令和２年度環境省委託業務

令和２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３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・破砕・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いているものが多く、付随する製鋼・製錬忌避物質の除去や管理まで念頭においていないものが多い（ソーティングセンター1.0～2.0）。また、高価値成分の濃縮に最適化されていることも多いため、単価が低く、量も少ない部位やレアメタル等は、破砕残残渣や買い手のつきにくい低品位基板などに寄せられるか、大量処理による希釈効果を伴って鉄スクラップやスラグ、焼却灰の中へ拡散、埋没していることが多い。

中国政府による廃棄物の輸入規制以降、日本国内で処理しなければいけない使用済み製品やスクラップ等が増加しており、今後は破砕残渣や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。

処理困難物としての炭素繊維強化プラスチック等の難処理物質の問題、また製品品質に影響を与えるトランプエレメントの問題や、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重金属の問題に対して、過去事業では、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、難処理物質への新たな前処理の適用と、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、コークス代替品など）の回収可能性を追求した（ソーティングセンター3.0）。しかし、素材産業が互いに連携するだけでは、忌避物質の管理に限界があり、中間処理事業者も巻き込み、新たな事業者間連携と忌避物質に着目した新たな分離・選別技術の開発を行う必要性がでてきている。

本事業では、各素材産業の原料要求仕様をもとに解体・破砕・選別方法を見直したうえで、中間処理業と各素材産業と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（ソーティングセンター4.0）。これにより、今後直面すると思われる忌避物質の増加に伴う資源循環の停滞を回避しつつ、未資源化物質の再資源化を拡大し、さらに新たな取引拡大が期待される。

本年度事業では、品質判断項目として設定するべき項目、項目ごとの要求水準の段階、段階に応じた類型（品質等級）を整理し、鉄スクラップおよび廃プラスチック原燃料の分類（品質等級）に関する規格案を作成した。同時に、こうした規格案を満たす再生資源を回収するため、自動販売機および小型家電をケーススタディとして、忌避物質の管理を念頭においた解体・破砕・選別プロセスの検討を行った。また、新たな忌避物質管理技術として、低品位基板等から製錬原料と原燃料代替品を回収する選別技術と、磁着物中に含まれるステンレス鋼を分離する選別技術の実証を行い、標準試料を対象に、電磁ファインダーと LIBS ソーターにおける鉄とステンレス鋼を分離可能な条件を明らかにした。加えて、最大の課題となる破砕前後で情報連携を実現する基本的なワークフローを検討し、初期投資を抑えつつ、産物の付加価値向上に繋がる情報連携システム仕様を設定した。さらに、既知の情報、新たに取得可能な情報、その中から連携させる情報等を具体化することで、各情報の入出力、処理・変換方法、またトレーサビリティを実現する基本的仕様を作成した。

今後、情報連携システムを組み入れた、忌避物質の管理を念頭にした解体・破砕・選別プロセスにより、再生資源の規格案を満たす原料が生産可能か検証するとともに、こうした仕組みを構築・機能させるための要素技術の導入や情報連携システムの具体化、さらには社会実装を進めていくための企業共同体等の検討を進めていくことが求められている。

Summary

Most waste treatments (dismantling, shredding, sorting) for used products are aimed at recovering 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, a few 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 that is necessary to be processed in Japan has increased. In the future, it should be more repellent substances concentrated on shredder residues and low-grade substrates. Then the resource circulation conducted by the steel and cement industry would face difficult.

Some problems caused by repellent substances have generated, which are increasing difficulty in recycling process by carbon reinforced fibers, degrading quality of product by trump elements, and pollution by halogens and chromium remaining in slag and incineration ash. In previous projects, we aimed to expand the interchange trade of repellent substances through cooperation between material companies. We applied new pretreatment to difficult-to-treat substances and recovery of recycled substances (copper, precious metals, iron, coke substitutes, etc.) by technologies that each industry has (Sorting Center 3.0). However, there is a limit to the management of repellent substances by cooperating with material sectors. 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 the raw material requirements of each material industry (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 FY2020, draft standards for classification (quality grades) of iron scrap and waste plastic raw materials was established, according to a consideration of items to be set as quality judgment, required levels of each item, types (quality grades) by some grades. Then, as case studies, the new dismantling, shredding, and sorting processes, which can manage repellent substances, were examined in vending machines and small household appliances. Besides, sorting technologies that recover smelting raw materials and coke substitutes from low-grade substrates, etc., and that separates stainless steel contained in magnetic materials were demonstrated. In addition, the basic workflow to realize information exchange before and after shredding was examined and set the information exchange system specifications that lead to the improvement of the added value of products while suppressing the initial investment.

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
2.1.1. 事業全体像 3
2.1.2. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証事業１） 5
2.1.3. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証事業２） 5
2.1.4. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証事業３） 5
2.1.5. 情報連携システムの検討（実証事業４） 5
2.1.6. 磁着物の高度選別実証（実証事業５） 5
2.1.7. 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 6
2.1.8. 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 6
2.1.9. 「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 6
2.1.10. 共同実施者等との打合せ 6
2.1.11. 評価審査委員会の出席 6

2.2. 各実施事項 7
2.2.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証事業１） 7
2.2.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証事業２） 13
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（実証事業３） 16
2.2.4. 情報連携システムの検討（実証事業４） 21
2.2.5. 磁着物の高度選別実証（実証事業５） 28
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 36
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 40
2.2.8. 「包括的中間処理（ソーティングセンター4.0）の実現に向けた再資源化技術・システム実証事業」の現地視察会の開催 40
2.2.9. 共同実施者等との打合せ 41
2.2.10. 評価審査委員会の出席 42

3. 結果および考察 43

3.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証事業１） 43
3.1.1. 忌避元素としての銅に関する既存研究、知見の整理 43
3.1.2. 塩素に関する既存研究、知見の整理 43
3.1.3. クロムのマテリアルフロー分析 45
3.1.4. 成分分析の実施 52
3.1.5. 技術仕様の特定に関する検討 52

3.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証事業２） 55
3.2.1. 素材産業における規格・検収基準等の調査 55
3.2.2. 再生資源規格案の検討 56

3.3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証事業３） 61
3.3.1. 全体最適化を実現する処理プロセスの検討 61
3.3.2. 樹脂・金属成分を分離する要素技術の検討 64
3.4. 情報連携システムの検討（実証事業４） 73
3.4.1. 情報連携システムの仕様検討 73
3.4.2. 連携する情報の特定 76
3.5. 磁着物の高度選別実証（実証事業５） 78
3.5.1. 電磁式ファインダーによる選別実証 78
3.5.2. LIBS ソーターによる選別実証 85
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 91
3.6.1. 資源回収による「天然資源採掘量削減効果」 91
3.6.2. 二次資源単位重量当たりの収益改善効果（資源効率性向上効果） 92
3.6.3. CO_2 排出量削減効果 93
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 94
3.7.1. 金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討 94
3.7.2. 出口戦略の検討 95
4. まとめ 98
4.1. 実証成果 98
4.1.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証事業１） 98
4.1.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証事業２） 98
4.1.3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証事業３） 98
4.1.4. 情報連携システムの検討（実証事業４） 99
4.1.5. 磁着物の高度選別実証（実証事業５） 99
4.1.6. 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 100
4.1.7. 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 100
4.2. 今後の課題 101
4.2.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証事業１） 101
4.2.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証事業２） 101
4.2.3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証事業３） 101
4.2.4. 情報連携システムの検討（実証事業４） 102
4.2.5. 磁着物の高度選別実証（実証事業５） 103
4.2.6. 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 103
4.2.7. 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 103
5. 付録 104
5.1. 天然資源採掘量削減効果（天然資源節約効果）の算定根拠 104
5.2. 資源効率性向上効果の算定根拠 108
5.3. CO_2 排出量削減効果の計算根拠 112

事業実施担当（研究会メンバー）

（大学・研究所：機関名五十音順）

川嵜幹生	埼玉県環境科学国際センター　資源循環・廃棄物担当　主任研究員
村上進亮	東京大学大学院　工学系研究科技術経営戦略学専攻 准教授
大和田秀二	早稲田大学大学院　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

（企業等：機関名五十音順）

茨木敬久	（株）茨木金属商会　取締役統括部長
森島久訓	（株）茨木金属商会　関東営業所　羽田工場　所長
小野晃	共英製鋼（株）　執行役員　環境リサイクル部長
櫻井元樹	共英製鋼（株）　環境リサイクル部営業課　課長代理
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
堤庸佐	(株)ツルオカ　総務部　ＲＥＣＹＩＮＴ事業企画室
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
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
前田俊輔	前田産業（株）　代表取締役社長
丹羽崇人	前田産業（株）
境健一郎	松田産業（株）　金属･環境営業本部　営業企画推進部　次長
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　担当課長
太田洋文	三井金属鉱業（株）　金属事業本部 技術部
大森洋輔	三井金属鉱業（株）　営業統括部　リサイクル営業部　部長補佐
萩原慎一郎	リバーホールディングス（株）　技術部　技術開発課　部長補佐
山下勇一郎	リバーホールディングス（株）　事業戦略室　室長代理
富田繁	リバーホールディングス（株）　技術部　設備管理課　課長

（共同実施者：企業名五十音順）

矢敷真一	イーペックスジャパン（株）　代表取締役
花田隆	太平洋セメント（株）環境事業部　営業企画グループ　リーダー
福田誠司	太平洋セメント（株）環境事業部　営業企画グループ　参事
森賢一	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
石田泰之	太平洋セメント（株）中央研究所　第３研究部　副部長
竹本智典	太平洋セメント（株）中央研究所　第３研究部　分離技術チーム
武藤恭宗	太平洋セメント（株）中央研究所　第３研究部　分離技術チーム

（事務局）

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

（オブザーバー：企業・機関名五十音順）

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

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

1. 背景・目的

使用済み製品等の中間処理（解体・破砕・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いているものが多く、付随する製鋼・製錬忌避物質の除去や管理まで念頭においていないものが多い（図表 1：ソーティングセンター1.0～2.0）。また、高価値成分の濃縮に最適化されているケースも多いため、単価が低く、量も少ない部位やレアメタル等は、破砕残渣（シュレッダーダスト）や買い手のつきにくい低品位基板などに寄せられるか、大量処理による希釈効果を伴って鉄スクラップやスラグ、焼却灰の中へ拡散、埋没していることが多い。

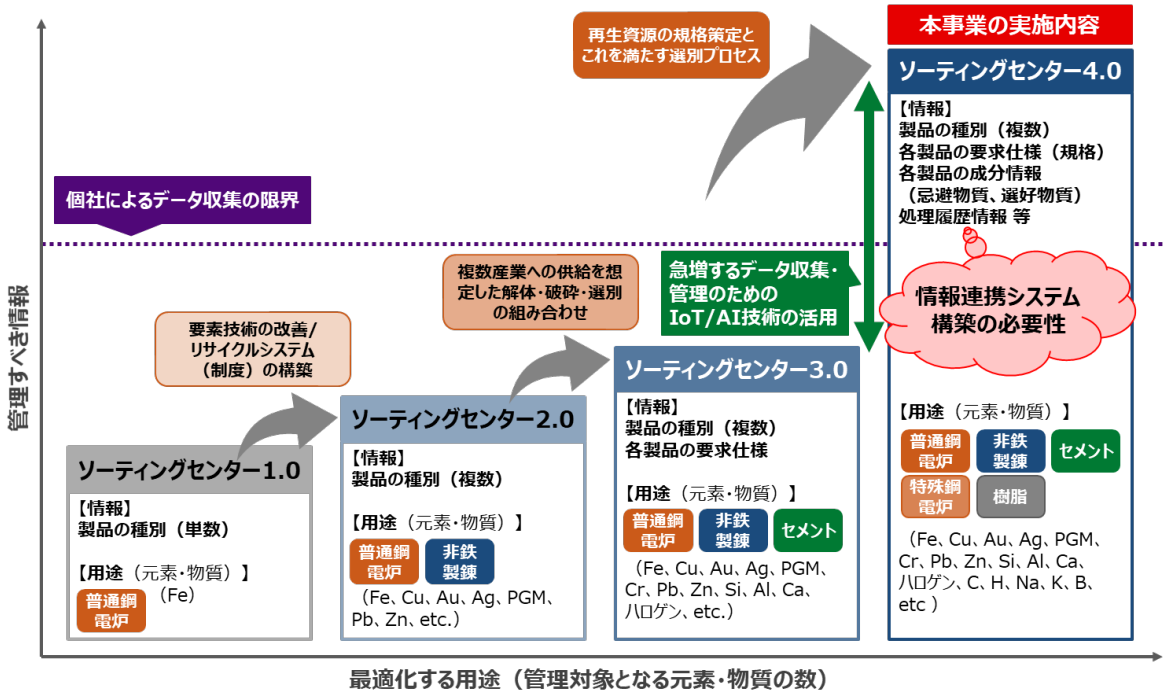
中国政府による廃棄物の輸入規制以降、日本国内で処理しなければいけない使用済み製品やスクラップ等が増加しており、今後は破砕残渣や低品位基板等に忌避物質が集中し、鉄鋼・セメント産業等による資源循環を難しくさせる可能性がある。

