） 粗鋼製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	417	CO ₂ -kg/ton	132
	セメント製造	C-1-5	投入された原燃料向け樹脂量	0.0171	ton-原燃料/機能単位	A-2-5	（二次資源由来の） セメント原燃料1ton当たりのCO ₂ 排出量	60	CO ₂ -kg/ton	1.0
		C-1-6	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	3.6235	ton-セメント/機能単位	C-2-6	（二次資源由来の）セメント製造1ton当たりのCO ₂ 排出量（アロケーション後）	10	CO ₂ -kg/ton	36
	銅製錬	C-1-7	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	0.0075	ton-銅/機能単位	C-2-7	（二次資源由来の） 銅製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	988	CO ₂ -kg/ton	7.4
	アルミニウム製錬	C-1-8	回収されたアルミニウム製錬原料由来のアルミニウム生産量	0.0000	ton-Al/機能単位	C-2-8	（二次資源由来の） アルミニウム製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	306	CO ₂ -kg/ton	0.00
	ステンレス鋼製錬	C-1-9	回収されたステンレス製錬原料由来のステンレス鋼生産量	0.0166	ton-SUS/機能単位	C-2-9	（二次資源由来の） ステンレス鋼製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	979	CO ₂ -kg/ton	16
	樹脂製造	C-1-10	回収された樹脂原料由来の樹脂生産量	0.0000	ton-樹脂/機能単位	C-2-10	（二次資源由来の） 樹脂製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	197	CO ₂ -kg/ton	0.00
D	鉄鋼電炉	D-1-1	代替された天然資源由来の粗鋼生産量	0.5575	ton-鉄鋼/機能単位	D-2-1	（天然資源由来の） 粗鋼製造1ton当たりのCO ₂ 排出量	2282	CO ₂ -kg/ton	1,272

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

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、廃小型家電などの他製品への展開可能性と、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 採算性改善に向けた検討

3.3 では、標準解体方法の開発を目指して、複数のパターンで使用済み自動販売機を解体し、忌避物質含有部品を予め取り外した。その後、筐体を破碎・選別し、磁着物やミックスメタル、ダストを回収した。回収物の品位は、解体方法によって変動すると考えられる。忌避物質が管理されたことで、磁着物やダストの付加価値を向上できる可能性がある。他方、事前に銅等の有価物を回収するため、ミックスメタルの回収量・品位が低下する可能性がある。

回収物の販売収入・処理費用のほかには、解体する部品が増えることで、解体工数が増加すると考えられる。これは中間処理事業者のコストアップにつながってしまう。

そこで、回収物の成分分析の結果や、忌避物質が管理されたスクラップの素材産業側での評価（買取費用の見直しを含む）をもとに、今後の採算性向上に向けた課題と解決策を検討した。

3.4 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。加えて、GHG 排出量が紐づいたスクラップの生産にも取り組んだ。忌避物質含有量や GHG 排出量が記録されたスクラップは、情報が付加されていること自体が付加価値になる可能性がある。Scope3 の GHG 排出量算定にも寄与するスクラップとして、他社と差別化することにもつながる。

情報を記録するためには、QR シールを貼付したり、スマートフォンで写真撮影をしたり、手袋を外して携帯電話を操作したり、といった工数が生じる。他方、これまで書面で管理されてきた情報を、予めシステム上で管理することで、事務所での入力作業等を効率化できる可能性がある。また、情報システムの開発や運営、維持・管理にも一定の費用が発生する。中間処理事業者が採算性を取れる範囲で、低廉な価格でシステムを活用するには、システム開発・保全費用に掛かる費用も考慮する必要がある。

上記のような観点から、今後採算性を改善していくための課題を定性的に整理した。

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、また採算性改善に向けた検討結果を踏まえて、事業成果を実装するための課題を具体化した。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、実証事業後に実施するものを（2025年まで、2026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・システム実証委託業務」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4年8月30日（火）13:30～16:30
- 場所：ハリタ金属株式会社 本社工場／ウェブ会議によるハイブリッド開催
- 出席者
 - ・ 環境省事業担当者 3名（うち2名はウェブ参加）
 - ・ 事業審査委員 4名（うち1名はウェブ参加）
 - ・ 事務局業務受託者 2名（うち1名はウェブ参加）
- 応対者
 - ・ ハリタ金属株式会社 6名
 - ・ 株式会社ムスビメ 1名
 - ・ 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社 4名（うち2名はウェブ参加）
- 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） ハリタ金属（株）概要及び解体・破碎・選別工程のご説明
 - （3） （株）ムスビメ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。

- 日時：令和4年5月31日（火）13:00～14:15
- 場所：ウェブ会議
- 参加企業等：
 - ◇ 株式会社ツルオカ
 - ◇ ハリタ金属株式会社
 - ◇ 株式会社ムスビメ
 - ◇ 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社

- 日時：令和4年6月6日（月）13:00～15:00
- 場所：ウェブ会議
- 参加企業等：事業実施担当（研究会メンバー）
- 議題次第：
 - （1） 令和4年度事業計画（案）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②～④に関する実施方針の説明
 - （4） 実証テーマ⑤に関する実証方針の説明
 - （5） 環境影響改善効果・CO₂排出量削減効果の評価実施方針の説明
 - （6） 今後の予定

- 日時：令和4年7月8日（金）16:00～17:00
- 場所：ウェブ会議
- 参加企業等：
 - ◇ 早稲田大学理工学術院創造理工学研究科 大和田秀二 教授
 - ◇ イーペックスジャパン株式会社
 - ◇ 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング 株式会社

- 日時：令和4年7月11日（月）13:10～16:00
- 場所：ハリタ金属株式会社 本社工場
- 参加企業等：
 - ◇ ハリタ金属株式会社
 - ◇ 株式会社ムスビメ
 - ◇ 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング 株式会社

- 日時：令和4年7月13日（水）13:30～15:00
- 場所：株式会社ツルオカ 小山事業所
- 参加企業等：
 - ◇ 株式会社ツルオカ
 - ◇ 株式会社ムスビメ
 - ◇ 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング 株式会社

- 日時：令和4年7月22日（金）13:00～14:00
- 場所：ウェブ会議
- 参加企業等：
 - ◇ 東京大学大学院工学系研究科技術経営戦略学専攻 村上進亮 教授
 - ◇ 太平洋セメント株式会社
 - ◇ 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング 株式会社

- 日時：令和4年9月30日（水）10:00～11:00
- 場所：ウェブ会議
- 参加企業等：
 - ◇ 株式会社ツルオカ
 - ◇ ハリタ金属株式会社
 - ◇ 株式会社ムスビメ
 - ◇ 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社

- 日時：令和4年10月17日（月）13:00～15:00
- 場所：ウェブ会議
- 参加企業等：事業実施担当（研究会メンバー）
- 議事次第：
 - （1） 実証テーマ②～④に関する進捗報告
 - （2） 実証テーマ⑤に関する進捗報告
 - （3） 環境影響改善効果・CO₂排出量削減効果の評価に関する進捗報告
 - （4） 環境省中間報告会に関するご紹介
 - （5） 実証テーマ①に関する進捗報告
 - （6） 今後の予定

- 日時：令和4年10月28日（金）13:30～14:30
- 場所：ウェブ会議
- 参加企業等：
 - ◇ ハリタ金属株式会社
 - ◇ 株式会社ムスビメ
 - ◇ 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社

- 日時：令和4年12月20日（火）13:00～17:30
- 場所：株式会社ツルオカ 小山事業所
- 参加企業等：
 - ◇ 株式会社ツルオカ
 - ◇ 株式会社ムスビメ
 - ◇ 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社

- 日時：令和4年12月22日（木）8:00～10:30
- 場所：ハリタ金属株式会社 本社工場
- 参加企業等：
 - ◇ ハリタ金属株式会社
 - ◇ 株式会社ムスビメ
 - ◇ 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社

- 日時：令和 5 年 1 月 13 日（金）14:00～15:00
- 場所：ウェブ会議
- 参加企業等：
 - ◇ 株式会社ツルオカ
 - ◇ ハリタ金属株式会社
 - ◇ 株式会社ムスビメ
 - ◇ 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社

- 日時：令和 5 年 2 月 10 日（金）15:00～17:00
- 場所：ウェブ会議
- 参加企業等：事業実施担当（研究会メンバー）
- 議事次第：
 - （１） 事業全体の実施事項・成果・課題に関する進捗報告
 - （２） 実証テーマ①に関する進捗報告
 - （３） 実証テーマ②～④に関する進捗報告
 - （４） 実証テーマ⑤に関する進捗報告
 - （５） 環境影響改善効果・CO₂排出量削減効果の評価に関する進捗報告
 - （６） 令和 5 年度以降の事業構想に関する説明
 - （７） 今後の予定

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 4 年 11 月 9 日（水）16:00～16:40
 - ・ 開催方法：ウェブ会議
 - ・ 参加者：
 - 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社 清水、迫田、園原、千賀、村中

- 最終報告会
 - ・ 日時：令和 5 年 2 月 14 日（火）15:30～16:10
 - ・ 開催方法：都内会議室／ウェブ会議によるハイブリッド開催
 - ・ 参加者：
 - 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社 清水、迫田、園原、千賀、村中

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. マテリアルフロー推計の実施

4.1.1.1 流通量・忌避物質含有量に関する調査

（1）鉄鋼産業

事業第2年度と同様、国内に投入されるクロムのデータは、統計や公開論文等^{13,14,15,16,17,18,19,20,21}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²²を参考に設定した（図表51）。

図表 51 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

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（中間処理工程における磁着物）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^{13,14}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52：{1}～{4}）。

13 日本鉄鋼連盟「普通鋼・特殊鋼 品種別・用途別受注統計」（2020）

14 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）

15 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）

16 鉄鋼新聞社「鉄鋼年鑑 令和元年度版」（2019）

17 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)

18 日本鉄源協会「鉄源年報 第31号」（2020）

19 日本鉄源協会「クォータリー てつげん Vol.64」（2015）

20 日本鉄源協会「クォータリー てつげん Vol.83」（2020）

21 鉄鋼新聞社「鉄鋼年鑑 平成二十七年度版」（2014）

22 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

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と仮定した（{11}={2}、{12}={4}、{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）」の数値を用いた。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 52 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

(2) 非鉄製錬（銅・鉛・亜鉛）

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）より収集した。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投入されうるものを、ヒアリングをもとに分類した（図表 53）。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年度の各鉱種（銅、鉛、亜鉛）の総生産量を用いて按分し、各製錬工程への投入量を推計した。

非鉄製錬（銅、亜鉛）スラグの利用量は、日本鉱業協会資料中の用途別販売実績（2016～2020年度平均値）に、総生産量に占めるリサイクル原料・副産物等の投入比率を乗じて推計した。

図表 53 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

(3) 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)より引用した。

内訳の細分化が必要な廃棄物等の投入量は、推計や外部情報を参照して捕捉した。例えば、廃プラスチックに含まれる ASR・SR は、事業者の処理実績(廃プラスチック、ASR・SR)から、廃プラスチックに占める ASR・SR の比率を設定し、それぞれの投入量を推計した。

本年度は新たに、都市ごみ焼却灰の投入量の推計精度向上を図った。都市ごみ焼却灰は、セメントハンドブック上「燃えがら(石炭灰を除く)」に含まれていると想定される。そこで、外部データを用いて、都市ごみ焼却灰のセメントへの投入量を推計した。環境省²³統計データより、セメントにおける都市ごみ焼却灰の処理量を収集した。ここにはエコセメントでの処理量は含まれていないため、公益財団法人東京市町村自治調査会²⁴の公表値を参照した。

都市ごみ焼却灰の処理量は、主灰と飛灰の合算値であると想定される。主灰と飛灰のクロム含有量は異なるため、内訳を細分化する必要がある。脱塩設備の有無等によって、セメント工場での飛灰受入可否は異なるが、国内のセメント工場すべての飛灰・主灰の受入量を把握することは困難である。そこで、飛灰・主灰の発生比率を用いて、都市ごみ焼却灰の処理量を按分することとした。主灰・飛灰の発生比率は、各種文献値²⁵²⁶及びヒアリングをもとに設定した。なお、飛灰のほうハンドリングは煩雑であること、塩素含有量が高いことから、実際には主灰の使用量が多いと考えられ、主灰の投入量がやや過小に推計されている可能性がある。また、エコセメントにおける飛灰・主灰の受入量の比率は、既往文献²⁷をもとに設定した。

セメント産業には、再生資源由来のみでなく、天然資源由来のクロムも投入されている。特に、セメントの主原料である石灰石には、微量ながらクロムが含まれている。セメント製造時の石灰石の消費原単位は大きいため、含有率は低くとも、クロムの混入源として無視できない。セメントへの石灰石投入量は、石灰石鉱業協会が公表²⁸するセメント向け石灰石出荷量を引用した。石灰石以外の天然資源(年度、珪石)は、代表的なセメント製品として、ポルトランドセメント、高炉セメント、フライアッシュセメントの3つを選定し、これらの生産量とそれぞれの消費原単位²⁹から推計した。

²³ 環境省環境再生・資源循環局廃棄物適正処理推進課「日本の廃棄物処理 令和元年度版」(令和3年3月)

²⁴ 公益財団法人東京市町村自治調査会「多摩地域ごみ実態調査 2019年度統計」(2020年8月)

²⁵ 東京二十三区清掃一部事務組合 一般廃棄物処理基本計画改定検討委員会 第3回検討委員会資料1「ごみ焼却灰の処理及びそれに伴う資源の有効利用等について」(平成21年)

²⁶ 肴倉宏史「都市ごみ焼却残渣の資源化の現状と課題—資源価値の最大化に向けて—」廃棄物資源循環学会誌、Vol.2, No.5, pp. 339-348 (2018)

²⁷ 飯野成憲ほか「エコセメントに関する技術情報調査」東京都環境科学研究書年報2017

²⁸ 石灰石鉱業協会ウェブサイト (<https://www.limestone.gr.jp/doc/toukei/pdf/toukei2022.pdf>) (2022年10月閲覧)

²⁹ 一般社団法人セメント協会「セメントの LCI データの概要」(2021年)

4.1.2. 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。事業初年度は、中間処理事業者が受け入れている新断及びダライ粉のクロム含有量を分析した。いずれのスクラップも発生源が特定可能なものであり、発生源によるクロム含有状況の傾向を確認した。事業第 2 年度は、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。

本年度は、セメント生産工程で使用する焼却灰（飛灰、主灰）のクロム含有率を重点的に調査することとした。さらに、天然資源である石灰石中のクロム品位も調査対象とした。

4.1.3. 技術仕様の特定に関する検討

4.1.3.1 成分分析結果を踏まえたマテリアルフローの作成

(1) クロム

国内に投入される鉄鋼材に随伴して、各種製品等に投入されるクロムのマテリアルフローを推計した（図表 54）。鉄鋼中のクロムの推計方法は、事業第 2 年度の方法論を踏襲しており、事業第 2 年度からのフローの変化は軽微である。

鉄鋼材に伴って国内に投入されるクロムの多くは、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）に由来する。ステンレス鋼と比較すると少量ではあるが、構造用合金鋼や遮熱鋼、さらには普通電炉鋼にもクロムが含まれていた。

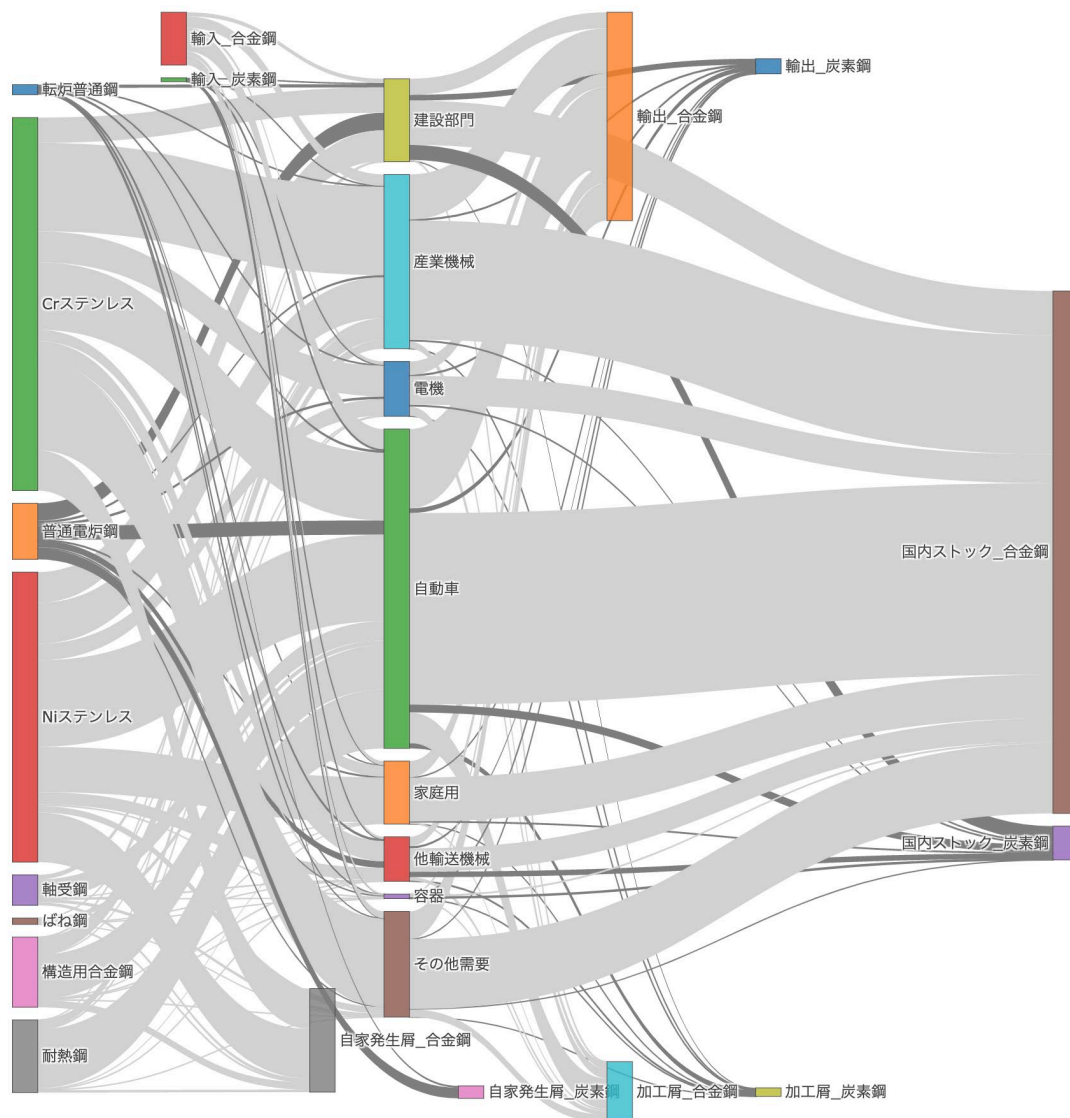
用途別では、自動車に使用されるクロムが多く、次いで産業機械や建設物でのクロム使用量が多かった。こうした製品が国内で使用されることで、クロムの多くは合金鋼として国内にストックされる。

次に、鉄スクラップ（普通鋼・特殊鋼）に随伴して流通するクロムのマテリアルフローを推計した（図表 55）。クロムの主な発生源は、老廃系の特殊鋼スクラップであると推計された。製品別では、機械類や建設物、その他由来の老廃スクラップからの発生量が多い。

特殊鋼スクラップに含まれるクロムは、半量程度しか特殊鋼電炉に投入されていない（主にステンレス鋼）。残り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、主に普通電炉鋼材とスラグ（特に還元スラグ）に分配されるが、一部は普通鋼電炉ダストやスラグ（酸化スラグ）にも分配されることがわかる。

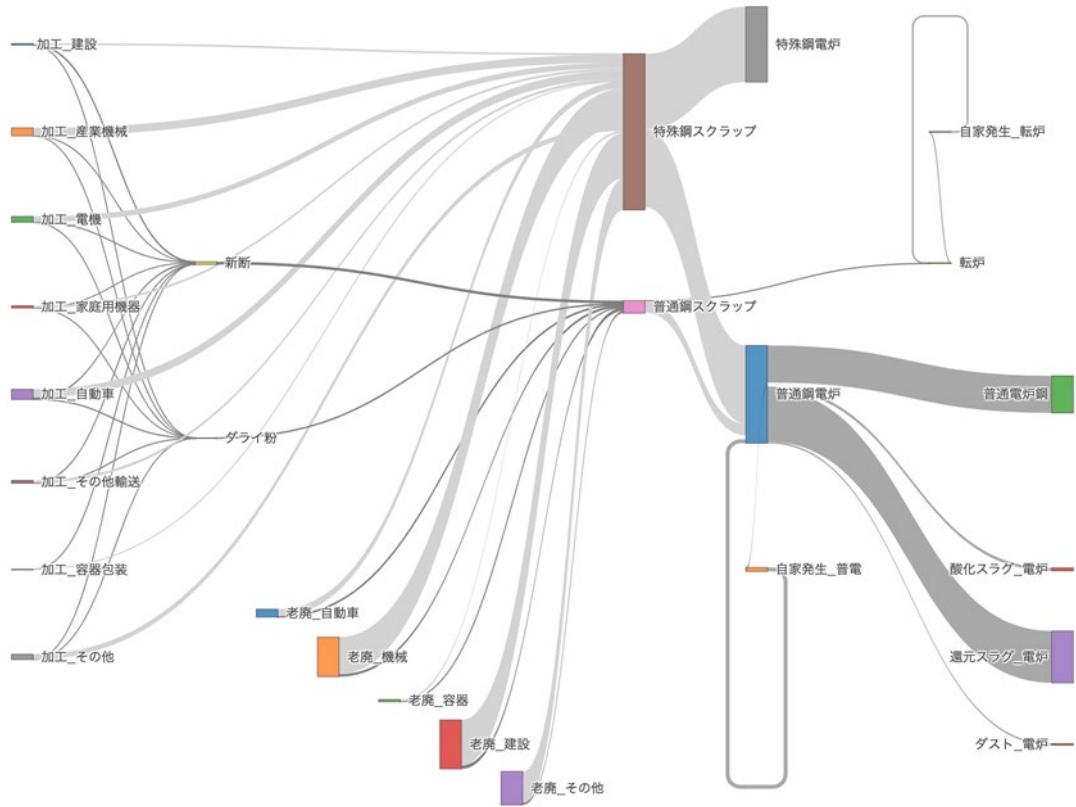
図表 54 のフローに再度注目すると、普通電炉鋼中にもクロムが少なからず含まれていることがわかる。これは、図表 55 における普通鋼電炉に流入した特殊鋼スクラップ中のクロムによるものであることがわかる。鉄スクラップから十分に特殊鋼スクラップを分離できていないことによる影響が、普通鋼電炉にも及んでいることがわかった。

図表 54 クロムのマテリアルフロー推計結果（鉄鋼材に随伴する流通量：2019 年）



（出所）東京大学村上研究室作成

図表 55 クロムのマテリアルフロー推計結果（スクラップに随伴する流通量：2019 年）



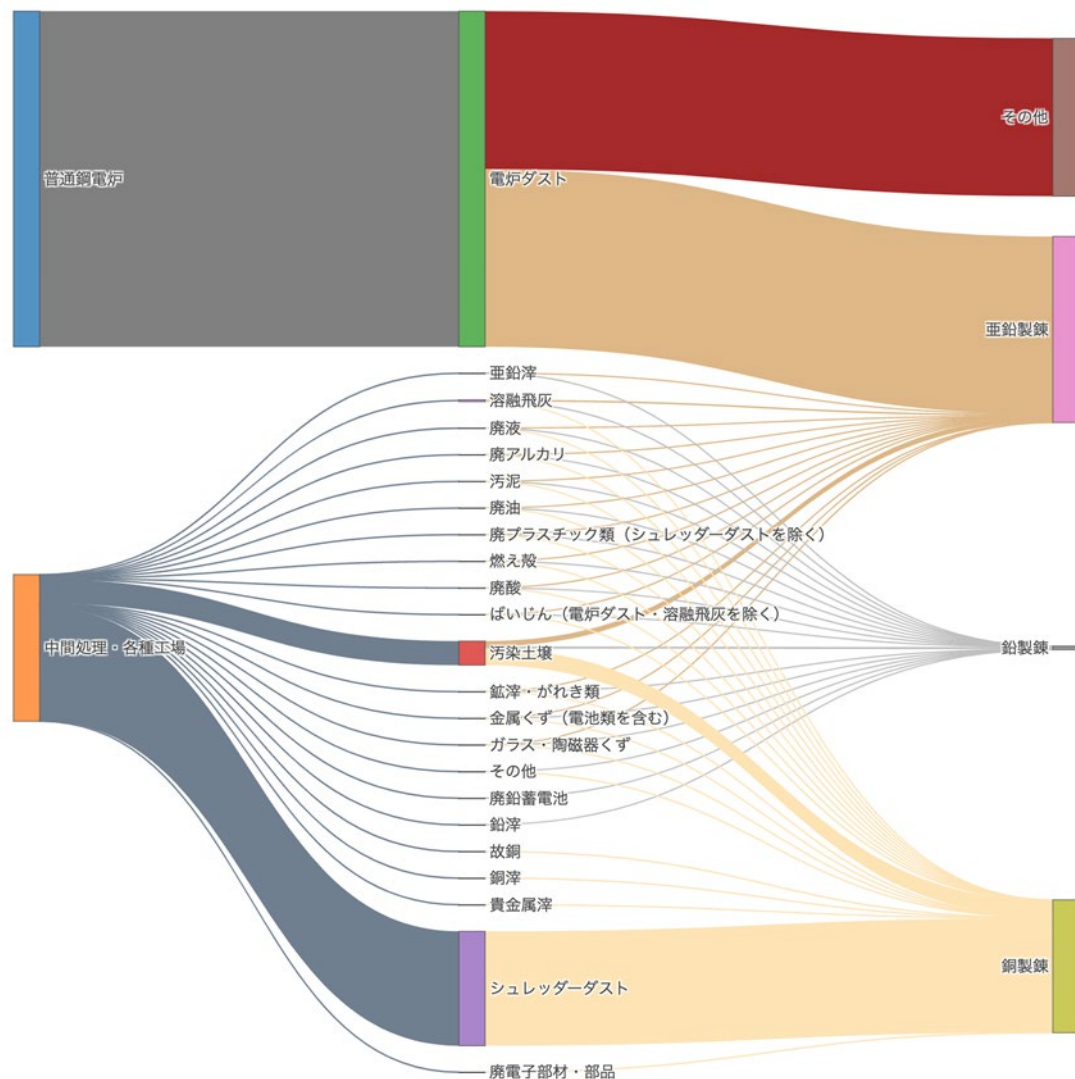
(出所) 東京大学村上研究室作成

次に、普通鋼電炉由来の原料（電炉ダスト）以外のものも対象に、非鉄製錬に投入される循環資源中のクロム賦存量を確認した（図表 56）。これは、後段のセメント原料中のクロム含有量の検討に必要な情報であるほか、4.1.3.2 で Regional Sensitivity Analysis（RSA）を行うための基礎情報にもなる。

非鉄製錬へのクロムの投入量は、本推計結果では、相対的にそれほど多くないと考えられる。図表 55 に示す通り、普通鋼電炉ダスト中に分配されるクロムは、電炉普通鋼やスラグと比較すると少ないためである。

他方、無視できる規模ではない普通鋼電炉ダスト中のクロムが、亜鉛製錬に流入していることがわかった。また、亜鉛製錬ほどではないが、銅製錬にもクロムが流入している。銅製錬の主なクロム流入源は、シュレッダーダストであることがわかった。

図表 56 クロムのマテリアルフロー推計結果
（廃棄物・副産物に随伴する非鉄製錬への投入量：2019 年）



（出所）東京大学村上研究室作成

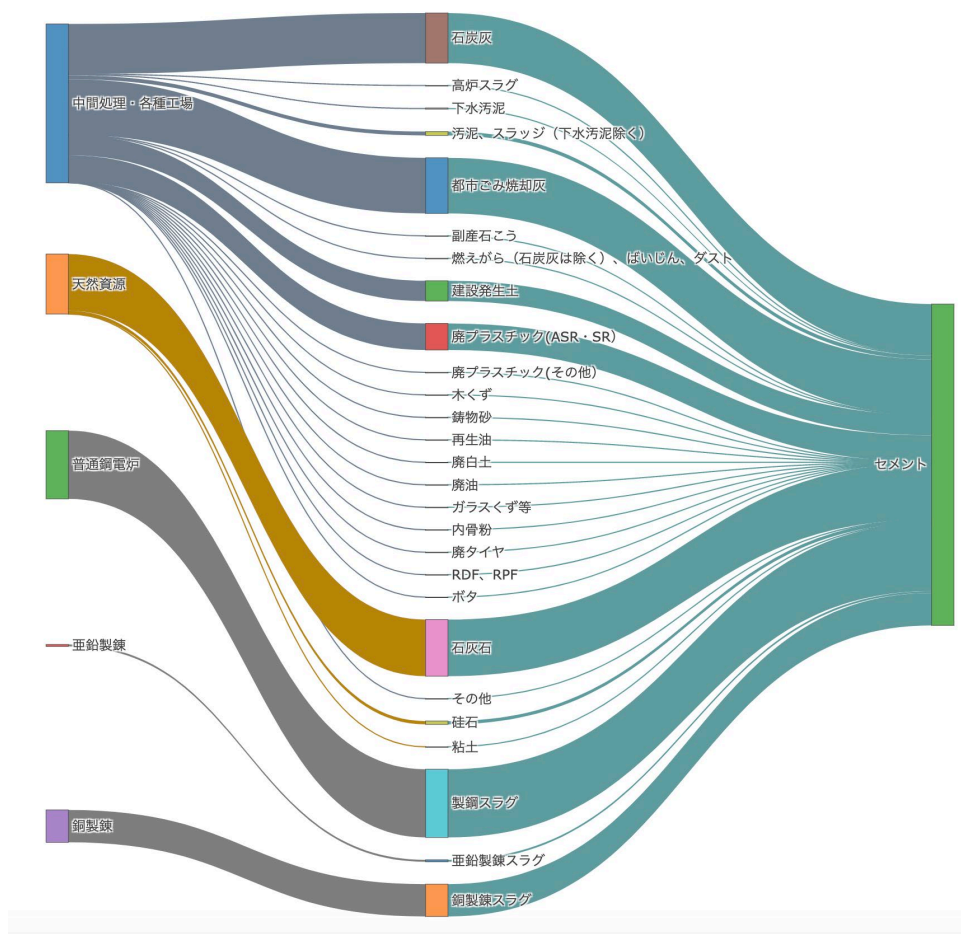
鉄鋼電炉及び非鉄製錬へのクロム流入フロー推計結果をもとに、4.1.3.2 で RSA の検討対象とするセメント産業へのクロムの流入量を整理した（図表 57）。

図表 56 と図表 57 の結果で注意すべき点は、亜鉛製錬スラグと銅製錬スラグに由来するクロムの混入量である。図表 56 では、亜鉛製錬スラグ中のクロムが、銅製錬スラグ中のクロムより多い結果となったが、図表 57 では大小関係が反転した。

本事業では、素材生産事業者の協力を受けて、亜鉛製錬スラグのクロム含有量データを複数年分収集した。成分情報の収集と併せて実施したヒアリングでは、全国の平均値と比較して、クロム含有量が少ないものであったとの指摘も受けている。そのため、亜鉛製錬スラグ中のクロム含有量が過小推計されている可能性がある。また、別の要因として、亜鉛製錬スラグ及び銅製錬スラグの需要先への販売比率の設定値による影響も考えられる。

上記のような推計上の課題はあるものの、セメント産業における主なクロム混入源は、石炭灰、都市ごみ焼却灰、石灰石、製鋼スラグ、銅製錬スラグであることがわかった。このうち、製鋼スラグへのクロム混入要因として、普通鋼電炉への特殊鋼スクラップの混入が、銅製錬スラグへのクロム混入要因として、シュレッターダストが大きく影響している。こうした情報を踏まえて、RSA を用いた分析を試行することとした。

図表 57 クロムのマテリアルフロー推計結果
(天然資源・廃棄物・副産物に随伴するセメントへの投入量：2019 年)



(出所) 東京大学村上研究室作成

(2) 塩素

塩素に関しては資源循環上の懸念は多くあることから、局所的にマテリアルフロー分析を実施した事例はいくつか存在する。

近年実施された推計として、Kumagai et al.³⁰による PVC の日本国内におけるフローの検討（2012 年）がある。同推計結果によれば、407.8 万トンの塩素が輸入され、344.6 万トンが国内の産業によって利用されている。最終的には、そのうちの 134.6 万トンが PVC の生産に、178.33 万トンがその他の化学工業製品向けに利用されたとしている。

ここからも分かるように、PVC は塩素の一大需要先であることは間違いなく、分析の対象として重要なものであるといえる。

そこで、PVC の国内出荷先を製品別、産業別に整理した（図表 58、図表 59）。製品別ではパイプが、産業別では住建・土木が、それぞれ圧倒的なシェアを占めていることがわかる。また、2010 年以降、製品別・産業別ともに、国内出荷量に大きな変化がないこともわかった。なお、先の推計結果³⁰より古いデータとなるが、Nakamura et al.³¹は 2000 年の PVC のフローを推計している。同調査の推計結果では、PVC の生産量は 240 万トンであり、このうち約 80 万トンが輸出され、残りの 160 万トンが国内で消費されると推定している。

これまで整理したデータを踏まえると、土木・住建を中心に調査を行うことが有効であると考えられる。土木・住建用途での PVC 利用に関して、磯部ら³²は、PVC の国内排出量を 118 万トン、再資源化量を 13 万トン程度と推計している。再資源化量の内訳は、塩ビ管が 6.7 万トン程度、電線被覆材で 2.6 万トン程度とされる。塩ビ管、継手は業界としてリサイクルシステムを整備しており、その中でここ数年は 2 万トン程度がリサイクルされているとのことである（出荷量は 30 万トン程度）。

土木・住建用途以外では、農業用フィルムも比較的リサイクルが進んでいる製品である。ここ数年、排出量は 10 万トン強、リサイクル率は 72.5%程度とされていることから、年間 7 万トン程度がリサイクルされていると考えられる。これらの製品以外に、大規模な PVC のリサイクルは実施されていないものとみられる。

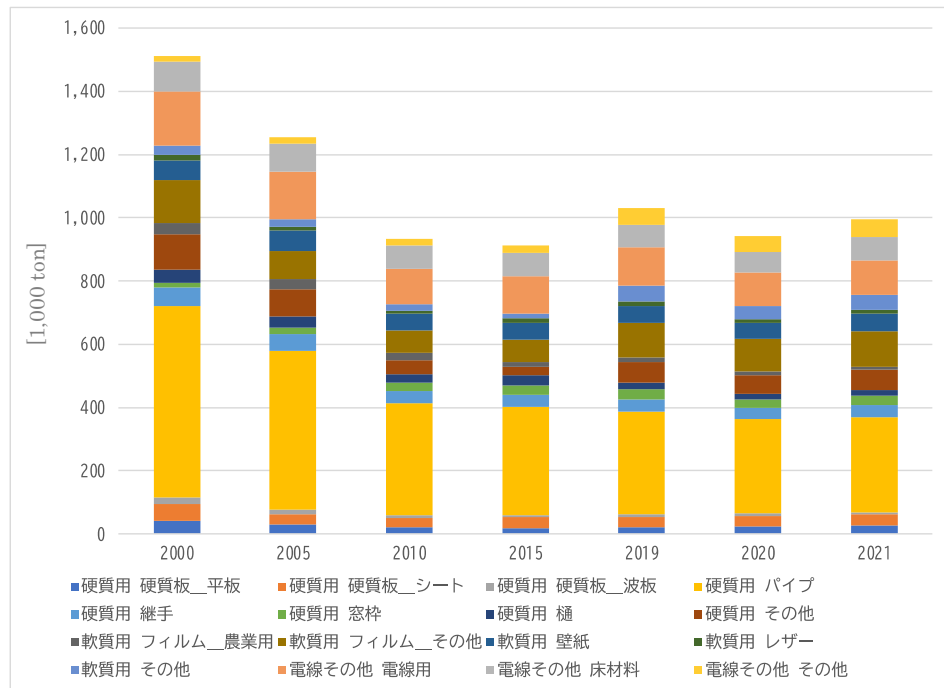
こうした情報を総合的に勘案すると、年間 20 万トン前後程度がマテリアルリサイクルされている可能性がある。ただし、国内出荷量から推察される排出量を 100 万トン程度であると考えれば、80 万トン程度はリサイクルされずに、各所に混入している可能性がある。このうちの一部が、様々な素材産業にも混入している可能性があることが明らかになった。

³⁰ Kumagai, S., Lu, J., Fukushima, Y., Ohno, H., Kameda, T., Yoshioka, T., “Diagnosing chlorine industrial metabolism by evaluating the potential of chlorine recovery from polyvinyl chloride wastes—A case study in Japan”. *Resour. Conserv. Recycl.* 133, 354–361, 2018.

³¹ Nakamura, S. et al. “Analyzing Polyvinyl Chloride in Japan With the Waste Input-Output Material Flow Analysis Model. *Journal of Industrial Ecology*” vol. 13, no. 5, p. 706–717, 2009.