処理困難物としての炭素繊維強化プラスチック等の難処理物質の問題、また製品品質に影響を与えるトランプエレメントの問題や、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重金属の問題がある。過去事業 [1]では、自動車破砕残渣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、難処理物質への新たな前処理適用と、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、コークス代替品など）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り、中間処理事業者も巻き込み、新たな事業者間連携（情報連携システムの構築）と忌避物質に着目した新たな分離・選別技術の開発を行う必要性がでてきている。

そこで、本事業では、各素材産業の原料要求仕様をもとに中間処理で満たすべき新たな解体・選別方法を見直した上（忌避物質等管理技術の検証や開発も含む：磁着物混入のクロムや、低品位基板に混入する樹脂・ハロゲン等に注目）、中間処理業と各素材産業と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。どのようなフィードでどのような処理を行い、どのような品質の産物が得られているかの情報連携を確立させていく。また、忌避物質等管理技術の実証では、画像解析等による新たな選別技術の可能性も追求する。これにより、今後直面すると思われる忌避物質の増加に伴う資源循環の停滞を回避しつつ、未資源化物質の再資源化を拡大し、さらに新たな取引拡大へとつなげていくことを目指した（図表 1：ソーティングセンター4.0、図表 2）。

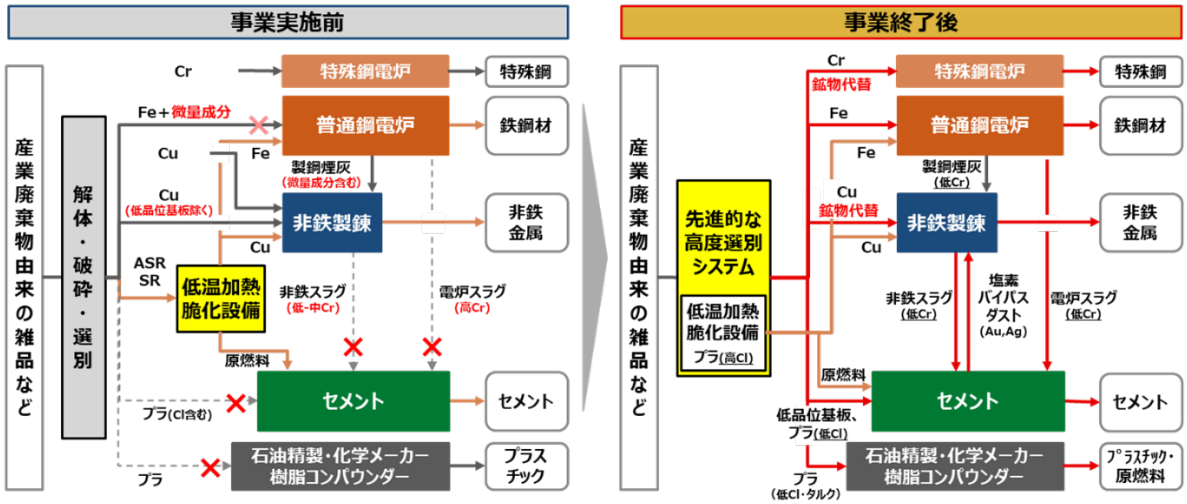
[1] 環境省「省 CO_2 型リサイクル等設備技術実証事業」（平成 30~31 年度）

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　事業実施後に期待される未資源化物質の再資源化と取引の拡大



（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

2.1.1. 事業全体像

各素材産業は、それぞれ自産業に流れ込む選好・忌避物質の量を購買時や再資源化時に把握しているが、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。

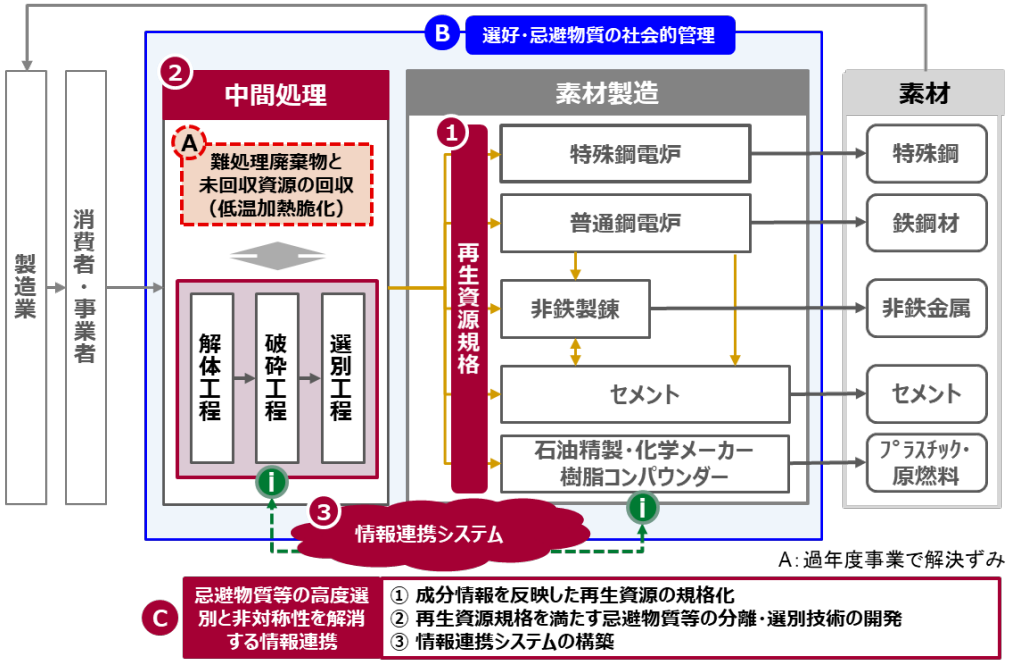
そこで、鉄鋼電炉、非鉄製錬（銅、鉛、亜鉛）、セメント、樹脂にとっての再資源化忌避物質（例：銅、錫、クロム、塩素、臭素等）を取り上げ、それらが静脈産業でどのように流通しているのかを推計し、忌避物質等管理技術が必要とされる箇所を検証するとともに、どのような仕様の技術が必要とされるのか検証した（図表 3：課題 B）。

また、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上、これを満たす忌避物質等の分離・選別プロセスや要素技術の確立を目指し、検討および実証を行った。また、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、複数事業者間で管理・運用できる情報連携システムの構築に向けた検討を行った（図表 3：課題 C、2.1.2）。

再生資源規格として、忌避成分に言及した鉄鋼向け鉄スクラップ規格案やセメント向け廃棄物規格案を具体化するための検討を行った（2.1.3）。また、低品位基板等を対象として、疑似重液等を用いた樹脂成分と金属成分の分離可能性を実証することに加えて、そもそも低品位基板をつくらず、各素材産業が得意とする成分をそれぞれ寄せた各用途に適したスクラップ等をつくる解体・破砕・選別プロセスの具体化を目指し、検討を行った（2.1.4）。さらに、忌避物質等の分離・選別プロセスや要素技術として、磁着物中のマルテンサイト系ステンレス鋼の分離を念頭においた、画像解析等による体積等推計と電磁ファインダーの組み合わせ、また LIBS ソーターの実証を行った（2.1.6）。情報連携システムの構築では、どのような使用済み製品のフィードがあり、どのような解体・選別プロセスを適用されて得られた産物なのかを 1 日ロット単位で記録し、そこから産物組成と再生資源規格の充足状況を予測して素材産業に開示していく情報連携（画像認識、自動計算、QR コード等識別）の具体化を図った（2.1.5）。

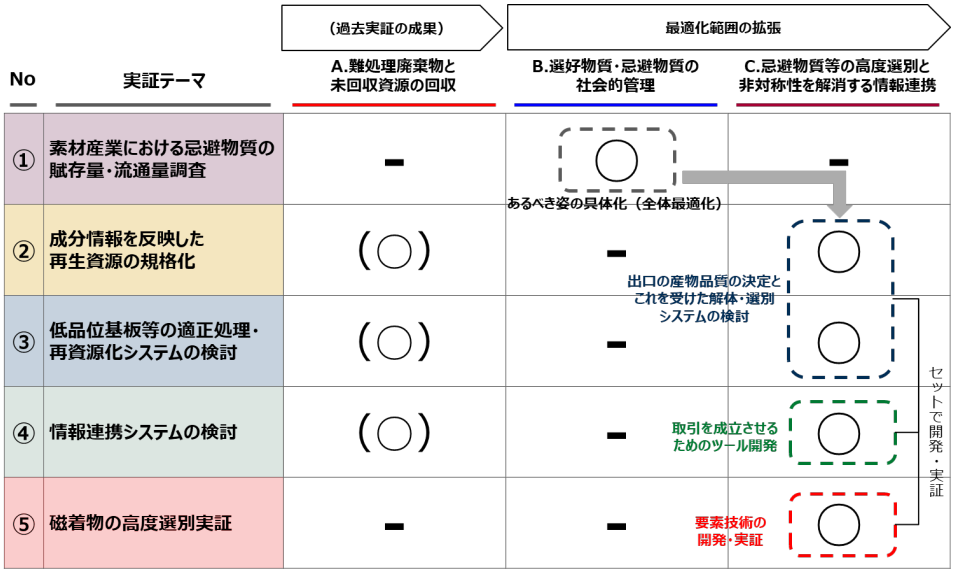
本事業の特徴は、選好物質・忌避物質を社会的に関するためのあるべき姿を具体化すると同時に、あるべき姿を実現させるため、出口品質の決定と解体・破砕・選別システムの検討、取引を成立させるためツール（情報連携）の開発、また必要な要素技術の実証を一体として実施することにある（図表 4）。これら実証の成果として、期待される環境影響改善効果や CO_2 排出量の削減効果の算定（2.1.7）と、金属リサイクルビジネスの活性化と事業の出口戦略の検討（2.1.8）を行った。また、現地視察会への開催（2.1.9）や共同実施者等との打ち合わせの実施（2.1.10）、評価審査会への出席（2.1.11）を通じて、有識者からの助言をもとに、円滑かつ効果的な実証の実施に努めた。

図表 3　本事業で解決を目指す課題（課題 B・課題 C）



（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



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

2.1.2. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証事業１）

各素材産業は、それぞれ自産業に流れ込む選好・忌避物質の量を把握しているが、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、セメント、樹脂にとっての再資源化忌避物質を取り上げ、それらが静脈産業でどのように流通しているのかを推計し、忌避物質等管理技術が必要とされる箇所を検証するとともに、どのような仕様の技術が必要とされるのか検証した。

2.1.3. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証事業２）

スクラップ等の再生資源は、排出源や形状等に依存するかたちで取引されている。そこで、素材産業に流入する忌避物質の管理を目的に、素材産業の要求仕様に応じた再生資源の規格を検討した。

2.1.4. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証事業３）

現状の中間処理は、複数の素材産業の要求仕様を同時に満たす解体・破砕・選別システムにはなっていない。例えば、貴金属回収後の基板には銅が残っているが、非鉄製錬向け原料の水準を満たさず、銅は未回収のまま、低品位基板として処分されている。そこで、金属や樹脂の成分バランスと用途に応じた中間処理システムを検討した。また、素材産業の要求仕様を満たせない低品位基板には、樹脂等も随伴するため、必要な処理を適用するための選別技術（重液選別等）の実証を行った。

2.1.5. 情報連携システムの検討（実証事業４）

再生資源規格（実証事業２で実施）の構築によって、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が、現在の取引では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。そこで、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、選好・忌避物質の含有状況を複数事業者間で管理・運用できる情報連携システムの構築を目指し、検討を行った。

2.1.6. 磁着物の高度選別実証（実証事業５）

解体工程等を見直しても素材産業における要求水準を満たすことが難しい産物として、鉄鋼電炉向けに供給される磁着物がある。磁着物中の銅やクロム含有量は増加傾向にあり、銅は鋼材の品質異常の原因になる。また、クロムは最終的なセメント再資源化の障害となる。今回は特に磁着物中のステンレス鋼（マルテンサイト系）に注目し、これらの導電性に着目した新たな選別技術として電磁式ファインダーの実証を行った。また、識別能力を高めるため、画像解析等を用い

た体積推計技術の適用等も併せて検討するほか、比較対象として元素定量分析を行う LIBS ソーターによる実証も行った。

2.1.7. 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

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」および「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し試算を行うとともに、CO_2 排出削減量を算出した。

2.1.8. 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および経済性を確保したリサイクルビジネスの活性化、加えて自動車や家電・小型家電への応用可能性が見込まれることから、これらの展開可能性について検討した。また、事業の将来的な展開可能性を経済的・技術的側面から評価するとともに、それらを実現するための、実証事業終了後の事業展開に係る出口戦略について検討した。

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

業務の円滑な実施のため、業務実施期間内において、評価審査委員１名程度、環境省担当官１名程度、「令和２年度地球温暖化対策に係る技術実証事業管理・検討等事業委託業務」の受託者２名程度による現地視察会をサナース木更津マシンセンター（千葉県木更津市）にて１回開催した。また、現地視察会に併せて、本業務の進捗報告を行った。

2.1.10. 共同実施者等との打合せ

業務実施に当たって、共同実施者である太平洋セメント株式会社と、成分分析の実施、樹脂・金属成分を分離する要素技術の検討について、イーペックスジャパン株式会社と、電磁式ファインダーによる選別実証について、打ち合わせを実施した。

2.1.11. 評価審査委員会の出席

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

2.2. 各実施事項

2.2.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証事業１）

2.2.1.1 マテリアルフロー推計の目的

各素材産業は、それぞれ自産業に流れ込む選好・忌避物質の量を購買時や再資源化時に把握しているが、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、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を取り上げ、それらが静脈産業でどのように流通しているのかを推計するべく、事業目的に照らし合わせて妥当なバウンダリ（実態値把握および推計を行う範囲）を設定するとともに、マテリアルフローの作成に必要なデータに関係する既存各種文献（学術論文を含む）や統計等の収集を行った。

また、収集したデータや、不足するデータを補うために実施した対象物の成分分析の実施結果をもとにマテリアルフロー図を作成し、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。

より具体的には、我が国の資源循環を多様な形で支えているセメント産業にとって、昨今最も懸念材料であるとも言える忌避物質のクロムの混入源を明らかにするための基礎的な情報を収集、可視化することを目的とした。定量化可能な部分については定量的に描き、そのうえで、定性的にしか描けないフローについては定性的な傾向を調査した。

2.2.1.2 バウンダリと対象鉱種の設定とデータの出典

本事業全体の作業を鑑みつつ、本報告におけるシステムバウンダリを検討する。本事業は素材産業の資源効率の向上を念頭においているが、ここで言う素材産業とは、鉄鋼、非鉄製錬、並びにこうした素材産業から出る副産物を受け入れるセメント産業を基軸に考えることとする。樹脂も検討対象ではあるが、プラスチック素材関連産業のすべてを念頭におくことは現実的ではない。よってより限定的に、鉄鋼電炉、非鉄ベースメタル 3 鉱種（銅、鉛、亜鉛）製錬、セメント、プラスチックリサイクル産業を対象とする。これらにおける主たる忌避物質として注目すべきは銅、錫、クロム、鉛、ハロゲンになる。銅が鉄鋼にとっては製品中のトランプエレメントとなること[2]、ハロゲンの中でも塩素に対する懸念が極めて大きいことはよく知られ[3]、また徐々にだが対策も考えられているが十分とは言えない。他方で、本事業のヒアリングにより、クロムが様々な場面で忌避物質となっていることが既に分かっている。そこで、本報告においては、クロムについて重点的にマテリアルフロー分析を実施し検討を行うとともに、銅と塩素については既存の文献等の知見の整理を行うこととする。

システムバウンダリは、特にクロムについて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、樹脂）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

[2] 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）

[3] 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）

心に検討することで本事業の目指すソーティングセンター4.0 の設計に対する基礎情報を付与することを考える。

データに関しては、各種統計書並びに論文等からのデータを基本とし、本事業内で実施した分析結果等を可能な範囲で反映することでこれを改善、もしくは拡張することを目指す。

2.2.1.3 マテリアルフロー分析

本研究では、クロムのフローを推計するためにマテリアルフロー分析(Material Flow Analysis:MFA)と呼ばれる手法を用いる。鉱石が製錬されてフェロクロム・金属クロムとなり、鉄を中心としてその他の物質に添加されて製品となる。そしてその製品が消費者に渡る。それ以外ではそれぞれの段階で海外から輸入したり海外へ輸出したりする。そして消費された後は主物質に付随してリサイクル、ないしは最終処分される。マテリアルフロー分析とはそれらのライフサイクルを明確なシステム境界線を設けて、対象となるものの流れを把握し、評価・解析するものである。

フローを推計する手法は大きく 3 つに分類できると考えられている。それらには、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などから、適した手法を選択する必要がある。その 3 つの方法は、「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)」などと便宜上呼ばれている。

「積み上げ法」は、各種統計資料などからデータを積み上げる方法で、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の構成などを乗じることで求めるものである。しかしながら、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。「投入産出法」は、産業連関表を援用する。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が、これを物量単位へと変換することで MFA を実施するものである。部分的に物量への換算モジュールを実装するものから、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ものまで数多くある。その利点は、基礎に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があるために、これを変換して求められるマテリアルフローについて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・素材などのマテリアルフローを描くには、分類の粗い部分と無駄に細かい部分が混在することなどが問題点である。とあるシステムに対しての投入と産出だけを見ることで詳細は捨象してしまう本当の意味での「トップダウン法」もあるが、今回のように我が国の経済内でクロムがどのように流れるのかといった研究には全く利用できないのでここでは触れない。「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。

本報告では、一つの手法で完全に描ききるだけの情報は存在していないことから、「積み上げ法」をベースにしたボトムアップ的アプローチで推計を行うが、ヒアリングを参考にしながらトップダウン的に、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などから得ることで一部のフローを描かざるを得ない。つまり本報告のマテリアルフロー分析の手法は「ハイブリッド法」であると考えることができる。

クロムは基本的に単体で移動することはなく、添加物として鉄を中心として他の物質に付随し

ているため、単にクロムの純分量だけでなく主物質のバルク量を用いたフローも同時に推計する。また、本研究の目的がセメントに投入されるクロムの要因を特定することを考慮し、最終的にセメントに投入され得るクロムのフローを推計する。

2.2.1.4 クロム投入に関するフロー

データについては、本報告では統計や既発表論文を中心に整理を試みた。具体的には参考文献[4][5][6][7][8][9][10][11][12]を用いた。基本的には鉄鋼そのもののフローを抑えながら、そこに文献等から得られる含有量情報を乗じることでフローを抑えることとした。今回用いた鉄鋼材料におけるクロム含有量の情報を図表 5 に示す。具体的には文献[13]を参考に設定した。

図表 5　特殊鋼の種類別クロム含有率

Material	Cr contents(%)
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

2.2.1.5 鉄鋼産業におけるクロムのスクラップからのフローについて

天然資源由来のクロムについては概ね制御されていると考えるべきであり、ここで我々が検討しなければならないものは、スクラップとして集められ投入されるものに、どのようにクロムが存在し、そしてそれがその下流へどの程度流れていくかである。特に特殊鋼スクラップとして回収され特殊鋼電炉に再利用されるのではなく、クロム高含有スクラップであるにもかかわらず普通鋼電炉に投入されてしまう非意図的混入分の推計が今回の大きな目的である。

普通鋼産業の主なクロム混入要因は転炉や電炉に投入される鉄スクラップであるため、鉄スクラップのフローを推計した。まず文献[4][5]より普通鋼くず、特殊鋼くずの転炉並びに電炉消費量を

4 日本鉄鋼連盟「普通鋼・特殊鋼 品種別・用途別受注統計」(2020)
5 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)
6 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)
7 鉄鋼新聞社「鉄鋼年鑑 令和元年度版」(2019)
8 関東鉄源協同組合「関東鉄源共同組合 HP」http://www.kantotetsugen.com/index.html (accessed Jan. 19, 2021)
9 日本鉄源協会「鉄源年報 第 31 号」(2020)
10 日本鉄源協会「クォータリー てつげん Vol.64」(2015)
11 日本鉄源協会「クォータリー てつげん Vol.83」(2020)
12 鉄鋼新聞社「鉄鋼年鑑 平成二十七年度版」(2014)
13 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

得ることで({1}～{4}:図表 6 参照、以下同様)、炉別に全鉄スクラップの消費量を求めた({5}、{6})。それを生産量で除することで炉別に生産量あたりのスクラップ消費原単位を得た。この原単位が普通鋼と特殊鋼で同様であるとし、普通鋼/特殊鋼、転炉/電炉のそれぞれの生産量からそれぞれの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製造に消費されていることを考慮して、すなわち{11}、{12}をそれぞれ{2}、{4}と同値とみなし、{13}、{14}を 0 として、残りの箇所はそれぞれ合計値から減ずることで推計値を得た。

図表 6　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

2.2.1.6 成分分析の実施

前節では、統計情報や既存文献の数値を用いて、鉄スクラップに随伴して流通されるクロム量を推計している。しかし、中国による輸入規制後、鉄スクラップにおけるクロムの含有量が変化している可能性がある。現状の流通量を正確に把握するためには、中間処理事業者と鉄鋼電炉事業者間で融通される鉄スクラップ中に、どの程度クロムが含まれているのか明らかにする必要がある。鉄スクラップの取扱量は膨大であり、鉄鋼電炉での検収時に、都度スクラップの分析を実施しているわけではなく、成分情報は蓄積されていない。

そこで、鉄スクラップのうち、ヒアリングによりクロム含有率が高いと推測された「新断、ダライ粉、シュレッダー」を対象に、中間処理事業者でサンプリングを実施したうえで、成分分析を行った。クロムのみでなく、鉄鋼電炉における忌避物質（銅、鉛、錫など）も分析対象元素とした。

新断スクラップは、鋼板の加工工程から排出されるものが多く、スクラップ毎の成分のばらつきは小さいことが想定されること、また、X 線を照射できる十分な面積を有することから、X 線の照射箇所を事前に研磨したうえで、ハンドヘルド XRF 装置による表面分析によって、微量成分の分析を行った（図表 7）。

図表 7　分析対象の新断スクラップ（一例）

（出所）株式会社ツルオカ提供

一方、ダライ粉は形状が様々であり、表面を研磨して X 線を照射することは困難である。また、シュレッダースクラップは、破砕した母材により、めっきの厚みも様々であるほか、場合により、銅線などを抱き込んだスクラップも存在するため、表面分析によって正確な分析値を出すことは困難である。そこで、ダライ粉およびシュレッダースクラップを 500g～3kg 程度、高周波炉もしくは抵抗加熱炉を用いて溶解し、インゴットを製造したうえで、成分分析を行った。