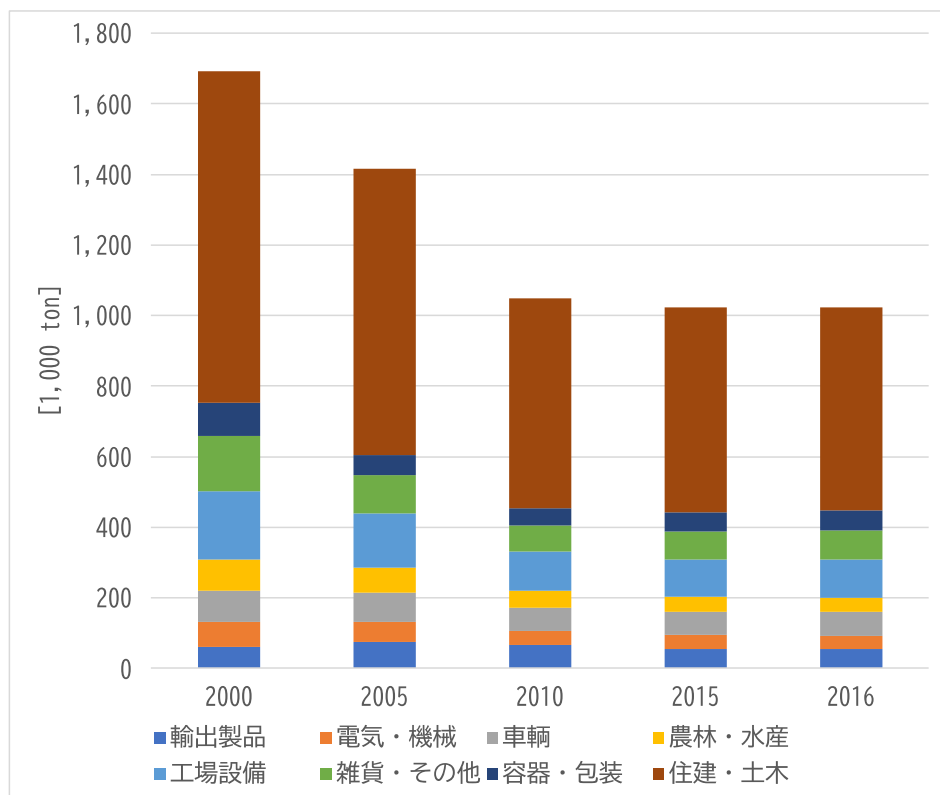
³² 磯部 孝行, 清家 剛, 金 容善, 伊藤 篤史, 原田 優作, 東アジアにおける塩化ビニル廃材のマテリアルフロー分析, 日本 LCA 学会誌, 2016, 12 巻, 3 号, p. 196-207

図表 58 PVC の製品別出荷量



(出所) 東京大学村上研究室作成

図表 59 PVC の産業別出荷量



(注) データの入手性に制約があり 2017 年以降は更新できていない。

(出所) 東京大学村上研究室作成

(3) 銅

銅のマテリアルフロー研究自体は、金属の中でも最も古くから検討されてきたものである。忌避元素の側面では、鉄鋼中のトランプエレメントとしての銅に関する研究が非常に多い。近年実施された代表的なマテリアルフロー分析結果として醍醐らの研究³³を挙げられる。同研究の重要な示唆は、20年近く普通鋼への銅の混入が問題と言われてきたにもかかわらず、当該論文の発表時点（2018年）において、銅の混入源は明らかになっていないという点である。

電炉棒鋼中の銅濃度について1960年代から2010年代までの文献値を時間に対して回帰したところ、0.3%程度で変化がないことが示されている。電炉棒鋼は各品種内での銅許容量が最も高く、多様なスクラップを原料とすることが知られている。電炉棒鋼の銅濃度が変化しないということは、その他の各鉄鋼材中の銅含有量も大きくは変わっていないと考えられる。

こうした仮定をもとにモデル分析を実施した結果、老廃系の鉄スクラップ中の銅含有量は、2000年頃には0.27%程度であったものが2010年頃には0.20%程度まで低下したと結論づけている。

老廃系の鉄スクラップの銅含有量が低下した要因として、スクラップ中の鋼材品種のシェアが変化したことと、普通鋼以外の素材が鉄スクラップに混在する量が増えた結果であると結論づけている。前者が増加、後者が低下傾向にあると推定されるが、後者については、他素材の分離選別効率が上がったのか、そもそも銅を使わないものが増えているのかのいずれかが要因であると考えられる。この要因の1つとして、雑品スクラップの輸出量の増加が、結果的に国内における鉄スクラップへの銅混入量の低下に貢献した可能性を示唆している。

こうした考察は、本事業にとっても重要な示唆である。中国の輸入禁止措置以降、雑品スクラップの輸出量は激減している。そのため、国内で消費される鉄スクラップに銅が混入する可能性が、再度高まっている恐れがある。輸入禁止措置以降の直近の状況は、詳細に検討しておく必要がある。

本事業では、全体感のある銅のフローを描くため、情報収集を実施した。中国の輸入規制の影響で、国内の鉄スクラップ中の銅含有量が高まると想定していたが、ヒアリング調査や一部の分析データからは、明示的な傾向を確認することは出来なかった。

³³ 醍醐 市朗, 瀧 将太, 太田 暁, 林 英男, 榎 学, 日本における普通鋼中の Cu 濃度を決定する要因の同定, 鉄と鋼, 2018, 104 巻, 8 号, p. 461-466

4.1.3.2 今後必要とされる分離技術に関する検討

3.1.2.2 で既述の通り、RSA は大域的感度分析手法の一つであり、マッピングを行うものである。ここでは、図表 56、図表 57 に示したセメントに流入するクロムのマテリアルフローを参考に、セメントに流入するクロムを管理するうえで、影響の大きいパラメータの特定を目指す。

まず、RSA を行う際に変化させるパラメータを設定した（図表 60）。個社の分析値を含むこと、代表値とみなすことが難しいものが含まれるため、詳細な値は記載しない。今回は全てのパラメータが正規分布に従うものと仮定した。その際に与える分散は、全て入手可能な文献値、サンプル値等の平均の 3 割と設定した。これは、平均値に対して同じレベルの変化を与えることで、パラメータとしての影響の大小を考察するためである。

4.1.3.1 で既述の通り、亜鉛製錬スラグは、今回使用している分析値が代表的でない可能性があるため、別途文献調査等から得られた値を用い、パラメータは変化させないこととした。製鋼スラグは多様な要因が考えられるものの同様の扱いとした。

そのうえで、亜鉛製錬スラグ及び製鋼スラグは、問題の発端である普通鋼電炉への特殊鋼スクラップの混入比率を変化させることで、その影響を間接的に受けるものとした。シュレッターダストは、直接セメントへ投入されるものと銅製錬を経由して影響を与えるものがあるが、銅製錬スラグ中のクロム含有量は他の原料による影響も受けることから、銅製錬スラグの濃度そのものを変化させることとし、セメントに直接投入される部分の影響のみ考察した。

Python のパッケージである EMA_workbench を用い、モンテカルロシミュレーションの試行回数は 10,000 回とした。また、KS 検定を行うのではなく、制御目的変数であるセメント中のクロム混入率の大小によって、均等なサンプル数を持つ 10 群に分けた散布図を用いることで、パラメータの変動による傾向を分析することとした。

図表 60 RSA で変化させる代表的なパラメータ

対象物	対象データ
シュレッターダスト	クロム混入率[%]
都市ゴミ焼却灰	クロム混入率[%]
銅製錬スラグ	クロム混入率[%]
普通鋼電炉への特殊鋼スクラップの混入比率	現状に対する変化幅

（出所）東京大学村上研究室作成

制御目的変数であるセメント中のクロム混入率の分布を整理した（図表 61）。パラメータの分布に正規分布を用いたことも影響している可能性があるが、ベル状の分布を示した。しかし、KS 検定を用いて正規性を検証した結果、本分布は正規分布とは認められなかった。

次に、RSA を行い、パラメータを変化させた際の制御目的変数の変化を確認した（図表 62）。凡例にある「group」とは、0 から 9 に数値が増えるに従ってクロム混入率が高くなることを示す。なお、それぞれの群（ASR/SR、都市ゴミ焼却灰、銅製錬スラグ、特殊鋼スクラップ混入）に含まれるサンプル数は同一である。

今回注目しているパラメータは、基本的にこれらの値が高くなる（原料中のクロム混入率が高まる、もしくは特殊鋼スクラップの混入比率が高まる）と、目的変数（セメント中のクロム混入率）が高くなると推察される。そのため、右肩上がりの傾向になると期待される。なお、

各群の y 軸方向の高さが中央付近では狭く、左端もしくは右端に近づくにつれて広がるのは、セメント中のクロム混入率の中央付近の分布密度が高いことを示す。

今回検討した 4 つのパラメータに注目すると、その全てがある程度の傾向を有することがわかる。すなわち、感度分析結果は、全てのパラメータに対して、セメント中のクロム混入率は右肩上がりの傾向を示しており、少なくとも当初仮説と逆行するものはない（どのパラメータも、数値が大きくなれば、セメント中のクロム混入率が高くなる傾向）。

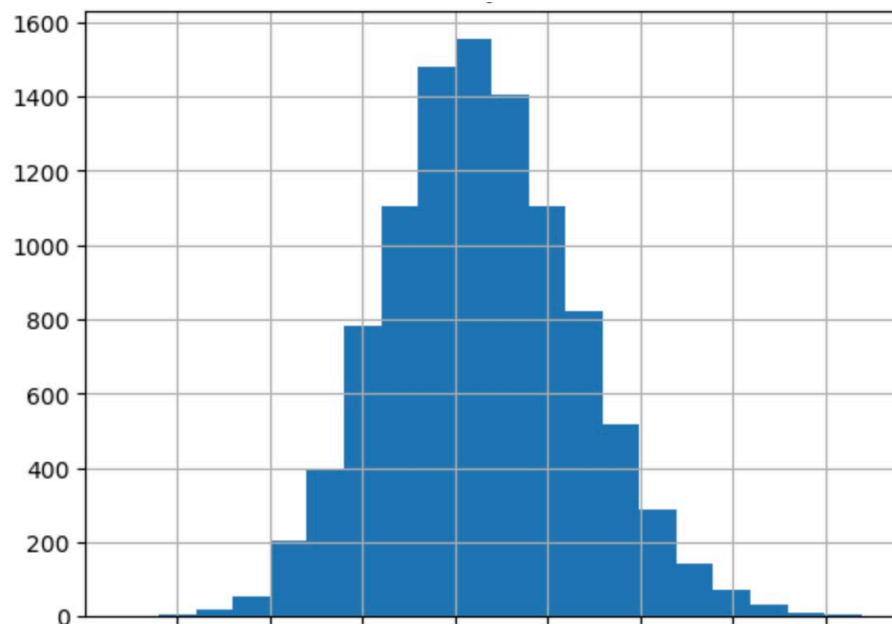
傾向の強さに注目すると、明らかに特殊鋼スクラップの普通鋼電炉への混入率が突出して強い傾向を持つように見える。対照的に、シュレッダーダスト（ASR とその他の SR を区別せずに投入しているためここで ASR/SR と表記している）の右肩上がりの傾向は非常に弱い。

また、混入率の濃淡を示す「group」に注目して詳細な傾向を確認する。例えば、薄い群（group 0）より、濃度の高い群（group 9）に注目するほうが、シュレッダーダストの相関の弱さは明らかである。都市ごみ焼却灰は、濃度の薄い群（group 0）の方が顕著な傾向を示しており、逆に特殊鋼スクラップの混入率は濃度の濃い群（group 9）で強い相関を有する様子が確認できる。特殊鋼スクラップの混入比率が高まると、セメント中のクロム混入率は顕著に増加する傾向がみられるといえる。

当初の仮定から、全てのパラメータが右肩上がりの傾向を持つことを改めて確認できた。シュレッダーダストや都市ごみ焼却灰、銅製錬スラグに含まれるクロムを分離すること、鉄スクラップから特殊鋼スクラップを分離することが、セメント中のクロム混入率を低下すること、特に、特殊鋼スクラップの分離による効果が大きいと期待されることを特定した。

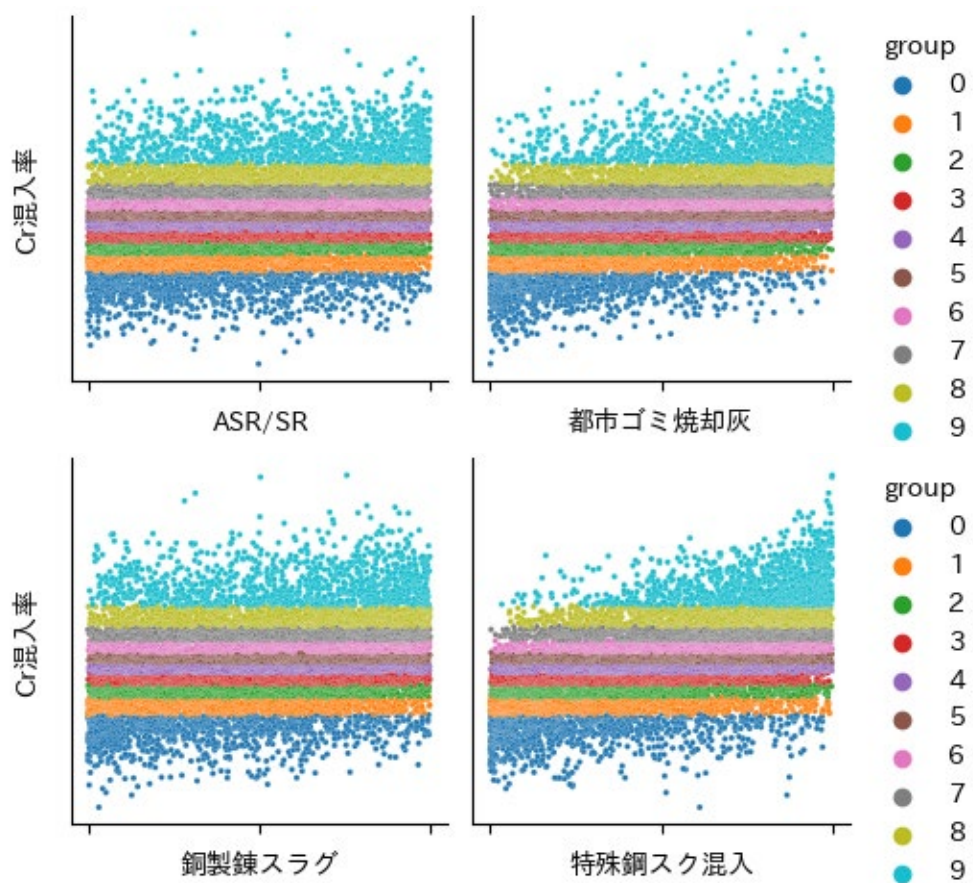
ただ、現実的には、セメント企業が、普通鋼電炉への特殊鋼スクラップの混入比率を下げるよう取り組むことは、非常に難しい。製鋼スラグの受入基準を厳しくすれば可能であるが、その結果として、クロム含有量の多い製鋼スラグが多用途で使用される結果となる。社会全体の資源効率を高めるためには、当該パラメータ（普通鋼電炉への特殊鋼スクラップの混入）を制御することは非常に重要であることが分かる。

図表 61 モンテカルロシミュレーションの結果得られたセメント中の Cr 混入率の分布



(出所) 東京大学村上研究室作成

図表 62 RSA の結果の一例



(注) 縦軸はセメントへの Cr 混入率、凡例は 0 から 9 に向けて混入率が高くなる。

(出所) 東京大学村上研究室作成

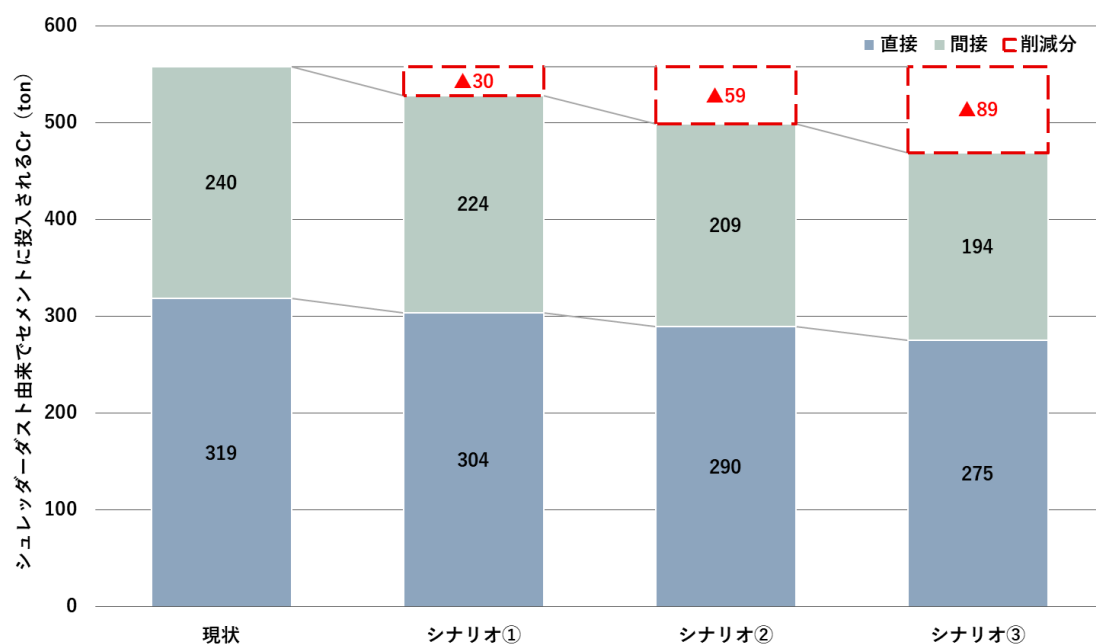
4.1.4. 規格案の導入効果に関する検討

廃プラスチック原燃料のうち、シュレッダーダストが、3.2 で検討する廃プラスチック原燃料規格案で規定された品質水準で取引された際に、社会全体で管理可能となるクロムの重量を推計した。

推計の結果、シナリオ②（セメント及び銅製錬に投入されるシュレッダーダストのうち、60%が第1等級の水準（クロム含有量：0.1%））の場合、日本全国で毎年、セメントに投入されるクロムを 89t 削減できることがわかった。

日本全国で年間セメントに投入されるクロムの重量は 4,000kt 程度と推計され、セメント全体での削減効果はそれほど大きくない（セメントに投入されるクロム全体の 0.002%）。他方、仮に現状と同じ水準での受け入れが可能な場合、第1等級を満たす廃プラスチック原燃料であれば、9 万 t 程度を追加で受入可能になると考えられる。なお、今回は廃プラスチック原燃料のうち、シュレッダーダストのみを対象にしているため、過小評価になっている可能性がある。

図表 63 廃プラスチック原燃料の規格案導入によるセメントでのクロム削減効果（一例）



(注)

- ・直接：セメントに投入されるシュレッダーダスト中のクロム
 - ・間接：銅製錬に投入されるシュレッダーダスト中のクロムが銅製錬スラグに分配され、セメントに投入される分を想定
 - ・現状：2019 年の推計値（マテリアルフロー分析結果より引用）
 - ・シナリオ①：シュレッダーダストのうち、20%が第1等級水準（0.1%）で管理された場合
 - ・シナリオ②：シュレッダーダストのうち、40%が第1等級水準（0.1%）で管理された場合
 - ・シナリオ③：シュレッダーダストのうち、60%が第1等級水準（0.1%）で管理された場合
- （出所）MURC 作成

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. 解体・破碎・選別処理の実施

解体・破碎・選別処理実証で生産される用いた規格案への対応可能性（実証テーマ③における回収産物が品質等級規格案における各品質等級の水準を満たすかどうか）を検討した。検討結果は4.3.1.3にて詳述している。

4.2.2. 回収した再生資源の評価及び規格案の改善検討再生資源の規格案の策定

4.2.2.1 規格案の改善検討

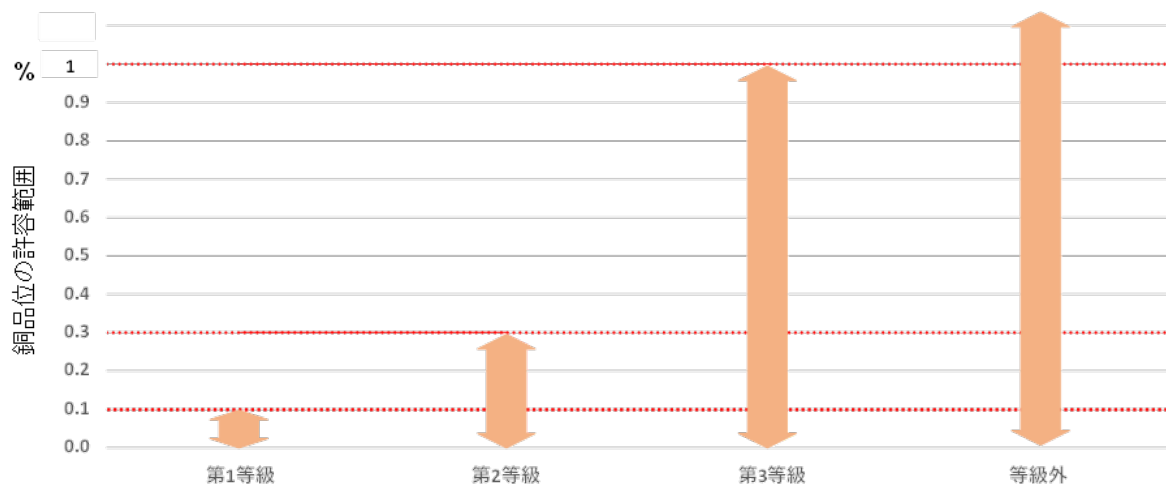
(1) 鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）

事業第2年度に実施した鉄スクラップ（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をもとに品質等級規格案を作成した。銅品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級及び各等級設定の考え方は次の通りである。

- 第1等級：最も厳しい水準（事業第2年度推計をもとに）
- 第2等級：第1等級の3倍（3倍系列の考え方から）
- 第3等級：第2等級の3倍（3倍系列の考え方から）※きりのよい近似値
- 等級外：上記目標値から外れるもの

鉄スクラップの銅品位に関する基準を設けるものとして、自動車リサイクル法第31条に基づく全部再資源化制度があるため、同スキームにおける忌避物質品位の基準を確認し、本事業で作成した品質等級規格案との乖離の有無を整理した³⁴。全部再資源化制度においてコンソーシアム（全部再資源化業者（解体業者、破碎業者）、全部利用者（電炉・転炉業者）、コンソーシアム代表者（商社等）からなるもの）が31条に基づく認定を受けるためには、全部再資源化業者が「精緻な解体」を実施することが条件となる。「精緻な解体」とは、Aプレス中の銅品位が0.3%以下となるような解体であることが一つの基準とされている³⁵。本事業における品質等級規格案では、銅の第2等級を0.3%以下としたが、これは自動車リサイクル法全部再資源化制度が一般的に求める基準とも対応するものになっている。

図表 64 銅品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級規格案



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

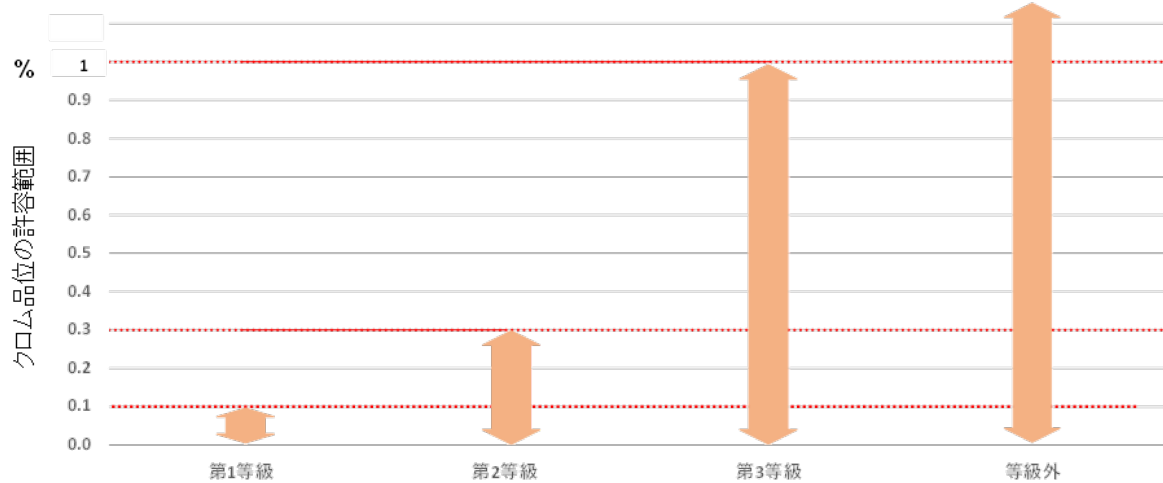
³⁴ 同スキームはAプレスを対象としたものであるが、本事業では参考となる基準として整理した。

³⁵ <http://www.jrcm.or.jp/jrcmnews/0508jn226.pdf>

事業第2年度に実施した鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）におけるクロムの許容品位の推計結果をもとに品質等級規格案を作成した。クロム品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級及び各等級設定の考え方は次の通りである。なお、鉄スクラップのクロム品位に関する品質等級や基準を設ける既存規格等は存在しないものとみられる。

- 第1等級：最も厳しい水準（事業第2年度推計をもとに）
- 第2等級：第1等級の3倍（3倍系列の考え方から）
- 第3等級：第2等級の3倍（3倍系列の考え方から）
- 等級外：上記目標値から外れるもの

図表 65 クロム品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級



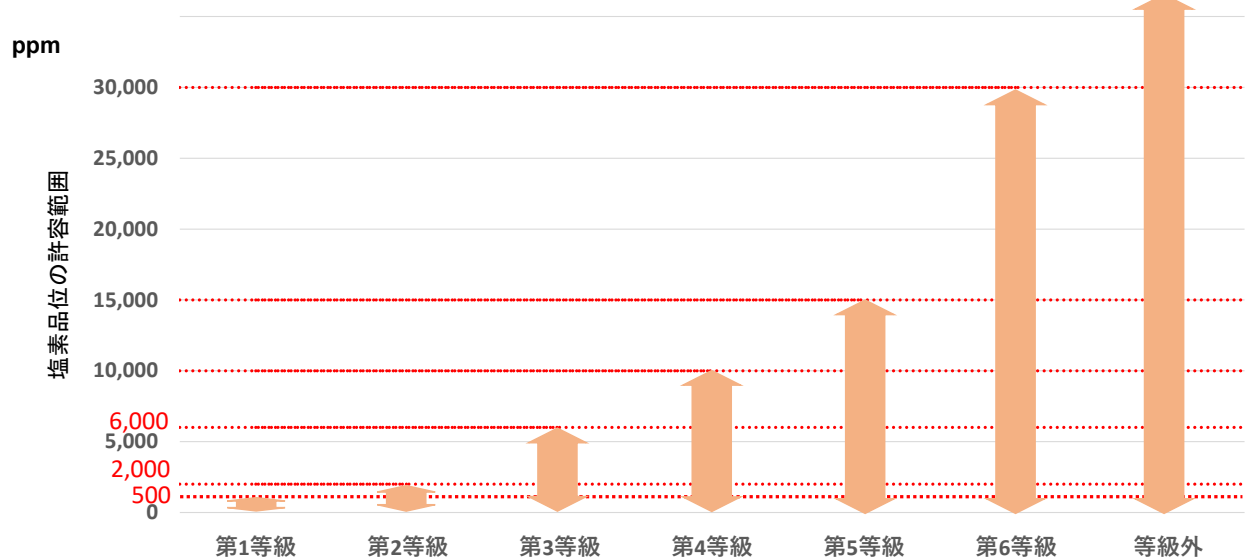
（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

(2) 廃プラスチック原燃料

事業第2年度に実施した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、及び既存規格との整合性調査をもとに品質等級規格案を作成した。塩素品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級及び各等級設定の考え方は次の通りである。廃プラスチック原燃料を対象として含み、塩素品位に応じた品質等級を定める既存規格として ISO 21640:2021 (Solid recovered fuels – Specifications and classes) がある。この内容を調査し、同規格との整合性を確保するよう品質等級を設定している。

- 第1等級：最も厳しい水準（事業第2年度推計をもとに）
- 第2等級：第1等級の3倍（3倍系列の考え方から）
- 第3等級：第2等級の3倍（3倍系列の考え方から）
- 第4等級：既存規格に合わせた値
- 第5等級：第3等級の3倍（3倍系列の考え方から）※きりのよい近似値
- 第6等級：既存規格に合わせた値
- 等級外：上記目標値から外れるもの

図表 66 塩素品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級規格案

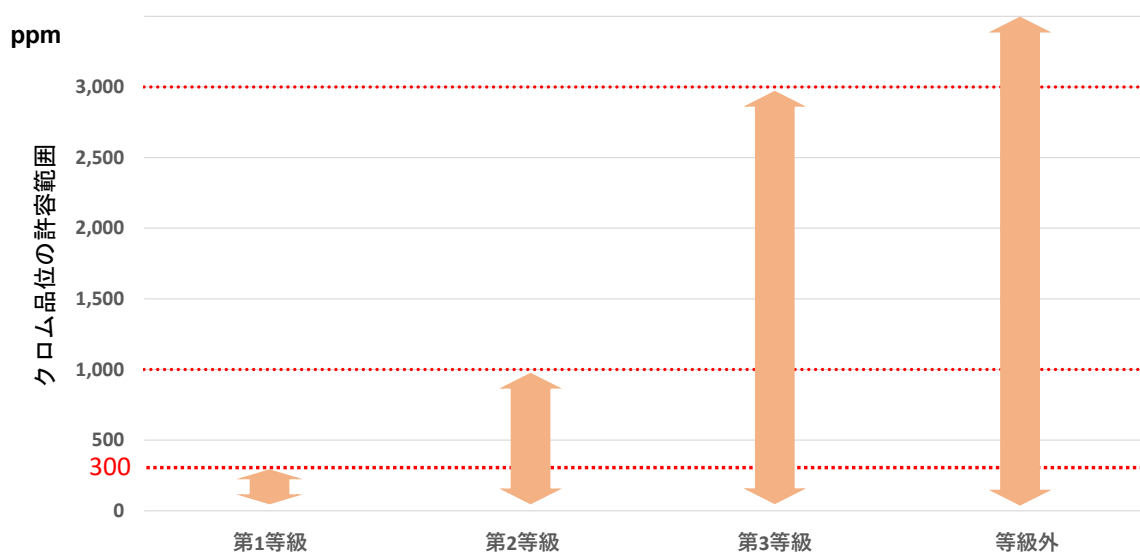


(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

事業第2年度に実施した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をもとに品質等級規格案を作成した。クロム品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級及び各等級設定の考え方は次の通りである。なお、廃プラスチック原燃料のクロム品位に関する品質等級や基準を設ける既存規格等は存在しないものとみられる。

- 第1等級：最も厳しい水準（事業第2年度推計をもとに）
- 第2等級：第1等級の3倍（3倍系列の考え方から）※きりのよい近似値
- 第3等級：第2等級の3倍（3倍系列の考え方から）
- 等級外：上記目標値から外れるもの

図表 67 クロム品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級規格案



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

本事業では、図表 68 の構成にて、忌避物質品位に応じた再生資源の品質等級に関する規格案を文書として作成した（6.2 及び 6.3）。今回は品質等級及び品質等級表示方法に焦点を当てた規格文書案を作成しているが、今後は、品質等級を判定するための分析試験方法、品質管理・保証等のためのトレーサビリティや情報伝達に関する規格の具体化も必要となると考えられる。

図表 68 規格文書案の構成及び概要

章	タイトル	規定の概要
1	適用範囲	忌避物質品位に応じた品質等級、並びに、取引する再生資源に関する情報の表示事項を適用範囲とする旨を規定
2	引用規格	一般社団法人日本鉄源協会「鉄スクラップ検収統一規格」を引用規格として掲載
3	用語及び定義	「鉄スクラップ（シュレッタースクラップ）／廃プラスチック原燃料」、「忌避物質」、「忌避物質品位」等の定義を規定
4	原則	忌避物質品位に応じて等級に分類することを規定
5	忌避物質品位に応じた品質等級	銅品位（鉄スクラップのみ）、塩素品位（廃プラスチック原燃料のみ）、クロム品位に応じた品質等級を規定
6	分析試験	該当する品質等級を判断するために用いるべき分析試験方法（サンプリング方法、化学分析方法等）またはその代替となる判断方法（プロセスによる判断）について簡易的に記載
7	表示	再生資源の品質（等級）に関する表示事項（製品名、製造業者、年月、番号、品質等級）、品質等級の表示方法を規定
附属書 A	品質等級の設定方法	根拠資料として、分類基準の検討方針、忌避物質の許容品位の推計方法、推計結果（事業第 2 年度の本事業調査結果に基づくもの）を掲載
附属書 B	ラベル例	参考資料として、忌避物質品位に応じた品質等級を示すためのラベルの例（イメージ）を掲載

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

4.2.2.2 忌避物質品位に着目した品質管理上の課題整理

本事業では品質等級規格案を作成したが、忌避物質品位に着目した品質管理を実現するためには、これを管理目標として、中間処理業における工程管理、それが実際に達成されているかどうかを確認するための試料採取や成分分析を含む品質評価なども行う必要がある。そこで、本事業では、中間処理事業者、鉄鋼電炉事業者及びセメント事業者等に品質管理上の課題に聞き取りを行った（図表 69）。主に品質等級水準を満たす解体方法、破碎・選別ラインをどう構築するのか、品質等級をどのように判定するのか（試験分析方法、解体・破碎・選別プロセスの情報をもとにした判定方法等）、どのように検収を行うのか、トレーサビリティをどのように確保するのか、といった課題が指摘されている。静脈産業を巻き込んだ循環経済型ビジネスを実現するうえでの制度的及び技術的課題として取り組まなければならない問題である。

図表 69 忌避物質品位に着目した品質管理上の課題

生産・取引フロー	想定される課題
再生原料製造	- 品質等級水準を満たす解体・破碎・選別方法の特定及びこれを示すマニュアル等の作成 - 品質等級水準を満たす解体・破碎・選別ラインの構築
出荷前検査	- 適切な（信頼性のある）試験分析方法の特定 - 適切なサンプリング方法の特定（成分分析の頻度（年 1 回、半年 1 回、月 1 回等）、サンプリングの方法（オートサンプリング、マニュアルサンプリング、ベルトコンベアからのサンプリング、堆積物からのサンプリング等）、最大ロットサイズ（重量）、インクリメント数・重量、サンプルサイズ・重量等） - 適切な成分分析方法の特定（ICP³⁶-AES³⁷、ICP-MS³⁸、XRF 等）
品質判定	- 適切な品質等級の判定方法の特定（化学分析によるか、再生原料の生産プロセスの確認によるか等） - 取引する再生原料の生産に用いられた解体・破碎・選別プロセスの情報をもとに判定する場合、プロセスと品質等級の紐づけ - プロセスが適切にとられていることを保証する方法（トレーサビリティの方法）
再生原料の受渡	- 品質等級情報以外に伝達すべき情報の特定 - 情報の伝達方法の特定
受入検査	- 適切な検収方法の特定（目視での検収以外に、忌避物質の成分値に異常がないかを確認する方法の検討） - 検収に必要な情報をどのように入手するか（再生原料の生産プロセスに関する情報等）
製品製造	品質等級別の原料管理方法の検討（原料の保管方法、原料の投入方法等）

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

³⁶ ICP : Inductively Coupled Plasma（誘導結合プラズマ）

³⁷ AES : Auger Electron Spectroscopy（オージェ電子分光法）

³⁸ MS : Mass spectrometry（質量分析法）

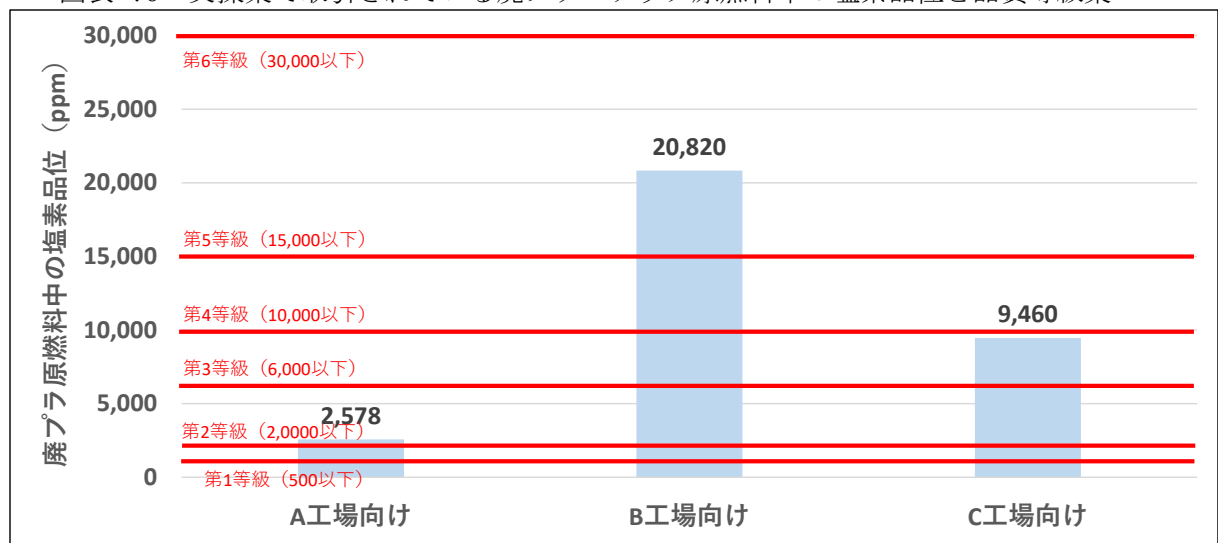
4.2.2.3 中間処理業における規格案への対応可能性検討

中間処理業が、本事業の品質等級規格案を処理産物の品質管理目標として使用することを念頭においた場合、従来とは異なる工程管理上の課題が生じる可能性がある。工程管理上の課題は、母材の管理（母材ごとに生産ラインを構築する等）、解体・破砕・選別ラインの構築及び管理、生産した再生原料の出荷管理（品質等級ごとの梱包を行う等）等が想定される。中間処理業では、目指す品質等級を満たすための工程管理方法を具体化しつつ、これを実現するための体制構築等を行う必要がある。

また、中間処理事業者が再生原料の等級評価を行う際の代表性の確保も今後の課題となる。分析試験によって等級評価を行う際、取引する再生原料をロットごとに毎回分析して等級評価を行うことは、コスト等が過度にかかるという問題にも直面する。そのため、このたびの品質等級規格は現行の自動車リサイクル全部再資源化制度等と同様、あくまで品質管理目標として取り扱い、実際には解体・破砕・選別プロセスの管理水準を別途定めて、4.4 で検討した情報連携システムを用いて記録、伝達することで、需要家に対する品質保証（再生原料の品質（忌避物質品位））としていくことも考える必要がある。

なお、本事業では、実操業で取引されているシュレッターダスト（SR）の塩素及びクロムの品位の分析も行った（図表 70、図表 71）。

図表 70 実操業で取引されている廃プラスチック原燃料中の塩素品位と品質等級案



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 71 実操業で取引されている廃プラスチック原燃料中のクロム品位と品質等級案



(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）

4.3.1.1 自動販売機中の忌避物質含有部品の追加特定

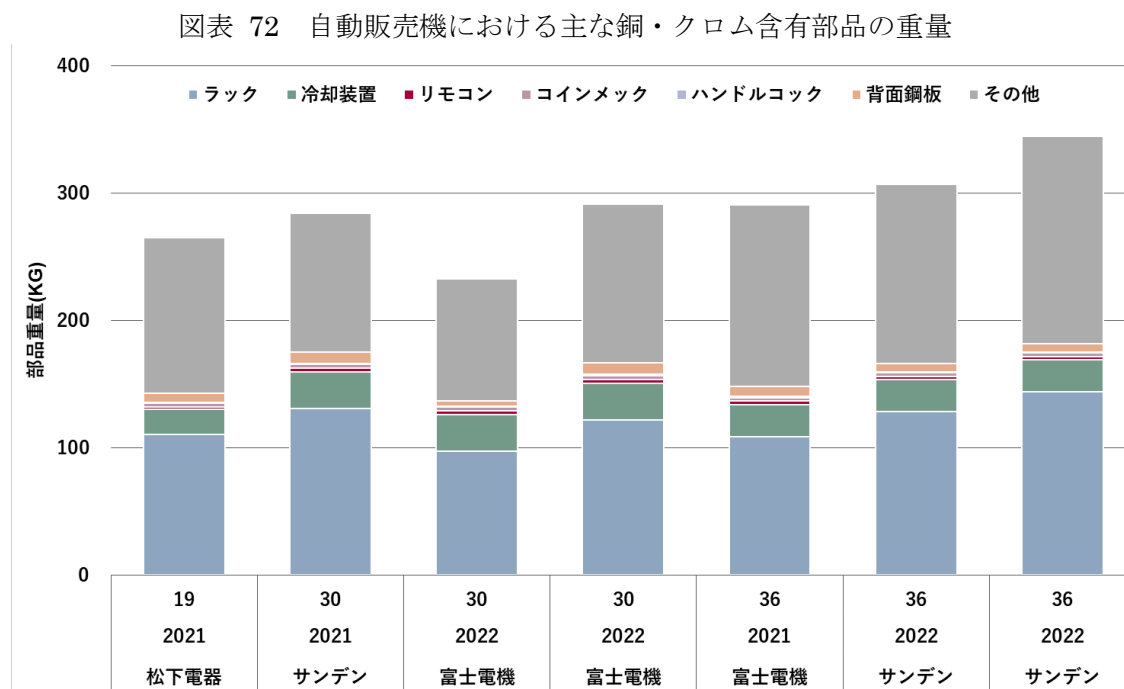
使用済み自動販売機を解体（分解）後、対象とする忌避物質（銅、クロム）が含まれると想定される部品（ラック、冷却装置、リモコン、コインメック、ハンドルロック、背面鋼板その他）を対象に、重量を計測した（図表 72）。

自動販売機 1 台あたりの対象部品の総重量は、セクション数に伴って大きくなる傾向にあった。個別の部品に注目すると、ラックは総重量と同様な傾向にあった。冷却装置の重量は、小型の自動販売機（セクション数（自動販売機に格納できる飲料種類の数）：19）では小さい値であったが、それ以降はメーカー・セクション数が変わってもそれほど変化しなかった。ただ、今回分析した小型自動販売機は、セクション数 30 以降の自動販売機とメーカーが異なるため、メーカーによる差異を考慮する必要がある。

解体した部品を可能な限り、最小単位（単一素材）になるまで分解したうえで、XRF を用いて成分分析を行い、これを重量と掛け合わせることで、それぞれ部品中の銅・クロム含有量を整理した（図表 73、図表 74）。

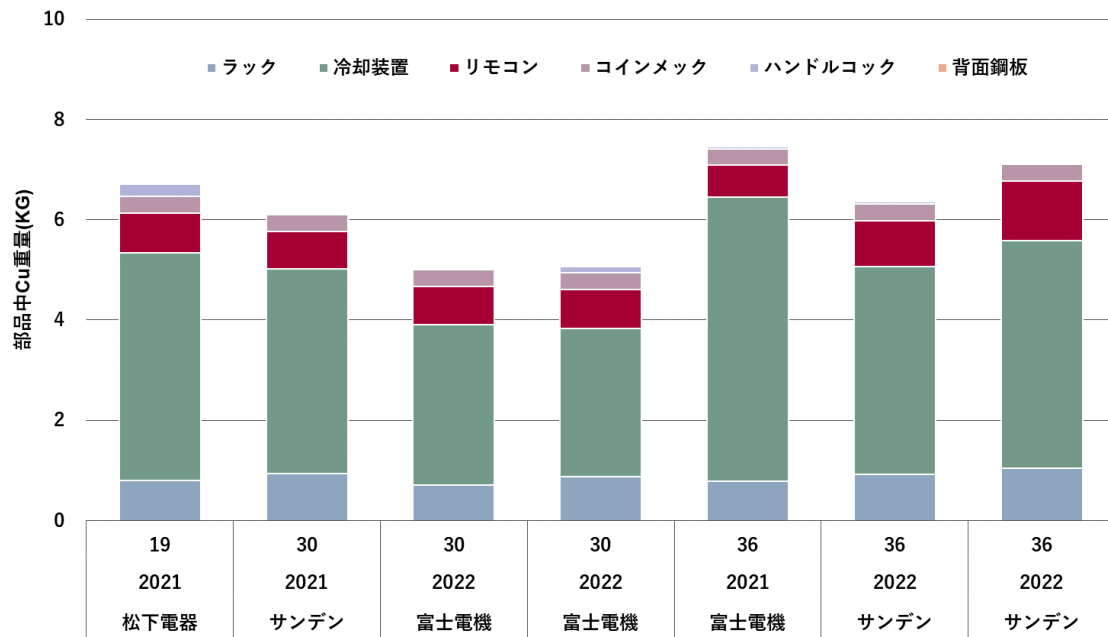
事業第 2 年度に解体した使用済み製品と同様、銅が最も多く含まれているのは冷却装置であった、次いで、ラックやリモコン、コインメックにおける含有量が多い。こうした部品を事前に取り外すことで、破碎・選別後の回収物に含まれる銅を削減できる可能性がある。

クロムも事業第 2 年度と同様に、最も多く含まれているのはラックであった。次いで、冷却装置（ユニットに付随しているヒーター等）にクロムが含まれていた。特にラックを取り外すことで、解体・破碎・選別工程のクロムを管理できる可能性が示唆された。



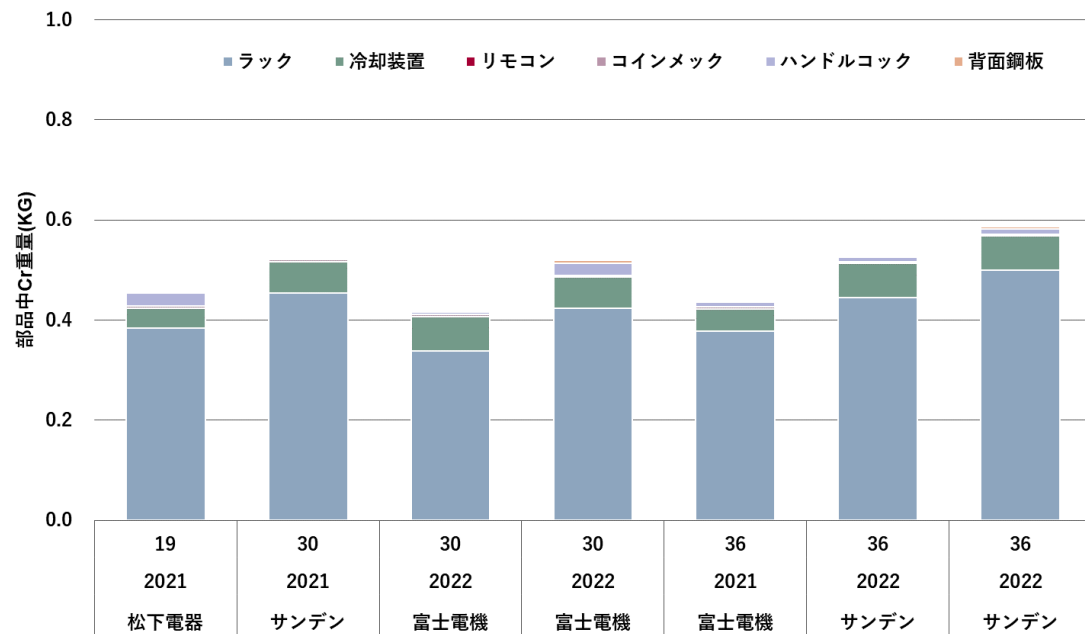
（注）横軸の凡例（上から）：セクション数、試験実施年度、自動販売機メーカー
（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 73 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 72 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) 横軸の凡例 (上から) : セレクション数、試験実施年度、自動販売機メーカー
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 74 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 72 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) 横軸の凡例 (上から) : セレクション数、試験実施年度、自動販売機メーカー
(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

4.3.1.1 で実施した試験の結果、銅含有部品を漏れなく回収するには、冷却装置、リモコン、コインメック、ラックを取り外す必要があることが分かった。また、クロム含有部品を漏れなく回収するには、ラック、冷却装置、ハンドルロックを取り外す必要がある。

理論的に銅・クロムを全量回収できる条件で、解体試験を実施することとした（図表 12：解体パターン②）。実際には、細かな配線類をすべて取り除くことは難しく、微量の銅・クロムは残存する可能性はあるが、こうしたデータを蓄積することで、標準解体時のベースライン（精緻に解体を行っても残存してしまう忌避物質）を把握することにもつながる。

毎回、すべての部品を取り外すことは容易ではない。特に、ラックは筐体と強固に固定されていることも多く、数も多いため、毎回取り外すのは相当な工数を要する。そこで、忌避物質を一定程度管理できる範囲で、解体作業効率を考慮した方法（図表 12：解体パターン①）を検討した。

なお、作業効率を考慮した解体方法を検討する際、4.2.1 で検討した忌避物質の品質等級を考慮することとした。

4.3.1.3 回収物のサンプリング・産物分析

（1）磁着物（鉄スクラップ）

図表 12 に示すフローに従って磁着物を回収し、成分分析を行った（図表 75）。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。

A 社、B 社ともに、事前に回収する部品点数が増えた場合、わずかではあるが鉄品位は向上する傾向にあった。他方、銅・クロムの品位に顕著な変化は見られなかった。B 社では、取り外す部品が増えるほど、磁着物の銅・クロム含有量が微増する傾向が確認された。

本来、解体工程で銅・クロム含有部品を分離し、破碎・選別工程に投入される銅・クロムが少なくなれば、磁着物中の銅・クロム品位も減少すると考えられる。こうした想定と異なる結果になった要因及び今後の改善策は、4.3.2.2（2）で詳述する。

A 社で回収した磁着物のうち、成分分析を実施するためサンプリングした磁着物には、普通鋼（多くは亜鉛メッキ鋼板）のみが含まれており、ステンレス鋼や銅を巻き込んだ磁着物は確認されなかった。いずれの解体方法であっても、再生資源の分類等級のうち、「第 1 等級」を満たすものであった。

B 社で回収した磁着物には、微量ながら銅・クロムが含まれていた。銅は「ブランク・解体パターン①」で「第 2 等級」、「解体パターン②」で「第 3 等級」を満たすものであった。クロムはいずれの解体方法であっても、「第 2 等級」を満たすものであった。

図表 75 磁着物の成分分析結果

		鉄	銅		クロム	
A社	ブランク	95.2%	0.00%	第1等級	0.00%	第1等級
	解体パターン①	97.6%	0.00%	第1等級	0.00%	第1等級
	解体パターン②	97.6%	0.00%	第1等級	0.00%	第1等級
B社	ブランク	89.4%	0.13%	第2等級	0.19%	第2等級
	解体パターン①	95.6%	0.20%	第2等級	0.23%	第2等級
	解体パターン②	95.6%	0.31%	第3等級	0.23%	第2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

亜鉛メッキ鋼板と判断される場合には、鉄の分析値を補正した。

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 76 サンプルングした磁着物（一例）



(出所) 共同実施事業者提供

(2) ミックスメタル

図表 12 に示すフローに従ってミックスメタルを回収し、成分分析を行った（図表 77）。なお、パターン別に 2 点サンプリングを行っており、図表中では 2 点の算術平均値を示している。

取り外す部品点数が増加するにしたがって、品位が向上する傾向が確認されたのは A 社の銅、クロムであった。他方、取り外す部品点数が増加すると品位が低下するのは、B 社のアルミニウムであった。ただ、上記で取り上げた元素は、A 社と B 社で異なる挙動を示すものであり、部品回収量とミックスメタル中の各元素の品位に、相関があると結論付けるのは困難であった。

解体部品点数の増加に伴って、ミックスメタル中の銅・クロム品位が向上した理由として、ミックスメタルの回収量そのものが少なくなったため、重量あたりの銅・クロム含有量が増加した可能性がある。特に、破碎工程で単体分離しにくい銅・クロム含有部品が事前に回収された場合には、ミックスメタル中の銅・クロム品位が向上する可能性がある。

他方、事前に銅・クロム含有部位を取り除いているため、そもそも銅やクロムが破碎工程に投入される量が減少し、銅・クロム品位が低下する可能性がある。特に、「解体パターン②」では、想定される銅・クロム含有部品を可能な限り取り除いているが、結果的に銅・クロムが含まれていた。すべての銅・クロム含有部品を回収できていなかった可能性が考えられる。

図表 77 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	0.0 g/t	4 g/t	11 %	35 %	26 %	1.8 %
	解体パターン①	0.0 g/t	120 g/t	22 %	51 %	7 %	4.3 %
	解体パターン②	0.0 g/t	11.5 g/t	31 %	9 %	16 %	7.5 %
B社	ブランク	1.5 g/t	86 g/t	17 %	32 %	23 %	1.6 %
	解体パターン①	1.6 g/t	110 g/t	8.8 %	18 %	10 %	1.1 %
	解体パターン②	0.9 g/t	53.5 g/t	58 %	5.8 %	12 %	2.7 %

(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%

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

(3) シュレッダーダスト

図表 12 に示すフローに従ってシュレッダーダストを回収し、成分分析を行った。シュレッダーダストは金属成分の評価に関する項目（図表 78）と、燃料評価に関する項目（図表 79）のそれぞれで分析を実施している。なお、パターン別に 2 点サンプリングを行っており、図表中では 2 点の算術平均値を示している。

金属成分に関して、取り外す部品点数が増加するにしたがって、品位が向上する傾向が確認されたのは B 社の銅、クロムであった。他方、取り外す部品点数が増加すると品位が低下するのは、A 社のアルミニウム、鉄であった。

銅・クロム品位の増加要因は、(2) ミックスメタルと同様な要因であると考えられる。A 社の銅やクロムも、「解体パターン②」の品位が「ブランク・解体パターン①」より高くなっており、シュレッダーダストの結果を踏まえても、解体パターン②でも銅・クロムが完全に分離できていないものと考えられる。

A社のクロムは、「ブランク・解体パターン①」で「第1等級」、「解体パターン②」で「第2等級」を満たすものであった。他方、B社のクロムは、いずれの解体パターンでも等級外であった。

原燃料評価に必要な項目に関して、取り外す部品点数が増加するにしたがって、品位が減少するのはB社の塩素・臭素であった。A社では、解体部品点数の増加により、総発熱量が増加しており、B社でも「解体パターン②」で回収したダストの総発熱量が最も高い結果となった。解体工程では、銅・クロムの回収を念頭においていたが、この際にハーネスも併せて回収されている。ハーネスの被覆線に使用される塩素等が事前に取り除かれた結果、シュレッダーダストの塩素含有率が低下したと考えられる。

図表 78 シュレッダー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	0.6 g/t	78 g/t	21 %	9.1 %	2.5 %	0.0 %	第1等級
	解体パターン①	2.4 g/t	84 g/t	8.1 %	3.5 %	2.5 %	0.0 %	第1等級
	解体パターン②	1.0 g/t	24 g/t	5.2 %	2.3 %	3.3 %	0.19 %	第2等級
B社	ブランク	0.0 g/t	3.5 g/t	35 %	26 %	11 %	1.8 %	等級外
	解体パターン①	0.0 g/t	120 g/t	51 %	6.9 %	22 %	4.3 %	等級外
	解体パターン②	0.0 g/t	12 g/t	9.1 %	16 %	31.0 %	7.5 %	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：0.1%以下、第2等級：0.3%以下、第3等級：1.0%以下、等級外：1%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 79 シュレッダー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 %	3.75 %	第6等級	0.39 %	4,220 kcal/kg
	解体パターン①	0.26 %	1.9 %	第6等級	0.65 %	4,830 kcal/kg
	解体パターン②	0.28 %	2.5 %	第6等級	0.22 %	5,580 kcal/kg
B社	ブランク	0.18 %	1.3 %	第6等級	0.18 %	4,280 kcal/kg
	解体パターン①	0.21 %	1.28 %	第6等級	0.130 %	4,140 kcal/kg
	解体パターン②	0.23 %	0.70 %	第3等級	0.020 %	5,350 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：2,000ppm 以下、第3等級：6,000ppm 以下
第4等級：10,000ppm 以下、第5等級：15,000ppm 以下、第6等級：30,000ppm 以下、
等級外：30,000ppm 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. 標準解体方法の検討

4.3.2.1 解体・破碎・選別パターン別の分配状況の確認

「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（図表 12）により、解体・破碎・選別を行った際の、産物重量及び元素分配状況を、A 社及び B 社それぞれで整理した（図表 80～図表 85）。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と、回収物の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、解体工程以降に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、85%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90~97%前後であり、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 80、図表 83）。

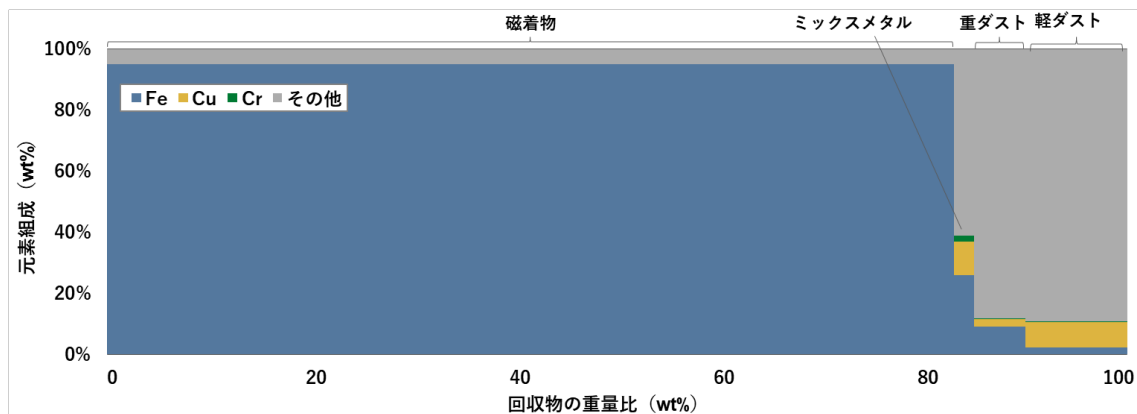
「解体パターン①」では、銅・クロムを含む部品の一部（冷却ユニット）を事前に回収した。回収した部品重量は全体の 5%前後であった。破碎工程に投入される銅とクロムが減少したことで、各回収物（鉄スクラップ、ミックスメタル、ダスト）に分配される銅・クロムは減少した。鉄スクラップの回収量はそれほど大きく変わらないが、B 社では鉄品位が向上した。ミックスメタルの回収量は、「ブランク」の回収量の 40~60%程度まで減少した。A 社では銅品位が向上したが、B 社では銅品位は低下した。ダストの回収率は「ブランク」とほとんど変わらなかったが、銅品位は「ブランク」と比較して低下した（図表 81、図表 84）。

「解体パターン②」では、銅・クロムを含む部品を、可能な限り回収した。事前回収した部品重量が 40~60%を占め、かなり多くの部品が事前に回収されたことがわかる。「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。磁着物の回収量は「ブランク」と比較して半分程度まで減少したが、鉄品位は向上した。ミックスメタルやダストへの銅・クロムの分配量も著しく減少した。（図表 82、図表 85）。

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、冷却ユニット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する傾向が確認された。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することで、概ね近い品質のスクラップを回収できる可能性がある。

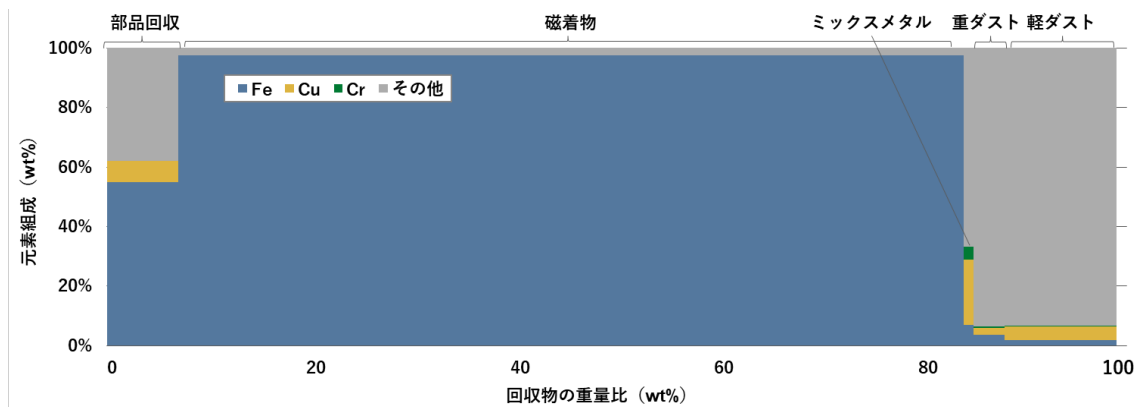
ただ、4.3.2.1 でも既述の通り、解体部品点数（銅・クロムを含む部品）が増加しても、磁着物の銅・クロム品位が低下しないケースがあった。「解体パターン②」でも、可能な限りで想定される銅・クロム含有部品を取り除いているが、選別後の回収物にも銅・クロムは含まれており、これらを完全に分離できていない。製品中の銅・クロム含有量をより正確に把握し、これを分離可能な解体方法を開発していく必要がある。

図表 80 解体パターン別の選別回収物の成分値 (A 社・ブランク)



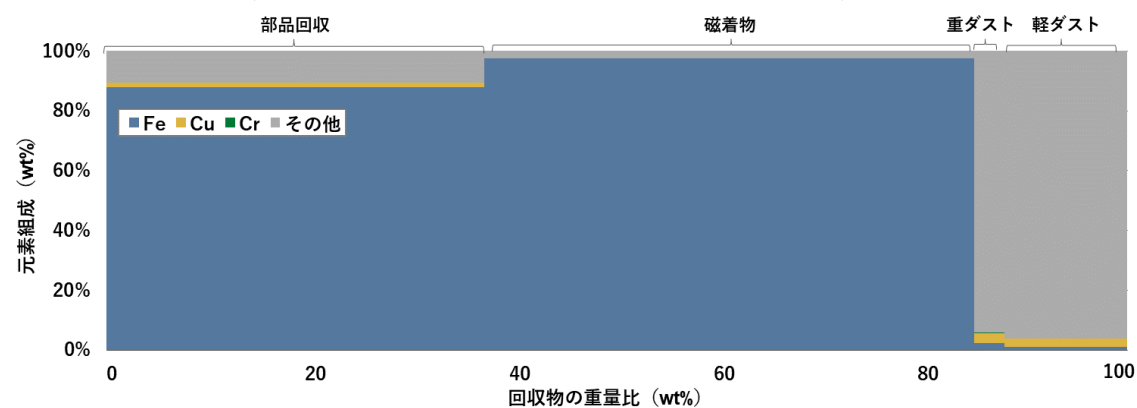
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 81 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)



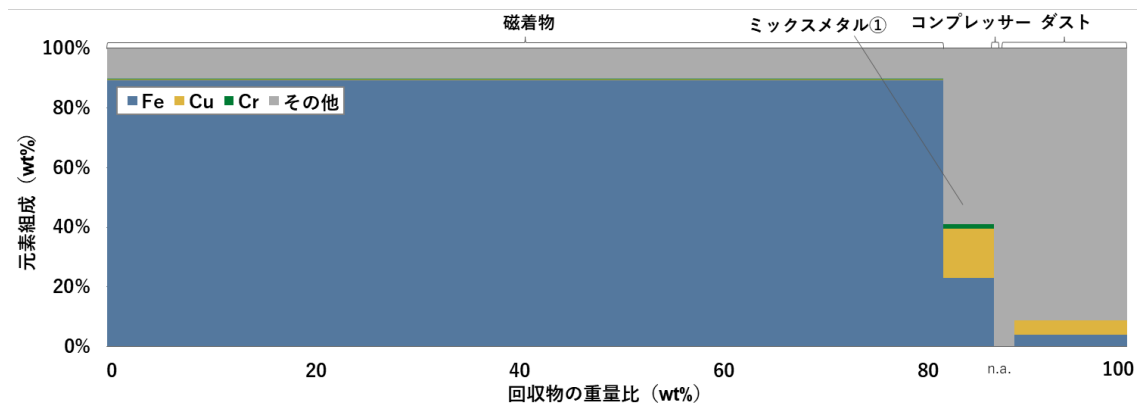
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 82 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)



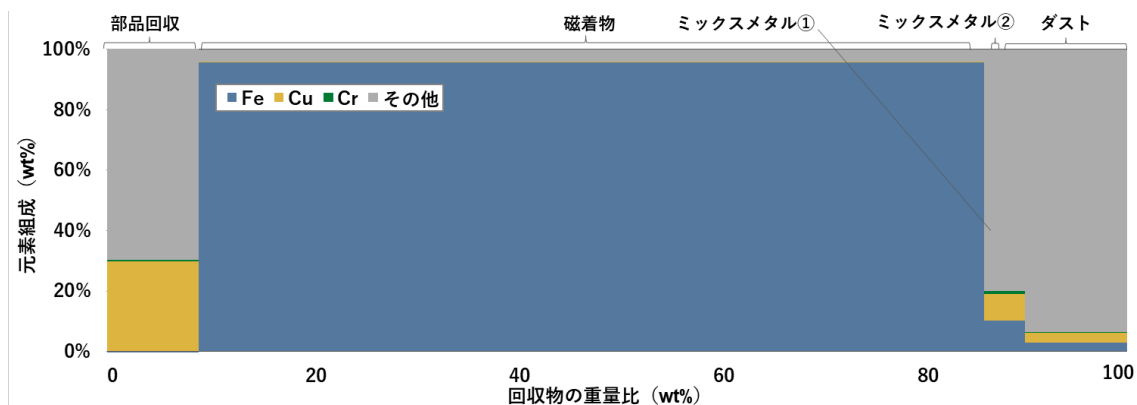
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 83 解体パターン別の選別回収物の成分値 (B 社・ブランク)



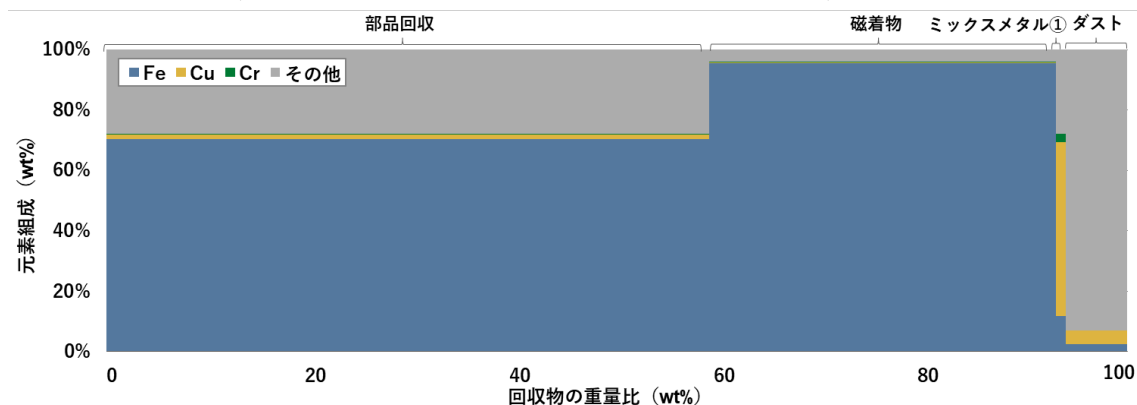
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 84 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 85 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

4.3.2.2 標準解体方法（案）の検討及び開発に向けた課題整理

（1）解体方法別の鉄スクラップの品質の推定

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、処理対象となる自動販売機（型式別）の銅・クロム含有情報と、これら自動販売機（型式別）中の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（松下電器）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（事業第2年度：3台、本年度：4台）。総重量やラックの重量はセクション数とある程度相関があること、冷却装置は小型自動販売機では部品重量も小さいこと等を確認した。

事業第2年度、銅・クロム含有部品の重量は、自動販売機のセクション数に相関するとの仮定を置き、メーカー・セクション数別の部品重量データベースを作成した。各部品中の銅・クロムの含有比率は一定とみなして、部品ごとの銅・クロムのデータも併せて整理した。本年度事業では、追加で解体した自動販売機の成果も踏まえて、データベースの更新を行った。まず、事業第2年度はセクション数による影響のみを考慮したが、本年度は冷却・加熱機構の影響を検討した。昨今、ヒートポンプ式の自動販売機の導入が進んでいる³⁹。

中間処理事業者へのヒアリングによると、地域差等もあるが、自動販売機の耐用年数は概ね10年とされる。現在発生している使用済み自動販売機は、ヒートポンプ式への切り替えが進んでいるものと考えられる。ヒートポンプの採用が進めば、ヒーターが不要になり、製品中の銅・クロム含有量が変化する可能性がある。他方、メーカーにヒアリングを行ったところ、ヒートポンプを採用していても、予備の発熱装置として、シーズヒーターを搭載しているとのことであった。メーカーのプレスリリース等を調査すると、このほか、昨今はデジタルサイネージの採用やキャッシュレス決済機の導入が進んでいるが、本実証で対象とした自動販売機には、こうした装置は確認されなかったため、本年度のデータベース更新では、これらを考慮せず、メーカー別・セクション数別に整理することとした。

メーカーによって、小型の自動販売機では、小型の熱交換器を採用しているケースもあるため、本年度はセクション数30までとそれ以降（実際にはセクション数36以降）で、それぞれメーカー別・セクション別の部品重量に占める銅・クロム原単位を設定した。

こうして、型式情報（メーカー、セクション数）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し、磁着物の銅・クロム品位が予測可能にした。なお、今回は事業者ごとに「ブランク」の分析値（実測値）から、磁着物の回収率、銅・クロムの分配率を設定した。

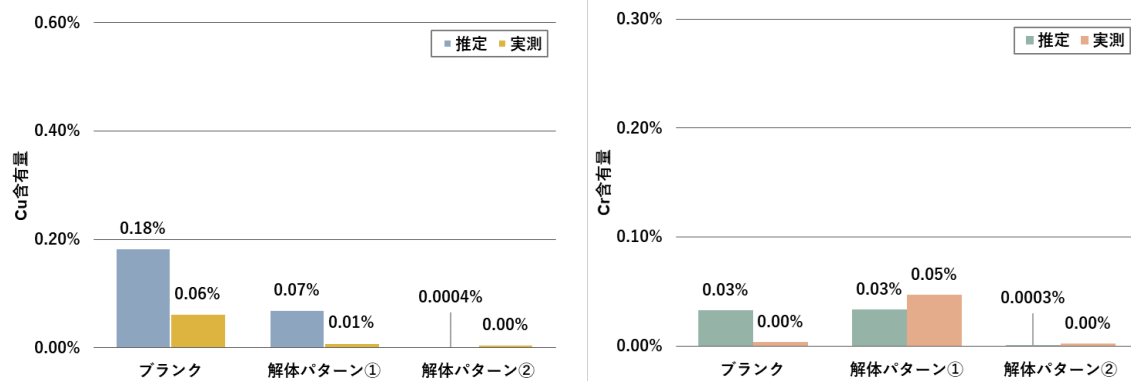
³⁹ 富士電機株式会社では、2008年度より飲料自動販売機にヒートポンプ式を採用。2012年には、出荷される缶・ボトル用自動販売機の95%がヒートポンプ式になっている。（富士電機技報 2012 vol85 No.5 を参照）

(2) 実績値と推定値の比較検討

事業者別に、上記の方法で磁着物中の銅・クロム含有量を推定した。これに、4.3.1.3と事業第2年度成果を反映した実測値(本年度と事業第2年度の平均値)と併せて整理した(図表86、図表87)。

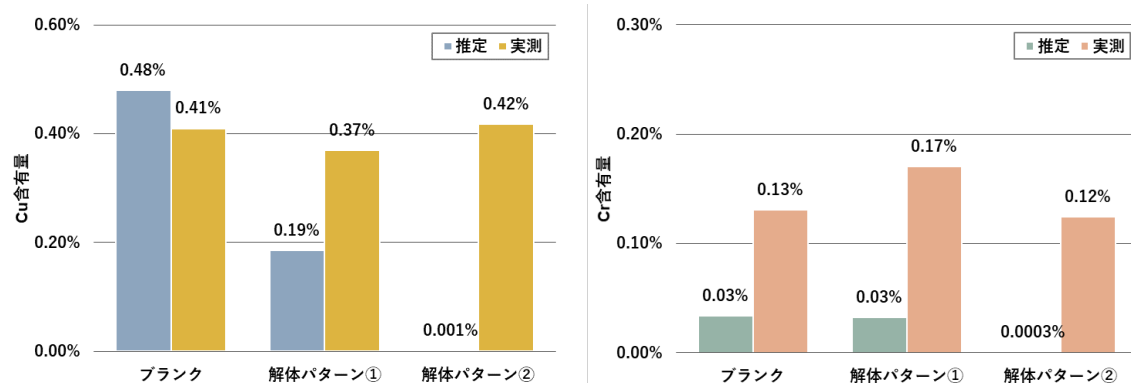
推定値と実測値を比較すると、銅で最大0.4%程度、クロムで最大0.1%強の乖離が生じていた。シュレッダースクラップの規格案では、分類等級を0.1%、0.3%、1.0%と設定しているが、これら等級値の設定幅と比較して、実測値と推計値の差分が大きくなってしまっている。解体パターン別での回収物を、毎回成分分析を実施することは現実的ではない。そのため、情報連携システム上に記録した情報をもとに、一定の精度でスクラップの品質(忌避物質含有量)を推定できるようにする必要がある。

図表 86 磁着物品位の実測値と推定値の比較 (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 87 磁着物品位の実測値と推定値の比較 (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

(3) 標準解体方法に向けた課題検討

3.3.1.3 で問題視された、事前に銅・クロム含有部品を回収しても磁着物（鉄シュレッダースクラップ）の銅・クロム品位が低下しない問題、また実測値と推定値が一致しない問題を解決する必要がある。現時点で想定される要因として、標準解体手法の一般性の問題、処理産物の分析方法の問題がある。

標準解体手法を考える場合、解体対象とした自動販売機の標準解体方法の一般性が十分に高くはなく、同じ解体方法を採用しても、自動販売機を構成する部位によって使用部材に多様性があるほか、メーカーや型式によって部品重量が異なる場合もあり、結果として、期待するようないかなる一定の品位、重量となっていない可能性がある。例えば、破碎対象とした母材中に銅・クロム含有部品が意図せず残存してしまっていた可能性、同一の標準解体パターンであっても母材の成分が異なっている可能性、同一部品の取り外しであっても重量が異なっている可能性、などがある。今回、「解体パターン②」では、事前に把握できている範囲で、すべての銅・クロム含有部品を取り外したのち、破碎・選別工程にまわしたが、処理産物の目視確認を行う限り、対象とした部品（冷却装置、リモコン、コインメック、ハンドルロック、ラック）以外に銅やクロムを使用している部品がほかにも残っている可能性があることを確認した。そうした未回収部品の代表として、リモコンや電源装置から伸びている細かいハーネス類がある。

また、上記に加えて、防錆性や意匠性を高めるためにステンレス鋼を多く使用した特殊仕様や電装部品が多い使用されている特殊仕様の自動販売機が存在していることを実際の解体で確認しており、こうした影響も無視できない。

次に処理産物の分析方法に関する問題がある。今回は、コストや時間の問題から産物を溶解して成分を均一にした状態で成分の分析は行うことができなかった。得られたスクラップ粒子ごとにハンドヘルド XRF 分析器を用いて成分を分析し、それにそれぞれのスクラップ粒子重量を乗じて全体の成分量を計算した。この場合、スクラップ粒子の単体分離が進んでおらず、1つのスクラップ粒子に複数成分が存在している場合（片刃粒子の場合）、ハンドヘルド XRF 分析器を当てる部位によって分析値は異なる可能性が出てくる。目視確認のかぎり、片刃粒子を確認できてはいないが、そうした目視確認から漏れてしまっている片刃粒子の存在も一定程度想定される。なお、本実証では同一試料を複数事業者に標準試料として配布の上、それをもとに機器を校正したほか、前後で処理した別ロットからのコンタミネーションを避けるためのシュレッダーや選別装置の掃除も実施していることから、これらに由来する測定値の揺らぎはほとんどないものと考えている。

現時点では、恣意的な試料採取であることの影響はないとみているが、処理産物の均質性を確保したうえでの無作為抽出方法を確立できれば、信頼性の高い分析値を得ることに貢献できる。本実証事業では、連続的に生産される処理産物を任意のタイミングで採取し（全産物重量の約1%程度）、これを縮分することで分析用の試料（多数のスクラップ粒子）を得た。今後、こうした試料採取方法で得られる試料の分析結果を統計的に検証できると良い。

4.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）

4.4.1. 情報連携システム及び記録項目の改善検討

4.4.1.1 耐久性の高いQRシールの検討

QRシールの耐久性を高めるための方法として、QRシールを日光や水の当たらない場所に貼る、QRシールの上部から保護フィルムを貼付する、QRシールの素材を耐候性の高いものに変更するといった対策が考えられる。自動販売機には釣銭受領部や商品取出口のように、直接外部に触れない箇所が存在する。こうした箇所に貼付すれば、直接日光や水が当たることなく、トナーの印字を識別可能な期間も延長することが期待される。他方、貼付したQRシールは、破碎前のヤードで積み上げられた状態で読み込むこともある。毎回、釣銭受領部や商品取引口を開けて読み込むことは難しく、本方式の採用は見送ることとした。

次に、事業第2年度に使用した耐水性フィルムの上から、紫外線に強い保護フィルムを貼付する方法が考えられる。こうすれば、自動販売機の外面に貼付しても、退色を起こすことなく、問題なく読み込みができると期待される。しかし、毎回、QRシールのうえに保護フィルムを貼付する必要があり、現場での作業工数が増加してしまう。また、シールと保護フィルムの間にゴミや空気が入ってしまうことで、QRコードの識別に影響を及ぼす可能性がある。

そこで、保護フィルムを使用しなくとも十分な耐水性・耐候性を有するシール素材を選定した。複数のメーカーカタログを確認し、シール販売元にヒアリングを行った結果、PETフィルム製の製品（ヒサゴ：KLP701S）を採用した。トナーの退色速度は使用環境やトナーの品種によって異なるため、数か月程度での貼り替えを推奨されている。しかし、業務用のレーザープリンターで印刷し、実証の現場で活用したところ、本実証の期間内（11月～12月の2か月程度）では問題なく識別できた。

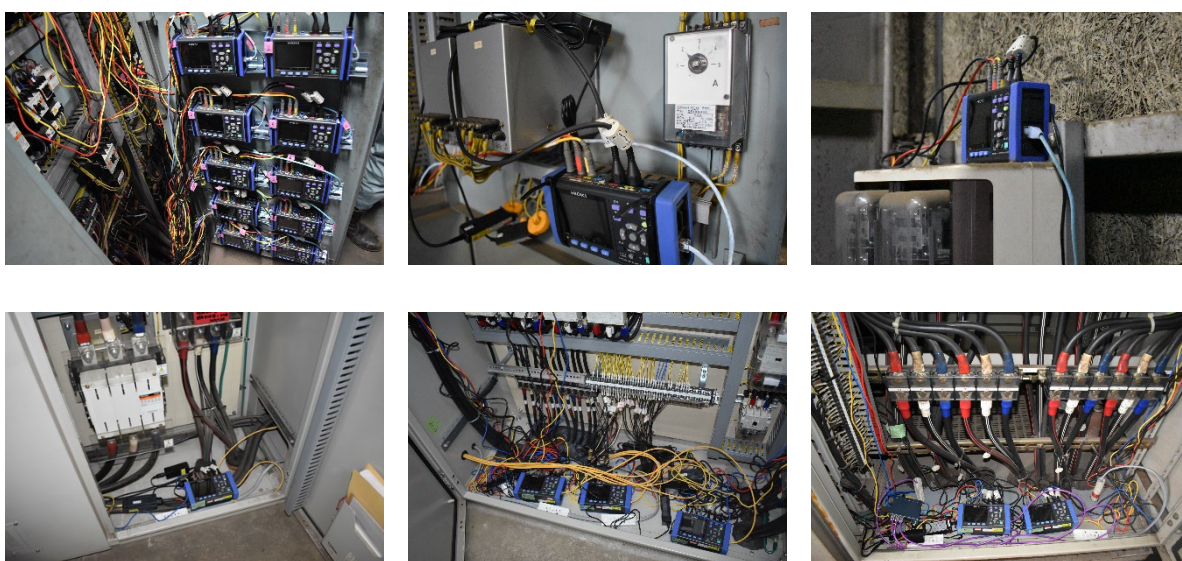
4.4.2. 中間処理工程におけるシステムの有効性及び作業負荷の検証

4.4.2.1 解体・破碎・選別実証での実証試験結果

(1) 電力消費量計測用デバイスの設置結果

図表 24、図表 25 に示した装置を対象に、電力ロガーを設置した（図表 88）。各電力ロガーには LAN ケーブルを接続し、これをイーサネットハブに接続した（図表 89）。それぞれの電力ロガーには、個別の IP アドレスを振っているため、電力ロガー別の情報収集が可能である。イーサネットハブには、ボード PC が接続されている。それぞれの電力ロガーから収集した情報は、1 日 1 回、LTE 回線経由でクラウド上にアップロードされるよう設定した。

図表 88 ロガー設置状況（（一例）上段：A 社、下段：B 社）



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 89 イーサネットハブ・ボード PC 設置状況（左：A 社、中央・右：B 社）



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 90 電力ロガーに蓄積されるデータセット（見本）

(出所) 三菱UFJ リサーチ&コンサルティング作成

[illegible]

116

4.4.2.2 情報連携システムの構築

本年度活用した「Moira」を用いることで、忌避物質の含有量及び GHG 排出量を、それぞれ製鋼原料と紐づけが可能となった。

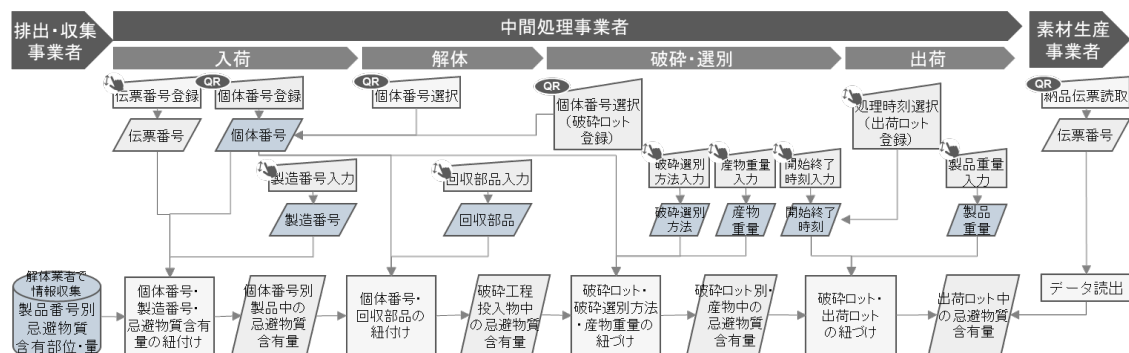
忌避物質を管理するための情報の入出力及び処理方法として、入荷した自動販売機の伝票番号を登録した後、各個体に QR シールを貼付し、QR シールを読み取ってから個体番号（シリアルナンバー）を入力する方法を採用している。この作業によって、以後の工程では、QR シールを読み込むことで、どの個体を処理しているのか、管理・記録できるようになる。

解体工程では、個体番号を選択したうえで、回収した部品をスマートフォン上で入力する。システム上で、個体番号と回収した部品を紐づけることによって、破碎以降の工程に、どの個体から、どの部品を取った母材（筐体）が投入されるか特定可能になる。

破碎工程に投入する直前で、改めて個体情報を入力する。破碎工程に投入したら、破碎・選別方法（磁着物の回収率や、銅・クロムの分配率を決定するための情報）と産物重量を入力することで、1 回の破碎ロットあたりの重量及び銅・クロムの含有量が推定可能となる。

別途、破碎の開始・終了時刻を入力しておく。出荷時には、いつからいつまで破碎・選別した磁着物であるのか選択し、製鋼原料の重量を入力しておく。出荷のロットと破碎のロットが 1 対 1 で対応していればそのまま、複数の破碎ロットにまたがる場合には、重量で按分する。こうして、忌避物質含有量が紐づいた製鋼原料を出荷することができる。

図表 92 Moira 上での記録項目及び忌避物質含有量の出力方法

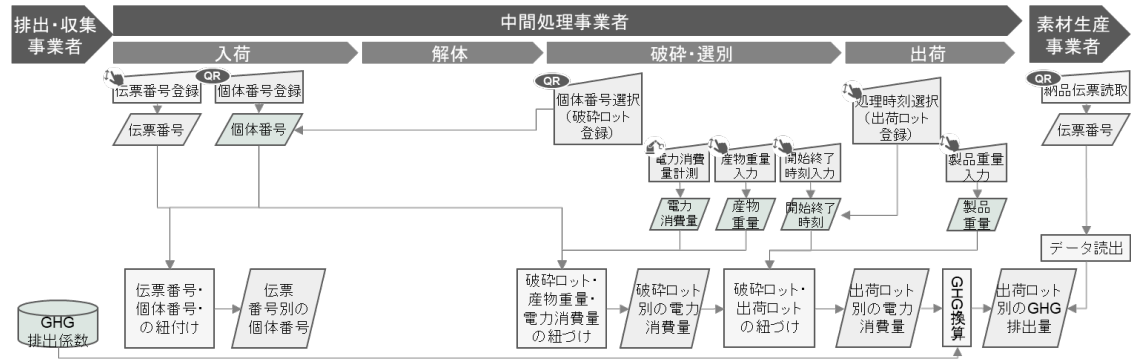


（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

GHG 排出量を記録・再生原料と紐づけるための基本的な入力項目は、図表 93 に含まれている。1 点大きく異なるのが、電力消費量のデータを参照することである。電力ロガーから自動でシステム上に送信された 1 分毎の電力消費量データにアクセスし、破碎工程で入力された開始・終了時刻をもとに、該当時間内の電力消費量を集計できるようになっている。これに事前に登録しておいた GHG 排出係数を乗じることで、CO₂ 排出量を算出する。

なお、破碎ロットと出荷ロットの紐づけは、忌避物質管理と同様の手法を採用している（電力消費量を重量で按分）。

図表 93 Moira 上での記録項目及び GHG 排出量の出力方法



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

4.4.2.3 システムの有効性及び作業負荷の検証

3.3.1.2 に記載した解体パターンを対象に、中間処理工程で実際に情報の入力を行い、回収した鉄スクラップ中の銅・クロム含有量及びロット別の電力消費量を記録、また CO₂ 排出量を算定した（図表 94）。ロット別の電力消費量は、両社ともに 60~70kWh/t、CO₂ 排出量は 0.0260~0.0320 t-CO₂/t の範囲になった。実証実施先の 2 社で概ね類似した値が得られており、記録・測定結果も一定度妥当性があつたと考えられる。