発生源のそれぞれ異なるダライ粉を 5 バッチ分、シュレッダースクラップを 5 バッチ分手配し、それぞれ溶解処理を行った。炉内は 1650℃まで昇温し、完全溶解が確認されたのち、20~30 分程度温度を保持し、その後炉冷を行った。アルゴンガス雰囲気下で溶解試験を行い、有機成分由来の白煙が確認された場合には、適宜アルゴンガスをパージして、白煙による影響を軽減させながら溶解試験を行った。

ダライ粉を溶解する際、嵩密度の低さが影響し、十分な誘導加熱を実施することが困難であったため、1 つのバッチを除いては抵抗加熱炉を用いた。また、表面の油脂分を除去するため、事前に乾式処理（脱脂炉）を行った（図表 8）。

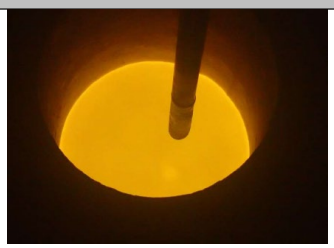
また、シュレッダーを溶解する際、坩堝の長径より大きな粒径のスクラップが含まれており、そのままでは棚釣りが発生する可能性があったほか、空隙により十分な量を溶解できないため、破砕機で事前に粒径 10~20mm 程度になるよう前処理を行った（図表 9）。

図表 8　ダライ粉の溶解試験の様子

ダライ粉（有姿）	ダライ粉（脱脂後）
坩堝に仕込んだ状態（溶解前）	**作成したインゴット（上面）**

（出所）株式会社超高温材料研究センター提供

図表 9　シュレッダースクラップの溶解試験の様子

シュレッダー（破砕品）	坩堝に仕込んだ状態（溶解前）
坩堝に仕込んだ状態（溶解中）	**作成したインゴット（上面）**
	

（出所）株式会社超高温材料研究センター提供

2.2.1.7 技術仕様の特定に関する検討

上記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し、忌避物質の分離技術が必要な個所を検証した。また、流通形態や各素材産業における要求水準を踏まえて、要求される技術仕様を特定した。

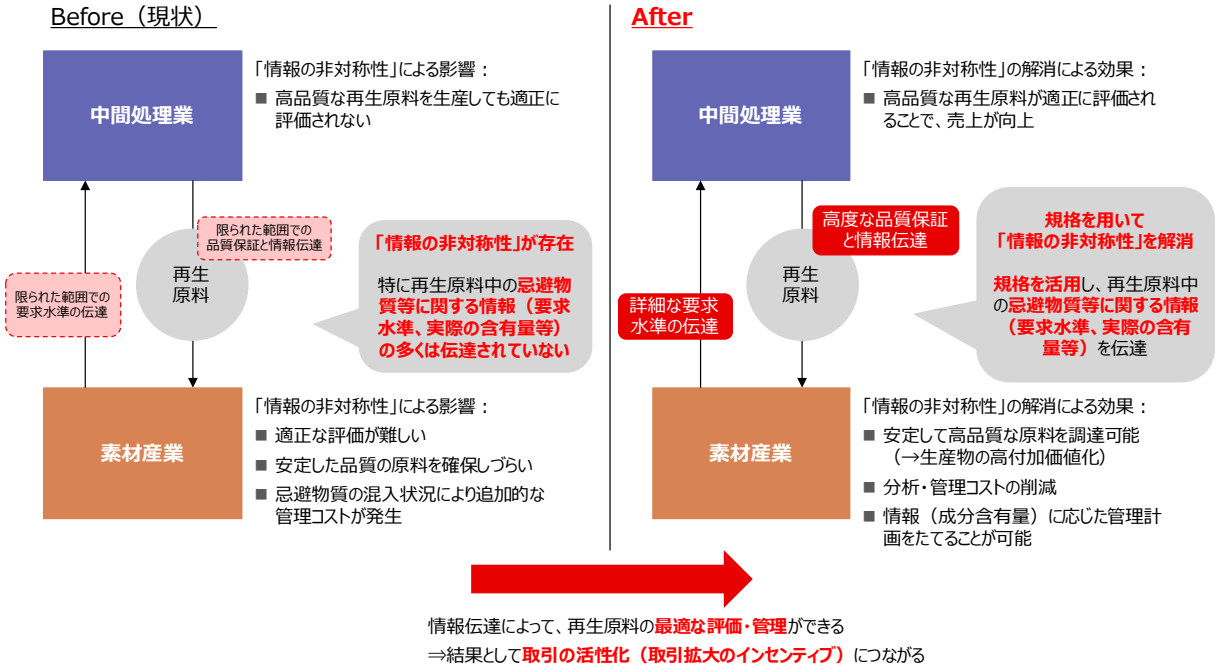
2.2.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証事業２）

2.2.2.1 成分情報を反映した再生資源の規格化の目的

新興国等における廃棄物の輸入規制等の整備が進むなか、わが国では国内における雑品等の処理量が増加し、再生資源中の微量成分（忌避物質等）が増加している。忌避物質の混入は、素材産業における操業に悪影響を起こしたり、対策のためのコストを増加させたりするなど、事業者にとってのコストやリスクとなる。こうした状況の中、素材産業が再生資源を利用し続けるためには、各素材産業の要求を適切に満たす供給を行う必要がある。現状、スクラップ等の再生資源は、排出源や形状等をもとに取引されている場合もあるものの、忌避物質等に関する情報（成分含有量等）は詳細に伝達されておらず（「情報の非対称性」が存在し）、要求に沿った製品であるか否かの判断が難しい場合がある（図表 10）。これは、再生資源の適切な評価・管理の妨げる一つの要因となる

そこで本事業では、忌避物質の観点から再生資源が適切に評価・管理されるよう、素材産業からの要求（忌避物質の成分情報に関する要求）を踏まえた（要求に沿っているか否かを判断するための）再生資源の規格案を作成する。具体的には、素材産業における再資源化忌避物質に着目し、中間処理事業者と素材生産事業者間の取引において利用されているスクラップ等の分類（品質等級）に関する規格案を作成した。規格案においては、再生資源における分類（品質等級：A～D 級等）を設定し、各類型（品質等級）における要求水準を記載した。

図表 10　忌避物質等の含有量に着目した規格検討の背景と展開イメージ



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

2.2.2.2 成分情報を反映した再生資源規格案の検討

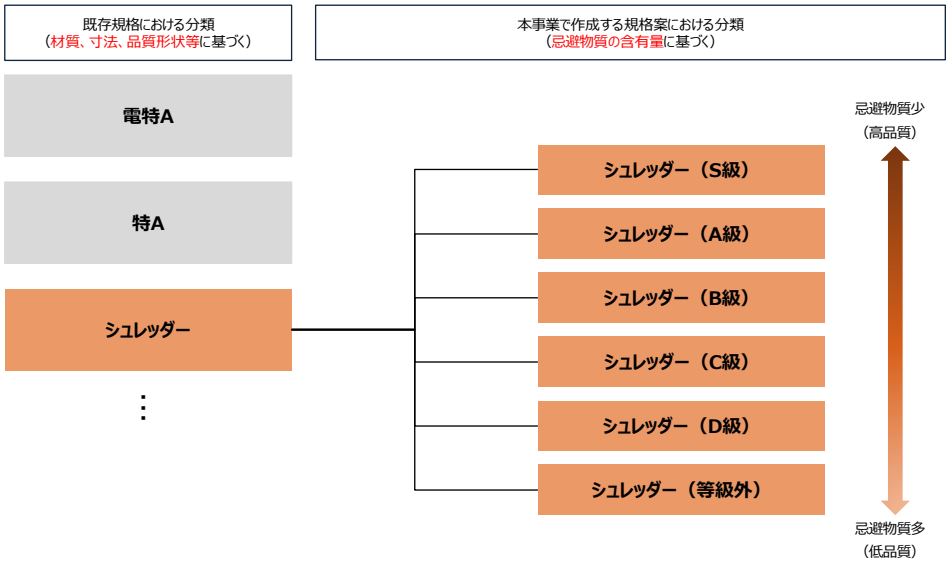
（1） 素材産業における規格・検収基準等の調査

本事業では、図表 11 に示す通り、既存規格における再生資源の分類を細分化することを想定している。そのため、再生資源の規格案を検討するにあたっては、はじめに各素材産業における再生資源の分類（品質等級）に関する既存規格の有無・内容を調査した。また、規格案を事業者の実態に即したもの（実際に活用されるもの）とするため、既存規格の運用実態や課題、新たな規格の活用可能性に関する情報収集も行った。

なお、研究会での議論をもとに、本事業では、鉄スクラップ（シュレッダー）および廃プラスチック原燃料を対象となる再生資源として設定している。なお、鉄スクラップはクロムの混入や雑品の国内処理量の増加に起因する銅の混入等の影響を受けているほか、廃プラスチック原燃料は新興国等での廃プラスチックの輸入規制を受けて国内でのさらなる有効利用が期待されている（ただし、原燃料として使用する際には、塩素やクロム等が忌避物質となる）。これらの取引の維持・活性化に向けて、今回作成する規格が貢献することが見込まれる。

具体的な実施事項として、文献やヒアリングによって、分類（品質）に関する既存規格の有無・内容（分類（品質等級）の判断軸として設定される項目、各類型（品質等級）において求められる要求水準）、既存規格の運用実態（検収方法等）、新たな規格の活用可能性に関する調査・検討を行った。

図表 11　既存の分類規格と本事業で作成する分類規格案の関係



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

(2) 再生資源規格案の検討

再生資源の分類（品質等級）に関する既存の規格案を作成するにあたっては、品質の判断軸とすべき項目（管理・伝達対象とすべき項目）、各項目について求められる要求水準の段階、段階に応じた類型（品質等級）を設定する必要がある。本事業では品質の判断軸とすべき項目（管理・伝達対象とすべき項目）を設定するために、文献およびヒアリング調査によって、各素材産業において特に悪影響を与えている（与える可能性のある）忌避物質を明らかにし、管理・伝達対象とすべき項目として整理した。加えて、「2.2.2.2（1）(1) 素材産業における規格・検収基準等の調査」で明らかにした既存規格の項目も管理・伝達対象とすべき項目として同時に整理した。また、文献およびヒアリング調査によって得られた再生資源の受入管理の実態、再生資源における忌避物質の含有状況等に関する情報を参考にしながら、各項目について求められる要求水準の段階、段階に応じた類型（品質等級）の設定を行った。

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（実証事業３）

2.2.3.1 全体最適化を実現する処理プロセスの検討

従来、樹脂の割合が多く、資源価値の低い使用済み製品の一部は、中国等に輸出され、国外で処理されていた。しかし、中国政府による輸入規制以後、こうした使用済み製品等を輸出できなくなり、国内の中間処理事業者で処理されるようになっている。

その結果、鉄スクラップ等の再生資源中の忌避物質が増加しているほか、非鉄製錬の受入基準を満たさない低品位人工鉱物（低品位基板等）が増加している。また、鉄や銅を回収した際の残渣（シュレッダーダスト等）に含まれる忌避物質（クロム、塩素など）も増加しており、セメント産業での受入が困難になりつつある。また、これら使用済み製品に含まれる樹脂分は、石油精製・化学メーカーや樹脂コンパンダーが利用可能な品質を満たしていない（図表 12）。

製造業では、製造原価低減の観点から、製品中の貴金属（金など）の使用量を削減しており、こうした取り組みが進むことで、使用済み製品の資源価値は低減していくことが予想される。その結果、低品位鉱物を処理する必要性が高まる可能性がある。また、再生資源中の忌避物質を十分に分離できない場合、鉄鋼電炉における再生資源利用率の低下や、セメントにおけるシュレッダーダストの受入量の削減とこれによる最終処分量の増加に繋がる可能性がある。