図表 94 ロット別・装置別の電力消費量及び CO₂ 排出量

A社																
排出係数：0.000443(t-CO ₂ /kWh)																
ロット	処理量 ton	開始時刻	終了時刻	装置①	装置②	装置③	装置④	装置⑤	装置⑥	装置⑦	装置⑧	装置⑨	装置⑩	装置⑪	装置⑫	合計
				Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
XX258等	7.151	2022.12.20 13:37	2022.12.20 14:10	6,110	4,683	6	2,538	0	0	1,350	333	2,154	99	339,900	58,577	415,750
XX285等	5.528	2022.12.20 15:15	2022.12.20 15:42	4,823	3,331	1	1,816	0	0	1,047	267	1,744	69	260,600	47,836	321,534
XX234等	5.645	2022.12.20 16:22	2022.12.20 16:54	6,089	3,776	14	2,693	0	0	1,223	295	2,068	78	285,700	57,434	359,370
B社																
排出係数：0.000466(t-CO ₂ /kWh)																
ロット	処理量 ton	開始時刻	終了時刻	装置①	装置②	装置③	装置④	装置⑤	装置⑥	装置⑦	装置⑧	合計		ton当たり 電力消費量		ton当たり CO ₂ 排出量
				Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	kWh/ton	KG-CO ₂	ton-CO ₂ /ton
XX250等		2022.12.08 15:00	2022.12.08 16:00	57,070	56,970							114,040				50.5
XX209等		2022.12.21 16:00	2022.12.21 17:00	42,140	42,950							85,090				37.7
XX273等		2022.12.16 15:00	2022.12.16 16:00	8,420	9,270							17,690				7.84
XX250等		2022.12.09 08:01	2022.12.09 08:26			206,100	10,784	12,610	49,570	20,933	8,228	308,225				137
XX209等		2022.12.22 08:19	2022.12.22 08:43			239,000	9,330	13,362	42,260	18,484	16,208	338,644				150
XX273等		2022.12.19 08:04	2022.12.19 08:26			125,700	9,069	9,441	40,880	17,756	15,236	218,082				96.6
XX250等	7.180											422,265		58.81	187	0.0261
XX209等	7.511											423,734		56.42	188	0.0250
XX273等	3.345											235,772		70.48	104	0.0312

(出所) 株式会社ムスビメ作成

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

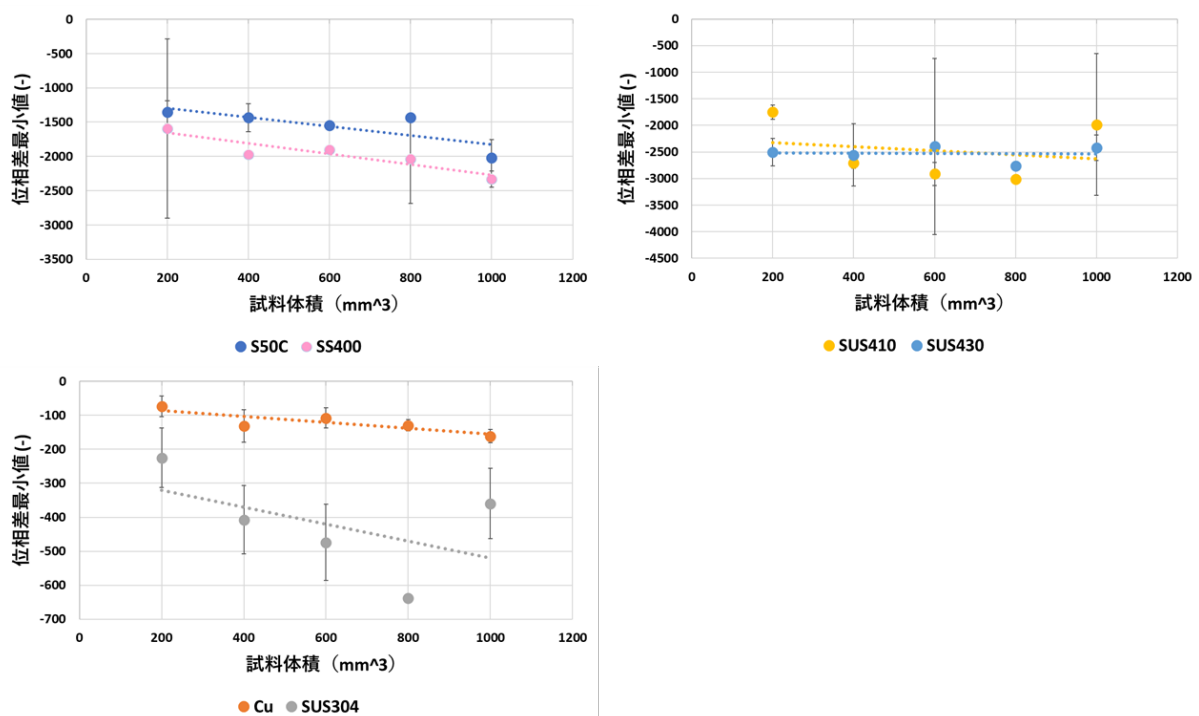
4.5.1.1 標準試料を用いた試料体積変化試験（電磁センサー直径 12.5mm 条件）

（1）試験 1－①における試験結果

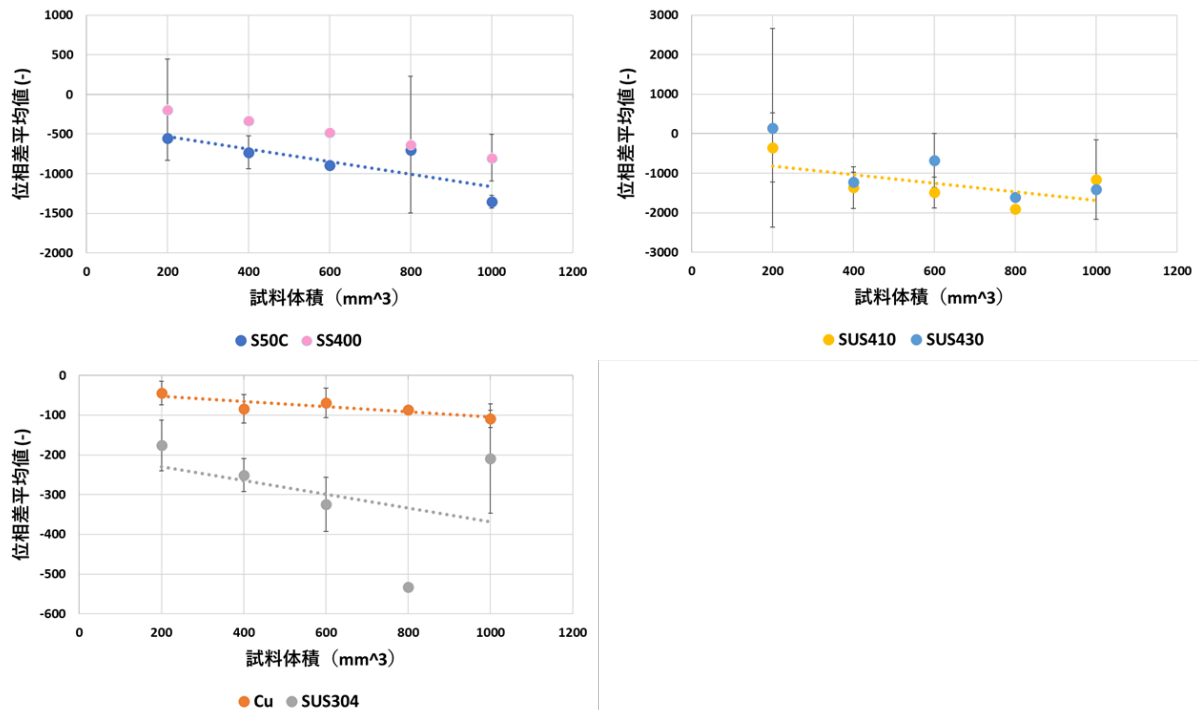
試験 1－①では、ベルトコンベアに接する試料底面積（100mm²）が同一で、試料の高さ（ベルトコンベア垂直方向の大きさ）が異なる試料における観測値を確認した（図表 95）。

結果、試験 1－①では、全金属種で、試料体積が大きいほど位相差最小値、位相差平均値が減少（絶対値としては増加）する傾向が確認できた。

図表 95 試験 1－①における試験結果
＜位相差最小値＞



<位相差平均値>



(注 1) 左上：普通鋼（S50C、SS400）、右上：クロム系ステンレス鋼（SUS410・SUS430）、左下：銅、ニッケル系ステンレス鋼

(注 2) プロットは観測データの平均値、エラーバーは観測データの標準偏差を表す。（以下同様）

(注 3) 点線は各金属種における近似直線（最小二乗法による線形近似によって得られた直線）を表す。（以下同様）

(注 4) ベルトコンベア上で試料が転がってしまい、複数回データを取得できていない条件がある。その場合、エラーバーを表示していない。（以下同様）

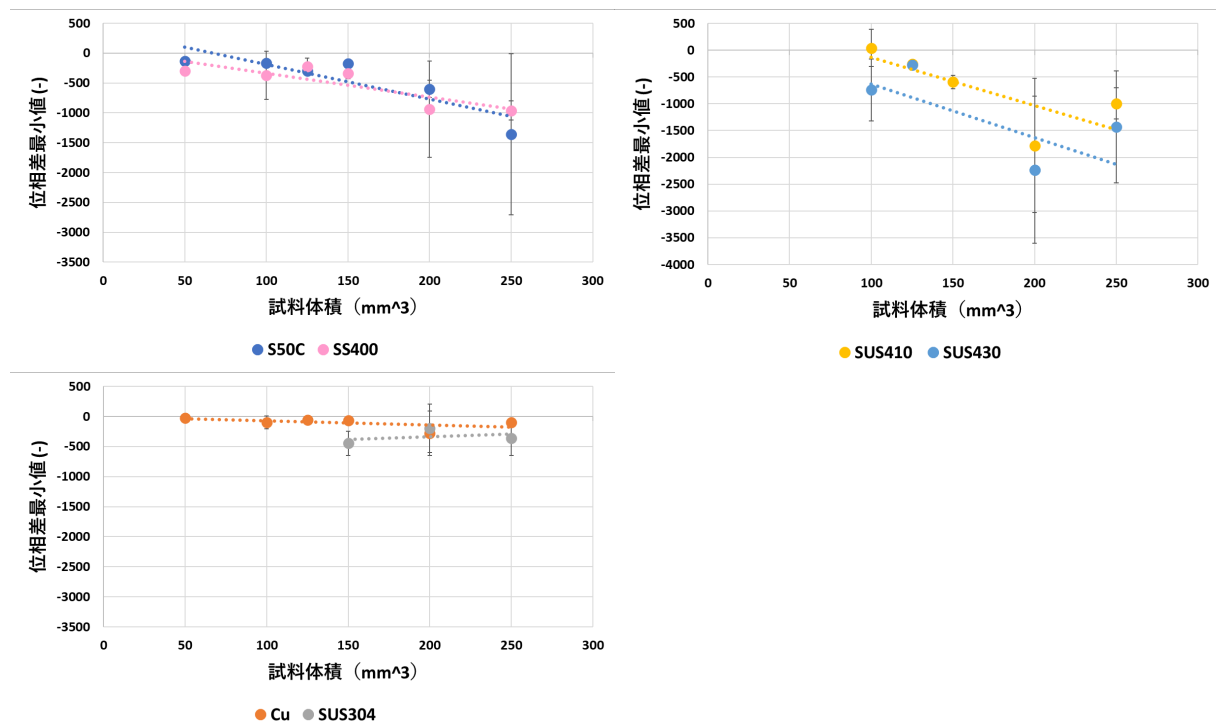
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

(2) 試験 1－②における試験結果

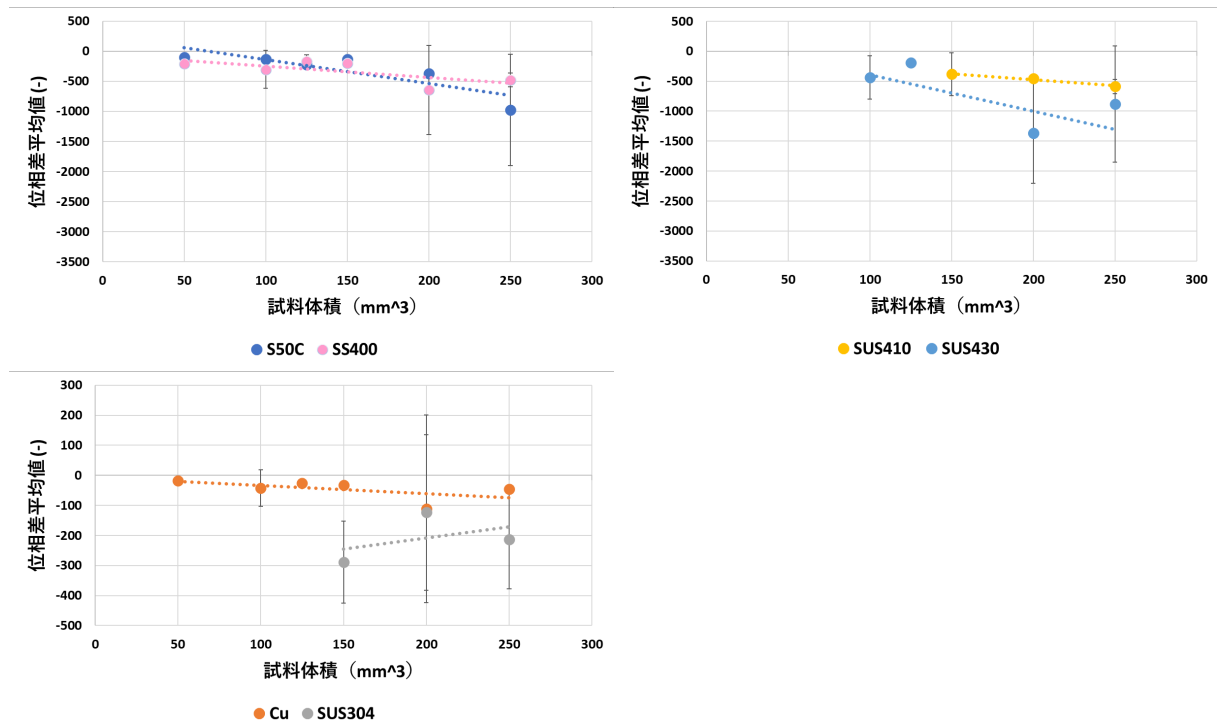
試験 1－②では、試料の高さ（5mm）が同一で、ベルトコンベアに接する試料底面積が異なる試料における観測値を確認した（図表 96）。

銅、普通鋼、クロム系ステンレス鋼等で、垂直方向の体積変化条件と同様、体積の大きい試料ほど位相差最小値および位相差平均値が減少（絶対値としては増加）する傾向が確認できた。なお、本試験のうち一部試料では、ベルトコンベア上で試料が転がってしまい、当初予定した試験条件（ベルトコンベアに接する試料底面積 1,600mm²）におけるデータを取得することができなかった。そのため、データを十分に取得することができなかったニッケル系ステンレス鋼等では、試料の体積と観測データの相関を十分に確認することができなかった。

図表 96 試験 1－②における試験結果
＜位相差最小値＞



<位相差平均値>



(注 1) 左上：普通鋼（S50C、SS400）、右上：クロム系ステンレス鋼（SUS410・SUS430）、左下：銅、ニッケル系ステンレス鋼

(注 2) 一部の試料は、ベルトコンベア上で転がってしまい、予定していた条件における観測データを測定できなかった。それらは、上記試験結果のプロットから除外している。

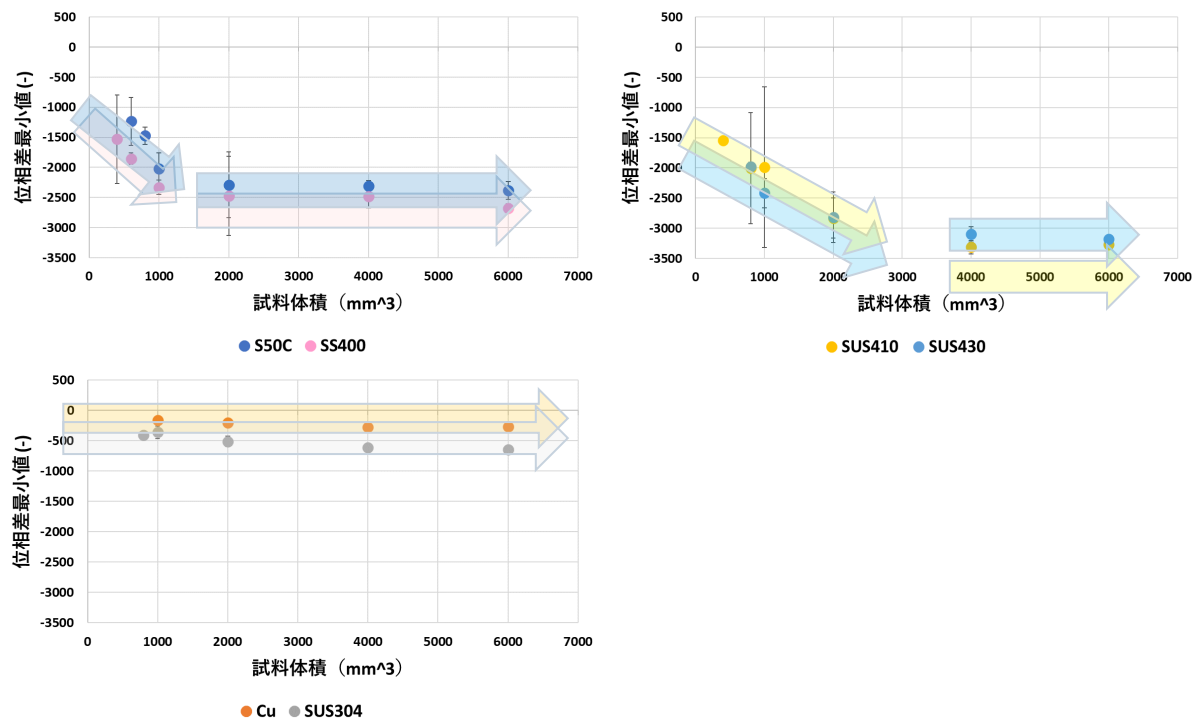
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

(3) 試験 1－③における試験結果

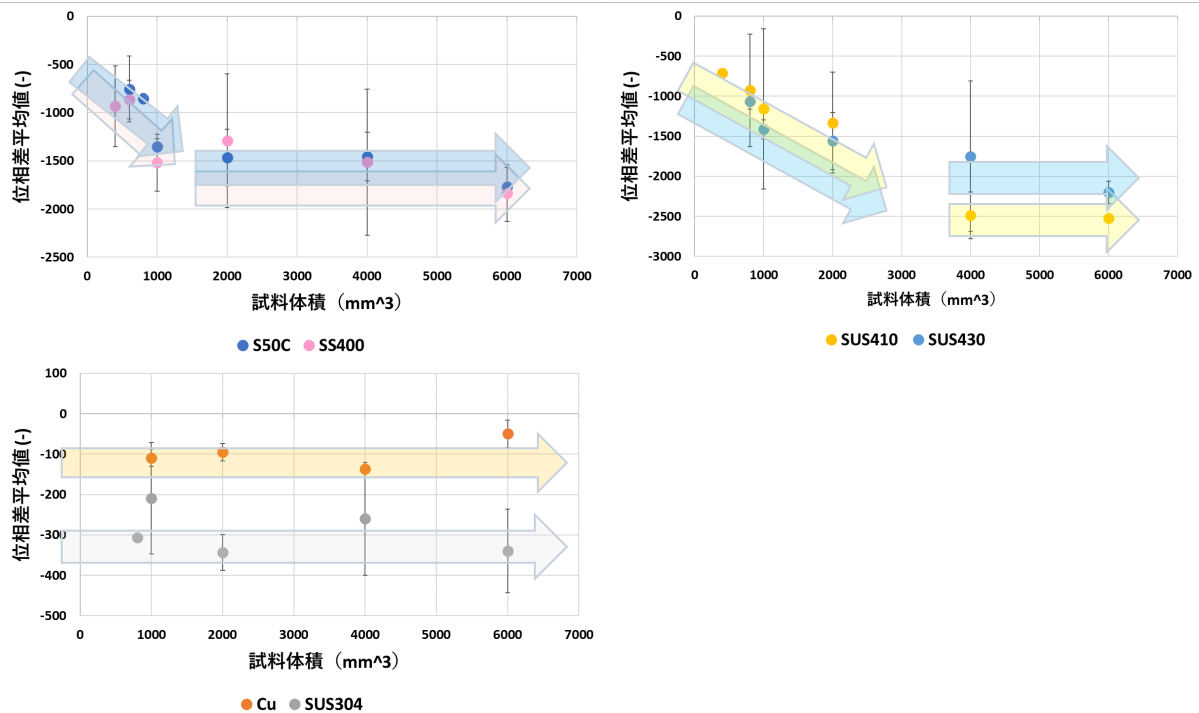
試験 1－③では、試料の高さ（10mm）が同一で、ベルトコンベアに接する試料底面積が異なる試料の観測値を確認した（図表 97）。

銅、ニッケル系ステンレス鋼では、試料体積の大きさによらず（ばらつきはあるものの）位相差最小値および平均値が一定となる傾向が確認できた。一方、普通鋼、クロム系ステンレス鋼では、ある大きさまで体積が大きい試料ほど位相差が減少（絶対値としては増加）し、その後試料体積の大きさによらず一定となる傾向が確認できた。

図表 97 試験 1－③における試験結果
＜位相差最小値＞



<位相差平均値>



(注 1) 左上：普通鋼（S50C、SS400）、右上：クロム系ステンレス鋼（SUS410・

SUS430）、左下：銅、ニッケル系ステンレス鋼

(注 2) 一部条件は、ベルトコンベア上で試料が転がってしまい、高さ 10mm 条件で測定できなかった。それら条件は、プロットから除外している。

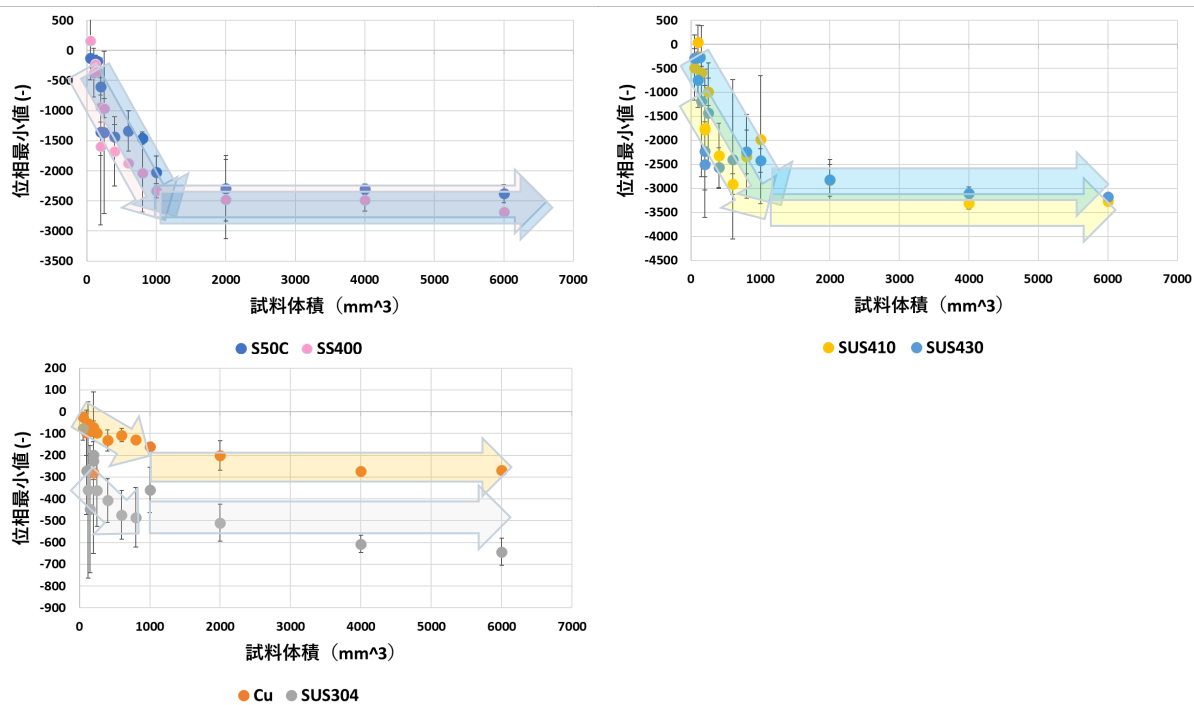
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

(4) 試験 1－①～③で使用した全試料における試験結果

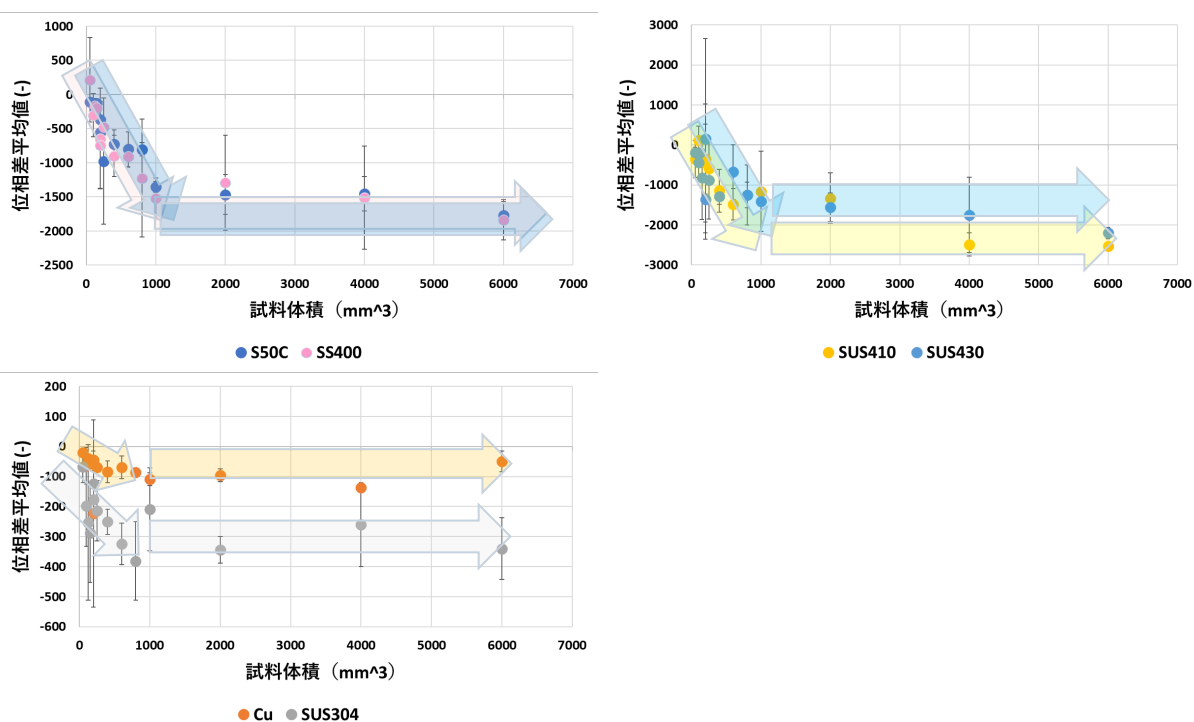
試験 1－①～③で使用した全試料の試験結果をまとめた（図表 98）。

結果、およそ 1,000mm³未満の体積を有する試料の場合、体積が大きい試料ほど位相差最小値、位相差平均値が減少（絶対値としては増加）し、1,000mm³以上の体積を有する試料の場合、試料体積によらず位相差平均値が一定となる傾向が確認できた。

図表 98 試験 1-①～③で使した全試料における試験結果
 <位相差最小値>



<位相差平均値>



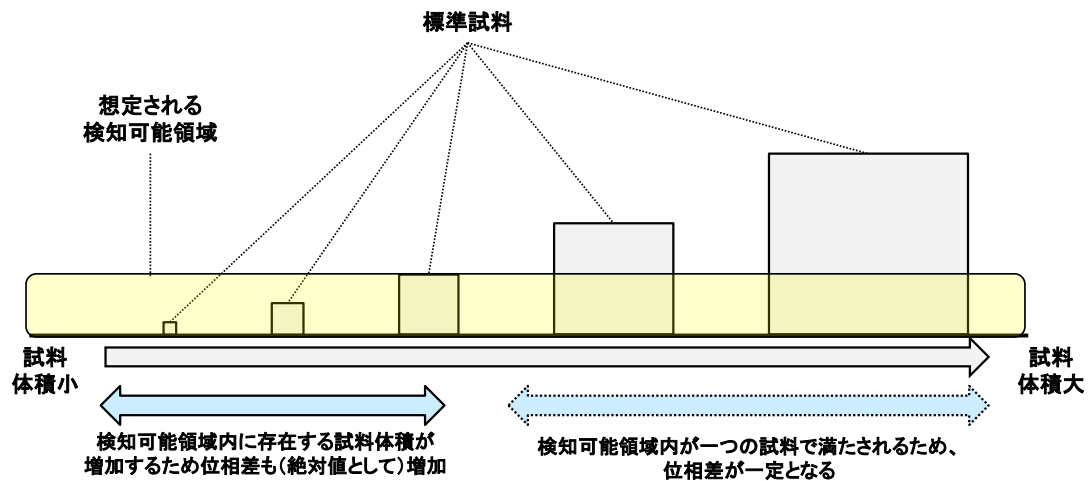
(注) 左上：普通鋼 (S50C、SS400)、右上：クロム系ステンレス鋼 (SUS410・SUS430)、
 左下：銅、ニッケル系ステンレス鋼
 (出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

(5) 検知可能領域と観測データに関する考察

これまでの結果から、電磁センサーでは、試料体積及び素材の導電率と透磁率によって得られる位相差値が異なること、体積が一定以上（電磁センサー直径 12.5mm の場合 1,000mm³ 前後）になると、体積による位相差値の変化は見られなくなる傾向にあることが分かった。

このことから、電磁センサーには、検知可能領域が存在し、検知可能領域内のセンサー近傍を通過する試料の一部分だけの導電率や透磁率のみに依存することが改めて示唆された（図表 99）。予め選別する等して試料体積のばらつきを電磁センサーの検知可能領域内で一定範囲内に収めるか、予め推定される試料体積に応じて異なる（位相差データの）境界条件を設定できれば、試料素材の導電率や透磁率によってのみ選別できる電磁センサーとなる可能性があると考えられる。

図表 99 検知可能領域と標準試料の体積との相関について（当社仮説）
（ベルトコンベアの進行方向面から観測した際のイメージ）



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

4.5.1.2 標準試料を用いた試料体積変化試験（電磁センサー直径 25mm 条件）

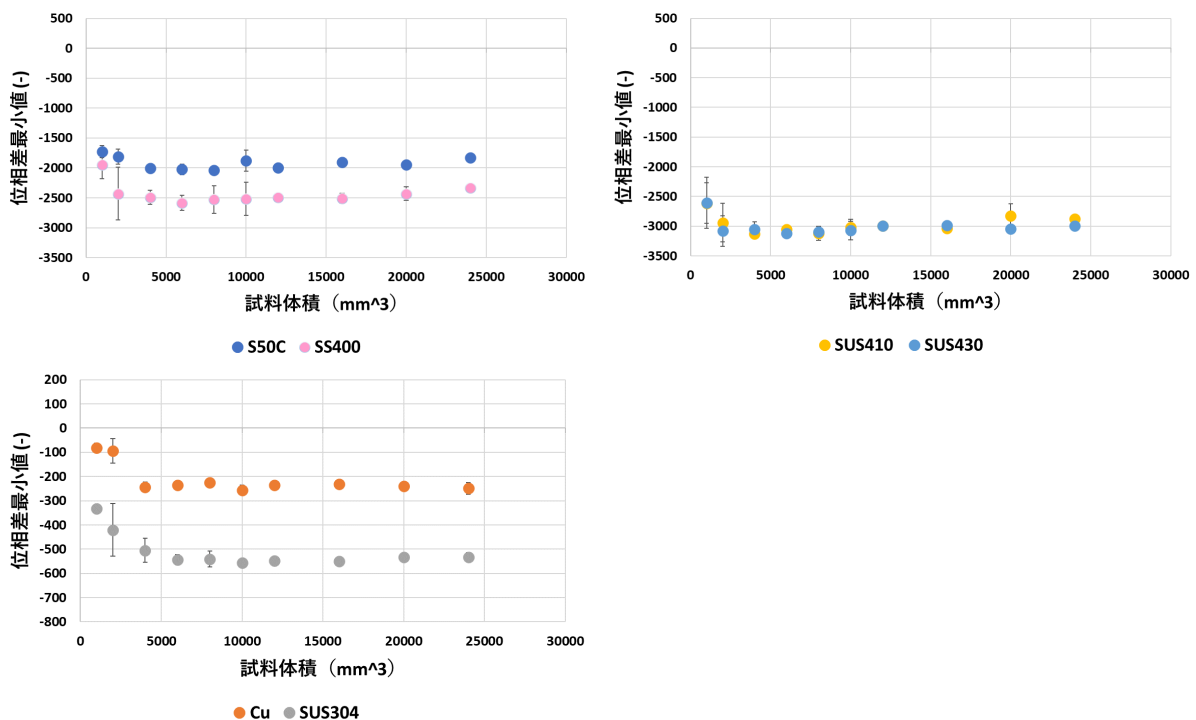
（1）試験 2－①における試験結果

試験 2－①では、試料の高さ（10mm）が同一で、ベルトコンベアに接する試料底面積が異なる試料の観測値を確認した（図表 100）。

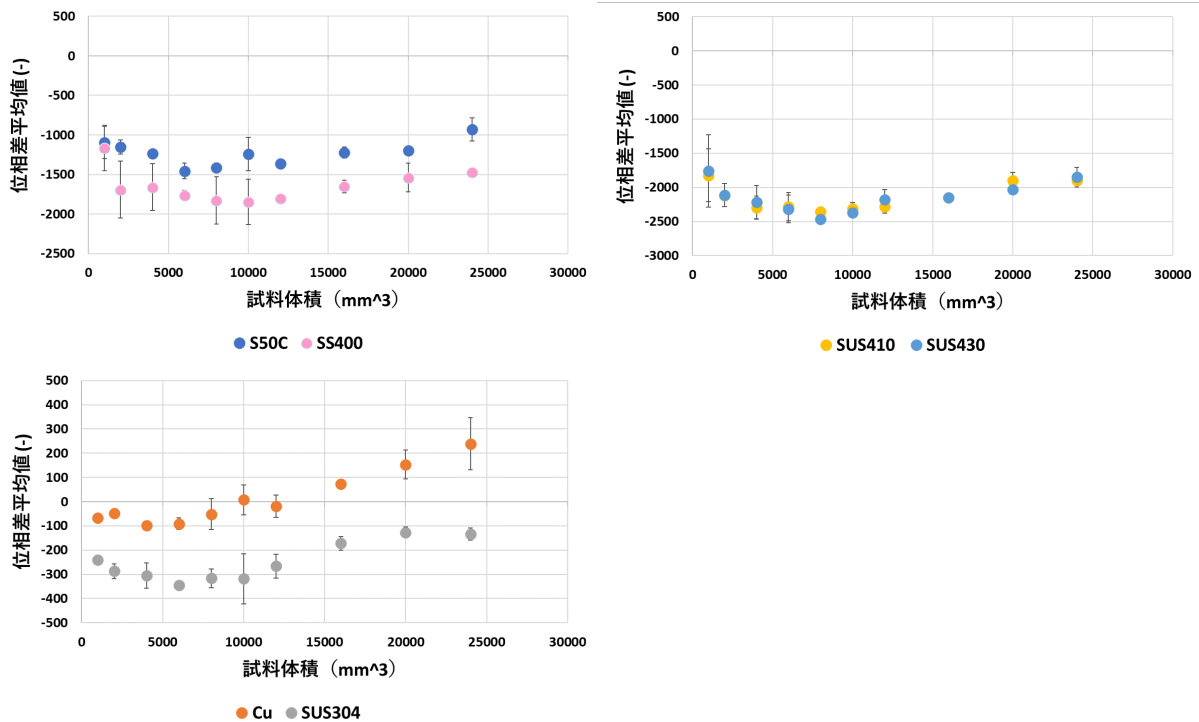
銅、ニッケル系ステンレス鋼それぞれで観測された位相差最小値は、体積 4,000 mm³ 未満の試料の場合、体積の大きい試料ほど減少傾向となった。一方、体積 4,000 mm³ 以上の試料の場合、試料体積の大きさにかかわらず、位相差最小値は一定の値を示す傾向が確認できた。普通鋼、クロム系ステンレス鋼それぞれで観測された位相差最小値は、体積 1,000 mm³ の試料で観測された値が他試料と比べて最も大きく、それよりも大きな試料は、試料体積の大きさにかかわらず、一定の値が観測された。

また、各試料で観測された位相差平均値は、体積の大きい試料ほど減少傾向を示すが、ある体積以上になると、体積の大きい試料ほど増加する傾向が確認された（普通鋼、銅、ニッケル系ステンレス鋼では体積 6,000 mm³、クロム系ステンレス鋼では体積 8,000 mm³ 以上になると位相差平均値が増加傾向にあった）。

図表 100 試験 2－①における試験結果
＜位相差最小値＞



<位相差平均値>



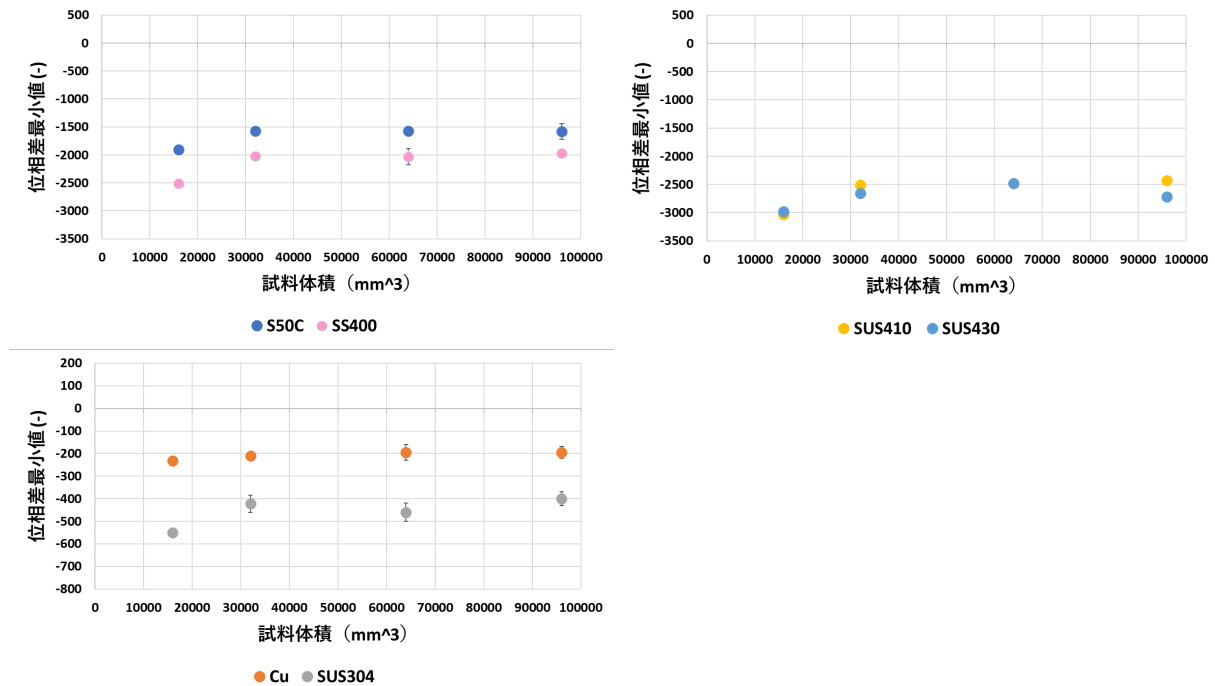
(注) 左上：普通鋼（S50C、SS400）、右上：クロム系ステンレス鋼（SUS410・SUS430）、
 左下：銅、ニッケル系ステンレス鋼
 (出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

(2) 試験 2-②における試験結果

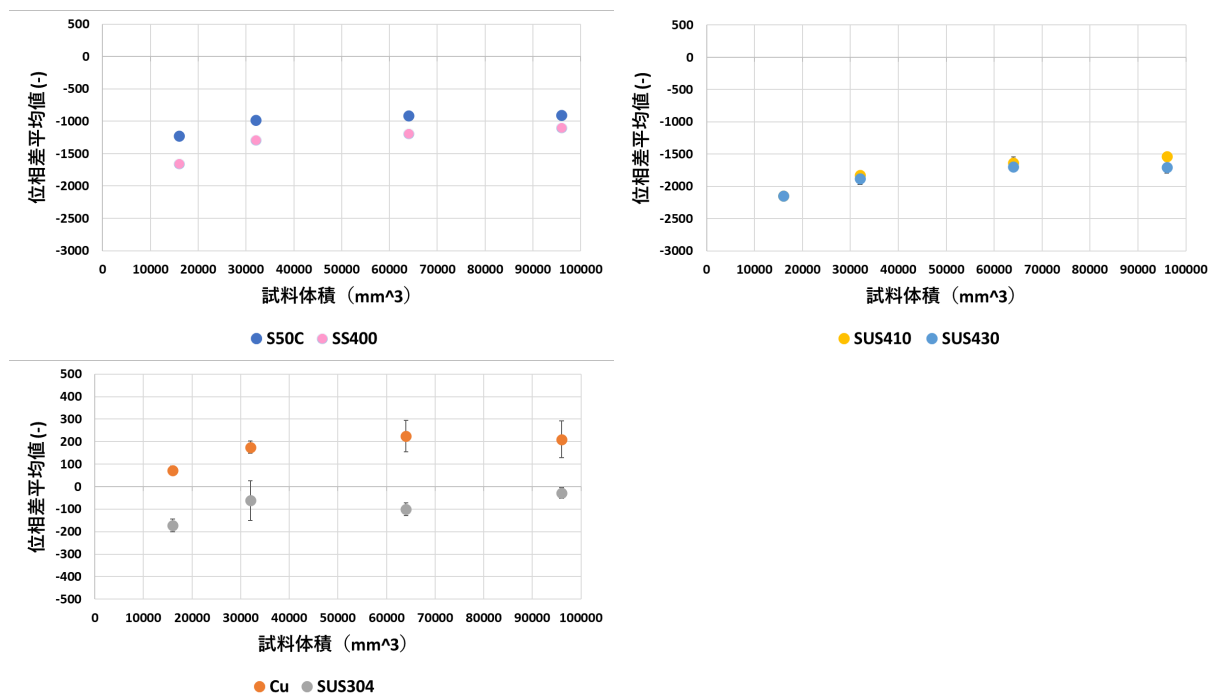
試験 2-②では、ベルトコンベアに接する試料底面積（1,600mm²）が同一で、試料の高さが異なる試料の観測値を確認した（図表 101）。

各試料条件において、位相差最小値、位相差平均値ともに、体積 32,000mm³ 以上の試料では一定の値が観測された。

図表 101 試験 2-②における試験結果
＜位相差最小値＞



＜位相差平均値＞



(注) 左上：普通鋼（S50C、SS400）、右上：クロム系ステンレス鋼（SUS410・SUS430）、
左下：銅、ニッケル系ステンレス鋼
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

(3) 試験 2-①、②で使用した全試料における試験結果

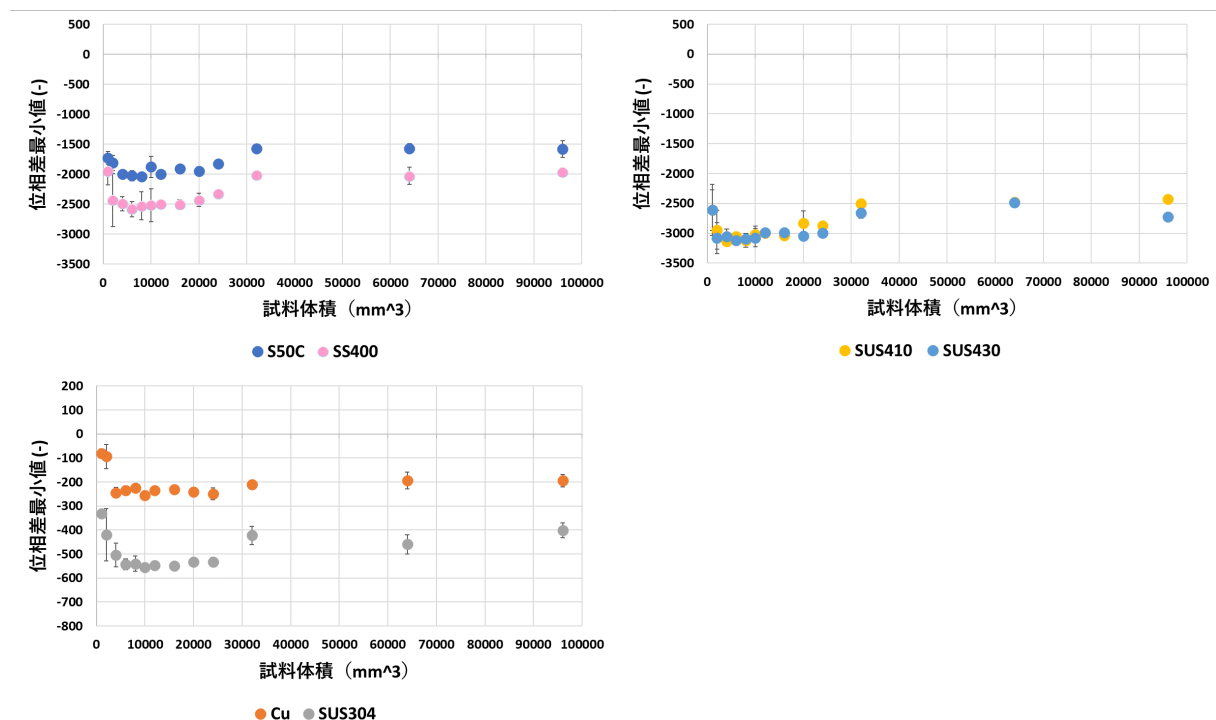
試験 2-①、②で使用した全試料の試験結果をまとめた（図表 102）。

銅、ニッケル系ステンレス鋼、普通鋼それぞれで観測された位相差最小値は、体積 4,000 mm³ 未満の試料の場合、体積の大きい試料ほど減少傾向を示した。4,000 mm³ 以上 32,000 mm³ 未満の体積を有する試料の場合、体積が大きい試料ほどわずかに位相差最小値が増加する傾向が確認された。32,000 mm³ 以上の体積を有する試料の場合、位相差最小値は試料体積の大きさによらず一定の傾向であった。

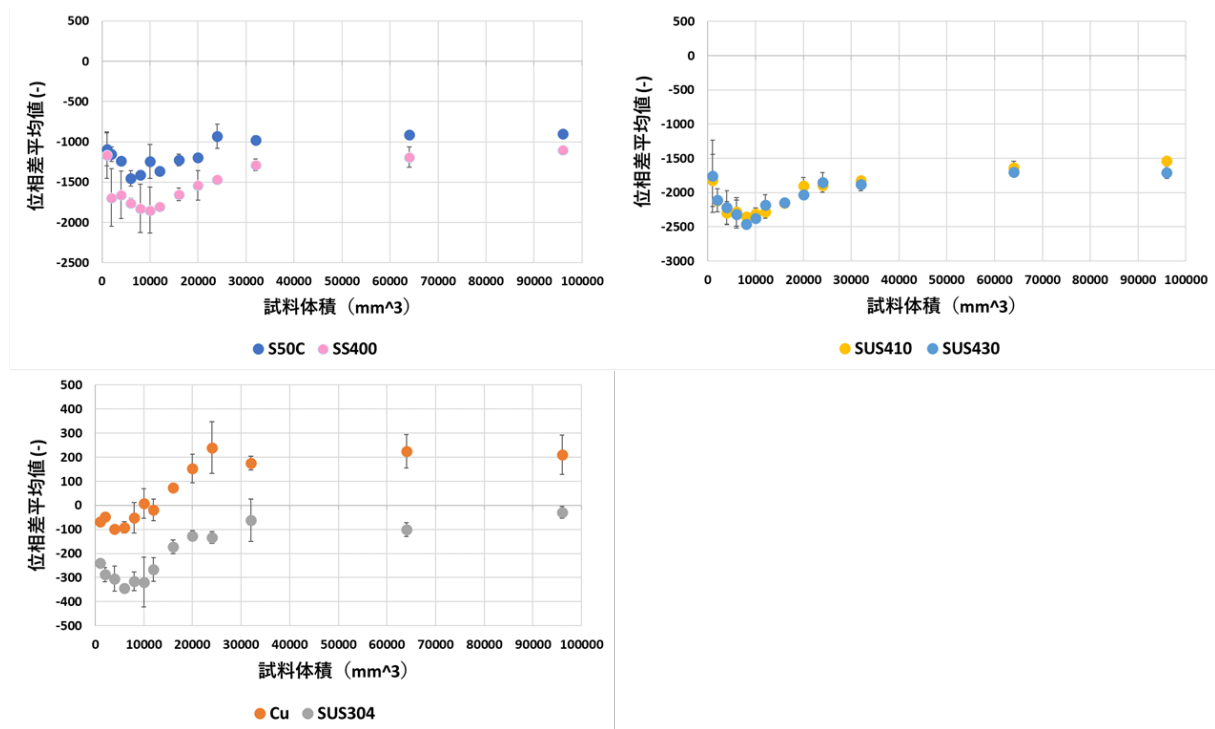
クロム系ステンレス鋼で観測された位相差最小値は、2,000 mm³ 以上 32,000 mm³ 未満の体積を有する試料の場合、体積の大きい試料ほどわずかに増加する傾向が確認された。32,000 mm³ 以上の体積を有する試料の場合、位相差最小値は試料体積の大きさによらず一定の傾向であった。

また、各試料で観測された位相差平均値は、体積の大きい試料ほど減少傾向を示すが、ある体積以上になると、体積の大きい試料ほど増加する傾向が確認された（普通鋼、銅、ニッケル系ステンレス鋼では体積 6,000 mm³、クロム系ステンレス鋼では体積 8,000 mm³ 以上になると位相差平均値が増加傾向にあった）。ただし、いずれの金属種も体積 32,000 mm³ 以上の試料では一定の位相差平均値が観測された。

図表 102 試験 2-①、②で行った全試料における試験結果
＜位相差最小値＞



<位相差平均値>



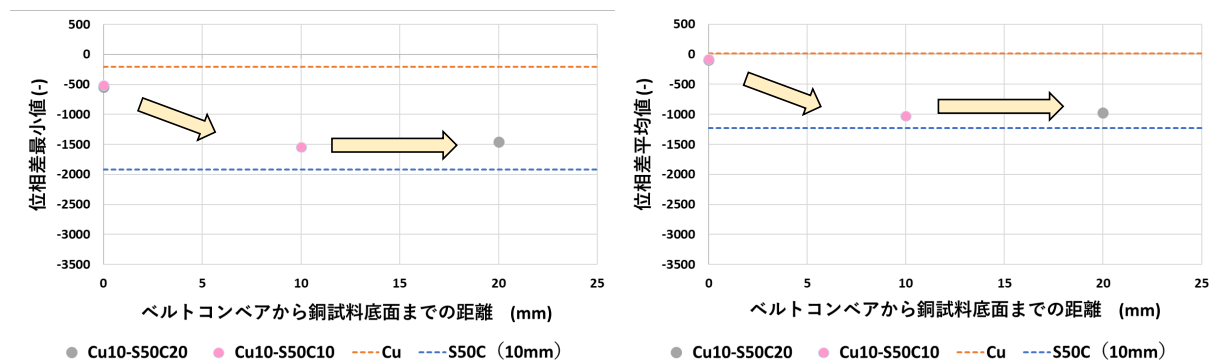
(注) 左上：普通鋼（S50C、SS400）、右上：クロム系ステンレス鋼（SUS410・SUS430）、
 左下：銅、ニッケル系ステンレス鋼
 (出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

(4) 試験 2-③における試験結果

二成分系試料を用いて、ベルトコンベアから銅試料底面までの距離と、位相差最小値、位相差平均値の関係を確認した（図表 103）。

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差平均値と近い値が観測された。つまり、12.5mm 直径のコイル同様、25mm 直径のコイルを用いた電磁センサーでも、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。

図表 103 二成分系試料（銅及び普通鋼（S50C））で観測される位相差最小値（左）及び位相差平均値（右）



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

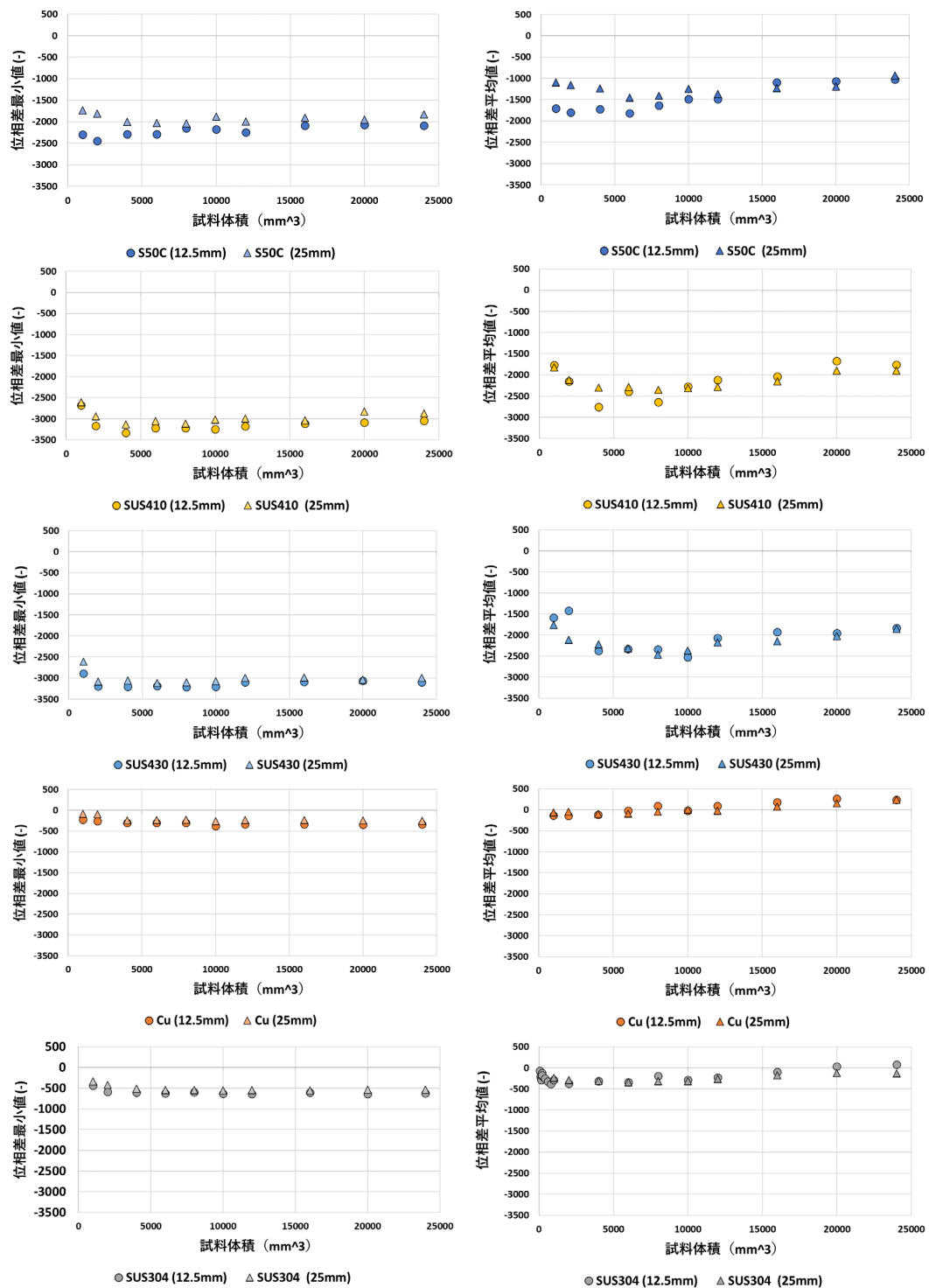
(5) コイル直径 12.5mm と 25mm 条件における観測値の比較

コイル直径 25mm 条件で観測されたデータと、本事業第 2 年度までに観測されたコイル直径 12.5mm 条件で観測されたデータを、金属種ごとに比較した（図表 104）。コイル直径 25mm 条件では、コイル直径 12.5mm 条件と比べて検知可能領域が大きくなり、観測値の傾向が異なることが期待されていたが、標準試料を用いた試験では、一部の金属種を除き、観測値に大きな傾向の違いは確認されなかった。

クロム系ステンレス鋼、銅、ニッケル系ステンレス鋼それぞれで観測された位相差最小値では、コイル直径の変化に応じた傾向の違いが確認されなかった（両条件において、位相差最小値は、試料体積 1,000 mm³ から 2,000 mm³ の範囲において減少傾向にあり、コイルの直径条件による違いは確認されなかった。また、2,000 mm³ よりも大きな体積を有する試料の場合も同様に、両条件で試料体積の大きさにかかわらず、一定となる傾向が確認された）。

他方、普通鋼（S50C）の場合、コイル直径条件による観測値の違いが確認された。4.5.1.1 (4) で示した通り、電磁センサーでは、一定未満の体積を有する試料の場合、体積が大きいほど位相差最小値が減少し、体積が一定以上になると体積による位相差値の変化は見られなくなる。コイル直径 12.5mm 条件で普通鋼（S50C）を観測して得られた位相差最小値は、試料体積 1,000 mm³ から 24,000 mm³ の範囲において、試料体積にかかわらず一定の傾向がみられた。一方、コイル直径 25mm 条件で普通鋼（S50C）を観測して得られた位相差最小値は、試料体積 1,000 mm³ から 4,000 mm³ の範囲において、体積の大きい試料ほど位相差最小値は減少する傾向にあった。また、4,000 mm³ よりも大きな体積を有する試料の場合、試料体積の大きさにかかわらず、位相差最小値が一定となる傾向が確認された。

図表 104 コイル直径 12.5mm と 25mm 条件で観測された各種金属における
位相差最小値（左）・位相差平均値（右）の比較



(注) 上から普通鋼 (S50C)、SUS410、SUS430、銅、SUS304 の比較結果を示す。なお、普通鋼 (SS400) はコイル直径 25mm と同条件の結果をコイル直径 12.5mm 条件において測定していないため、ここでは示していない。

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

4.5.1.3 実試料の選別可能性確認試験（電磁センサー直径 25mm 条件）

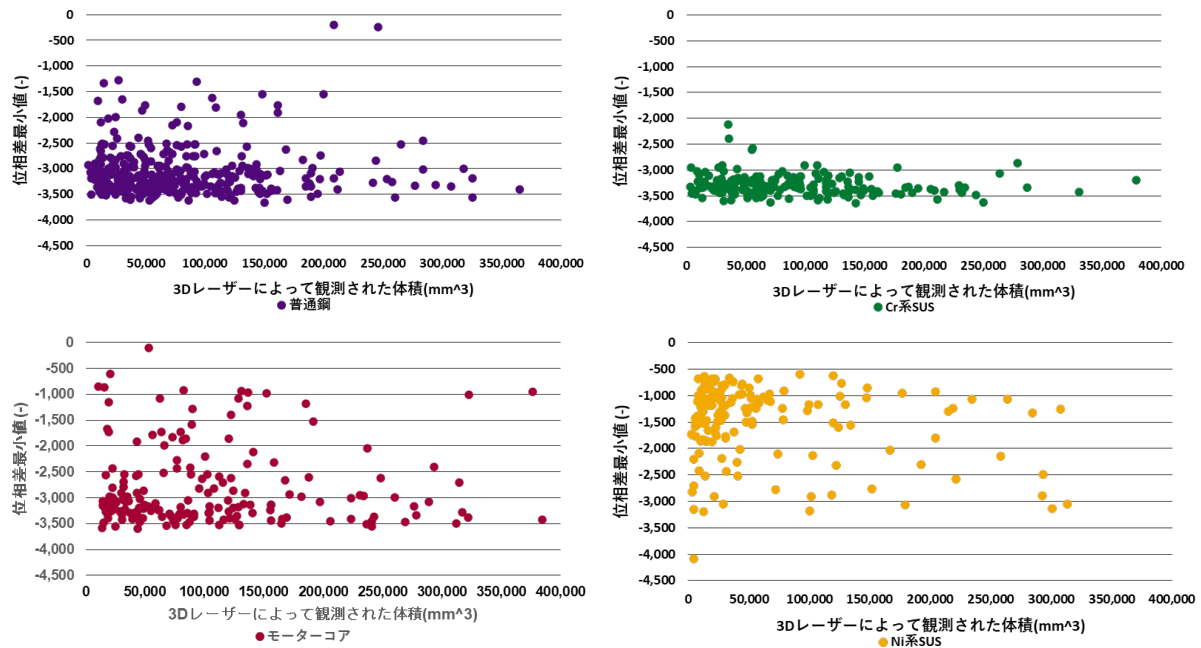
（1）実試料の選別可能性試験結果

普通鋼、クロム系ステンレス鋼において観測された位相差最小値は、 $-3,500$ から $-3,000$ 前後に集中する傾向がみられた。また、モーターコアにおいて観測された位相差最小値も $-3,500$ から $-3,000$ 前後が多かったものの、ほかの実試料よりもばらつく傾向がみられた。ニッケル系ステンレス鋼で観測された位相差最小値の場合、ばらつきはあるものの、 -500 から $2,000$ 前後に集中する傾向がみられた（図表 105）。

クロム系ステンレス鋼において観測された位相差最大値は、 $6,000$ から $7,000$ 前後に集中する傾向がみられた。普通鋼、モーターコアにおける位相差最大値の場合も同様に $6,000$ から $7,000$ 前後に値が集中する傾向があったものの、 0 以下の値も多く観測された。また、ニッケル系ステンレス鋼における位相差最大値の場合、 $5,000$ から $6,000$ 前後と、 0 前後に値が集中する傾向が確認された（図表 106）。

普通鋼において観測された位相差平均値は、 0 以下に集中する傾向がみられた。クロム系ステンレス鋼において観測された位相差平均値の場合 $-2,500$ から $5,000$ まで、モーターコアにおいて観測された位相差平均値の場合 $-3,000$ から $6,000$ 前後まで値がばらつく傾向がみられた。一方、ニッケル系ステンレス鋼において観測された位相差平均値は $-1,000$ から 0 に値が集中する傾向がみられた（図表 107）。

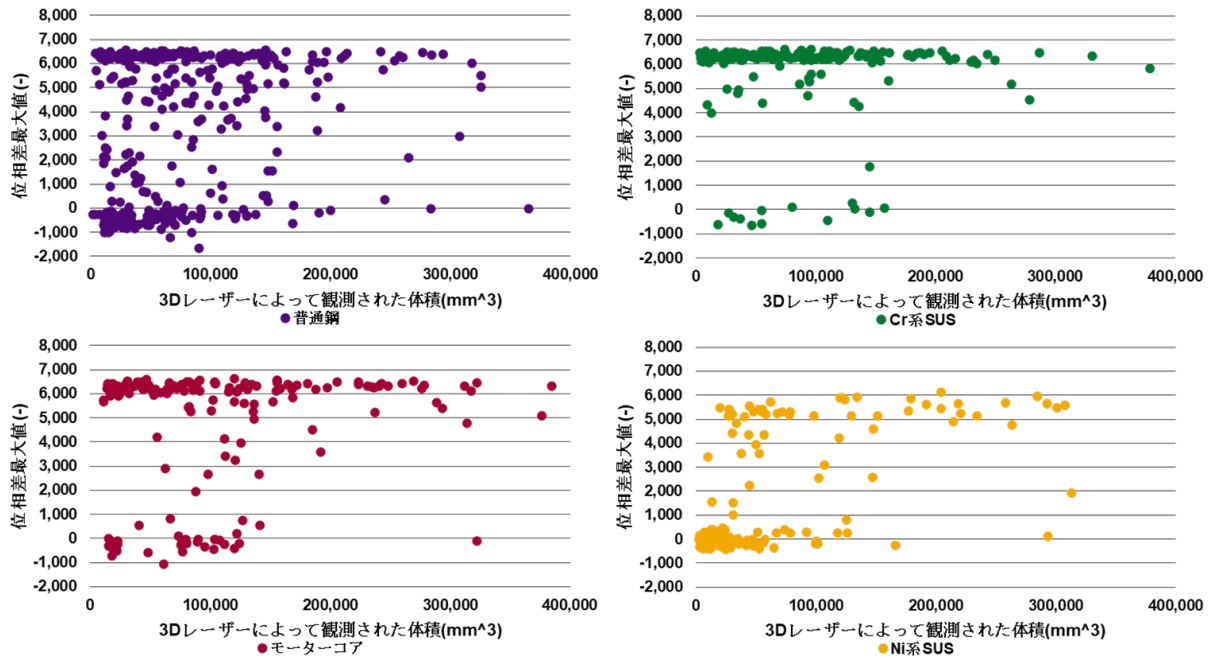
図表 105 コイル直径 25mm 条件で観測された実試料における位相差最小値



(注) 左上：普通鋼、右上：クロム系ステンレス鋼、左下：モーターコア、
右下：ニッケル系ステンレス

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

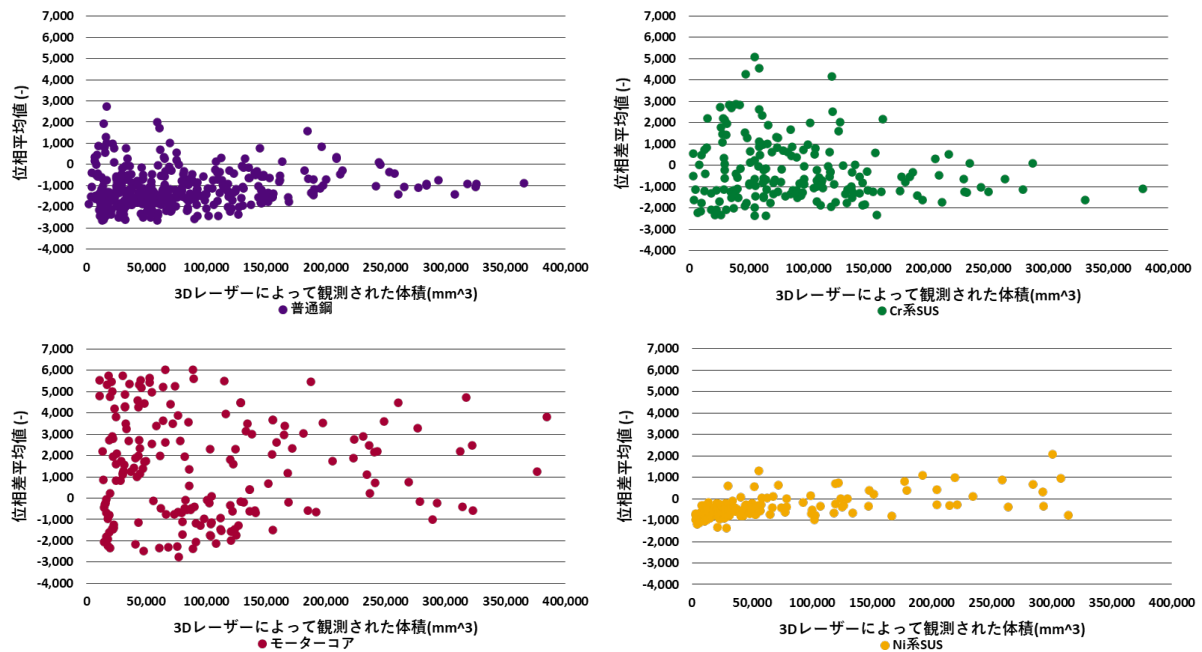
図表 106 コイル直径 25mm 条件で観測された実試料における位相差最大値



(注) 左上：普通鋼、右上：クロム系ステンレス鋼、左下：モーターコア、
右下：ニッケル系ステンレス

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 107 コイル直径 25mm 条件で観測された実試料における位相差平均値



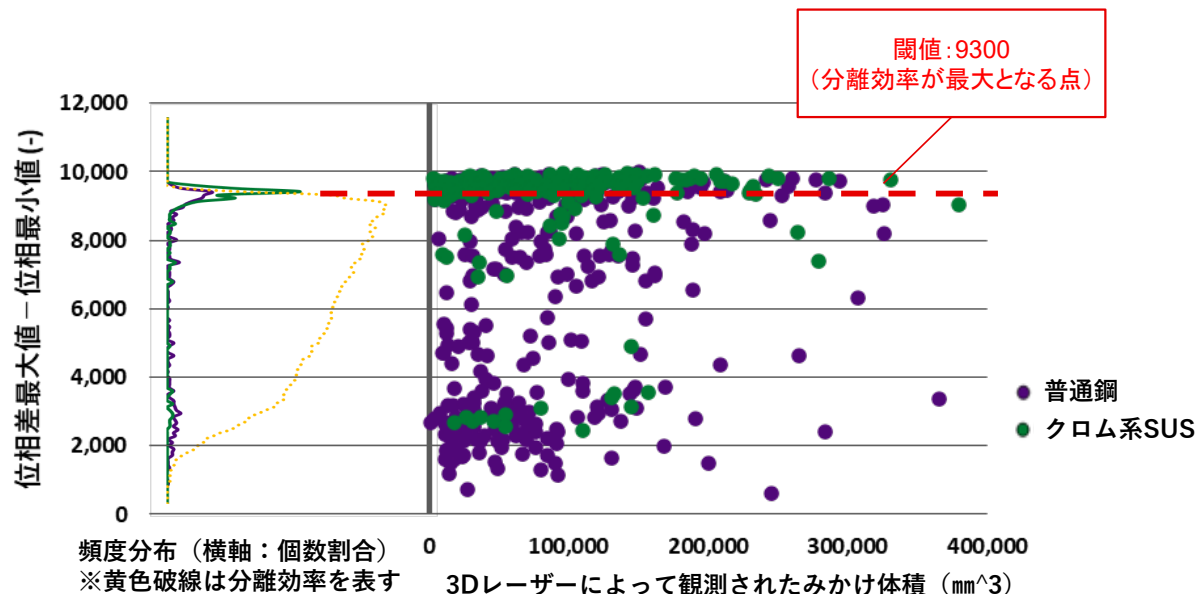
(注) 左上：普通鋼、右上：クロム系ステンレス鋼、左下：モーターコア、
右下：ニッケル系ステンレス

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

特に普通鋼とクロム系ステンレス鋼において観測されたデータに注目すると、クロム系ステンレス鋼における位相差最小値および位相差最大値は特定の値に集中し、普通鋼における位相差最小値および位相差最大値は比較的ばらつく傾向にあった。そこで、普通鋼、クロム系ステンレス鋼で観測される値の傾向をより顕著にするべく、位相差最大値を位相差最小値で差し引いた値で分布を取った（図表 108）。結果、位相差最小値と位相差最大値の差分値に 9300 という閾値を設定すると、個数ベースで約 64%の普通鋼を回収しながら、79%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る可能性があることが分かった（図表 109）。

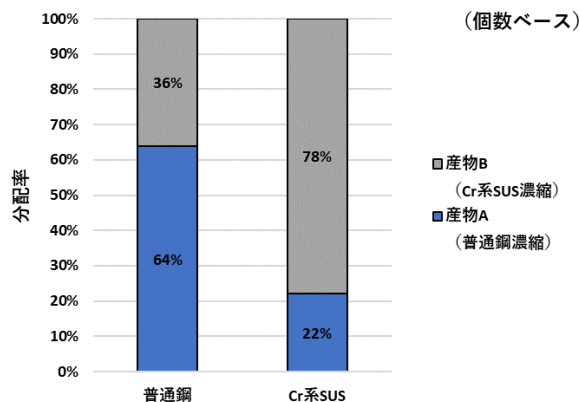
電磁センサーコイル直径 25mm の装置において期待される分離効率（目的成分の実収率－目的外成分の混入率）は 43%で、電磁センサーコイル直径 12.5mm の装置における分離効率（38%）よりも改善される結果となった。

図表 108 コイル直径 25mm 条件における位相差最大値と位相差最小値の差分値の分布



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 109 コイル直径 25mm 条件における普通鋼とクロム系ステンレス鋼の選別結果



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

(2) コイル直径 12.5mm と 25mm 条件における観測値の比較

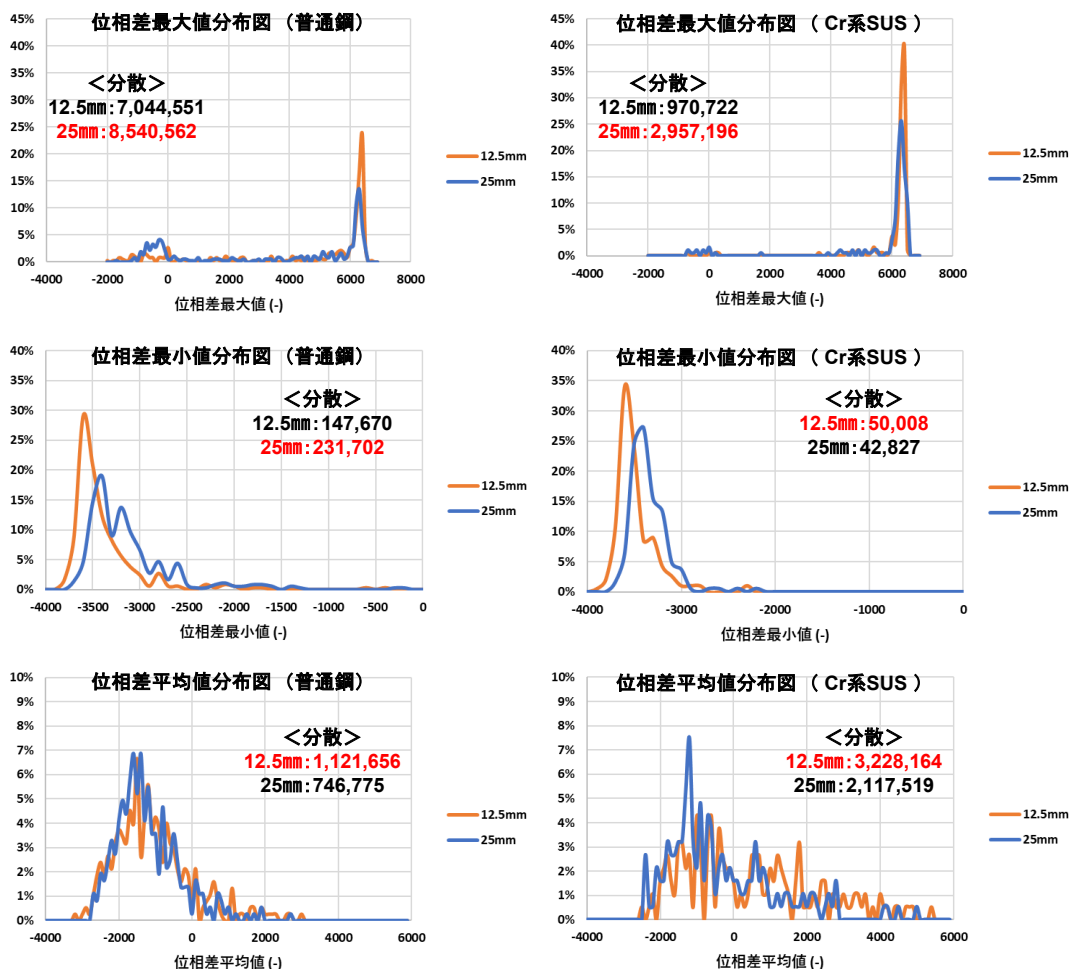
事業第2年度(コイル直径 12.5mm の装置を用いた選別試験)では、位相差平均値で特に金属種ごとの違いが確認されたため、閾値を設定して分離効率を検討していた。一方本年度(コイル直径 25mm の装置を用いた選別試験)は、位相差最大値および最小値で特に金属種ごとの違いが確認された。そこで、電磁センサーコイル直径 12.5mm、25mm を用いて普通鋼、クロム系ステンレス鋼を観測した際に得られた位相差最大値、位相差最小値、位相差平均値の分布および分散を比較した(図表 110、図表 111)。

コイル直径 12.5mm のほうが位相差最小値、最大値は分散が小さくなりやすい傾向にあり、また特定の値に集中して分布する傾向も確認された（図表 110）。一方、位相差平均値の場合、コイル直径 25mm のほうが、分散は小さくなりやすい傾向にあることが確認された。

また、特に位相差最小値においてコイル直径 12.5mm と 25mm で普通鋼とクロム系ステンレス鋼の分布の傾向が異なることが確認された。そのため、コイル直径 25mm のほうが、位相差最大値と位相差最小値において、普通鋼とクロム系ステンレス鋼の分布の重なりがずれている（金属種ごとに特徴が出ている）ことがわかる（図表 111）。

本実証の範囲では、コイル直径が小さいほど粒子ごとに得られる観測値のばらつきは小さくなる傾向にあり、絶対値で見た場合の金属種ごとの違いは識別が難しい傾向にあった。そのため、コイル直径の大きい方が観測値のばらつきは大きくなるが、絶対値で見た場合の金属種ごとの違いも拡大されることから、相対的に識別は容易になる可能性がある（識別時の分解能の問題）。

図表 110 コイル直径 12.5、25mm 条件における普通鋼とクロム系ステンレス鋼の観測値（位相差最大値、位相差最小値、位相差平均値）の分布（鋼種別比較）

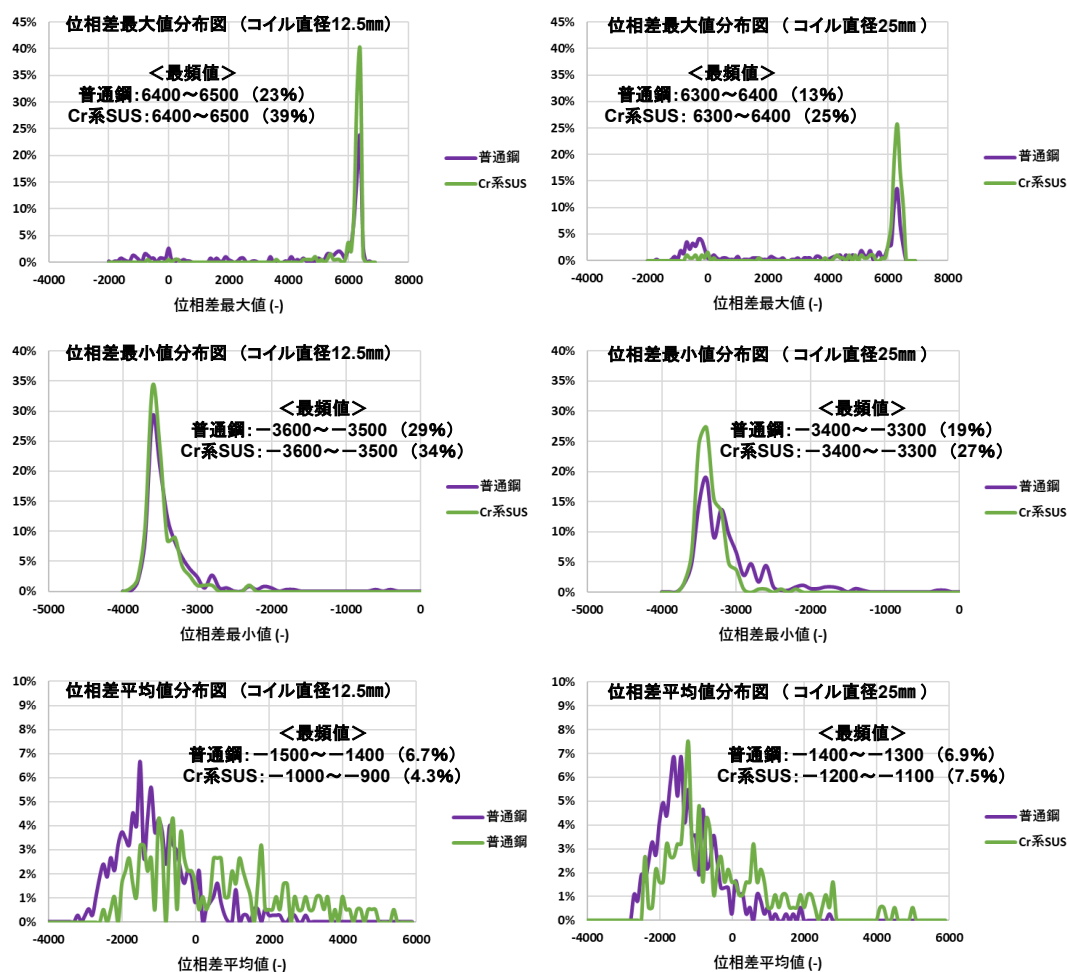


（注 1）横軸が観測値、分布率を表す（分布率は観測値を 100 単位で集計して計算）

（注 2）普通鋼とクロム系ステンレス鋼のうち、分散が大きかった方の値を赤で着色している

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 111 コイル直径 12.5、25mm 条件における普通鋼とクロム系ステンレス鋼の観測値（位相差最大値、位相差最小値、位相差平均値）の分布（コイル直径別比較）



（注）横軸は観測値、縦軸は分布率を表す（分布率は観測値を 100 単位で集計して計算）

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

（3）本事業に用いた装置における検証結果

標準試料を用いた実験と異なり、実試料を用いた実験では、試料体積（試料径）のばらつきが大きく、また形状も不定形であるため、電磁センサーで得られた位相差データのばらつきも大きくなった。そのため、素材の導電率や透磁率に応じた最適な境界条件を設定することが難しい。試料体積のばらつきを小さくするための前処理、また試料体積に応じて境界条件を都度自動計算して選別できるようにするアルゴリズムを装置に導入する必要があると考えられる。

本事業では、電磁式ファインダーの観測値に影響を及ぼすと思われる因子のうち、影響が大きいと想定される項目を対象に検討を実施した（図表 112）。標準試料のように試料の真比重と嵩比重の乖離が小さく、また素材の均質性の高い試料であれば、比透磁率や導電率の差を用いて金属種別に識別することが確認できた。一方、実試料の場合、比透磁率や導電率等の金属種固有の因

子だけでなく、試料の真比重と嵩比重の乖離が大きいこと、試料の均質性が乏しいこと等が大きく観測値に影響を及ぼし、識別を困難にしてしまう。今後の改善に向けては、検知可能領域の存在の検証に向けて電磁場を模したシミュレーション等による解析、また金属種の影響をより大きく観測値に反映させるための検知可能領域の拡大に向けた工夫等が必要になると考えられる。