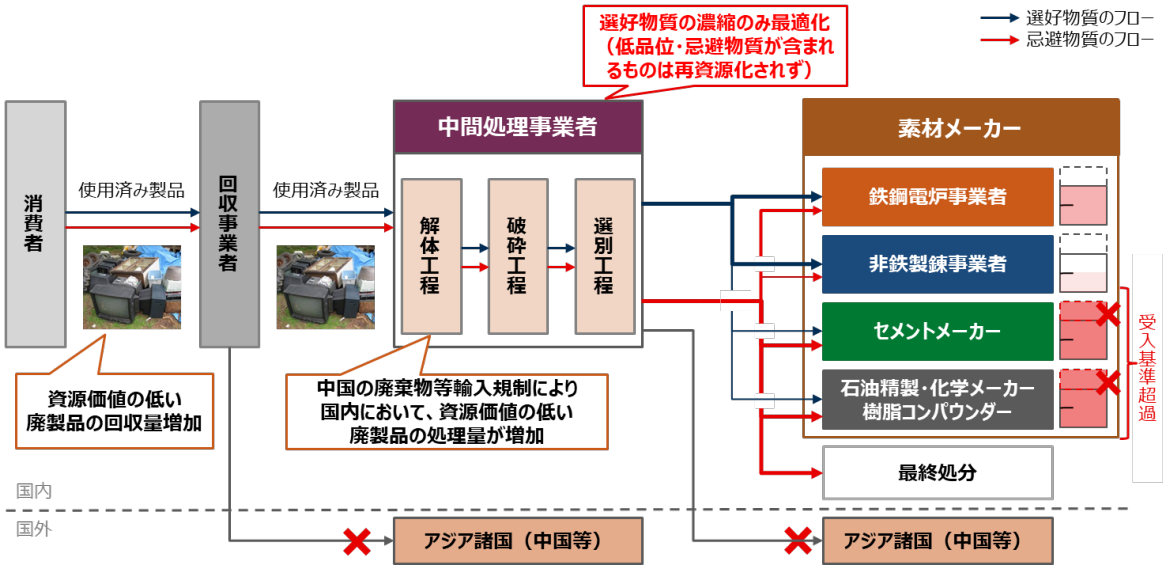
そのため、資源価値の低い使用済み製品を対象に、選好物質の濃縮に加えて、目的回収物や副産物、残渣に分配される忌避物質までを管理できるよう、中間処理工程における解体・破砕・選別プロセスを見直す必要がある（図表 13）。

そこで、廃自動販売機および使用済み小型家電をケーススタディとして、忌避物質を含む低品位人工鉱物の発生を抑制し、また、低品位人工鉱物から各素材産業向けの資源を回収するためのシステム・要素技術を検討した。

具体的には、まず、事前の解体を緻密化することで、品位の低下に繋がる部材を事前に解体・回収し、低品位人工鉱物の発生量を低減することを検討した。忌避物質が含まれる部品を予め特定できれば、破砕後の選別に係るコスト・手間を軽減でき、効率的な分離が期待される。そこで、中間処理事業者へのヒアリングを実施し、忌避物質が含まれる部品や当該部品の解体実施可能性を、ヒアリングによって明らかにした。

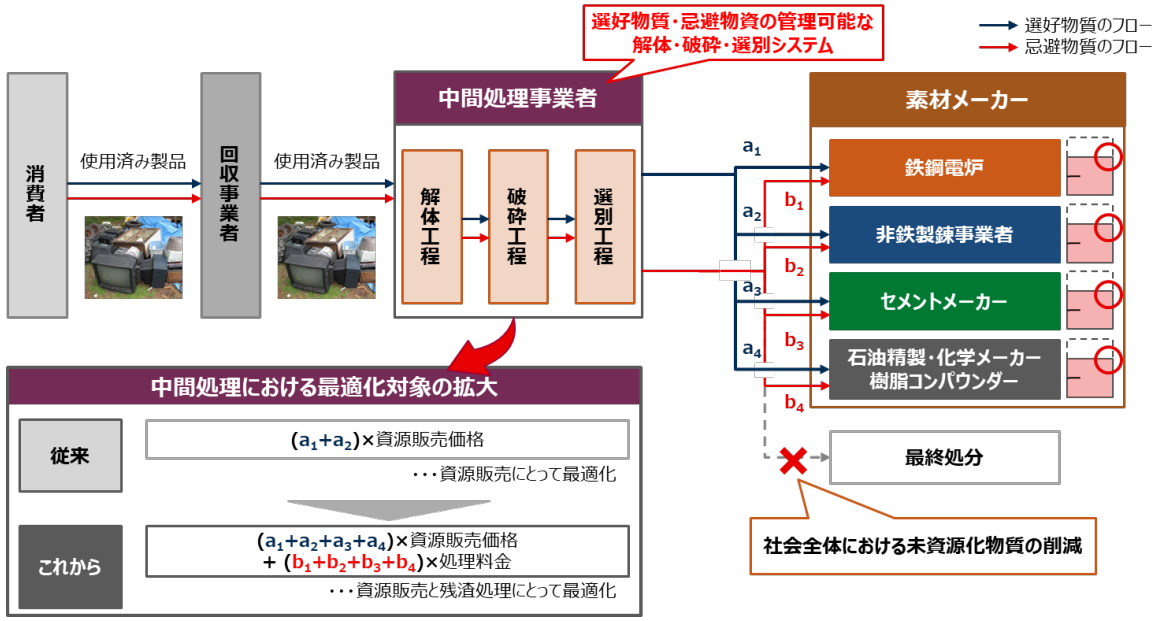
一方、こうした部品の特定が困難なほか、低品位の小型家電のように、個々の製品を解体していると、経済的に見合わない製品群も存在すると考えられる。そこで、先に破砕を行ったうえで、発生した低品位人工鉱物を、高度に選別するためのシステムを検討した。また、樹脂と金属の比重の差に注目し、重液および疑似重液（流動層）を用いて、要素技術の実証を行った（図表 14）。

図表 12　中間処理に投入される忌避物質の増加と素材メーカーにおける受入制限



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

図表 13　中間処理における最適化対象の拡大と取引拡大



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

図表 14　対象物に応じた解体・破砕・選別プロセスの検討

①事前解体により低品位人工鉱物の発生量を低減する

- 忌避物質が含まれる部品を特定したうえで、予め解体・回収しておくことによって、破砕機の投入物中に含まれる忌避物質を削減する
- 個々の製品を特定したうえで、適切に処理を行う必要がある

②破砕後の低品位人工鉱物から高付加価値な資源を回収する

- 破砕後の副産物・残渣等を精緻に選別することで、含有する有用金属（鉄、非鉄）を回収しつつ、セメント産業や樹脂製造業での利用も可能な資源を同時に回収する
- 個別管理は不要であるが、事前解体と比較して濃縮に多くの労力・コストを要する

	自動販売機	小型家電		（参考）		
		高品位（携帯電話、カメラ等）	低品位（その他雑多なもの）	雑品	自動車	家電
排出形態	個別管理可	個別管理可／雑多（自治体由来）	雑多	雑多	個別管理可	個別管理可
資源価値	中	高	低	低	高	中
管理対象部品・物質	フロン、蛍光管* *水銀使用の場合	電池	（電池）	-	エアバッグ、フロン	フロン
プロセス検討指針	①	①	②	（②）	（①）	（①）

（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

2.2.3.2 樹脂・金属成分を分離する要素技術の検討

低品位人工鉱物から、樹脂・金属成分を分離するための要素技術を実証するため、重液および流動層による選別試験を実施した。小型家電を破砕および選別（磁選・風選）した際に得られる重ダストを対象サンプルに選定した（図表 15）。

有姿の重ダストは、銅線等が複雑に絡まっていたため、物質の比重に応じた選別ができるよう、スクリーン径Φ20mm で予め破砕を行った。また、重液・流動層では、微粒群の選別は困難であると予想されたため、上記の破砕品を篩選別し、篩目Φ5mm 上に残ったもののみを、重液・流動層選別の試験サンプルとした。尚、篩目Φ5mm 下の試料は、再びΦ2.36mm で篩選別し、篩上と篩下をそれぞれ比重差選別（エアテーブル）によって処理した。

樹脂の多くは比重 1.8 未満である一方、アルミを除く回収対象の金属は、多くが比重 7.0 以上である。本選別試験の目的である樹脂と金属の分離を実現するためには、これらの間において、適切な比重を選定し、金属と樹脂がそれぞれ濃縮した産物を回収することが求められる。

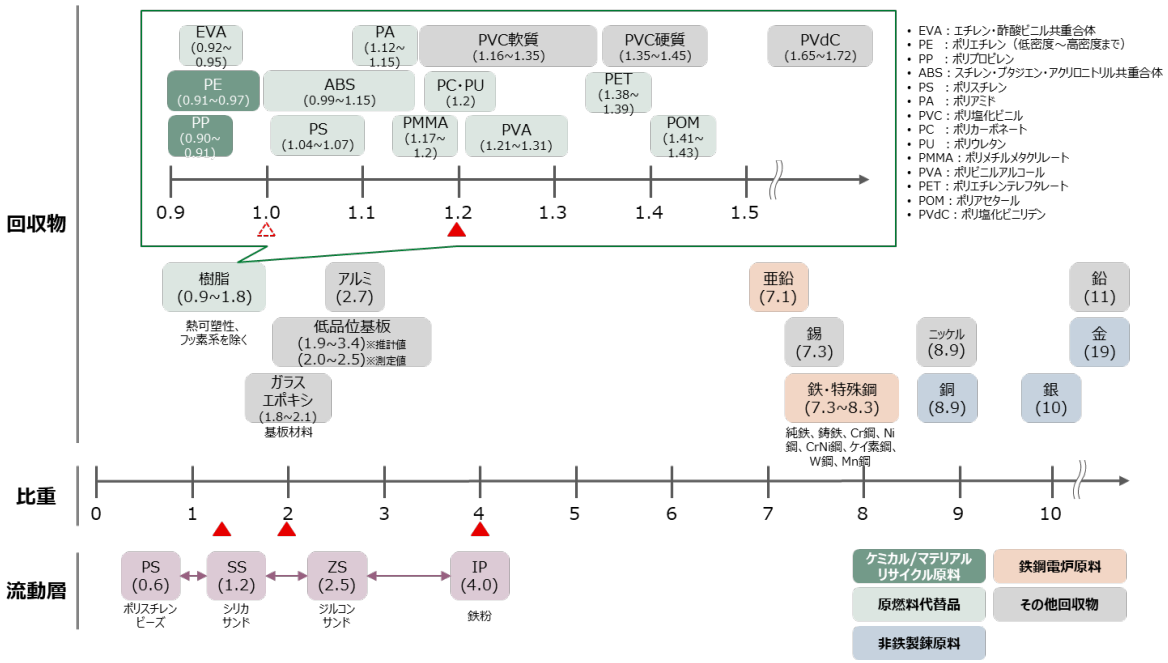
そこで、比重検討の 1 つの基準として、ガラスエポキシを用いた基板を参考にした。先行研究のレビューや比重の簡易測定の結果、ガラスエポキシ基板（一部素子や銅等が付着したもの）の比重は 1.9～3.4 と推測された。そのため、重比重側では低品位基板を含まない産物を回収し、低比重側では低品位基板を漏れなく回収することを目的に、比重 2.0 および 4.0 を閾値として設定した。

また、樹脂のマテリアルリサイクルや工業炉での原燃料利用を進めるうえで、塩素含有量を抑えることが必要になる。そこで、PVC の分離を念頭に比重 1.2 を閾値として設定した。さらに、マテリアル利用が期待される PE および PP を回収するため、比重 1.0 を閾値とした（図表 16）。

図表 15　試験サンプル（小型家電由来の重ダスト）の回収フローと重ダスト（有姿）の写真

（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

図表 16　目的回収物等の比重と本試験における比重の選定



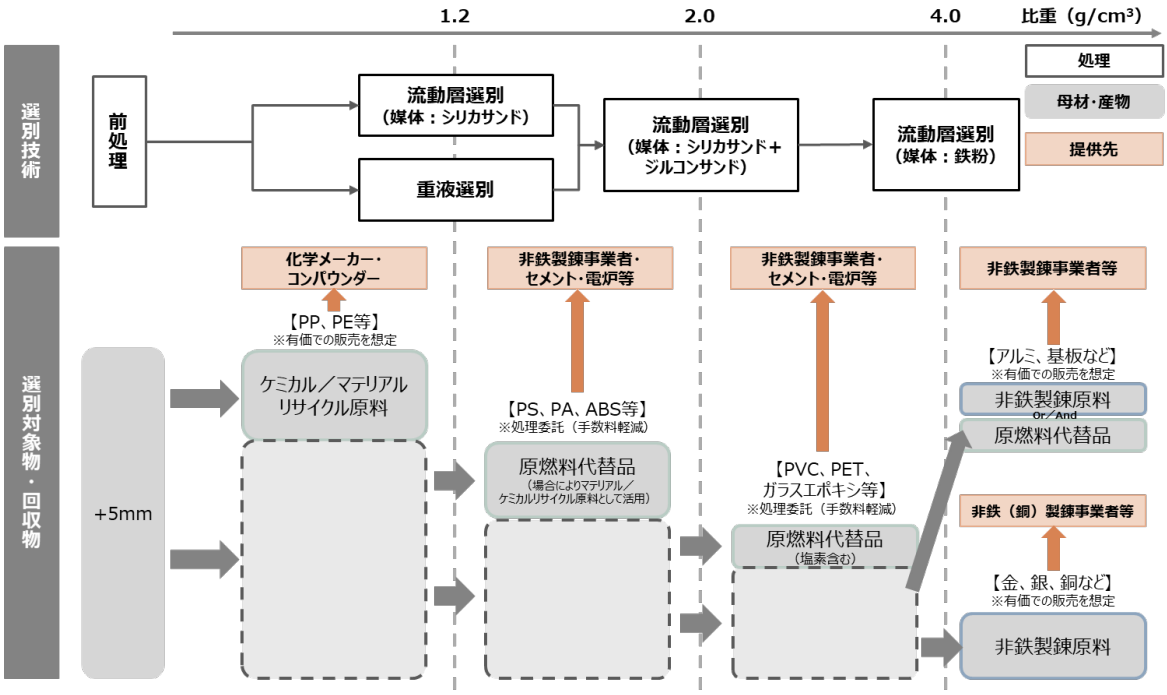
（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

選別試験は、重液および流動層媒体を、記述の通り設定した比重に調整して行った。比重 1.2 のみ、重液および流動層（シリカサンド）の双方を用いて試験を実施し、比重 2.0 はシリカサンドとジルコンサンド、比重 4.0 は鉄粉を用いて流動層のみで試験を行った。それぞれ、以下の産物を回収することを想定して、詳細な選別条件の検討を行った（図表 17）。

- 比重 1.2 での浮上物：樹脂のケミカル・マテリアルリサイクル原料／原燃料代替品
- 比重 2.0 での浮上物：原燃料代替品
- 比重 4.0 での浮上物：非鉄製錬原料（アルミ、銅など）／原燃料代替品
- 比重 4.0 での沈降物：非鉄製錬原料（銅）

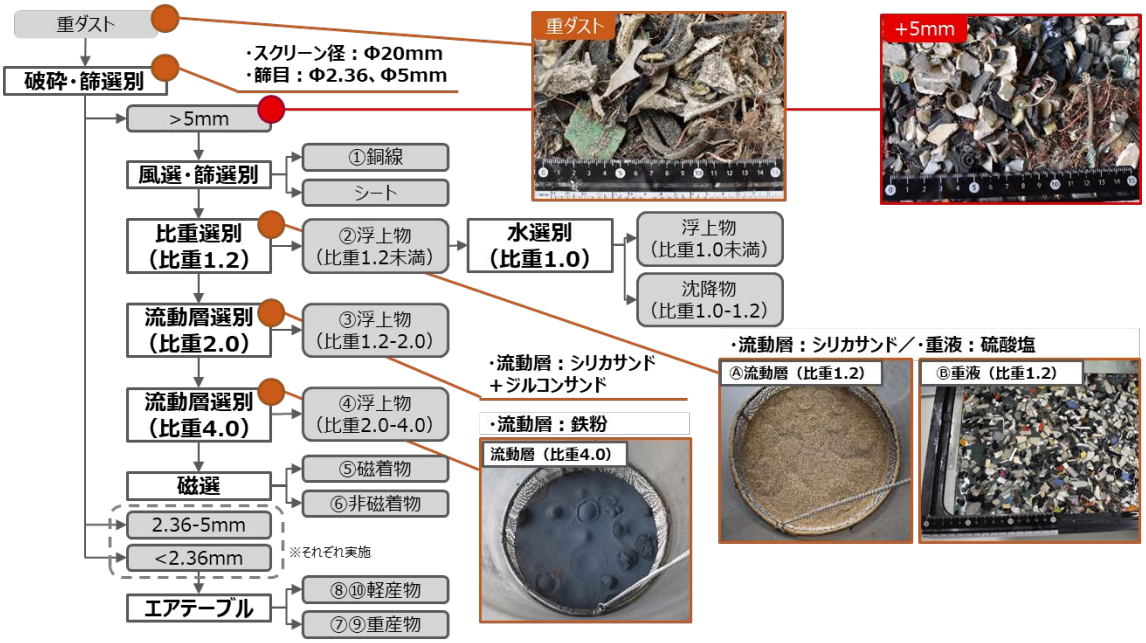
詳細な試験の実施フローや流動層・重液の写真は図表 18 に示す通りである。

図表 17　選別技術・選別条件と対象物および目的回収物



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

図表 18　試験実施フローとサンプル・試験装置のイメージ



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

2.2.4. 情報連携システムの検討（実証事業４）

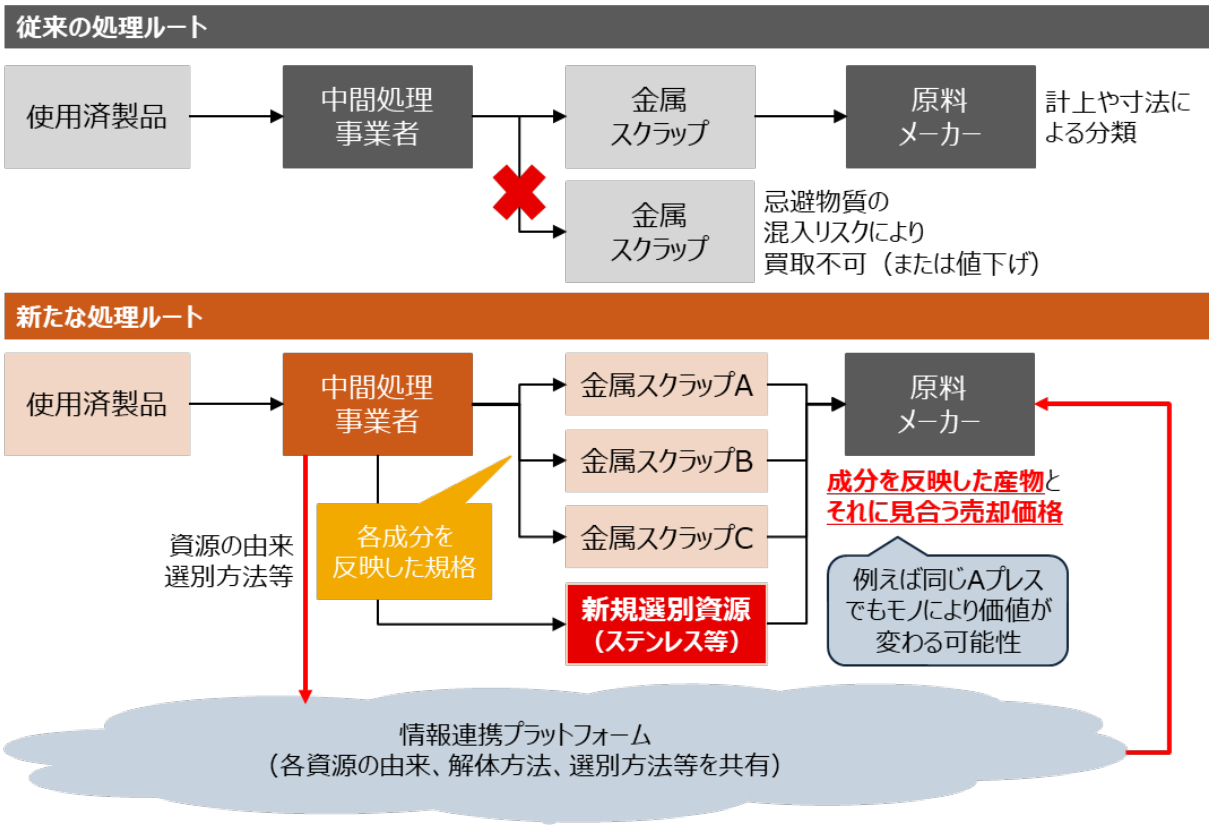
2.2.4.1 情報連携システムの目的

金属リサイクルを中心とした再生資源の取引においては、スクラップに含まれる成分情報などの不足により、情報の非対称性に起因する「市場の失敗」がしばしば起きていると考えられる。ターゲットとなる資源の品位など、選好物質については管理される場合もあるが、例えば忌避物質の含有情報が不明であるために取引が成立せず、選別技術や成分情報を客観的に示す方法が原因となって本来の価値よりも低い資源価値で取引されている場合がある。

2.2.2 で検討してきた再生資源規格によって、素材産業による要求仕様（もしくは中間処理工程で目指すべき仕様）は特定できるが、現在の取引では成分情報が明らかになっていないため、素材産業側での再生材の客観的評価が困難である。

こうした中、中間処理工程において各再生資源の由来（母材）や解体方法、選別方法等を記録し、販売する再生材に紐づけた管理が実現できれば、各規格への適合可否が判断できるようになり、再資源の売り手（中間処理業者）と買い手（原料メーカー）の間の情報の非対称性が解消されることで、金属スクラップ等の取引の活性化が実現できると考える。情報連携システムによって目指す取引の活性化について図表 19 に示す。

図表 19　本事業において目指す情報連携による取引の活性化



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

2.2.4.2 情報連携システムの仕様検討

（1） 情報の管理方法

情報連携システムの検討に際しては、母材や解体方法、選別方法等の中間処理業者で収集する情報の管理方法を具体化する必要がある。そこで、本事業では、まず情報管理方法を検討した。

中間処理業者で収集する情報の管理方法としては、大別して集中管理（外部データベースに情報を集約）もしくは分散管理（使用済製品に付随する情報タグ等に記録）が考えられる。双方の主な特徴について図表 20 に示す。

集中管理方式ではクラウドサーバー等で一元管理ができることや複数の個体番号等のパージや管理、編集、出力等がサーバー上で実施可能であることから管理がしやすい。また、記録容量に限りがある情報タグに対して、各個体の情報を大量に記録できることから、詳細な記録が実現できる。一方で、分散管理の場合には各個体に物理的に付随した情報タグで情報管理を行うために信頼性が高いほか、ネットワークに接続されていない状況でも情報の記録が可能であるなど、堅牢性も高い。

それぞれに特徴があるものの、今回想定している情報連携システムでは、使用済製品等の母材の破砕工程を含むという点で従来のトレーサビリティシステムとは大きく異なる。破砕工程を経るために、個体と物理的に紐づいた情報は一次的に寸断されることになるため、少なくとも破砕前の段階では一度収集した情報を外部データベース等に記録し、破砕後に改めてそれらの情報をロット単位の情報として復元する必要がある。そのため、分散管理する情報量（どの程度情報タグに情報を記録するか）については検討余地があるものの、外部データベースの活用が前提となる。

図表 20　集中管理と分散管理の比較

	集中管理方式	分散管理方式	備考
管理のしやすさ	○	×	■ 集中管理であればサーバーで情報の一元管理が可能 ■ 複数の個体番号のパージや管理・編集・出力等をサーバー上で実施可能 （分散管理の場合を個体同士の情報が連携されない）
記録容量	○	×	■ サーバー上であれば情報タグ等への記録と比べて大容量が記録可能 ■ 情報タグの場合、解体・破砕の証憑となる画像データの保存にも限界
個体情報の信頼性	△	○	■ 分散管理では対象個体とすべての情報が付随しているため、信頼性が高い ■ 集中管理ではサーバー上の情報改ざんや紐づけ情報の入力ミスなどのリスク
堅牢性（セキュリティ）	×	○	■ 分散管理であればネットワーク非接続時も情報連携が維持可能 ■ 集中管理の場合にも最低限の情報をタグ自体に記録するなどの工夫が必要
破砕処理への対応	○	×	■ 破砕処理により対象個体に付随したい情報は一度寸断されることから、集中管理方式で情報を外部に記録しておかないと、対応不可
情報記録媒体	RFID、QRコード等	RFID	■ 各工程で情報の上書きが可能な情報タグはRFID等に限られる。