図表 112 電磁式ファインダーの観測値に影響を及ぼすと思われる因子と
本事業に用いた装置における検証結果

観測値に影響を及ぼすと思われる因子		検討結果
● コイルの影響変数	○ 測定周波数 f M (= 励起電位および／またはコイルを流れる電流の周波数)	未検討
	○ コイルに流れる電流	未検討
	○ コイルの直径	標準試料を用いた試験では、観測値に大きな影響を確認できず。
	○ コイル形状	未検討
	○ コイル巻き数	未検討
	○ コイルと物体との構造体軸方向における距離	二成分系試料を用いた試験では、ベルトコンベア近傍 (0~10mm) に存在する金属種が観測値に影響を及ぼすことを確認。
● 物体の材料固有の物理的影響変数	○ 比透磁率 μ r	標準試料を用いた試験では、金属種が観測値に影響を及ぼすことを確認。
	○ 導電性 σ	標準試料を用いた試験では、金属種が観測値に影響を及ぼすことを確認。
● 物体の形態的な影響変数	○ 大きさ	標準試料を用いた試験では、観測値に大きな影響を確認できず。
	○ 厚さ	標準試料を用いた試験では、観測値に大きな影響を確認できず。
	○ 形状	実試料を用いた試験では、標準試料を用いた試験結果と大きく観測値が異なることから、試料形状が観測値に影響を及ぼすと考えられる。
	○ 表面条件	未検討
	○ 試料の均質性 (渦電流発生範囲における)	二成分系試料を用いた試験では、銅と普通鋼 (S 5 0 C) の組み合わせに応じて観測値に影響を及ぼすことを確認。
	○ 体積	標準試料を用いた試験では、観測値に大きな影響を確認できず。
● 外乱変数	○ 物体の動き (転がり等)	未検討
	○ 物体の移動速度	標準試料を用いた試験では、観測値に大きな影響を確認できず。
	○ 干渉場(interference fields)	未検討
	○ ノイズ	未検討
	○ 温度	未検討

(注) 黄色塗は観測値への影響が小さいと思われる因子、緑塗は観測値への影響が大きいと思われる因子、白塗は未検討の因子

(出所) 特許 5259630 等を参考に三菱 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試作機の仕様検討

事業第2年度までの成果では、可視光カメラを用いて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が期待できる識別精度を本実証に用いた電磁式ファインダーが有していることを確認した。(分離効率：88%)。また、本年度実証成果から、直径25mmのセンサーコイルを用いて選別することで、個数ベースで約64%の普通鋼を回収しながら、79%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期待できる(分離効率：43%)。

これを踏まえ、試作機において必要となる主要部品とその要求仕様を図表113に整理した。もし、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25mm幅のセンサーを24個敷き詰める必要がある。電磁センサー1個当たりを8万円と見積もれば、小計192万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1,500万円程度と見込まれる。

図表 113 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	■ 位相値（もしくはそれに準じるデータ）を観測できること ■ 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
可視光カメラ	■ 色調値（もしくはそれに準じるデータ）を観測できること
ソーティングシステム	■ 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
ベルトコンベア	■ 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 ■ ベルト速度が可変であるもの
エアバルブ	■ 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

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

4.6. 事業における環境影響改善効果・CO₂排出量削減効果の評価

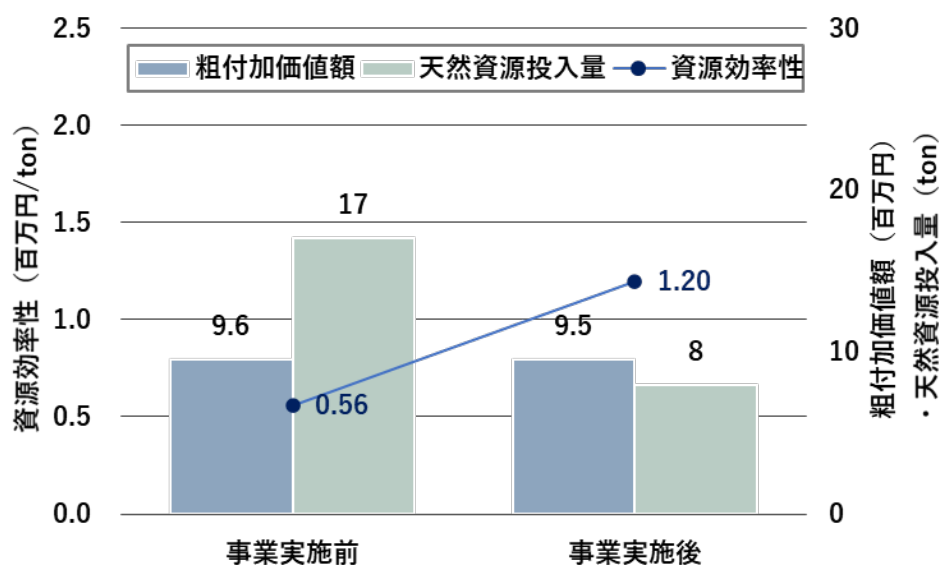
4.6.1. 資源効率性向上効果の検討

本推計の対象製品である自動販売機および自動車の資源効率性は、本事業の成果が社会に普及し、各製品の粗付加価値が増加し、天然資源投入量が減少することで、資源効率性が向上することが示唆された（図表 114、図表 115）。

自動車については、本事業実施前に回収されると想定した二次鉄原材料の品質が、本事業で設定した鉄鋼電炉向けシュレッタースクラップにおける忌避物質の許容品位の段階（図表 65）のうち、第 2 等級規格（詳しくは 4.2.2 を参照）を満たしていなかった。そのため、再資源化にあたって、天然資源由来の原材料による電炉での希釈が行われると仮定した。一方で、本事業実施後は、使用済み製品から回収される二次鉄原材料の品質が改善されて第 2 等級規格を満たすだろうと見込まれたことから、天然資源由来の原材料による希釈は行われないと仮定した。また、事業実施後は、使用済み自動車の水平リサイクルが拡大するため、天然資源の採掘・選鉱等に係る粗付加価値額が減少すると仮定した。結果、使用済み自動車を対象に本事業を実施することで、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。

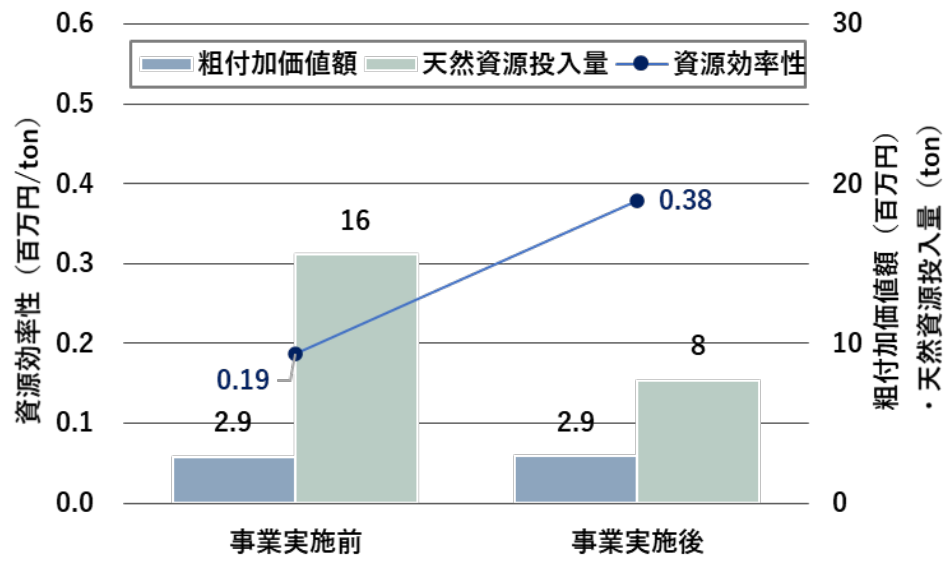
自動販売機については、事業実施前に回収される二次原料の品質が第 2 等級規格を満たしていると推計されたため、天然資源由来の原料による希釈は行われないと仮定した。結果として、自動車と同様に、本事業を実施することで、天然資源投入量が削減され、資源効率性が向上すると示唆された。一方で、自動販売機は、自動車と比較して各プロセスへの原料等の投入量が少ないため、粗付加価値額が小さい結果となった。また、事業実施後は天然資源の採掘・選鉱等に係る粗付加価値額が減少する一方で、鉄スクラップおよび銅スクラップの回収に係る粗付加価値が増加するため、見かけ上事業実施前後で機能単位あたりの粗付加価値額には変化がないと考えられる。

図表 114 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 115 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

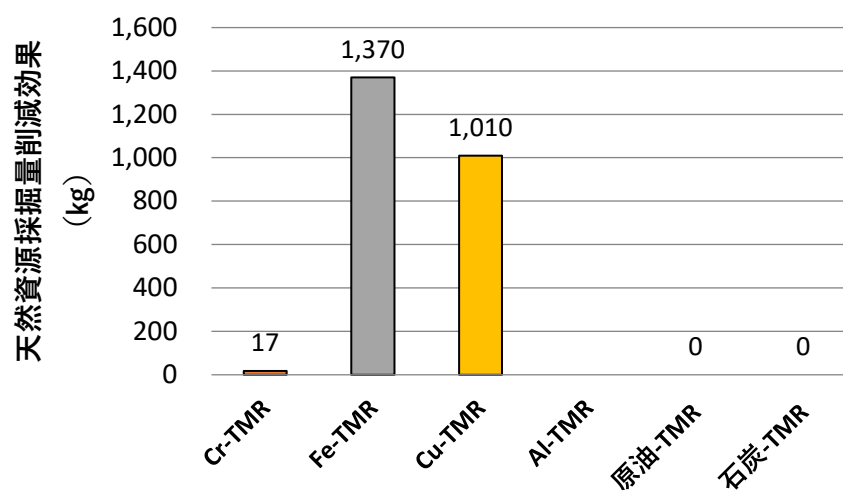
4.6.2. 天然資源採掘量削減効果の検討

本推計の対象製品である自動販売機および自動車では、本事業の成果が社会に普及することで、特に鉄鉱石・銅鉱石に係る天然資源採掘量が削減されると推計された(図表 116、図表 117)。自動車については、本事業実施前に回収されると想定した二次鉄原材料の品質が第 2 等級規格を満たしていなかったため、再資源化にあたって、天然資源由来の原材料による電炉での希釈が行われると仮定した。

一方で、本事業実施後は、使用済み製品から回収される二次鉄原材料の品質が改善されて第 2 等級規格を満たすと推計されたため、天然資源由来の原材料による希釈は行われないと仮定した。結果、使用済み自動車を対象に本事業を実施することで、特に鉄鉱石の天然資源投入量が大幅に削減されることにより、天然資源採掘量削減効果が大きいと推計された。

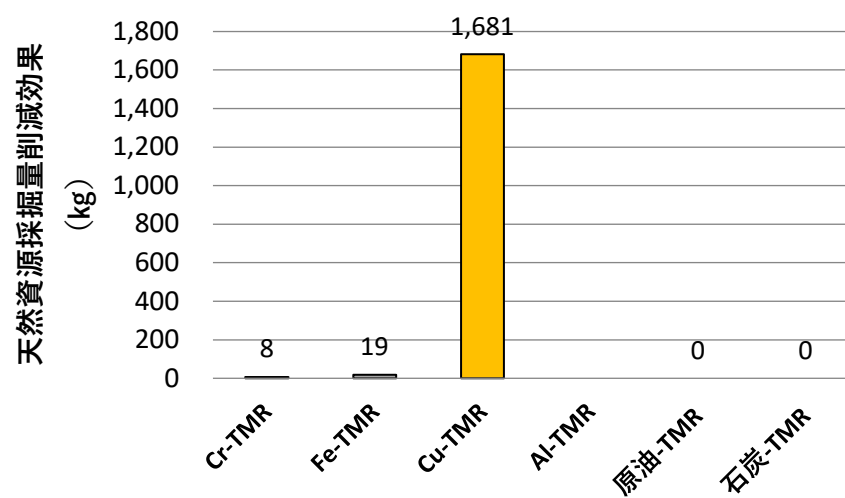
自動販売機については、事業実施前に回収される二次原料の品質が第 2 等級規格を満たしていると推計されたため、天然資源由来の原料による希釈は行われないと仮定した。自動車と比較して、鉄鉱石に係る天然資源採掘量削減効果よりも、銅鉱石に係る天然資源採掘量削減効果が顕著であった。これは、自動販売機は、自動車に比べて鉄鋼材の投入量が少なく、また、使用済み製品からの銅スクラップの回収量が多いと推計されていることに加え、自動車と比較して現在でも鉄鋼の再資源化は十分に行われているため(忌避物質の管理基準が自動車向け鋼板ほどに厳しくはないため)、新たな削減効果は大きく出なかったことが要因ではないかと考えられる。また、銅の TMR 係数(金属 1t 当たりの TMR)は、鉄のそれと比べて約 58 倍大きいことから、鉄スクラップに比べて銅スクラップ回収量が少なくても、天然資源採掘量削減効果に与える効果が大きかったとも考えられる。

図表 116 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

図表 117 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

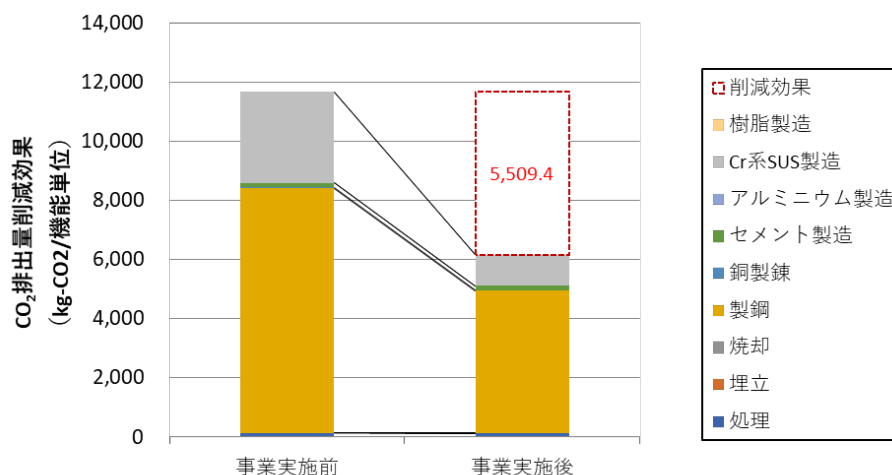
4.6.3. CO₂ 排出量削減効果

本事業の成果が社会に普及することによる CO₂ 排出量削減効果を使用済み自動車および自動車で推計し、それぞれ事業実施前後で CO₂ 排出量が削減されると推計された（図表 118、図表 119）。コンソーシアム内でも同様に CO₂ 排出量削減が期待される（図表 120、図表 121）。

自動販売機と自動車で改善効果が大きく異なる理由は、主に、鉄スクラップを電炉に投入する際の、天然資源由来の鉄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鉄スクラップの品質が既に第 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。自動車の場合、事業実施前に回収されると想定した鉄スクラップの品質は、第 2 等級規格を満たさず鉄の再資源化工程において、天然資源由来の原材料である銑鉄を投入し、希釈されると仮定した。そのため、本事業の成果が実装されれば、従来、資源循環が十分ではなかった自動車分野でもその効果が行き渡り、新たな追加効果は大きくでてくることになる。銑鉄の CO₂ 排出原単位は、高炉由来の CO₂ 排出によって、ほかの天然資源由来の原材料と比べても特に大きい。銑鉄の投入有無によって CO₂ 排出量が大きく変わると仮定した。本推計では事業実施後に回収されると想定した鉄スクラップの品質が改善され、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。

上記を前提とした場合、本事業の導入前後で、特に鉄鋼材の投入量が多い自動車に係る CO₂ 排出量は大きく削減されると推計された。本実証が社会に普及し、水平リサイクル可能な忌避物質の少ない二次原料が社会で循環するようになれば、天然資源による希釈が不要となるため、CO₂ 排出量削減効果が大きくなると示唆される。

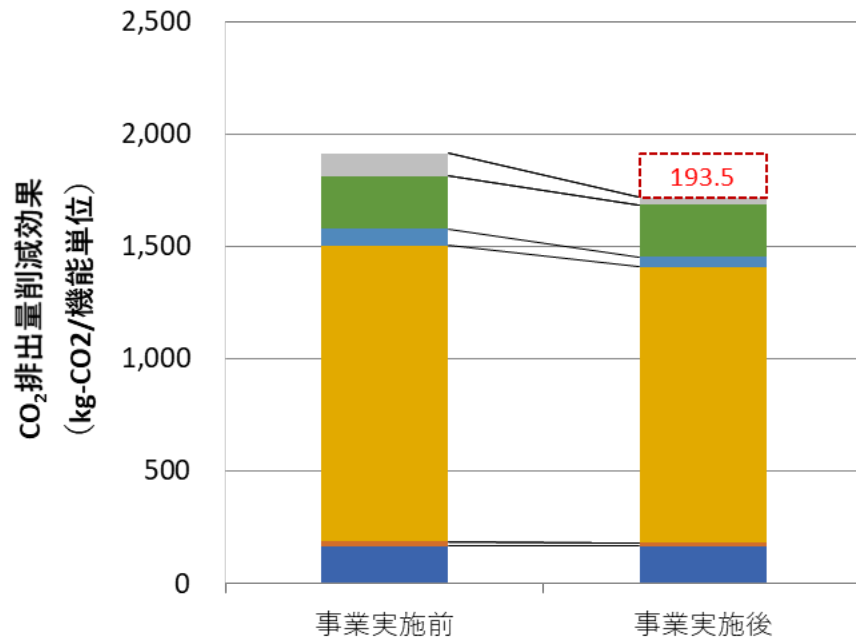
図表 118 事業実施前後における CO₂ 排出量削減効果⁴⁰（自動車・全国）



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

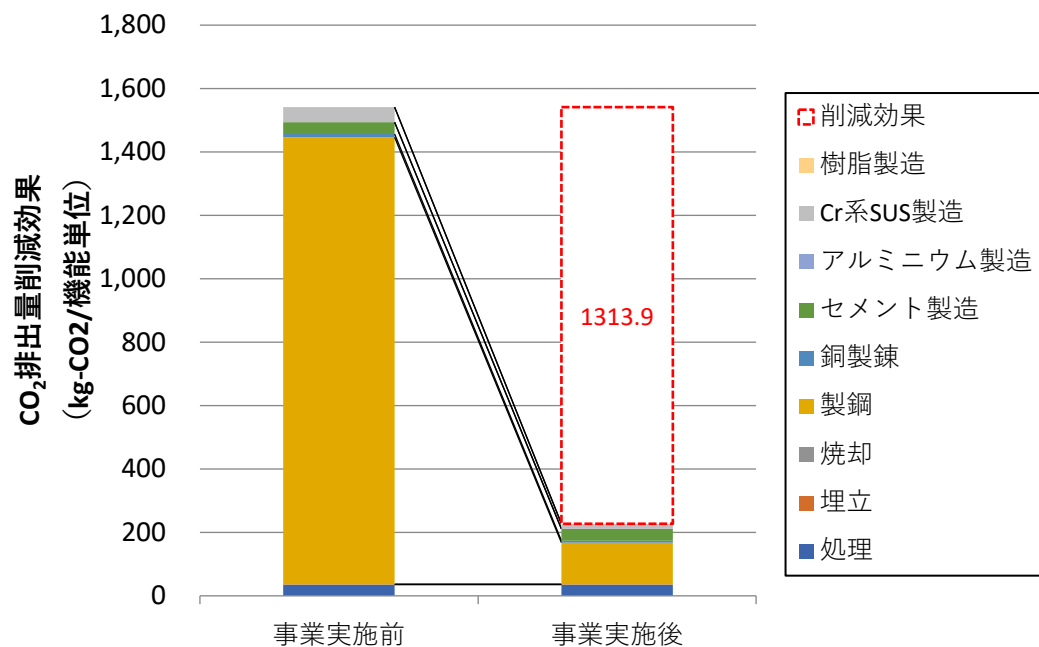
⁴⁰ 機能単位：製品 1t の 50 年間の使用と本事業で設定した再生資源規格の第 2 等級を満たす二次資源を原料とした素材（普通鋼、非鉄金属、クロム系ステンレス鋼、セメント、樹脂）生産

図表 119 事業実施前後における CO₂ 排出量削減効果（自動販売機・全国）



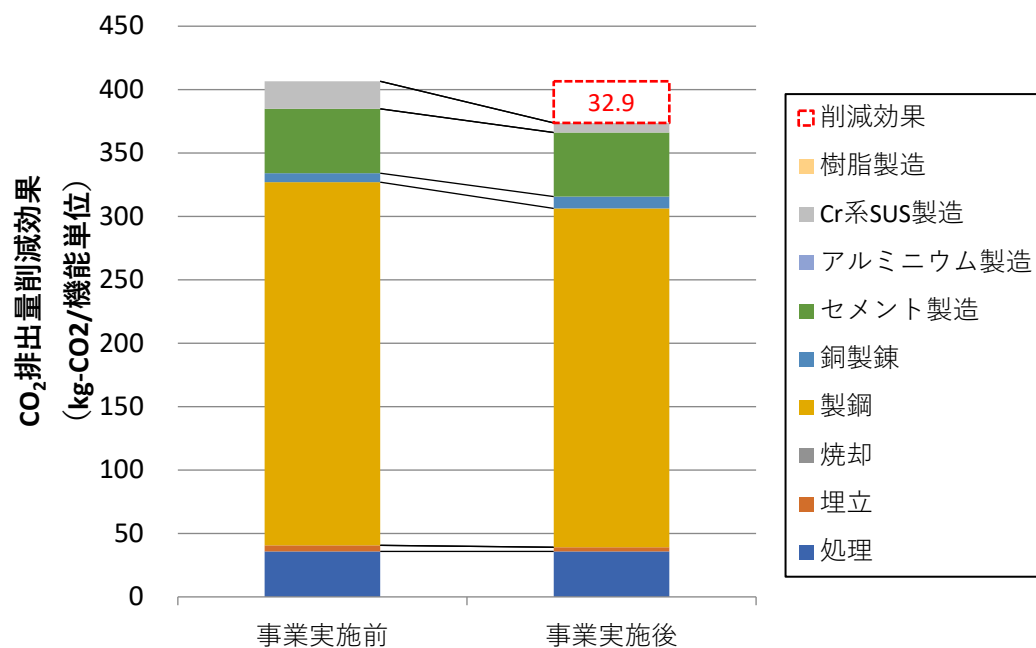
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 120 事業実施前後における CO₂ 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

図表 121 事業実施前後における CO₂ 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

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

再生資源規格案や、忌避物質を管理可能な解体方法、破碎・選別プロセス及び情報連携システムが導入されることによって、素材産業の資源有効利用やカーボンニュートラル実現に貢献可能な原料を供給できるようになる。このように追跡可能であり、付加価値の高い再生資源の供給によって、金属リサイクルビジネスを活性化できる可能性がある。特に、使用済み自動車や使用済み家電（4品目）、一部の産業廃棄物では、本実証で開発した分離プロセス・情報連携システムの親和性が高いと考えられる（図表 122）。

今回開発した分離プロセス・情報連携システムの活用を推進するには、使用済み製品が他の使用済み製品と分けて管理された状態で、中間処理事業者に搬入されることが重要である。こうした観点では、個別リサイクル法制度で商流が管理されている、自動車や家電4品目は導入に向けた障壁は低いと考えられる。小型家電もリサイクル法制度が存在するが、対象とする小型家電の製品群が広範にわたるため、小型家電中のどの製品を対象にするか、追加的な検討が必要となる。

個別リサイクル法制度が存在しない場合にも、商習慣から個別管理が可能な製品もある。例えば、今回の実証で対象とした自動販売機は、リース契約が一般的であり回収後の製品排出元事業者の数が限られること、また、回収される再生資源の価値が高いため、中間処理事業者で個別に処理されている。対象製品の商流や資源価値によって、法制度が整備されていない製品にも十分活用が可能である。他方、多様な製品が雑多に含まれているその他の産業廃棄物や一般廃棄物は、こうした個別管理が難しく、本実証プロセス・システムの導入は容易ではないと考えられる。

また、製品中の忌避物質含有部位が明らかであることも重要である。本実証では、中間処理事業者と連携して、実際に自動販売機を解体し、忌避物質含有部位を特定したが、こうした情報が整備されている製品では円滑に導入が進むと期待される。製品メーカーが、循環性の向上といった、持続可能性に配慮した事業活動にどの程度配慮しているかによって、こうした情報取得の障壁も変わると推察される。

例えば自動車では、自動車リサイクル制度の全部再資源化において、鉄スクラップ（Aプレス）中の銅含有量を管理するため、解体工程での推奨除去部品が公表されている。各解体事業者が目指す水準に応じて、Aプレス中の銅含有率が0.3%・0.5%・0.7%となるよう、3水準で設定されている。このように、既に忌避物質を管理する必要性が認知され、メーカーからの情報提供が進む製品では、導入が進みやすいと考えられる（図表 123）。

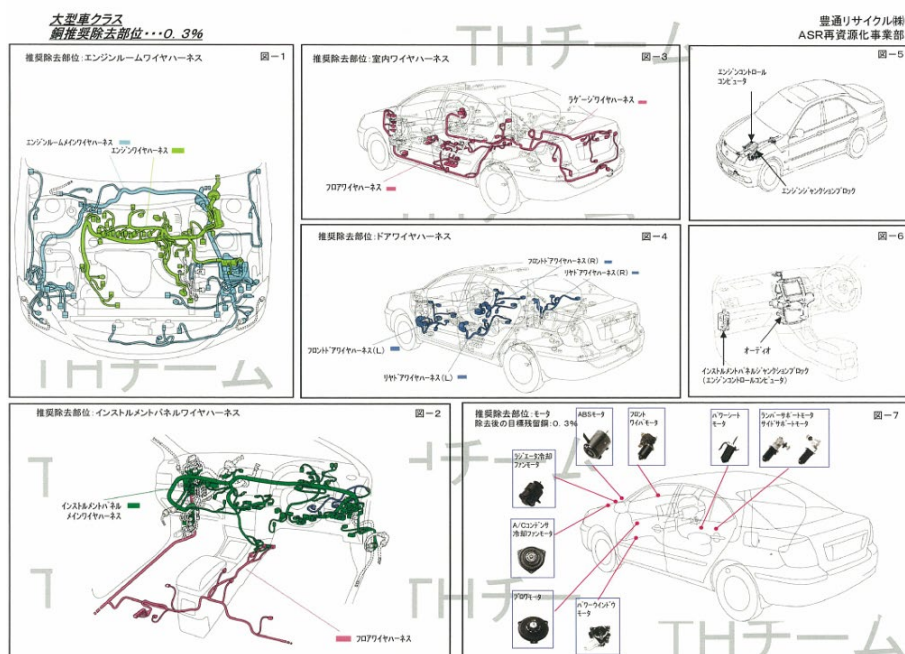
実証成果の波及効果の観点では、我が国における年間処理台数が多いものを優先するのがよい。こうした観点では、産業廃棄物や一般廃棄物で適用できれば、非常に波及効果は大きい。既述の通り、これら廃棄物を管理するのは容易ではない。個別管理できるもののなかから波及効果の大きな製品を対象に実装を進めることで、当該製品のリサイクルビジネス、さらにはリサイクルビジネス全体に普及させていくことが期待される。

図表 122 本実証成果の活用が期待される対象製品（一例）

	波及効果 (年間処理量)	忌避物質含有情報 の入手可能性 (メーカー参画度)	個別管理の 実現可能性
自動車	350万ton (2020)	× 高	× 高
家電4品目	60万ton (2020)	× 中	× 高
小型家電	10万ton (2018)	× 低	× 低
PC等	0.5万ton (2020)	× 低	× 中
一般廃棄物	4,300万ton (2020)	× 極めて低い	× 極めて低い
産業廃棄物	37,900万ton (2020)	× 極めて低い	× 極めて低い
うち自動販売機	6万ton(2018)	× 低	× 高

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 123 自動車リサイクル制度（全部再資源化）における推奨除去部品（参考）



(出所) 豊通リサイクルウェブサイト (<http://www.toyotsurecycle.co.jp/asr/all-th.html#alllist1>)
より引用 (2023 年 2 月閲覧)

4.7.2. 出口戦略の検討

4.7.2.1 採算性改善に向けた検討

本実証で検討した解体方法や情報連携システムを採用する場合、銅やクロム含有部品の解体、また情報連携システムへの記録に、追加の工数が必要になる。こうした人件費の増加に対応していくためには、生産された再生資源（製鋼原料等）が適切に評価され、経済的な価値が認められる必要がある。こうした際に、忌避物質含有量に応じた再生資源の規格が重要となる。規格のもと、忌避物質が管理された再生資源であることを示し、これが他の再生資源と識別できれば、素材メーカーに付加価値が乗った値段で販売できる可能性がある。

また、追加での工数を削減していくためには、省力化・省人化に資する技術の開発・採用も重要な課題である。現状、自動販売機の個体登録を行う際には、製品の型番（シリアルナンバー）を手入力する必要がある。また、解体した部品も一つ一つ画面上をタップして記録する必要がある。現場の作業者は手袋を装着しており、手入力作業が発生する度に手袋を取り外して作業しなければならない。こうした作業を自動化できれば、大幅な工数削減につながると期待される。例えば、型式（銘版）の自動読取技術や、解体した部品の自動判別（写真）技術等が候補として考えられる。

解体作業の効率化にも取り組んでいく必要がある。メーカーとも連携しながら、易解体設計の推進を働き掛けていくこと、効果的に解体を実施するためのマニュアルを整備すること、専用の治具やニブラを開発すること等が解決策として考えられる。製鋼原料（磁着物）や以外のスクラップ（ミックスメタル、ダスト等）の販売価格及び重量にも注意する必要がある。本実証では、製鋼原料の品質を向上させる（鉄品位が向上、銅・クロム品位が低下）ことを念頭に、事前の部品回収を行った。部品回収点数が増えれば、磁着物やミックスメタル、ダストの回収量は減少する。有価で販売されていたミックスメタル等の収量が下がる点には留意する必要がある。また、成分の分析結果では、部品回収点数と回収物中の各種金属（金、銀、アルミ、銅、クロム）含有量に相関等が見られなかったが、解体方法別の影響を適切に把握しておくことが必要である。また、回収した部品の処理方法や販売先を検討しておくことも求められる。

4.7.2.2 事業成果の実装に向けた課題検討

中間処理事業者・素材産業が連携した忌避物質管理を実現するために、忌避物質を管理可能な取引を円滑に進めること（取引に必要な情報の非対称性を解消すること）、忌避物質を分離するプロセスを構築すること、持続可能性に配慮した再生資源の市場を形成していくこと、必要とされる分離プロセス・システムを特定することが課題となる（図表 124）。

このうち、忌避物質を管理可能な取引を進めるためには、忌避物質含有量の把握方法やデータの伝達様式、製品のラベリング方法等を具体化・特定する必要がある。特に、忌避物質含有量を把握するため、連携先企業の拡大や自動化技術の導入を進める必要がある。また、本年度実証では、中間処理事業者が記録及び提供（開示）すべき情報を具体化したが、こうした情報を安全に伝達していく方法も必要となる。

忌避物質を分離するプロセス構築の観点では、自動販売機をケーススタディとして、解体方法を見直すことで銅・クロム含有量の管理を目指した。しかし、解体方法（解体部品点数）と回収された製鋼原料の品位に、十分な関係は確認できなかった。標準解体方法の開発に向けて、忌避物質含有部位の特定や解体時に代表性を確保できるサンプリング方法・分析方法の開発、忌避物質含有量推定方法の開発等が必要となる。

持続可能性に配慮した再生資源の市場形成に向けて、忌避物質含有量を考慮した再生資源規格を策定したことが大きな成果と言える。今後、GHG 排出量の記録に関しても、電力消費量のみでなく、燃料消費量も反映しつつ、またこれに関する規格を策定していくことが期待される。

図表 124 令和2年度から令和4年度事業の成果と今後の課題

目標	大課題	中課題	成果・今後の課題
中間処理事業者・素材産業が連携した忌避物質管理の実現 (忌避物質を管理するビジネスモデルシステムの構築)	I 忌避物質を管理可能な取引の円滑化 (情報の非対称性の解消)	忌避物質含有量の把握方法の特定	■ (成果) 中間処理工程で記録が必要なデータ項目具体化 ■ (成果) 忌避物質含有量の推定方法を具体化 ■ (課題) 記録作業の効率化 ※事業者間の情報共有、自動化技術の実装等
		データの伝達様式・方法の具体化	■ (成果) 事業者間で共有すべきデータ項目を具体化 ■ (課題) 改竄や誤入力等を防ぐ伝達方式の開発・検討
		データを紐づけた製品のラベリング方法の特定	■ (成果) 忌避物質含有量に基づく分類等級を具体化 ■ (成果) 規格案においてラベリング方法を整理 ■ (成果) 分類等級は中間処理で充足可能なことを確認済 ■ (課題) 規格案のその他製品への普及拡大
		データ記録・連携監視の仕組み構築	■ 本実証では対象外
II 忌避物質を分離するプロセスの構築		忌避物質分離プロセスの効率化 (既存技術の適用)	■ (成果) 忌避物質含有量に関するデータベースを構築 ■ (課題) 解体方法とスクラップ中の忌避物質含有量の関係確認 ■ (課題) 標準解体方法の開発に向けた継続検討
		新規分離プロセスの開発・実証	■ (成果) 磁着物からCu・Crを分離可能な技術を確認 ※LIBSソーター、電磁式ファインダー ■ (課題) 実証内容を踏まえたパイロット機・実機開発 ■ (課題) 樹脂のマテリアルの水準に耐える分離技術は確認できず
		忌避物質に紐づく再生資源の規格	■ (成果) シュレッダースクラップ(鉄)の規格案を策定 ■ (成果) 廃プラスチック原燃料の規格案を策定 ■ (課題) 規格案のその他製品への普及拡大
		GHG排出量を記録した再生資源の規格	■ (成果) 破碎・選別時の電力消費量を自動収集するシステム構築 ■ (成果) GHG排出量が特定された再生資源を回収 ■ (課題) 燃料消費量の把握 ■ (課題) システムと対応したデータロガーの規格統一等
III 持続可能性に配慮した再生資源の市場形成		社会全体における忌避物質流通量の把握	■ (成果) Crに関する「都市鉱山鉱床分布図」作成 ■ (成果) Cl及びCuに関する「都市鉱山調査計画図」作成
	IV 必要とされる分離プロセス・システムの特定		

達成度イメージ: ●3(高) ●2 ●1(低) ●0(対象外)

(注意) 青: システムに関する成果・課題 緑: 標準解体方法に関する成果・課題

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

情報連携システムの構築に焦点を当てると、忌避物質含有量の管理及び GHG 排出量の記録を実現するために、取り組むべき課題が存在する（図表 125）。本年度実証では、忌避物質含有量は自前でのサンプル分析によって、自動販売機中の忌避物質含有部品及び重量に関するデータベースを構築し、解体方法等をもとに間接的に忌避物質含有量を把握していた。実装に向けて、関係事業者との連携を拡大していくことが求められる。具体的には、メーカーと連携した製品に関するデータベースの構築や、排出事業者と協力した個体管理の効率化を進めることが期待される。

これに加えて、将来的には直接コンベア上で処理を行えるような技術の開発を目指すことが求められる。バッチ式での管理には多くの工数を要する。コンベア上でロット管理をしたり、コンベアスケールによって自動で秤量したり、連続的に分析したりできれば、管理に要する工数を大幅に削減できる可能性がある。

データの伝達様式や伝達方法を具体化していくことも必要である。本年度実証では、QR コードに紐づける形で、データの追跡を実施した。しかし、これら QR シールの貼り間違えや、悪質な場合には故意に貼り直すこともできてしまう。改竄を防止できるようなデータの追跡方法を具体化することが必要である。

GHG 排出量の記録に向けて、本年度実証では電力消費量のみを対象にしたが、燃料消費量も対象にしていく必要がある。重機等に設置可能なデバイス（燃料消費計）を特定し、またクラウドに接続して、自動で情報を読み込むためのシステム仕様を具体化する必要がある。中間処理事業者の観点で Scope3 の GHG 排出量を算定していくためには、原材料及び製品の輸送に伴う GHG 排出量や、再生資源を利用時に発生する GHG 排出量の把握も必要になっていく。

図表 125 令和 5 年度から令和 7 年度で重点的に解決を目指す課題

		～令和4年度	令和5年度	令和6年度	令和7年度
忌避物質管理に必要な情報を事業者間で伝達・連携する	含有量の把握			■連続式（コンベア上）でのロット管理手法の検討 ■コンベアスケールの検討 ■連続分析技術の検討	■連続式（コンベア上）でのロット管理手法の実証 ■コンベアスケールの実証 ■連続分析技術の実証
	直接	（重量はバッチ式で計測）	（重量はバッチ式で計測）		
	間接（推計）	■サンプル分析によるDB構築 ■個体・解体方法等の記録（手入力）	■メーカーと連携したDB構築 ■情報入力効率化（自動読取/排出者との連携）	（引き続き精査）	（引き続き精査）
	データ伝達方式・方法の具体化	■出荷伝票にQR貼付（QRより忌避物質含有量確認）	■共有するデータ項目検討 ■改竄困難な伝達方式の検討	改竄困難な伝達方式を採用したシステムの実証	改竄困難な伝達方式を採用したシステムの構築
	データと紐づけるラベリング	■忌避物質含有量の等級に紐づくラベルを検討 ■標準解体方法の検討	■忌避物質含有量の等級に紐づくラベルの規格化検討 ■標準解体方法の認証検討	■忌避物質含有量の等級に紐づくラベルの規格開発 ■標準解体方法の認証	（同左（適宜微修正））
GHG 排出量の把握を事業者間で伝達・連携する	GHG 排出量の把握			■燃料消費量を漏れなく計測し、システムに自動送信	（引き続き精査）
	Scope1	（対象外）	■主要重機の燃料消費量を計測し、システムに自動送信	■燃料消費量を漏れなく計測し、システムに自動送信	（引き続き精査）
	Scope2	■主要装置の電力消費量を計測し、システムに自動送信	■電力消費量を漏れなく計測し、システムに自動送信	（引き続き精査）	（引き続き精査）
	Scope3	（対象外）	（対象外）	■輸送に伴うGHG排出量計測（収集運搬事業者等と連携）	■再生資源利用・副産物等の処理に伴うGHG排出量計測（素材産業と連携）
	データ伝達方式・方法の具体化	■出荷伝票にQR貼付（QRよりGHG排出量確認）	■共有対象データ項目検討 ■改竄困難な伝達方式の検討	改竄困難な伝達方式を採用したシステムの実証	改竄困難な伝達方式を採用したシステムの構築
	データと紐づけるラベリング	（対象外）	■再生資源生産時のGHG排出量評価に関する規格検討	■再生資源生産時のGHG排出量に関するラベルの検討	■再生資源生産時のGHG排出量に関するラベルの規格開発

（注）赤字は対象とする事項や連携先が拡大する項目

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

4.7.2.3 出口戦略の検討（ロードマップの整理）

本実証を通じて構築を目指す情報連携システムは、図表 122 に示したような製品での導入を目指している。他方、これら製品には、既に個別リサイクル制度等による基幹システムが組み上がっているものもある。このほか、既に業界のなかで既存のシステムが存在するものもあると考えられる。本実証で開発したシステムは、こうした基幹システム・既存システムが対象としていない領域（忌避物質の管理、GHG 排出量の算定等）での情報記録を支援するような、追加的な運用を行うことを想定する。当該システムは、公的団体等で保守・管理を行いながら、頒布することを視野に入れている。

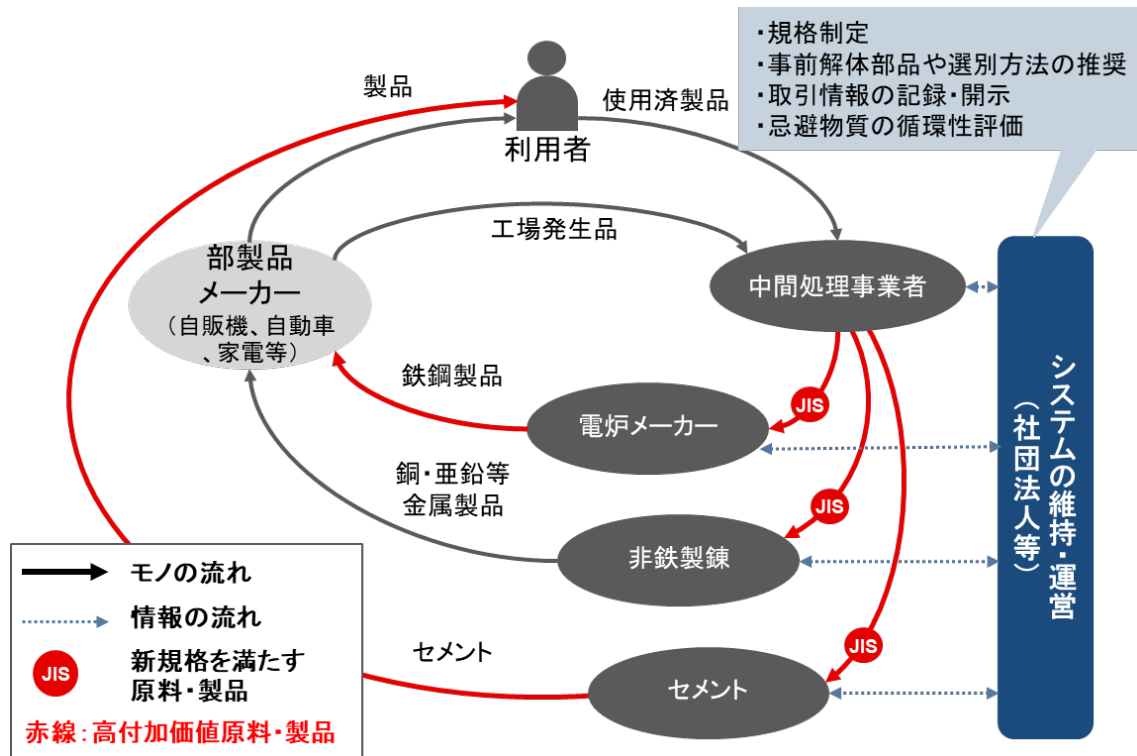
今後、追加的運用システムの運用に加え、再生資源に関する規格制定や、こうした規格を充足する解体ガイドライン（推奨解体部品や選別方法）等の作成を行い、事業成果を広く社会に普及することを目指す（図表 126）。このようにして運営する情報連携システムは、中間処理事業者のほか、素材メーカーや部製品メーカーからも利用料金を徴収する形での運用を想定する。これら利用料金を原資に、必要に応じてシステムの開発・改善や保守を行い、将来的には、システムの規格化・標準化や認証を行うことも視野に入れる。