（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

（2） データキャリアの検討

情報連携システムの実現には、各個体もしくは販売荷姿（フレコンやドラム缶等）に物理的に付随することで、処理工程の記録（活動記録）や読出を行うためのデータキャリアが不可欠である。既述の通り、今回検討するシステムでは集中管理方式を採用するため、主なデータは外部データベース等に記録されることになるが、その場合においても対象となる使用済製品や販売ロットの情報を呼び出すために、これらの情報を紐づける最低限の個体番号等を記録したデータキャリアが必要となる。

図表 21 に代表的なデータキャリアの比較を示す。RFID に関しては周波数帯やメモリの種類（RO、WORM、RW 等）により多様であるが、一般的にデータ交信や読取精度（金属面での貼付では精度低下）の点では他の方式を上回るものの、相対的に高コストとなることが特徴である。また、メモリの種類によってはデータの書換が可能な点で、光学的情報媒体とは大きく異なる。

一方、光学的情報媒体には一次元コード（バーコード等）と二次元コード（QR コード等）があり、読み取れる情報量では二次元コードの方が多いものの、コストでは一次元コードの方が安価と考えられる。これらの光学的情報媒体は、中間処理業者等でも製品管理の点から活用されているほか、自動車解体工程における中古部品の製品管理等でも活用されており、本事業と類似した活用実績も確認できる。

こうした中、集中管理方式を想定する今回のシステムでは、情報の書換等が求められることはなく、コストの高い RFID ではオーバースペックになることが想定される。また、バーコードや QR コードであれば、既に普及しているスマートフォンを活用した情報の読出等も可能であり、デバイスに要する導入コストも削減できると考えられる。一次元コードでも最低限の個体番号の記録等であれば十分と考えられるが、オフラインでも一時的な情報を記録することや、将来的に記録すべき情報量が増加すること等も考慮して、本事業では二次元コード（QR コード）をデータキャリアとして用いることを想定することとした。

図表 21　データキャリアの比較

		データ交信				読取精度			タグ		本事業における課題
		識別技術	書込み可能	情報容量	透過性	金属耐性	汚れ耐性	環境耐性	貼付箇所	コスト	
RFID		電磁波検知	○	○	○	×	○	×	×	×	■ 金属面への貼付で性能低下 ■ 相対的に高コスト（5円～100円程度）
光学的情報媒体	一次元コード（バーコード）	光学検知	×	△	×	○	×	○	○	○	■ 読み取れる情報量が少ない（～20バイト） ■ 情報の交信にコードタグの視認が必要 ■ コードが汚れるとデータ交信ができない
光学的情報媒体	二次元コード（QRコード他）	光学検知	×	○	×	○	×	○	○	△	■ 情報の交信にコードタグの視認が必要 ■ コードが汚れるとデータ交信ができない

（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

（3） 情報連携システムのイメージ

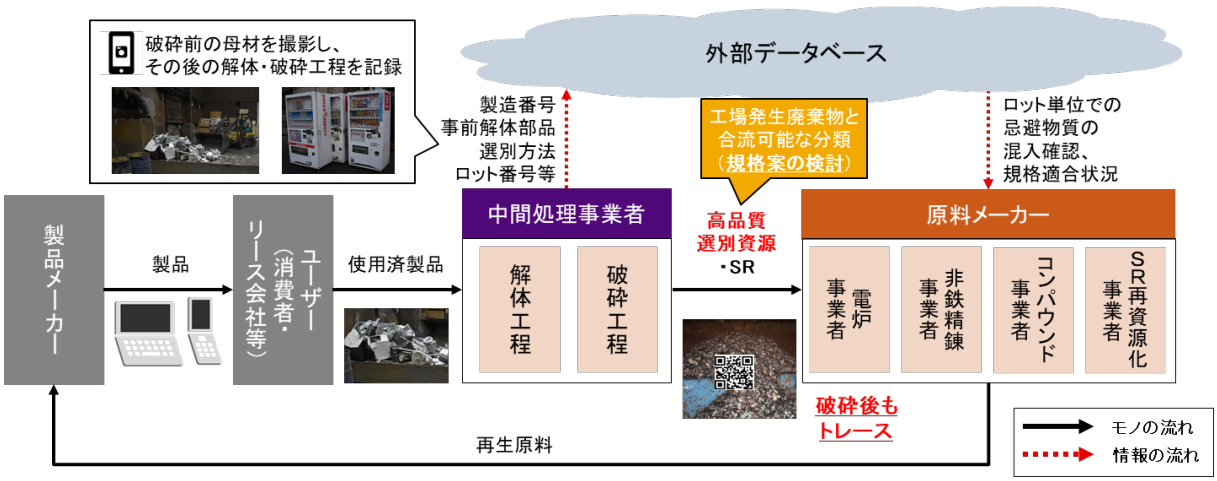
これまで検討した目的および仕様に沿って、想定される情報連携システムのイメージを検討した。

図表 22 に本事業で検討を進める情報連携システムのイメージを示す。使用済製品のトレーサビリティに関しては、製品メーカーに対して成分情報や解体方法の開示等を求める場合が多いが、すべての製品メーカーの同意を得て、機密情報にも関わる事項を共有するということは非常に課題が多い。正確な各製品の成分情報の把握にはメーカーの協力が不可欠であることには変わりないが、本事業では早期のシステムの実用化や情報の非対称性の解消を目指して、まずは静脈事業者間での情報連携によって実現できるシステムを検討することとした。情報連携システムの目的で示したような母材や解体情報、選別方法といった情報は中間処理事業者からの情報だけでも記録可能なものが多く、必ずしもメーカーの協力が得られなくても有用なシステムが実現可能と考えている。

主なフローとしては、回収した対象製品の情報（個体番号や型式等）、処理履歴（事前解体部品や選別方法等）等をデータベースに記録・蓄積し、破砕後はロットごとに破砕物に含まれる製品を明確化することを想定している。つまり、ある特定の販売ロット（フレコンやドラム缶等）に含まれる製品（母材）と処理方法を、紐づけることを目指している。これにより、販売ロットに含まれる成分を推測することが可能になる。ある特定の母材を、特定の解体方法および選別方法で処理した場合の規格化、もしくはそうしたプロセスで処理した場合に想定される製品規格が明確化すれば、売り手と買い手の情報の非対称性解消にも繋がると考えられる。

本イメージを前提として、対象物の具体化や連携すべき情報の精査を行うことで、情報連携システムの仕様を具体化することとした。

図表 22　本事業で検討を進める情報連携システムのイメージ



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

2.2.4.3 連携する情報の特定

(1) 現場視察の実施

連携する情報を特定するためには、検討の対象とする使用済製品を設定し、現状のワークフローを把握することが不可欠となる。金属スクラップを中心とした再生資源の取引活性化には、あらゆる母材に関して情報連携システムを構築することが求められるが、今回検討する情報連携システムでは、中間処理工程での処理記録（活動記録）を行う数少ないシステムであることや、破砕工程を含む処理工程の記録が求められることなどから、まずは特定の対象物に絞って検討や実証を進めることが必要と考えた。

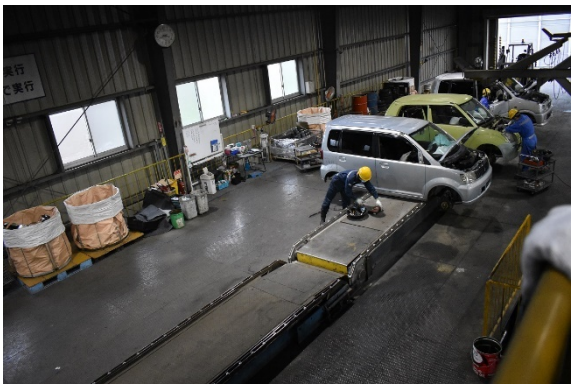
また、情報連携システムで検討する対象物は、既述の 2.2.2 や 2.2.3 で検討した規格や解体・選別方法と連動した記録が求められることから、同様に小型家電と自動販売機を主な対象物候補とした。なお、家電を対象に含めることも考えたが、家電リサイクル法によりメーカーがリサイクル方法にも大きく関与しているため、静脈事業者間で完結しない可能性が高く、本事業では対象外としている。以上の仮説をもって中間処理事業者への現場視察を行った。

視察に関しては、本事業の共同実施者でもある株式会社ツルオカで実施した。なお、当社と連携するシステム会社も同行することで、システム設計の観点から各対象物のトレース可能性についても検討した。視察では各工程の処理を写真およびデータ入力等により記録することを前提として、自動車、小型家電、自動販売機のワークフローおよび実際の処理現場の確認を行った。

これらの結果、当初は小型家電が母材を特定するニーズが高く、トレーサビリティを担保することによる付加価値向上が見込める点で対象部として適切と考えていたが、雑多な廃棄物が混在しており、破砕機への投入も混合状態で行われるため、投入した母材を特定するには、例えば定点カメラで撮影し、画像認識により各小型家電製品を特定するなど大幅な設備投資やアルゴリズム開発が求められることが判明し、最初の検討や実証の対象とするには課題が多いと考えた。

一方で、小型家電や自動販売機に関しては、再生素材の品質管理等の観点からバッチ処理が行われており、現状のフローにおいても投入物と発生産物を紐づけた管理が行われていることが改めて確認できた。これらは取引上の仕様を満たす観点から管理されているが、投入物と発生産物が紐づいていることは取引上の信頼関係のみによって担保されており、客観的な証跡等はないことから、これらを整備すれば取引の可能性が広がることが考えられる。なお、基本的にこれらの母材がバッチ処理されていることは他の複数の破砕業者へのヒアリングでも確認しており、一般的な処理方法と考えられる。

図表 23　自動車の解体工程と解体した基板



図表 24　小型家電の破砕機投入と発生産物

図表 25　入荷された多様な自販機

(2) ヒアリング調査の実施

こうした現場視察の結果をもとに、改めて情報連携システムの検討を行うとともに、関連する中間処理業者やシステム会社へのヒアリングを行った。今回候補とした小型家電と自動販売機への情報連携に関する主な意見を図表 26 に整理した。

概して、発生産物の付加価値向上という観点では、雑多な品目を手選別等で品目別に分類する必要がある小型家電では管理が困難であり、経済性が見込めないという意見であった。また、高品位の小型家電は別の回収ルートが存在しているため、自治体等から受け入れる低品位な小型家電に関しては付加価値向上に対するニーズは高くなく、専らの課題は LIB の選別であることも改めて確認できた。そのため、LIB の選別に繋がるような情報連携で無ければ、実現は難しく、中間処理業者のメリットも薄いことが分かった。

一方で、自動販売機については入口の管理がしやすいほか、フロンの適正処理の観点から現状でも個体管理されている場合が多く、今回の情報連携システムとの親和性が高いことが確認できた。さらに、自動販売機は商社やリース会社による製品管理が行われているため、サーキュラーエコノミーの進展により普及が期待されるサブスクリプション型ビジネスの先駆け的な事例となるとの意見もあった。今後 PC や携帯電話等もリース会社等による管理が行われれば、特定の製品のみが大量廃棄される可能性もあり、その際にも自動販売機での実証が横展開できる可能性が高い。

また、システム会社からも現状の小型家電を対象物とするにはハードルが高く、各個体に製品プレート等も取り付けられており、個体管理がしやすい自動販売機がサンプルとしては適切との意見もあった。さらに、自動販売機のメーカーや種類が限定的であれば、各型式の成分情報を分析することで、各ロットに含まれる成分まで追跡することも検討できる可能性がある。