2026 年から 2030 年にかけて社会実装を目指し、2023 年以降、必要な実証や調査・規格化に向けた検討、各社による取り組みを進めることを目指す（図表 128）。忌避物質の管理可能な取引の円滑化の実現に向けて、システムの利用を効率化しつつ、採算性を向上させるため、連携する事業者の拡大や自動化技術の導入、連続式プロセスでの情報記録に関する実証を進める。また、電力消費量のみでなく、燃料消費量も対象に、網羅的に GHG 排出量を記録できるように改善していく。

忌避物質の分離プロセスを構築するためには、製品別に標準解体方法を開発する必要がある。メーカーとの連携を模索しながら、製品中の忌避物質含有情報を蓄積し、また実際に製鋼原料を溶解する等して、部品解体点数と再生原料の品位の関係を明らかにしていく。再生資源の規格化や、必要とされる分離プロセス・システムの特定に関しては、本事業で検討した鉄シュレッタースクラップ及び廃プラスチック原燃料を対象に、規格発行に向けた取り組みを進める。このほか、規格化が必要な再生資源を追加特定し、規格案の策定を検討していく。また、クロム以外の忌避物質にも注目し、素材産業のなかでの流通実態を解明していく。2030 年頃には、中間処理事業者の現場にシステム・デバイスを導入することを目指す。情報連携システムの種類が多岐にわたり、相互に接続ができなくなならないよう、データの伝達様式や伝達方法の標準化、標準的なシステム仕様の検討等も念頭に置く。また、情報が追跡可能な再生資源のラベリング方法等も併せて標準化していくことを意識する。

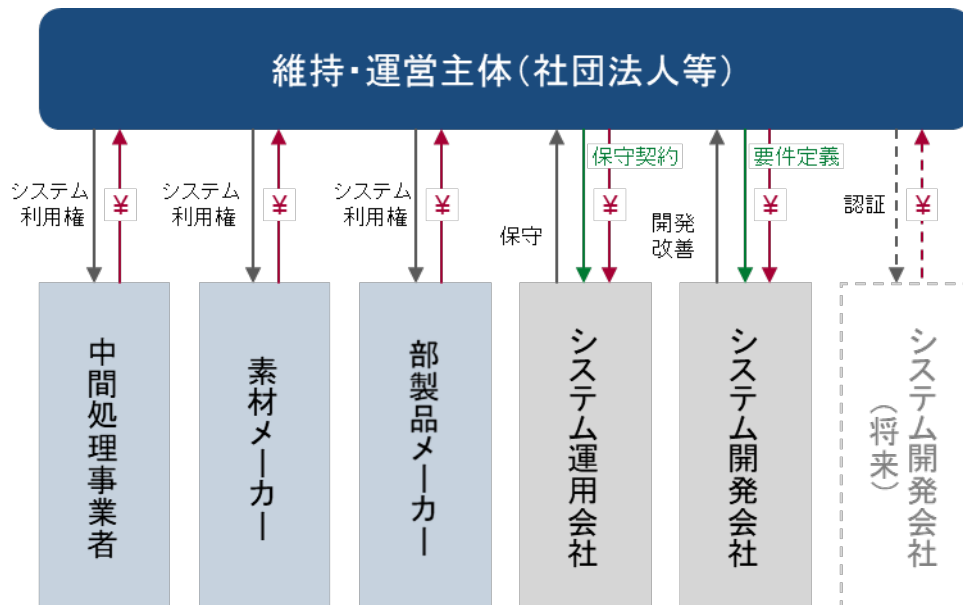
なお、社会実装を進める際には、まず特定の地域での導入を検討し、実際に取引を進めるうえでの課題を特定及び解決したうえで、全国規模に普及していく必要がある。まずは、図表 126 に示したような関係者（中間処理事業者、普通鋼電炉、非鉄製錬、セメント等）が集積する地域において、「資源循環圏」の形成を目指すことを想定する。

図表 126 本事業成果の社会実装イメージ



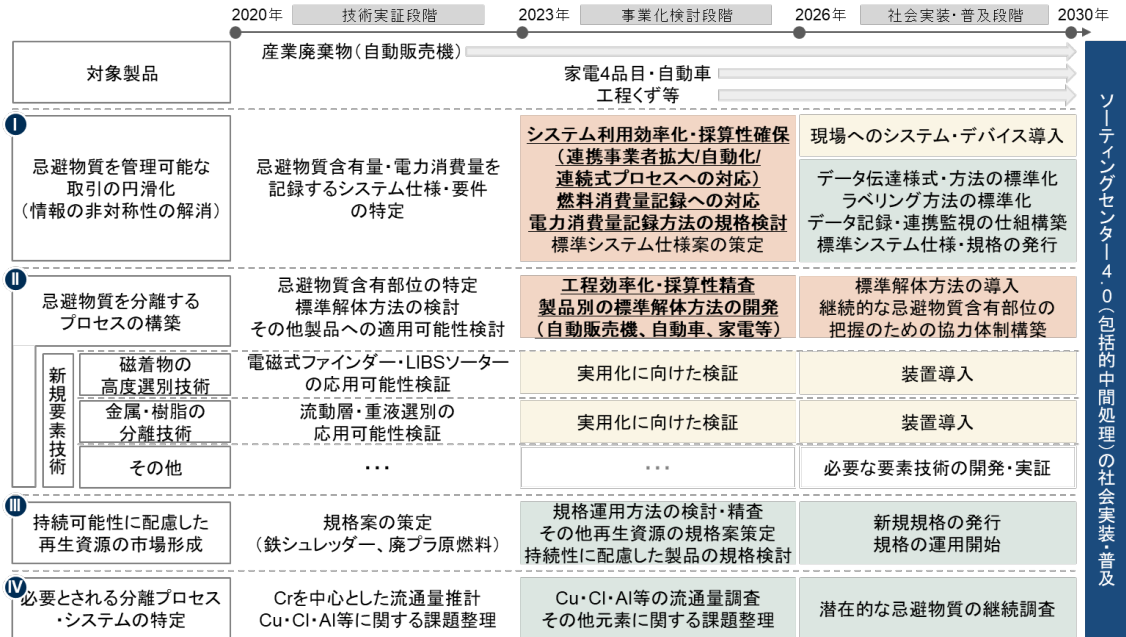
(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 127 情報連携システムの管理・運用イメージ



(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 128 事業出口に向けたロードマップ



(注) 橙：今後実証が必要な項目 緑：調査・規格化が必要な項目 黄：企業による取組
(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、プラスチックリサイクル産業を対象に、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（「都市鉱山鉱脈図」）を作成した。上記に加えて、各素材産業における再資源化忌避物質の主要な混入源を特定することで、今後の流通量把握に向けた重点評価ポイント（「都市鉱山探索計画図」）と、忌避物質の分離技術が必要とされる箇所を見いだすためのツール開発を行った。

マテリアルフロー推計の結果、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、普通鋼電炉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、普通鋼電炉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）等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量が多いもの）。天然資源（石灰石）由来でも一定量のクロムが流入しているが、石灰石はセメント生産に欠かせないものであり、その他の再生資源からクロムを分離することが重要であることが改めて確認できた。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性が高いことを明らかにした。

感度分析の手法を用いて、セメント産業中のクロム増加に影響を及ぼす再生資源を確認したところ、普通鋼電炉への特殊鋼スクラップが最も大きな影響力を有することが明らかになった。鉄シュレッダースクラップに関する再生資源規格でのクロムの管理や、電磁式ファインダーによるステンレス鋼の分離の重要性が、分析結果からも明らかになった。

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、既存規格に関する調査及び鉄鋼電炉事業者やセメント事業者における操業実態に関する調査をもとに、事業第2年度に作成した忌避物質の品位に応じた品質等級案を精査した。これを踏まえ、鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）における銅品位に応じた品質等級案及びクロム品位に応じた品質等級案を作成した。また、同様に廃プラスチック原燃料における塩素品位に応じた品質等級規格案及びクロム品位に応じた品質等級規格案を作成した。

品質等級案をもとに「忌避物質品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級—第1部：銅、クロム」（6.1）及び「忌避物質品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級—第1部：塩素、クロム」（6.3）の規格文書案を作成した。これらの規格文書は、適用範囲、引用規格、用語及び定義、原則、忌避物質品位に応じた品質等級、分析試験、表示（品質

等級の表示方法等) について規定するものである。

また、中間処理事業者における品質等級規格案への対応可能性を検討した。中間処理事業者が目標とする品質等級の再生原料を生産する際、母材の管理(母材ごとに生産ラインを構築する等)、解体・破碎・選別ラインの構築及び管理、生産した再生原料の出荷管理(品質等級ごとの梱包を行う等)等が課題になると考えられる。そのため、目指す品質等級を満たすための工程管理方法を具体化しつつ、これを実現するための体制構築等も今後具体化していく必要がある。この他、中間処理事業者や需要家である素材製造業が、再生原料の等級評価を行うための方法を具体化させることも課題となる。等級評価を行うための適切な試料採取方法や分析試験方法を具体化させる必要があるほか、品質等級(忌避物質品位)を満たすように相応の工程管理がされていることの証拠情報を記録し、また需要家に伝達するための情報連携システムを活用することも必要になってくる。

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)

本年度事業では、使用済み自動販売機を対象に、銅及びクロムを含む部品と、こうした部品中の銅・クロム含有量を追加で特定した。事業第2年度と同様に、自動販売機には、銅は主に冷却装置やリモコン、クロムは主にラックや冷却装置に使用されていることが確認された。

上記の結果を踏まえて、3通りの解体方法(現行の方法(法令で要求されるもののみ回収)、主たる銅・クロム含有部品を回収する方法、銅・クロム含有部品を精緻に回収する方法)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・クロム含有部品を事前に取り外すことで、磁着物の鉄品位は微増する傾向にあった。

また、本年度追加で特定した4台分の銅・クロム含有量分析結果を踏まえて、自動販売機のメーカー・セクション別の銅・クロム含有量データベースを更新した。こうしたデータベースの改善を踏まえて、直接解体を行っていない自動販売機の銅・クロム含有量の推定方法を見直した。

5.1.4. 情報連携システムの検討(実証テーマ4)

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」を改良した。本年度事業では、忌避物質の管理のみでなく、GHG排出量が紐づいた再生資源を生産するために、必要なデータ入力事項を明らかにした。また、実際に破碎・選別装置の配電盤等に電力ロガーを設置し、電力消費量を自動で計測し、これをシステム上に出力する機能を検証した。

中間処理事業者での解体実証を通じて、改善した情報連携システムの有効性を確認した。事業第2年度と同様に、磁着物中の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したことに加えて、破碎・選別工程の電力消費量も記録した。こうして記録された情報をシステム上で紐づけることによって、忌避物質含有量とGHG排出量が特定された製鋼原料を回収及び出荷できることを確認した。このように、中間処理事業者の現場で活用できるシステムを検証し、その仕様を具体化することができた。

5.1.5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）

本実証を通じて、本試験で用いた電磁式ファインダーには、検知可能領域内のセンサー近傍を通過する試料の一部分だけの導電率や透磁率のみに依存する可能性を明らかにした（検知可能領域の存在可能性を指摘）。また、本実証で用いた電磁センサーは、コイル直径が小さいほど精度がよくなる（ばらつきが小さくなる）傾向にあるが、コイル直径が小さいほど粒子ごとに得られる観測値のばらつきは小さくなる傾向にあり、絶対値で見た場合の金属種ごとの違いは識別が難しい傾向にある。そのため、コイル直径の大きい方が観測値のばらつきは大きくなるが、絶対値で見た場合の金属種ごとの違いも拡大されることから、相対的に識別は容易になる可能性があることが分かった。この傾向を活用し、事業第2年度よりもコイル直径の大きな電磁センサー（コイル直径25mm）を用いることで、事業第2年度の成果よりも分離効率（識別精度）を改善させることができた。

電磁センサーの選別精度改善には、電磁センサーの観測値に金属種ごとの特徴（導電率・透磁率）の違いが出るよう工夫する必要がある。上記成果をもとに、予め選別する等して試料体積のばらつきを電磁センサーの検知可能領域内で一定範囲内に収める、あらかじめ推定される試料体積に応じて異なる（位相差データの）境界条件を設定する、電磁センサーのコイル直径を大きくしてセンサーの感度を向上させる等すれば、試料素材の導電率や透磁率の違いによって選別可能な電磁センサーとなる可能性があることを明らかにした。

5.1.6. 事業における環境影響改善効果・CO₂排出量削減効果の評価

本事業では、使用済み自動販売機・自動車の包括的中間処理が社会に実装されることによる環境影響改善効果として、「資源効率性向上効果」および「天然資源採掘量削減効果」を推計した。

本事業の成果が社会に普及することによって、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、自動販売機・自動車ともに資源効率性が約2倍向上すると推計された（自動販売機：2.0倍、自動車：2.14倍）。銅鉱石や鉄鉱石、クロム鉱石に係る天然資源採掘量が、本事業を通じて減少することが推計された。

本事業によるCO₂排出量削減効果は、環境影響改善効果と同様に自動販売機および自動車を対象に推計を行った。本事業の実施前後で、機能単位あたり自動販売機で193.5kg、自動車で5509.4kgのCO₂排出量が削減されると推計された。

本事業が目指す使用済み製品の包括的中間処理が社会に普及し、本実証で対象とした自動販売機および自動車のみならず、他の使用済み製品についても受入基準を満たす忌避物質の少ない二次原料が流通することによって、天然資源による希釈が不要となり、CO₂排出量削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

本事業では、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・処理工程の GHG 排出量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。

また、本実証で検討した情報連携システムが応用可能な製品群を具体化した。特に、自動販売機をはじめとする一部の産業廃棄物や自動車、家電 4 品目等は、導入可能性が高いと考えられる。さらに、こうした製品群に関する基幹システムや既に存在するシステムに、忌避物質管理や GHG 排出量算定といった付加的な機能を提供することを目指して、システムの運営・開発を進める方針を具体化した。こうした方針のもと、情報連携システムの管理・運用体制を検討し、2030 年頃の社会実装を目指して今後実施すべき取り組みをロードマップ上に整理した。

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）

本年度事業で、マテリアルフロー（都市鉱山鉱脈分布図）の作成対象としなかった元素について、本年度具体化した推計上の課題（都市鉱山探査計画図）をもとに、継続的にマテリアルフローの推計を行っていく必要がある。

また、今後、忌避物質の分離技術の開発が必要となる箇所について、本年度事業で開発した感度分析に基づく方法論を活用することで、社会全体の資源効率向上の障壁となりうる元素（忌避物質）を特定し、これら元素の流通によって各素材産業にもたらされる影響（及びこれら元素を管理することで期待される効果）を把握していく必要がある。

製品（素材）の需要家とも連携しながら、素材産業が許容しうる忌避物質含有量に関して検討していくことも重要である。例えば、特定の用途であれば、現行基準より一定度緩和しても、素材産業側で受入できる可能性がある。そのためには、素材産業が調達している各原料が、忌避物質の混入にどの程度影響を及ぼしているのか、その影響はどの程度ぶれる可能性があるのか、把握しておく必要がある。本年度開発した方法論は、こうした議論を行っていくうえでの基礎材料にもなると考えられる。

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、品質等級案をもとに「忌避物質品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級—第1部：銅、クロム」及び「忌避物質品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級—第1部：塩素、クロム」の規格文書案を作成したが、忌避物質品位に着目した厳密な品質管理を行うためには、この他にも対応すべき事項があると考えられる（図表 69）。

特に再生原料の等級評価をどのように行うかを明確にしなければならない。等級評価を行うためには、代表性を確保するための試料採取方法、また再現性の高い分析試験が必要である。等級評価に用いるべき適切な試料採取方法や分析試験方法を具体化することが必要である。具体的には、適切なサンプリング方法の特定（成分分析の頻度（年1回、半年1回、月1回等）、サンプリングの方法（オートサンプリング、マニュアルサンプリング、ベルトコンベアからのサンプリング、堆積物からのサンプリング等）、最大ロットサイズ（重量）、インクリメント数・重量、サンプルサイズ・重量等）、適切な成分分析方法の特定（ICP-AES、ICP-MS、XRF等）を行い、これらを規定した規格を作成する必要がある。一方、取引する再生原料を毎回試験分析して等級評価を行うことは、コスト等が過度にかかることから現実的ではない。実際には、各産物の成分分析そのものを行うのではなく、品質等級を満たすことができるような工程管理がきちんとされていることの記録とその開示を行うことで、これに変えていく必要もある。その場合、4.4で検討した情報連携システムを用いることの重要性が高まってくる。こうしたトレーサビリティに関する規格の作成も今後検討する必要がある。

本事業では特に忌避物質混入が問題となっている鉄スクラップ（鉄鋼電炉事業者向け）及び廃プラスチック原燃料（セメント事業者向け）を対象としたが、これ以外にも忌避物質が問題となるケース（非鉄製錬原料等）もある。そのため、より広い範囲（コンソーシアム全体）で管理しなければいけない忌避物質を洗い出すとともに、どの再生資源等を対象として規格化を進

める必要があるのか、実証テーマ1の忌避物質の賦存量・流通量調査をもとに分析を深める必要がある。

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）

本事業では、3通りの方法で解体し、その後破碎・選別を行って磁着物を回収したが、回収する部品点数が増えても、磁着物中の銅・クロム品位が期待したようには低下しなかった。また、銅・クロム含有部品を特定するため、自動販売機を合計7台解体して、ここで得られた部品別の平均的な品位及び重量データから品位を推定したものの、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。

今回分析対象とした銅・クロム含有部品以外にも、自動販売機中に考慮すべき銅・クロムを含む部品が存在する可能性がある。製品中の忌避物質含有量を体系的に整理し、標準解体方法を確立するためには、製品メーカーと連携した銅・クロム含有量の把握が引き続き重要である。

このほか、実測値を正しく分析するためには、代表性の高い試料採取、また全量溶解することでの均質性の高い試料を用いた成分分析が理想ではある。しかし、この方法をロット単位で適用することはコスト・時間の観点から現実的とは言えず、今後、十分に代表性を検証しながら、より簡易に成分分析を実施できるようにしていく必要がある。

忌避物質の管理を行うために解体する部品点数を増やすと、一般的に解体工数も増加してしまふ。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り、効率的に忌避物質含有部品が取り外せるような標準解体方法及びそのための治具等の開発が必要である。

5.2.4. 情報連携システムの検討（実証テーマ4）

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。今後、自動記録機能（OCR技術による銘版の自動読取、画像解析による部品の自動判別等）や関係する事業者との連携（排出事業者による銘板情報の事前入力等）によって、入力作業を効率化していく必要がある。さらに工数を削減するためには、バッチ処理ではなく、連続処理に対応するための工夫（ベルトコンベア上でのロット管理方法の開発、コンベアスケールによる自動秤量の実現等）も重要である。

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に向けて、電力消費量を計測した。他方、燃料消費量は測定できておらず、中間処理工程で発生するGHGを網羅的に記録するためのデバイスの検討及びシステム仕様の具体化が必要となる。

5.2.5. 磁着物の高度選別実証（実証テーマ5）

本実証に用いた電磁式ファインダーは、標準試料のように試料の真比重と嵩比重の乖離が小さく、また素材の均質性の高い試料であれば、比透磁率や導電率の差を用いて金属種を識別することができた。一方、実試料の場合、比透磁率や導電率等の金属種固有の因子だけでなく、試料の真比重と嵩比重の乖離が大きく、また試料の均質性も乏しいこと等から、標準試料のような識別精度を得るには至っていない。

これを改善するには、予め粒度選別を行う等して、試料体積のばらつきを電磁センサーの検知可能領域内で一定範囲内に収めること、また試料体積に応じて識別条件を都度自動計算して試料体積が変わっても金属種を識別できるようなアルゴリズムを装置に導入すること、電磁センサーのコイル直径を大きくしてセンサーの識別分解能を向上させること、などの改良を行う必要がある。こうしたアルゴリズムの開発には、検知可能領域の存在の検証に向けた電磁場を模したシミュレーション解析等の基礎研究等も必要になってくる。基礎研究と、それを踏まえたアルゴリズム等が組み込まれた試作機の開発等が今後の課題となる。

5.2.6. 事業における環境影響改善効果・CO₂排出量削減効果の評価

本年度の評価では、本実証による忌避物質の高度管理が社会全体およびコンソーシアム（研究会）内それぞれに波及した場合における、環境影響改善効果とCO₂排出量削減効果を推計したが、現在の静脈産業構造に応じて、より実態に即した事業実施効果を示すためには、本事業が普及するために必要な動静脈産業それぞれの取組の方向性等に言及することが求められる。

また、より実態に即した評価を行うべく、評価単位・評価範囲を事業第2年度から一部見直し、評価に用いる情報を可能な限りでより代表性の高く最新のものに更新するとともに、実測データの採用を検討したものの、推計に使用するための代表性の高い業界統計等の定量データの一部は、不足または更新されていない。推計の精緻化に資するデータを再検討のうえで、業界をあげた統計情報の整理・更新を進めていくことが望まれる。

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

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。

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。また、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もある。

事業化に向けて、本事業で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、具体的な製品を想定したシステムの導入（基幹シ

システムや既存システムに追加的な機能を付加するもの) には、動脈産業とは異なる課題を抱える静脈産業のトレーサビリティを確保していくための課題解決が、循環経済型ビジネスを確立するために必要である。

動脈産業では、素性の明らかな原材料や部品等を一つの製品にくみ上げていく工程で、情報を記録することになる。他方、静脈産業では、製品の部品構成や原材料使用量等が明らかでない使用済み製品等を、解体・破砕等によって分離していく工程での情報記録が必要となる。そのため、スクラップ等の成分に一定度ばらつきが生じること、情報と物体(製品やスクラップ)の紐づけが容易でないことといった問題が生じる。こうした問題を解決できるよう、代表性のあるデータの計測方法・頻度の確立や、簡便かつ改竄されないように情報を記録・第三者に伝達する方法・ルールの確立が必要となる。また、静脈産業では、入荷量が不安定な少量多品種の使用済み製品・廃棄物等を取り扱っている。動脈産業のように必要な時に必要なものを安定した品質で調達することが容易ではなく、またそれが品質管理を難しくもさせている。そのため、こうした使用済み製品・廃棄物等の入出荷管理のあり方を変えていくことが必要であり、それを実現するための情報連携システムが求められている。

6. 付録

6.1. 学会発表、著書・論文投稿、報道、特許等の実績

学会名	タイトル	著者・所属	発表日
一般社団法人資源・素材学会関東支部 第19回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会	LIBS ソータによる鉄合金類相互分離に関する基礎研究	米山基樹、○笛木雄大、大和田秀二（早稲田大学） 清水孝太郎、千賀太喜（MURC）	2022 年 8 月 1 日
The 16th International Symposium on East Asia Resources Recycling Technology	Creating a value network for a resource-efficient industrial symbiosis	Kotaro SHIMIZU (MURC)	2022 年 10 月 31 日
	Possibility on the Mutual Separation of Fe Alloys by LIBS Sorting	Motoki Yoneyama, Yudai Fueki, Shuji Owada (Waseda Univ.) Shunsuke Kashiwakura (Ritsumeikan Univ.) Kotaro Shimizu, Taiki Senga (MURC)	2022 年 11 月 1 日

6.2. 忌避物質品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級 —第1部：銅、クロム

序文

この規格は忌避物質品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級、並びに、取引する鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）に関する情報の表示事項を規定し、忌避物質が適切に管理されたスクラップの取引及び使用の促進を図るものである。

1 適用範囲

忌避物質品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級、並びに、取引する鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）に関する情報の表示事項について規定する。

2 引用規格

一般社団法人日本鉄源協会「鉄スクラップ検収統一規格」

3 用語及び定義

3.1 鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）

主として鉄板加工製品を母材にしてシュレッダー機により破碎したあと磁機選別機で選別された鉄スクラップ

3.2 忌避物質

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、また製造装置等への損傷等を与える可能性がある物質、元素等

3.3 忌避物質品位

鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）中の忌避物質含有量を質量分率で表したものの。忌避物質が銅の場合は銅品位、クロムの場合はクロム品位という

3.4 忌避物質品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級

忌避物質のうち銅及びクロムに着目し、これらの品位に応じて設定される鉄スクラップ（シュレッダー）の品質等級

4 原則

この規格は忌避物質品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級を規定する。鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）は、銅品位に応じて第1等級、第2等級、第3等級に分類され、クロム品位に応じて第1等級、第2等級、第3等級に分類される。寸法、単重、母材に応じた分類は「鉄スクラップ検収統一規格」に従う。

5 忌避物質品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級

5.1 銅品位に応じた品質等級

銅品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級は表1による。表1に分類されない鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）は等級外とする。表示（ラベル）の例は附

属書Bに示す。

表1 銅品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級

等級名	表記記号	銅品位（質量%）
銅－第1等級	Cu 1	0.1 以下
銅－第2等級	Cu 2	0.3 以下
銅－第3等級	Cu 3	1 以下

5.2 クロム品位に応じた品質等級

クロム品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級は表2による。表2に分類されない鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）は等級外とする。表示（ラベル）の例は附属書Bに示す。

表2 クロム品位に応じた鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級

等級名	表記記号	クロム品位（質量%）
クロム－第1等級	Cr 1	0.1 以下
クロム－第2等級	Cr 2	0.3 以下
クロム－第3等級	Cr 3	1 以下

6 分析試験

化学成分分析による忌避物質品位の測定・評価結果をもとに、取引する鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）の品質等級評価を行う。試料採取（サンプリング）方法及び分析方法は受入当事者間の協定による。

ただし、各品質等級の水準を満たす鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）を生産するための解体・破砕・選別プロセスが明らかな場合、受入当事者間の協定によって、取引する鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）生産に用いられた解体・破砕・選別プロセスの情報をもとに、品質等級評価を行っても良い。

7 表示

7.1 表示事項

鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）には、次の事項を表示する。ただし、受渡当事者間の協定によって表示事項の追加又は省略を行っても良い。表示（ラベル）の例は附属書Bに示す。

- 製品名（一般社団法人日本鉄源協会「鉄スクラップ検収統一規格」又はその他規格に応じた分類名）
- 製造業者又はその略号
- 製造年月又はその略号
- 製造番号又はロット番号
- 品質等級

7.2 品質等級の表示方法

品質等級を表示する際、以下の例に示すように、銅品位に応じた品質等級の表記記号（Cu 1、

Cu 2、Cu 3) 及びクロム品位に応じた品質等級の表記記号 (Cr 1、Cr 2、Cr 3) を併記する。等級外である場合、以下の例 2 に示すように、該当する忌避物質の品質等級の表記記号は記載しないものとする。表示 (ラベル) の例は附属書 B に示す。

例 1 銅ー第 1 等級、クロムー第 2 等級のものは「Cu1 - Cr 2」と表示

例 2 銅ー第 2 等級、クロムの品質等級が等級外のものは「Cu 2」と表示

附属書 A

(参考)
品質等級の設定方法

A.1 品質等級の設定方針

忌避物質品位に応じた品質等級を設定するにあたり、日本における代表的な許容品位（ C_{ti} ）の推計を行った。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異なる。これらが異なる複数のパターンを想定し（表 A-1 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。これをもとにこの規格の等級を設定している。

表 A-1 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}

A.2 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。

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

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（ $i=1\sim9$ ）

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

A.3 再生資源における忌避物質の許容品位の推計結果

鉄スクラップ（シュレダースクラップ）における銅の許容品位（Cti）の推計結果は図 A-1 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（Co）の設定に応じた 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対応可能性を考慮したうえで、この規格の等級を設定した。

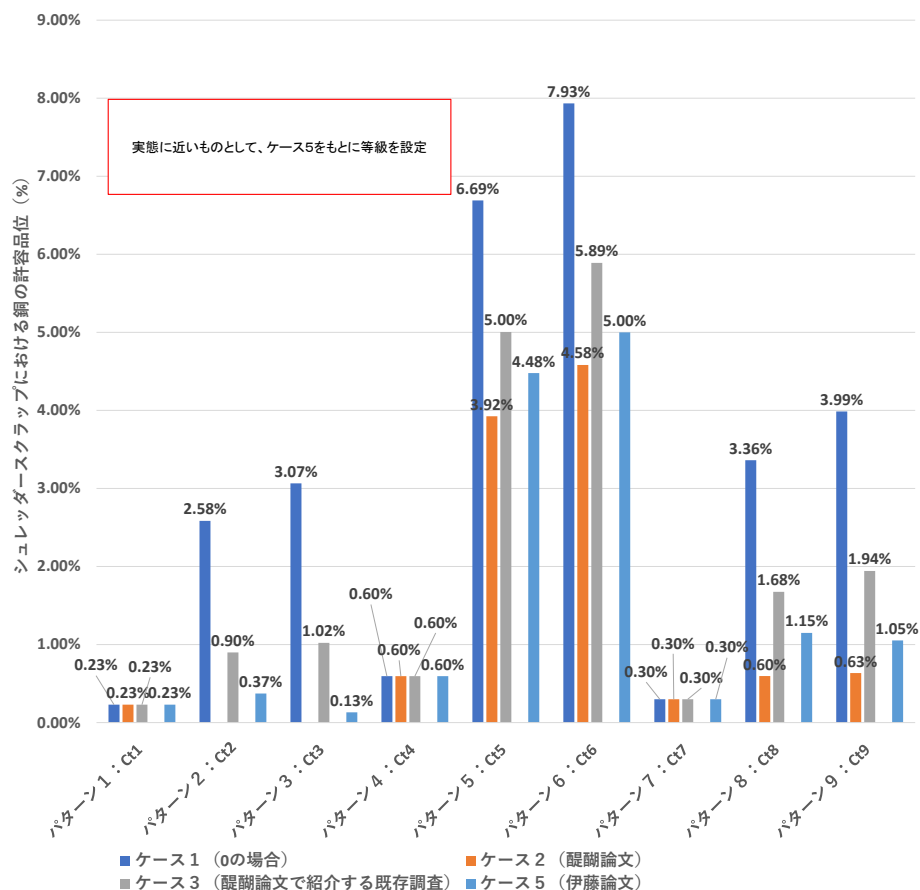


図 A-1 鉄スクラップ（シュレダースクラップ）における銅の許容品位

鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）におけるクロムの許容品位（Cti）の推計結果は図A-2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（Co）の設定に応じた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、この規格の等級を設定した。

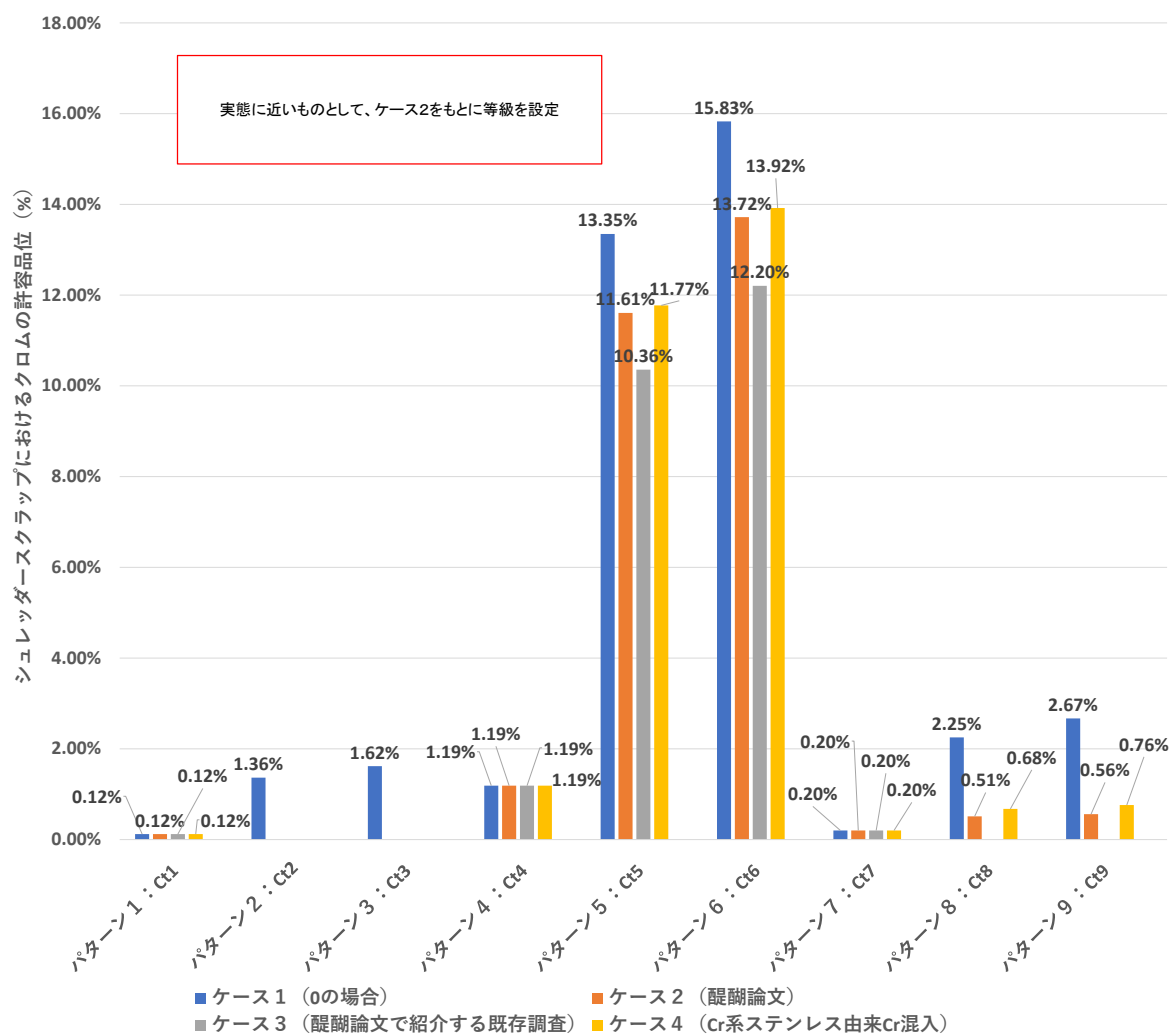


図 A-2 鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）におけるクロムの許容品位

附属書 B

(参考)
ラベル例

銅ー第 1 等級、クロムー第 2 等級である鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）のラベル例は、図 B-1 の通りである。二次元コードは必要に応じて使用するものとする。受渡当事者間の協定によって表示事項の追加又は省略する場合には、該当する項目を追加または削除するものとする。

製品名	シュレッダーA
製造業者	〇〇株式会社 〇〇工場
製造年月日	2022/11/25
ロット番号	12345678
品質等級	Cu 1 - Cr 2
	

図 B-1 鉄スクラップ（シュレッダースクラップ）のラベル例

6.3. 忌避物質品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級—第 1 部：塩素、クロム

序文

この規格は忌避物質品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級、並びに、取引する廃プラスチック原燃料に関する情報の表示事項を規定し、主にセメント産業等において、忌避物質が適切に管理された廃プラスチック原燃料の取引及び使用の促進を図るものである。

1 適用範囲

忌避物質品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級、並びに、取引する廃プラスチック原燃料の当該分類に関する情報の表示事項について規定する。

2 用語及び定義

2.1 廃プラスチック原燃料

使用後、廃棄された各種のプラスチック製品とその製造過程で発生したくず等であり、セメント産業等で原料または燃料として利用されるもの

2.2 忌避物質

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、また製造装置等への損傷等を与える可能性がある物質、元素等

2.3 忌避物質品位

廃プラスチック原燃料中の忌避物質含有量を質量分率で表したもの。忌避物質が塩素の場合は塩素品位、クロムの場合はクロム品位という

2.4 忌避物質品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級

忌避物質のうち塩素及びクロムに着目し、これらの品位に応じて設定される廃プラスチック原燃料の品質等級

3 原則

この規格は忌避物質品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級を規定する。廃プラスチック原燃料は、塩素品位に応じて第 1 等級、第 2 等級、第 3 等級、第 4 等級に分類され、クロム品位に応じて第 1 等級、第 2 等級に分類される。総発熱量、真発熱量、灰分、水分、粒度等に応じた分類は受入当事者間の協定による。

4 忌避物質品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級

4.1 塩素品位に応じた品質等級

塩素品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級は表 1 による。表 1 図表 66 に分類されない廃プラスチック原燃料は等級外とする。表示（ラベル）の例は附属書 B に示す。

表 1 塩素品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級

等級名	表記記号	塩素品位（質量 ppm）
塩素－第 1 等級	Cl 1	500 以下
塩素－第 2 等級	Cl 2	2,000 以下
塩素－第 3 等級	Cl 3	6,000 以下
塩素－第 4 等級	Cl 4	10,000 以下
塩素－第 5 等級	Cl 5	15,000 以下
塩素－第 6 等級	Cl 6	30,000 以下

4.2 クロム品位に応じた品質等級

クロム品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級は表 2 による。表 2 に分類されない廃プラスチック原燃料は等級外とする。表示（ラベル）の例は附属書 B に示す。

表 2 クロム品位に応じた廃プラスチック原燃料の品質等級

等級名	表記記号	クロム品位（質量 ppm）
クロム－第 1 等級	Cr 1	300 以下
クロム－第 2 等級	Cr 2	1,000 以下
クロム－第 3 等級	Cr 3	3,000 以下

5 分析試験

化学成分分析による忌避物質品位の測定・評価結果をもとに、取引する廃プラスチック原燃料の品質等級評価を行う。試料採取（サンプリング）方法及び分析方法は受入当事者間の協定による。

ただし、各品質等級の水準を満たす廃プラスチック原燃料を生産するための解体・破碎・選別プロセスが明らかな場合、受入当事者間の協定によって、取引する廃プラスチック原燃料生産に用いられた解体・破碎・選別プロセスの情報をもとに、品質等級評価を行っても良い。

6 表示

6.1 表示事項

廃プラスチック原燃料には、次の事項を表示する。ただし、受渡当事者間の協定によって表示事項の追加又は省略を行っても良い。表示（ラベル）の例は附属書 B に示す。

- 製品名
- 製造業者又はその略号
- 製造年月又はその略号
- 製造番号又はロット番号
- 品質等級

6.2 品質等級の表示方法

品質等級を表示する際、以下の例に示すように、塩素品位に応じた品質等級の表記記号（Cl 1、Cl 2、Cl 3、Cl 4）及びクロム品位に応じた品質等級の表記記号（Cr 1、Cr 2）を併記する。等級外である場合、以下の例 2 に示すように、該当する忌避物質の品質等級の表記記号は記載しないものとする。表示（ラベル）の例は附属書 B に示す。

例 1 塩素－第 1 等級、クロム－第 2 等級のものは「Cl 1 - Cr 2」と表示

例 2 塩素－第 2 等級、クロムの品質等級が等級外の場合は「Cl 2」と表示

(参考)
品質等級の設定方法

A.1 忌避物質品位に応じた分類基準の設定方針

忌避物質品位に応じた分類基準を設定するにあたり、日本における代表的な許容品位（ C_{ti} ）の推計を行った。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異なる。これらが異なる複数のパターンを想定し（表 A-1 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。これをもとにこの規格の等級を設定している。

表 A-1 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}

A.2 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。

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

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（ $i=1\sim9$ ）

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

A.3 再生資源における忌避物質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（Cti）の推計結果は図 A-1 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（Co）の設定に応じた 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 1 を選択し、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、この規格の等級を設定した。

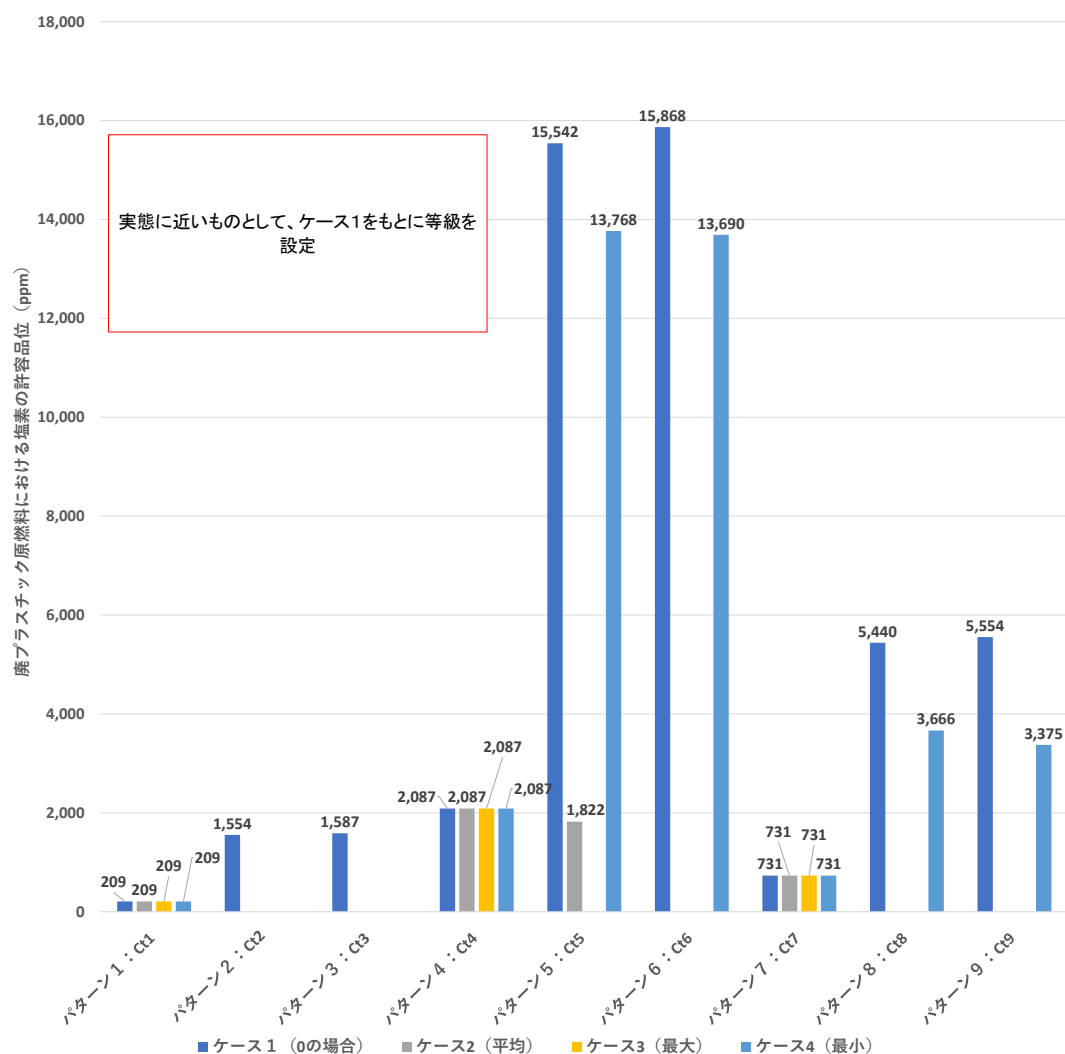


図 A-1 廃プラスチック原燃料における塩素の許容品位

廃プラスチック原燃料におけるクロムの許容品位（Cti）の推計結果は図 A-2 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（Co）の設定に応じた 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 3 を選択し、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、この規格の等級を設定した。

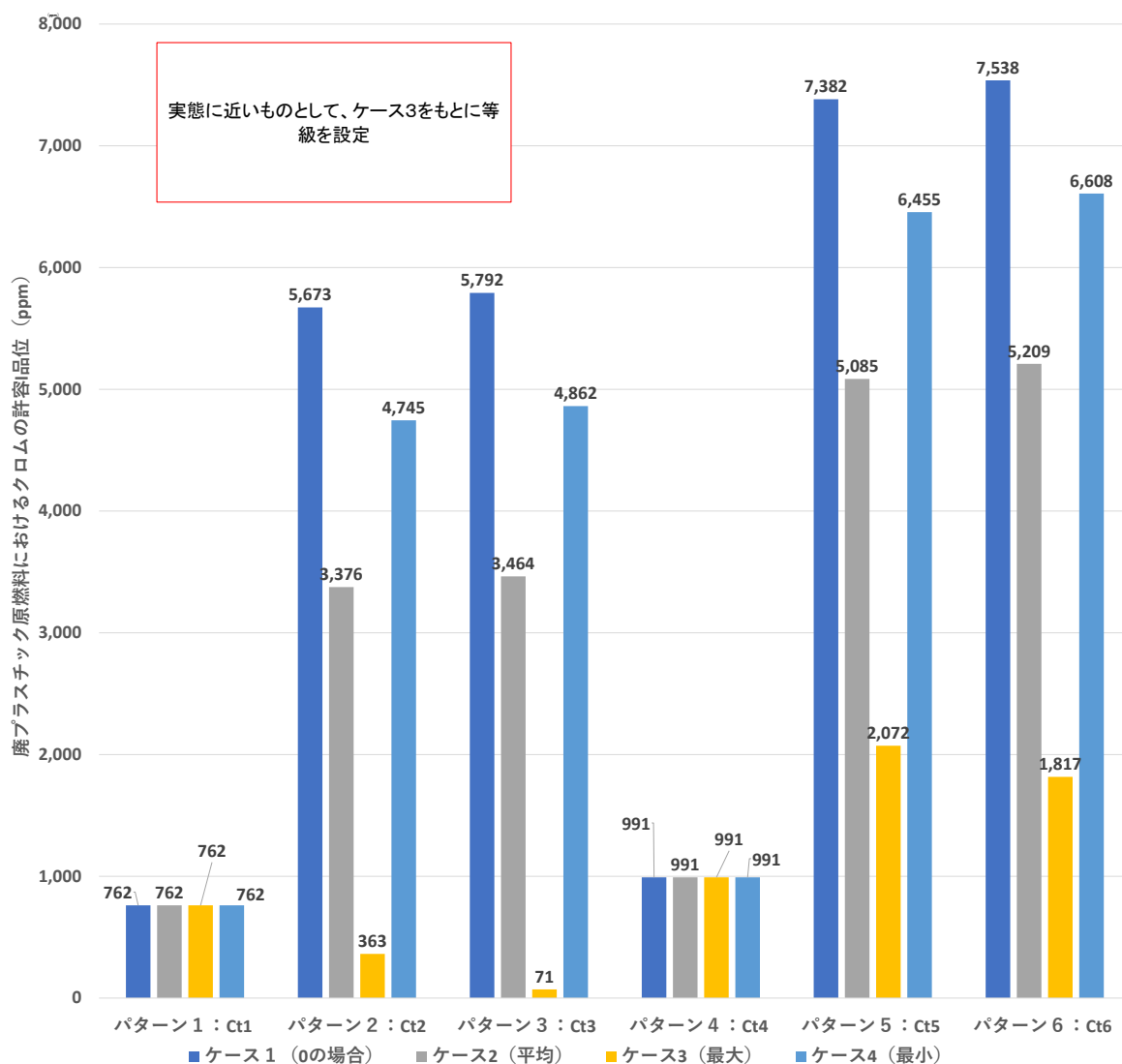


図 A-2 廃プラスチック原燃料におけるクロムの許容品位

附属書 B

(参考)
ラベル例

塩素一第 1 等級、クロム一第 2 等級である廃プラスチック原燃料のラベル例は、図 B-1 の通りである。二次元コードは必要に応じて使用するものとする。受渡当事者間の協定によって表示事項の追加又は省略する場合には、該当する項目を追加または削除するものとする。

製品名	廃プラスチック原燃料
製造業者	〇〇株式会社 〇〇工場
製造年月日	2022/11/25
ロット番号	12345678
忌避物質分類名	Cl1-Cr2
 * 1 2 3 4 5 6 7 8 * 	

図 B-1 廃プラスチック原燃料のラベル例

6. 4. 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は、図表 129 の通りである。また、各プロセスに係る素材・製品等の投入量、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 130、図表 131、図表 132、図表 133、図表 134、図表 135、図表 136 に示す。

図表 129 資源効率性向上効果の内訳

カテゴリ	No.	プロセス		粗付加価値額(円) (自動車販売機)	粗付加価値額 (円) (自動車)	粗付加価値額 (円) (合計)
A	1-1	採掘・選鉱等	採掘・選鉱 (クロム鉱石)	217	378	595
	1-2		採掘・選鉱 (鉄鉱石)	156	7,219	7,375
	1-3		採掘・選鉱 (銅鉱石)	9,686	10,311	19,997
	1-4		採掘・選鉱 (ボーキサイト)	0	0	0
	1-5		採掘 (原油)	7,908	3,507	11,415
	2-1	素材生産	普通鋼電炉製錬	55,963	63,819	119,782
	2-2		普通鋼高炉製錬	123	5,691	5,814
	2-3		銅製錬	486	521	1,007
	2-4		溶解・還元 (フェロクロム)	244	425	669
	2-5		特殊鋼電炉製錬	3,154	5,487	8,641
	2-6		精製 (原油)	1,264	560	1,824
	2-7		樹脂製造	32,167	14,265	46,432
	2-8		スラグ処理	426	451	877
	3	最終製品生産		309,455	313,933	623,388
	4	販売・サービス		0	1,906,260	1,906,260
	5	使用		0	0	0

カテゴリ	No.	プロセス		粗付加価値額(円) (自動販売機)	粗付加価値額 (円) (自動車)	粗付加価値額 (円) (合計)
	6	回収		0	0	0
	7	解体・破碎・選別		212,548	203,463	416,011
	8	埋立		3,636	184	3,820
	9	素材生産	セメント製造	4	129	133
B.	1-1	採掘・選鉱等	採掘・選炭（石炭）	0	0	0
	2-1	素材生産	セメント製造	0	0	0
C	1-1	採掘・選鉱等	採掘・選鉱（クロム鉱石）	80	80	160
	1-2		採掘・選鉱（鉄鉱石）	0	57	57
	1-3		採掘・選鉱（銅鉱石）	3,458	6,570	10,028
	1-4		採掘・選鉱（ボーキサイト）	0	0	0
	1-5		採掘（原油）	7,908	3,507	11,415
	2-1	素材生産	普通鋼電炉製錬	58,943	73,573	132,516
	2-2		普通鋼高炉製錬	46	45	91
	2-3		銅製錬	147	312	459
	2-4		溶解・還元（フェロクロム）	90	90	180
	2-5		特殊鋼電炉製錬	3,118	5,408	8,526
	2-6		精製（原油）	1,264	560	1,824
	2-7		樹脂製造	32,167	14,265	46,432
	2-8		スラグ処理	438	464	902
	3	最終製品生産		309,455	313,933	623,388
	4	販売・サービス		0	1,906,260	1,906,260

カテゴリ	No.	プロセス		粗付加価値額(円) (自動販売機)	粗付加価値額(円) (自動車)	粗付加価値額(円) (合計)
	5	使用		0	0	0
	6	回収		0	0	0
	7	解体・破碎・選別		218,712	206,440	425,152
	8	埋立		3,636	184	3,820
	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 130 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	投入量 (t) (自動販売機)	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・選鉱 (ボーキサイト)	－	－	－	投入物はなしとした。	
1-A-1-5	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	3.239	1.414	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て、これに循環回数を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

参照 番号	プロセス	原料等	投入量 (t) (自動販売機)	投入量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
		銑鉄	－	1.382	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。これに循環回数を乗じて投入量を算出した。	
1-A-2-2	普通鋼高炉製錬	鉄鉱石 (精鉱)	0.042	1.584	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)	0.121	0.107	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。これに循環回数を乗じて投入量を算出した。	
1-A-2-4	溶解・還元 (フェロクロム)	クロム鉱石	0.017	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	1.436	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	－	－	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	0.387	0.142	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	0.383	0.142	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)	－	－	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)	0.319	0.275	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。	1-1-3

参照 番号	プロセス	原料等	投入量 (t) (自動販売機)	投入量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
		高炉スラグ	0.003	0.097	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。	1-1-3
		電炉スラグ (特殊鋼)	0.006	0.009	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。	1-1-3
		非鉄スラグ	0.052	0.037	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。	1-1-3
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	－	－	－	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-A-6	回収	使用済み製品	4.600	3.800	全量回収されるとした。	
1-A-7	解体・破碎・選別	解体部品	4.600	3.800	全量解体・破碎・選別されるとした。	
1-A-8	埋立	SR・ASR	0.722	0.023	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。これに循環回数を乗じて投入量を算出した。	

参照 番号	プロセス	原料等	投入量 (t) (自動販売機)	投入量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
		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)	0.000	0.000	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	0.000	0.000	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	0.000	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。	
		高炉スラグ	0.009	0.344	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	0.046	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)	0.005	0.004	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-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）	-	-	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・選鉱（ボーキサイト）	-	-	-	投入物はなしとした。	
1-C-1-5	採掘（原油）	-	-	-	投入物はなしとした。	

参照 番号	プロセス	原料等	投入量 (t) (自動販売機)	投入量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
1-C-2-1	普通鋼電炉製錬	鉄スクラップ	2.955	1.604	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。	
1-C-2-2	普通鋼高炉製錬	鉄鉱石 (精鉱)	0.015	0.013	採掘された鉄鉱石が全量投入されたとした。	
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たとした。	
		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。	
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たとした。	
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たとした。	
		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たとした。	
		クロム系ステンレス鋼スクラップ	－	－	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	0.387	0.140	採掘された原油が全量投入されたとした。	
1-C-2-7	樹脂製造	ナフサ	0.383	0.140	生産されたナフサが全量投入されたとした。	
		樹脂 (二次原料)	－	－	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)	0.319	0.275	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たと仮定した。	

参照 番号	プロセス	原料等	投入量 (t) (自動販売機)	投入量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
		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	0.009	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	0.117	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	4.600	3.800	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	－	－	－	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-C-6	回収	使用済み製品	4.600	3.800	全量回収されたとした。	
1-C-7	解体・破碎・選別	解体部品	4.600	3.800	全量解体・破碎・選別されたとした。	
1-C-8	埋立	SR・ASR	0.722	0.023	各推計対象における発生した SR・ASR 量を用いた。	
		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。	

参照 番号	プロセス	原料等	投入量 (t) (自動販売機)	投入量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
		電炉スラグ (特殊鋼)	0.000	0.000	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	0.000	0.000	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	0.000	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。	
		高炉スラグ	0.003	0.003	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	0.046	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)	0.005	0.004	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 131 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	産出量 (t) (自動販売機)	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)	0.042	1.584	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

参照 番号	プロセス	製品等	産出量 (t) (自動販売機)	産出量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
1-A-1-3	採掘・選鉱 (銅鉱石)	銅鉱石 (精鉱)	0.121	0.107	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・選鉱 (ボーキサイト)	ボーキサイト (精鉱)	0.000	0.000	文献からアルミニウム 1t 生産あたりに必要なボーキサイト量を得て、1-A-2-4 のアルミニウム生産量に乗じて推計した。	1-1-4
1-A-1-4	採掘 (原油)	原油	0.038	0.142	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	2.972	2.565	自動販売機の場合、一部実証テーマ③で得られた実測データをもとに、自動販売機 1t の生産に必要な鉄量を推計した。これに循環回数を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。これに循環回数を乗じて産出量を算出した。	1-1-4 1-1-5
1-A-2-2	普通鋼高炉製錬	銑鉄	0.038	1.436	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	0.441	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、一部実証テーマ③で得られた実測データをもとに、自動販売機 1t の生産に必要な銅量を推計した。これに循環回数を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。これに循環回数を乗じて産出量を算出した。	1-1-4
		非鉄スラグ	0.117	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

参照 番号	プロセス	製品等	産出量 (t) (自動販売機)	産出量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
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	0.056	0.080	自動販売機の場合、一部実証テーマ③で得られた実測データをもとに、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。	1-1-4 1-1-5
1-A-2-6	精製 (原油)	ナフサ	0.383	0.140	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	0.881	0.323	自動販売機の場合、一部実証テーマ③で得られた実測データをもとに、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。	1-1-4
1-A-2-8	スラグ処理	路盤材等	0.376	0.320	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	—	—	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)。	1-1-4

参照 番号	プロセス	製品等	産出量 (t) (自動販売機)	産出量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
1-A-4	販売・サービス	最終製品	－	3.800	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。	1-1-4 1-1-6
1-A-5	使用		－	－	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	4.600	3.800	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	2.962	1.706	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て、これに循環回数を乗じて投入量を算出した。	1-1-4
		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。これに循環回数を乗じて投入量を算出した。	1-1-4
		セメント原燃料	0.000	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。	1-1-4
		クロム系ステンレス鋼スクラップ	－	－	事業実施前は回収されないと仮定した。	
		樹脂（二次原料）	－	－	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	0.002	0.003	廃ブラ、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を乗じて推計した。	

参照 番号	プロセス	製品等	産出量 (t) (自動販売機)	産出量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
1-B-1-1	採掘・選炭 (石炭)	石炭 (精炭)	0.000	0.000	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	0.000	0.000	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	0.013	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・選鉱 (ボーキサイト)	ボーキサイト (精鉱)	0.000	0.000	文献からアルミニウム 1t 生産あたりに必要なボーキサイト量を得て、1-C-2-4のアルミニウム生産量に乗じて推計した。	
1-C-1-5	採掘 (原油)	原油	0.387	0.142	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	2.972	2.565	自動販売機の場合、一部実証テーマ③で得られた実測データをもとに、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。	

参照 番号	プロセス	製品等	産出量 (t) (自動販売機)	産出量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
		高炉スラグ	0.004	0.003	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、一部実証テーマ③で得られた実測データをもとに、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	0.117	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	0.006	0.005	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	0.056	0.080	自動販売機の場合、一部実証テーマ③で得られた実測データをもとに、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	0.383	0.140	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	0.881	0.323	自動販売機の場合、一部実証テーマ③で得られた実測データをもとに、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。	

参照 番号	プロセス	製品等	産出量 (t) (自動販売機)	産出量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
					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。これに循環回数を乗じて産出量を算出した。	
1-C-2-8	スラグ処理	路盤材等	0.441	0.366	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	4.600	3.800	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	4.600	3.800	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	－	－	0.000	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	4.600	3.800	全量回収されるとした。	
1-C-7	解体・破砕・選別	鉄スクラップ	2.955	1.604	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て、これに循環回数を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。これに循環回数を乗じて投入量を算出した。	
		セメント原燃料	0.000	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。	

参照 番号	プロセス	製品等	産出量 (t) (自動販売機)	産出量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
		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。これに循環回数を乗じて投入量を算出した。	
		樹脂 (二次原料)	0.000	0.000	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。これに循環回数を乗じて投入量を算出した。	
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	0.002	0.003	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を乗じて推計した。	

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 132 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	排出量 (t) (自動販売機)	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	0.055	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	3.666	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	11.904	10.468	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

参照 番号	プロセス	不用品等	排出量 (t) (自動販売機)	産出量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
1-A-1-4	採掘・選鉱（ボーキサイト）	尾鉱等	0.000	0.000	1-A-1-3 ボーキサイト(精鉱)の産出量にアルミニウム含有率、アルミニウムの TMR 係数を乗じて算出した TMR から、1-A-1-3 ボーキサイト(精鉱)の産出量を差し引いて推計した。	1-1-4 1-1-8
1-A-1-5	採掘（原油）	油性廃棄物等	2.982	1.092	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)	0.341	0.294	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	0.059	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-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)	0.006	0.009	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。	

参照 番号	プロセス	不用品等	排出量 (t) (自動販売機)	産出量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
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	0.722	0.023	各推計対象における発生した SR・ASR 量を用いた。	
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	0.012	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	0.036	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	4.249	6.670	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・選鉱（ボーキサイト）	尾鉱等	0	0	1-C-1-3 ボーキサイト（精鉱）の産出量にアルミニウム含有率、アルミニウムの TMR 係数を乗じて算出した TMR から、1-C-1-3 ボーキサイト（精鉱）の産出量を差し引いて推計した。	
1-C-1-5	採掘（原油）	油性廃棄物等	2.982	1.092	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。	

参照 番号	プロセス	不用品等	排出量 (t) (自動販売機)	産出量 (t) (自動車)	算定の考え方	参考 文献
1-C-2-1	普通鋼電炉製錬	電炉スラグ (普通鋼)	0.341	0.294	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)	0.006	0.009	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	—	—	—	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	0.722	0.023	各推計対象における発生した SR・ASR 量を用いた。	
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 133 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・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	48,062	文献より 2022 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	2022 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）	17,322	2022 年の日本の輸出量と輸出額から推計した。	1-2-2
1-A-2-3	銅製錬	銅鉱石（精鉱）	366,824	2022 年の日本の輸出量と輸出額から推計した。	1-2-2
		銅スクラップ	1,067,600	文献より 2022 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	53,121	2022 年の日本の輸出量と輸出額から推計した。	1-2-2
1-A-2-5	特殊鋼電炉製錬	フェロクロム	124,542	2022 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	53,121	文献より引用した。	1-2-4
1-A-2-6	精製（原油）	原油	93,952	2022 年の WTI 原油価格（\$/bbl）に 2022 年の米ドル相場平均と原油密度を乗じて算出した。	
1-A-2-7	樹脂製造	ナフサ	92,286	文献より 2022 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	文献より引用した。	1-2-6

参照 番号	プロセス	製品等	単価（円 t） （自動販売機・自動車）	算定の考え方	参考 文献
1-A-2-8	スラグ処理	電炉スラグ （普通鋼）	-5,000	ヒアリング等より推計した。	
		高炉スラグ	942	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	ヒアリング等より推計した。	
		非鉄スラグ	1,280	文献より引用した。	1-2-7
1-A-8	埋立	SR・ASR	-22,904	文献より引用した。	1-2-8
		電炉スラグ （普通鋼）	-10,992	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）	-10,992	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	-10,992	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	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。	
		高炉スラグ	3,000	ヒアリング等より推計した。	
		非鉄スラグ	0	ヒアリング等より推計した。	
		電炉スラグ （普通鋼）	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	文献より 2022 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。	

参照 番号	プロセス	製品等	単価（円 t） （自動販売機・自動車）	算定の考え方	参考 文献
1-C-2-1	普通鋼電炉製錬	鉄スクラップ	48,062	文献より 2022 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）	17,322	2022 年の日本の輸出量と輸出額から推計した。	
1-C-2-3	銅製錬	銅鉱石（精 鉱）	366,824	2022 年の日本の輸出量と輸出額から推計した。	
		銅スクラップ	1,067,600	文献より 2022 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	53,121	2022 年の日本の輸出量と輸出額から推計した。	
1-C-2-5	特殊鋼電炉製錬	フェロクロム	124,542	2022 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	43,000	文献より引用した。	1-2-4
1-C-2-6	精製（原油）	原油	93,952	2022 年の WTI 原油価格（\$/bbl）に 2022 年の米ドル相場平均と原油密度を乗じて算出した。	1-2-10
1-C-2-7	樹脂製造	ナフサ	92,286	文献より 2022 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	文献より引用した。	

参照 番号	プロセス	製品等	単価（円 t） （自動販売機・自動車）	算定の考え方	参考 文献
1-C-2-8	スラグ処理	電炉スラグ （普通鋼）	-5,220	ヒアリング等より推計した。	
		高炉スラグ	942	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）	-5,225	ヒアリング等より推計した。	
		非鉄スラグ	1,280	文献より引用した。	1-2-8
1-C-8	埋立	SR・ASR	-22,904	文献より引用した。	
		電炉スラグ （普通鋼）	-10,992	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）	-10,992	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	-10,992	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	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。	
		高炉スラグ	3,000	ヒアリング等より推計した。	
		非鉄スラグ	0	ヒアリング等より推計した。	
		電炉スラグ （普通鋼）	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 134 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・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)	53,121	2022 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)	17,322	2022 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)	366,824	2022 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・選鉱 (ボーキサイト)	ボーキサイト (精鉱)	320,350	2022 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	
1-A-1-5	採掘 (原油)	原油	93,952	2022 年の WTI 原油価格 (\$/bbl) に 2022 年の米ドル相場平均と 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	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	2022 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	2,548	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	1,067,550	文献より 2022 年の銅建値の平均を採用した。	1-2-12
		非鉄スラグ	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	2022 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	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	92,286	文献より 2022 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	208,000	文献より 2022 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		複数企業の公表価格の平均 (円/m ³) に文献出た密度を乗じて推計 した。	1-2-15

参照 番号	プロセス	製品等	単価 (円/t) (自動販売機・自動車)	算定の考え方	参考 文献
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	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・破砕・選別	鉄スクラップ	48,062	文献より 2022 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	1,067,600	文献より 2022 年銅建値を引用した。	1-2-3
		セメント原燃料	-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	43,000	文献より引用した。	1-2-4
		樹脂（二次原料）	70,000	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	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）	10,001	文献より 2022 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	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)	53,121	2022 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	1-2-2

参照 番号	プロセス	製品等	単価 (円/t) (自動販売機・自動車)	算定の考え方	参考 文献
1-C-1-2	採掘・選鉱 (鉄鉱石)	鉄鉱石 (精鉱)	17,322	2022 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)	366,824	2022 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・選鉱 (ボーキサイト)	ボーキサイト (精鉱)	320,350	2022 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	
1-C-1-4	採掘 (原油)	原油	93,952	2022 年の WTI 原油価格 (\$/bbl) に 2022 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	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	2022 年の日本の輸入量と輸入額から推計した。	1-2-2
		高炉スラグ	2,548	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	1,067,550	文献より 2022 年の銅建値の平均を採用した。	1-2-12
		非鉄スラグ	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	2022 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	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	92,286	文献より 2022 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	208,000	文献より 2022 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	複数企業の公表価格の平均 (円/m ³) 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	-	-	

参照 番号	プロセス	製品等	単価 (円/t) (自動販売機・自動車)	算定の考え方	参考 文献
1-C-4	販売・サービス	最終製品	0	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	48,062	文献より 2022 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	1,067,600	文献より 2022 年銅建値を引用した。	1-2-3
		セメント原燃料	-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	43,000	文献より引用した。	1-2-4
		樹脂（二次原料）	70,000	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	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 135 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・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	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	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	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	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 136 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、2022、統合報告書 2022
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（2021 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、2022、セメントハンドブック 2022
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 (2022 年 10 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

6.5. 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 137、図表 138 に示す。

図表 137 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)
	項目	数値	単位	数値	単位	
クロム	クロム	0.000875	t	8.9	t/metal-t	7.79
鉄	鉄	0.003697	t	5.1	t/metal-t	18.86
銅	銅	0.005603	t	300	t/metal-t	1,680.98
樹脂	原油	0	L	0.0074	t/L	0
セメント原燃料	石炭	0	t	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 138 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)
	項目	数値	単位	数値	単位	
クロム	クロム	0.001908	t	8.9	t/metal-t	16.98
鉄	鉄	0.26872	t	5.1	t/metal-t	1,370.47
銅	銅	0.003365	t	300	t/metal-t	1,009.57
樹脂	原油	0	L	0.0074	t/L	0
セメント原燃料	石炭	0	t	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. 6. CO₂ 排出量削減効果の計算根拠

CO₂ 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は、それぞれ図表 139、図表 140、図表 141、図表 142、図表 143、図表 144、図表 145 の通りである。

図表 139 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	A-1-1	使用済み製品処理量（アロケーション後）	8.36	ton/機能単位
	埋立	A-1-2	発生した SR の埋立量	0.74	ton-SR/機能単位
	焼却	A-1-3	発生した SR の焼却量	0.00	ton-SR/機能単位
	鉄鋼電炉	A-1-4	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	6.21	ton-鉄/機能単位
	鉄鋼高炉	A-1-5	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	ton-鉄鋼/機能単位
	セメント製造	A-1-6	投入された原燃料向け樹脂量	0.06	ton-原燃料/機能単位
		A-1-7	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	12.04	ton-セメント/機能単位
	銅製錬	A-1-8	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	0.05	ton-銅/機能単位
B	セメント製造	B-1-1	代替された天然資源由来のセメント生産量	24.84	ton-セメント/機能単位
	銅製錬	B-1-2	代替された天然資源由来の銅生産量	0.04	ton-銅/機能単位
	アルミニウム製錬	B-1-3	代替された天然資源由来のアルミニウム生産量	0.00	ton-Al/機能単位
	ステンレス鋼製錬	B-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	ton-SUS/機能単位
	樹脂（PP）製造	B-1-5	代替された天然資源由来の樹脂生産量	0.00	ton-樹脂/機能単位
C	処理	C-1-1	使用済み製品処理量（アロケーション後）	8.36	ton/機能単位
	埋立	C-1-2	発生した SR の埋立量	1	ton-SR/機能単位
	焼却	C-1-3	発生した SR の焼却量	0.000	ton-SR/機能単位

	鉄鋼電炉	C-1-4	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	4.10	ton-鉄/機能単位
	セメント製造	C-1-5	投入された原燃料向け樹脂量	0.06	ton-原燃料/機能単位
		C-1-6	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	36.88	ton-セメント/機能単位
	銅製錬	C-1-7	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	0.09	ton-銅/機能単位
	アルミニウム製錬	C-1-8	回収されたアルミニウム製錬原料由来のアルミニウム生産量	0.000	ton-Al/機能単位
	ステンレス鋼製錬	C-1-9	回収されたステンレス製錬原料由来のステンレス鋼生産量	0.10	ton-SUS/機能単位
	樹脂製造	C-1-10	回収された樹脂原料由来の樹脂生産量	0	ton-樹脂/機能単位
D	鉄鋼電炉	D-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	ton-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 140 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	A-1-1	使用済み製品処理量（アロケーション後）	8.36	ton/機能単位
	埋立	A-1-2	発生した SR の埋立量	0.74	ton-SR/機能単位
	焼却	A-1-3	発生した SR の焼却量	0.000	ton-SR/機能単位
	鉄鋼電炉	A-1-4	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	6.21	ton-鉄/機能単位
	鉄鋼高炉	A-1-5	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	ton-鉄鋼/機能単位
	セメント製造	A-1-6	投入された原燃料向け樹脂量	0.06	ton-原燃料/機能単位
		A-1-7	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	0.00	ton-セメント/機能単位
	銅製錬	A-1-8	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	0.05	ton-銅/機能単位
	セメント製造	B-1-1	代替された天然資源由来のセメント生産量	36.88	ton-セメント/機能単位
	銅製錬	B-1-2	代替された天然資源由来の銅生産量	0.04	ton-銅/機能単位
	アルミニウム製錬	B-1-3	代替された天然資源由来のアルミニウム生産量	0.0000	ton-Al/機能単位

	ステンレス鋼製錬	B-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	ton-SUS/機能単位
	樹脂（PP）製造	B-1-5	代替された天然資源由来の樹脂生産量	0.00	ton-樹脂/機能単位
C	処理	C-1-1	使用済み製品処理量（アロケーション後）	8.36	ton/機能単位
	埋立	C-1-2	発生した SR の埋立量	0	ton-SR/機能単位
	焼却	C-1-3	発生した SR の焼却量	0.000	ton-SR/機能単位
	鉄鋼電炉	C-1-4	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	4.38	ton-鉄/機能単位
	セメント製造	C-1-5	回収された原燃料向け樹脂量	0.06	ton-原燃料/機能単位
		C-1-6	回収された電炉スラグ由来のセメント生産量	36.88	ton-セメント/機能単位
	銅製錬	C-1-7	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	0.09	ton-銅/機能単位
	アルミニウム製錬	C-1-8	機能単位あたりのアルミニウム製錬原料回収量	0.000	ton-Al/機能単位
	ステンレス鋼製錬	C-1-9	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	ton-SUS/機能単位
	樹脂製造	C-1-10	回収された樹脂原料由来の樹脂生産量	0	ton-樹脂/機能単位
D	鉄鋼電炉	D-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	ton-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 141 各プロセスにおける排出原単位

カテゴリ	プロセス	排出原単位			
		参照 番号	項目	数値	単位
A	処理	A-2-1	使用済み製品処理 1t 当たりの CO ₂ 排出量	36	CO ₂ -kg/t
	埋立	A-2-2	埋立処理 1t 当たりの CO ₂ 排出量	31	CO ₂ -kg/t
	焼却	A-2-3	焼却処理 1t 当たりの CO ₂ 排出量	94	CO ₂ -kg/t
	鉄鋼電炉	A-2-4	（二次資源由来の）粗鋼製造 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	417	CO ₂ -kg/t
	鉄鋼高炉	A-2-5	（天然資源由来の）銑鉄製造 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	2,310	CO ₂ -kg/t

	セメント原燃料	A-2-6	(二次資源由来の) セメント原燃料 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	60	CO ₂ -kg/t
	セメント製造	A-2-7	(二次資源由来の) セメント製造 1ton 当たりの CO ₂ 排出量 (アロケーション後)	10	CO ₂ -kg/t
	銅製錬	A-2-8	(二次資源由来の) 銅製造 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	988	CO ₂ -kg/t
B	セメント製造	B-2-1	(天然資源由来の) セメント製造 1ton 当たりの CO ₂ 排出量 (アロケーション後)	10	CO ₂ -kg/t
	銅製錬	B-2-2	(天然資源由来の) 銅製造 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	1,634	CO ₂ -kg/t
	アルミニウム製錬	B-2-3	(天然資源由来の) アルミニウム製造 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	7,230	CO ₂ -kg/t
	ステンレス鋼製錬	B-2-4	(天然資源由来の) ステンレス鋼製造 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	2,874	CO ₂ -kg/t
	樹脂 (PP) 製造	B-2-5	(天然資源由来の) 樹脂製造 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	630	CO ₂ -kg/t
C	処理	C-2-1	使用済み製品処理 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	36	CO ₂ -kg/t
	埋立	C-2-2	埋立処理 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	31	CO ₂ -kg/t
	焼却	C-2-3	焼却処理 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	94	CO ₂ -kg/t
	鉄鋼電炉	C-2-4	(二次資源由来の) 粗鋼製 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	417	CO ₂ -kg/t
	セメント原燃料	C-2-5	(二次資源由来の) セメント原燃 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	60	CO ₂ -kg/t
	セメント製造	C-2-6	(二次資源由来の) セメント製 1ton 当たりの CO ₂ 排出量 (アロケーション後)	10	CO ₂ -kg/t
	銅製錬	C-2-7	(二次資源由来の) 銅製 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	988	CO ₂ -kg/t
	アルミニウム製錬	C-2-8	(二次資源由来の) アルミニウム製 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	306	CO ₂ -kg/t
	ステンレス鋼製錬	C-2-9	(二次資源由来の) ステンレス鋼製 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	979	CO ₂ -kg/t
	樹脂製造	C-2-10	(二次資源由来の) 樹脂製 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	197	CO ₂ -kg/t
D	鉄鋼電炉	D-2-1	(天然資源由来の) 粗鋼製 1ton 当たりの CO ₂ 排出量	2282	CO ₂ -kg/t

(出所) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 142 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
A-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（4.6 回）は文献 3-1-1 からダイドグループの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
A-1-2	発生した SR の埋立量	実実証テーマ③による実測データを一部参照し、測定さ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を乗じることで、活動量を推計した。	
A-1-3	発生した SR の焼却量	本推計では 0 とした。	
A-1-4	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	実証テーマ③による実測データを一部参照し、測定さ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を乗じることで、活動量を推計した。	3-1-2 3-1-3
A-1-5	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③による実測データを一部参照し、測定された鉄製錬原料の品質が、本調査で設定した品質基準のうち第 2 等級規格を満たしていることから、0 とした。	
A-1-6	投入された原燃料向け樹脂量	実証テーマ③による実測データを一部参照し、測定された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。	
A-1-7	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
A-1-8	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	実証テーマ③による実測データを一部参照し、測定された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。	3-1-6

活動量			
参照番号	項目	算定の考え方	参考文献
		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）。	
B-1-1	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 A-1-7 における活動量を差し引いて算出した。	
B-1-2	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 A-1-8 における活動量を差し引いて算出した。	
B-1-3	代替された天然資源由来のアルミニウム生産量	本推計では 0 とした。	
B-1-4	代替された天然資源由来のステンレス鋼生産量	C-1-9 と同値とした。	
B-1-5	代替された天然資源由来の樹脂生産量	C-1-10 と同値とした。	
C-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（4.6 回）を乗じて活動量を算出した。	
C-1-2	発生した SR の埋立量	A-1-2 と同値とした。	
C-1-3	発生した SR の焼却量	本推計では 0 とした。	
C-1-4	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	実証テーマ③による実測データを一部参照し、測定さ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（4.6 回）を乗じることで、活動量を推計した。	
C-1-5	回収された原燃料向け樹脂量	実証テーマ③による実測データを一部参照し、測定された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。	
C-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。 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。	

活動量			
参照番号	項目	算定の考え方	参考文献
C-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「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。	
C-1-8	回収されたアルミニウム製錬原料由来のアルミニウム生産量	本推計では 0 とした。	
C-1-9	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③による実測データを一部参照し、測定さ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
C-1-10	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。	
D-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	A-1-4 における活動量から C-1-4 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 143 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
A-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
A-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
A-1-3	発生した SR の焼却量	本推計では 0 とした。	
A-1-4	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

活動量			
参照番号	項目	算定の考え方	参考文献
		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。	
A-1-5	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
A-1-6	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
A-1-7	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
A-1-8	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
B-1-1	代替された天然資源由来のセメント生産量	C-1-6における活動量からA-1-6における活動量を差し引いて算出した。	
B-1-2	代替された天然資源由来の銅生産量	C-1-7における活動量からA-1-8における活動量を差し引いて算出した。	
B-1-3	代替された天然資源由来のアルミニウム生産量	本推計では0とした。	
B-1-4	代替された天然資源由来のステンレス鋼生産量	C-1-9と同値とした。	
B-1-5	代替された天然資源由来の樹脂生産量	C-1-10と同値とした。	

活動量			
参照番号	項目	算定の考え方	参考文献
C-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。	
C-1-2	発生した ASR の埋立量	A-1-2 と同値とした。	
C-1-3	発生した SR の焼却量	本推計では 0 とした。	
C-1-4	回収された鉄製錬原料由来の粗鋼生産量	実証テーマ③による実測データを一部参照し、測定さ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を乗じることで、活動量を推計した。	
C-1-5	回収された原燃料向け樹脂量	A-1-6 と同値とした。	
C-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。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。	
C-1-7	回収された銅製錬原料由来の銅生産量	実証テーマ③による実測データを一部参照し、測定さ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を乗じることで、活動量を推計した。	
C-1-8	回収されたアルミニウム製錬原料由来のアルミニウム生産量	本推計では 0 とした。	
C-1-9	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③による実測データを一部参照し、測定さ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。	
C-1-10	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。	
D-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	A-1-4 における活動量から C-1-4 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 144 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
A-2-1	小型家電・家電処理 1t 当たりの CO ₂ 排出量	小型家電及び家電の破碎・選別処理にかかる CO ₂ 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
A-2-2	埋立処理 1t 当たりの CO ₂ 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
A-2-3	焼却処理 1t 当たりの CO ₂ 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
A-2-4	(二次原料由来の) 粗鋼製造 1t 当たりの CO ₂ 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
A-2-7	セメント製造 1t 当たりの CO ₂ 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 ₂ 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 ₂ 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
A-2-8	(二次原料由来の) 銅製造 1t 当たりの CO ₂ 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
B-2-1	セメント製造 1t 当たりの CO ₂ 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 ₂ 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 ₂ 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
B-2-2	(天然資源由来の) 銅製造 1t 当たりの CO ₂ 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
B-2-3	(天然資源由来の) アルミニウム製造 1ton 当たりの CO ₂ 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
B-2-4	(天然資源由来の) ステンレス鋼製造 1t 当たりの CO ₂ 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

排出原単位			
参照番号	項目	算定の考え方	参考文献
B-2-5	(天然資源由来の) 樹脂製造 1t 当たりの CO ₂ 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
C-2-1	小型家電・家電処理 1t 当たりの CO ₂ 排出量	小型家電及び家電の破碎・選別処理にかかる CO ₂ 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
C-2-2	埋立処理 1t 当たりの CO ₂ 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
C-2-3	焼却処理 1t 当たりの CO ₂ 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。	
C-2-4	(二次原料由来の) 粗鋼製造 1t 当たりの CO ₂ 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
C-2-5	セメント製造 1t 当たりのセメント原燃料由来の CO ₂ 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 ₂ 量を参考文献 3-3-4 より引用した。	3-3-4
C-2-6	セメント製造 1t 当たりの CO ₂ 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 ₂ 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 ₂ 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
C-2-7	(二次原料由来の) 銅製造 1t 当たりの CO ₂ 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
C-2-8	(二次資源由来の) アルミニウム製造 1ton 当たりの CO ₂ 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
C-2-9	(二次原料由来の) ステンレス鋼製造 1t 当たりの CO ₂ 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
C-2-10	(二次原料由来の) 樹脂製造 1t 当たりの CO ₂ 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

排出原単位			
参照番号	項目	算定の考え方	参考文献
D-2-1	(二次原料由来の) 粗鋼製造 1t 当たりの CO ₂ 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 145 CO₂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、2022、統合報告書 2022
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	鐵鋼スラグ協会、2021、鐵鋼スラグ統計年報 (2021 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 (2021 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 2022 年度 1 版検索「破碎・選別(家電) 混合処理」
3-3-2	長田守弘ら、2012、自動車破碎残渣 (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 ₂ 排出量削減ポテンシャルの推計
3-3-4	セメント協会、2023、セメントの LCI データの概要

記号	参考文献名
3-3-5	セメント協会、2022、セメントハンドブック 2022
3-3-6	JEMAI-LCA データベース
3-3-7	ISSF、2018 、ステンレスと CO ₂ : 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 2022 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 2022 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 2022 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4年度環境省委託業務

令和4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5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・迫田・園原・千賀・村中）

※無許可の転載・掲載を禁じます。