これらの検討の結果、検討や実証の対象とする製品は自動販売機と想定して、その処理フローや連携する情報の特定を行うこととした。

図表 26　情報連携の対象物に関する中間処理業者の意見

対象候補	情報連携に関する意見
小型家電	● 自治体からの受入時点で多様な品目が混ざった混沌とした状態であり、目視確認で危険物を除外することはあるが、基本的にすべて破砕機に投入している。ポストシュレッダーで対応した方が効率的と考える。 ● 母材と処理方法で発生産物を予測するためには、事前に母材を品目ごとに分けるような機能が必要である（手選別含む）。その点、小型家電は非常に品種が多岐に渡っており、ハードルは高い。 ● 高品位な小型家電は自治体以外の回収ルートもある。自治体回収品などは一山になっており、どの製品がどの程度含まれているか把握していない。 ● 小型家電は火災リスクの観点から、LIB を含むものを選別する必要がある。この問題を解決できる情報連携であれば、可能性があるかもしれない。 ● 小型家電の管理は難しい。一つの考え方として、LIB がついている製品を個別管理するような方向になるのではないかと考えている。 ● LIB をリサイクルしたいという要望から、規制が生まれたり、市場が出きたりする可能性があるのではないか（発生産物の付加価値向上という観点では品目別管理は難しい）。
自動販売機	● 自動販売機はフロンの適正処理の観点から既に個体管理を行っており、入口の管理が行いやすい。発生産物の付加価値向上には入口管理が前提となるため、取り組みやすい母材と言える。 ● 自動販売機のダストは断熱材が由来とみられる硫黄や窒素が高い傾向があり、事前解体によりダストの質向上も見込める。 ● ダスト同様にステレンス鋼の部品を事前解体しないことで、破砕物のクロム度が高まっている可能性は十分考えられる。事前解体の実施によって質の高い製鋼原料を回収できる可能性もある（但し、取り外した側の販売先は課題となるため、こちらも規格化等により需要を開拓することが重要）。 ● 既に個体管理を行っているため、例えば個体情報の取得が画像認識等により簡略化できるのであれば、作業者の負担は軽減する可能性もある。 ● 現在は売切の社会が前提だが、サーキュラーエコノミーによりビジネスモデルが変革すると、リース会社等に管理されたものが排出されるようになる。このように、母材が管理されたものは比較的取り組み易い可能性がある。 ● この観点では、自動販売機は興味深い。現状は、フロン、蛍光灯、電池等の事前解体が必須であり、顧客に証跡を提出している。一般にバッチ処理が行われるため、サーキュラーエコノミーにより母材が管理される製品の先駆け的事例とも言えるかもしれない。

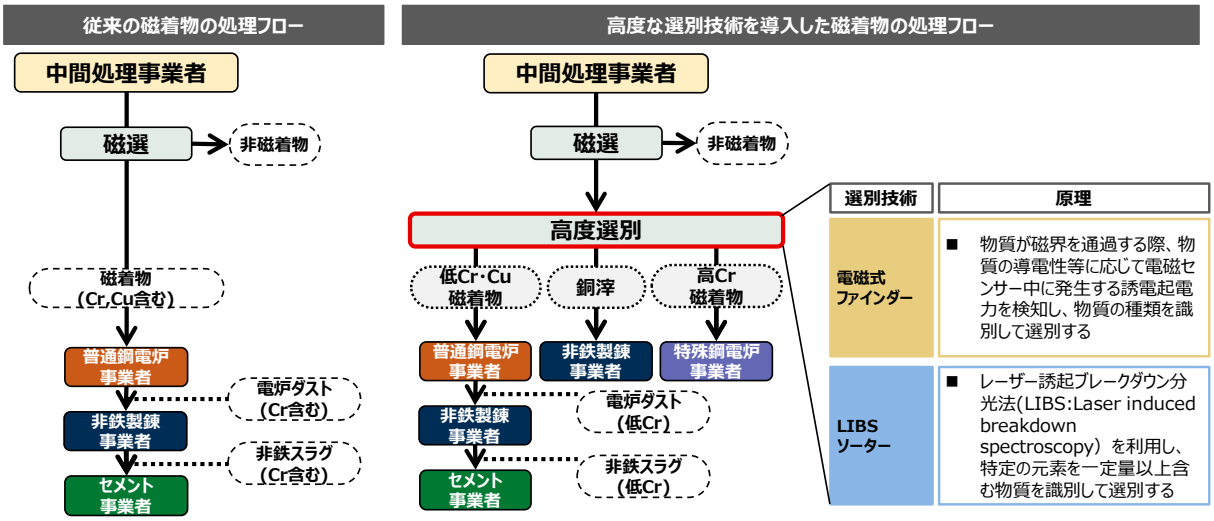
2.2.5. 磁着物の高度選別実証（実証事業５）

2.2.5.1 磁着物の高度選別実証の目的

中間処理事業者から鉄鋼電炉向けに供給される磁着物には、通常の磁選で取り除くことが難しいクロム系ステンレス鋼由来のクロムやモーターコア由来の銅等が含まれている。銅は鋼材の品質異常の原因になり、クロムは最終的なセメント再資源化の障害となりうることから、それぞれの磁着物中の含有量は可能な限り低減されることが望ましい。

そこで、本事業で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検討した。本事業が目指す高度な選別技術を導入した後の磁着物の処理フローと従来の磁着物の処理フローとの比較を図表 27 に示す。本事業では、高度選別技術として、まだクロム系ステンレス鋼の選別等には使用実績がない電磁式ファインダーを選定し、検討を行った。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。それぞれの試験で、ステンレス鋼（マルテンサイト系）やモーターコアを識別するため最適な識別条件、今後の課題などを検討することを目的とした。

図表 27　高度な選別技術導入前後の磁着物の処理フローの比較



2.2.5.2 電磁式ファインダーによる選別実証

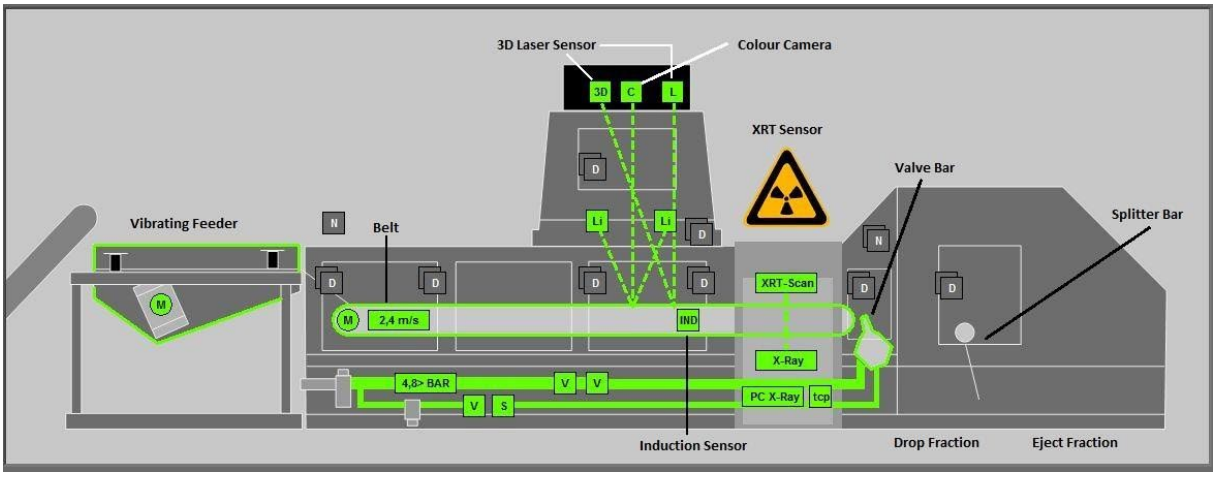
(1) 本試験で用いた試験装置について

本試験で用いた電磁式ファインダーの装置イメージ図と観測される各種データを図表 28、図表 29 に示す。本試験で用いた電磁式ファインダーは、カラーカメラ、電磁センサー、3D レーザー、XRT センサーを搭載しているが、このうち、本試験では、カラーカメラ、電磁センサー、3D レーザーによって得られたデータをもとに分析を行った。

また、電磁センサーと同様の機構をもつ渦電流変位センサーにおける出力電圧の算出式を図表 30 に示す。図表 30 に示す通り、測定対象物の比透磁率、抵抗率（導電率）に応じてセンサーが出力する電圧が変化し、測定対象物を検知することが可能となる。そのため、現在電磁式ファイ

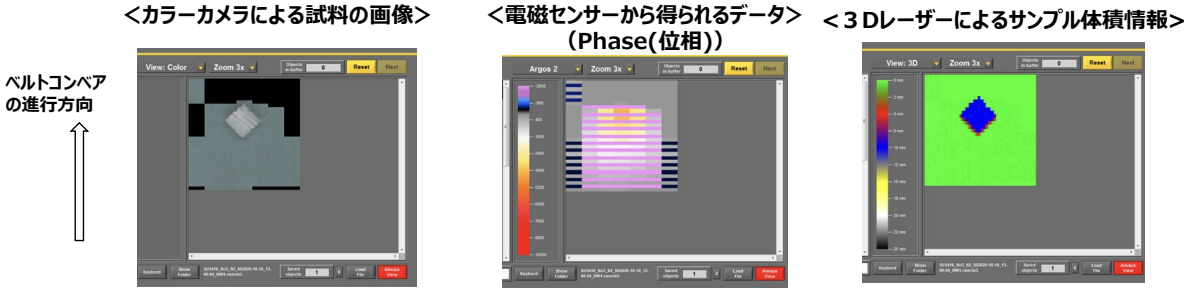
ンダーは抵抗率（導電率）の大きく離れた物質同士の選別などによく用いられている。

図表 28　本試験で用いた電磁式ファインダーの装置イメージ図



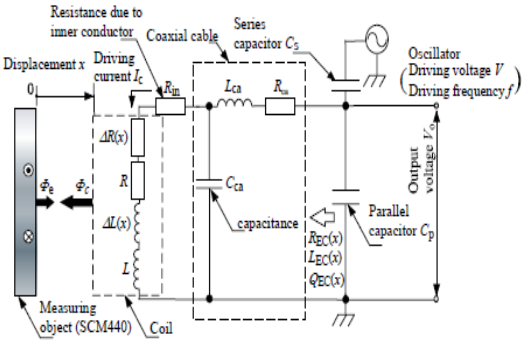
（出所）Steinert　HP より

図表 29　本試験で用いた電磁式ファインダーによって観測される各種データ



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

図表 30　渦電流変異センサーにおける出力電圧の算出式



$$V_0 = \sqrt{\frac{1+Q^2(x)}{k^2+Q^2(x)}} \cdot V \cong \frac{Q^2(x)}{k^2} \cdot V$$

$$Q = \omega L(x)/R(x)$$

$$k = 1 + C_p/C_s$$

$$\Delta L(x) = \frac{\pi\mu_0 N^2}{l_a{}^2(r_0-r_i)^2}\int_0^\infty \frac{1}{\alpha^6} I^2(r_0,r_i)\left[-\exp(-2x\alpha)\times\{\exp(-l_a\alpha)-1\}^2\frac{\mu_r\alpha^2-\alpha_1{}^2-\alpha_2{}^2}{(\mu_r\alpha+\alpha_1)^2+\alpha_2{}^2}\right]d\alpha$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{\alpha^2-\sqrt{\alpha^4+(\omega\mu_r\mu_0/\rho)^2}}{2}}$$

$$\alpha_2 = \sqrt{\frac{-\alpha^2-\sqrt{\alpha^4+(\omega\mu_r\mu_0/\rho)^2}}{2}}$$

V_0	:EC変位センサの出力電圧（V）	Q	:コイルの品質係数	r_0	:コイルの外半径
V	:励振電圧（V）	x	:センサと測定対象物の変位距離（m）	r_i	:コイルの内半径
L	:コイルのインダクタンス　（H）	μ_0	:真空の透磁率（H/m）	α、α_1 α_2	:変数（m^{-1}）
C_p	:共振用コンデンサ（F）	N	:コイルの巻き数	μ_r	:測定対象の比透磁率
C_s	:分圧用コンデンサ（F）	l_a	:コイルの軸方向の長さ	ρ	:測定対象の抵抗率（Ωm）

（出所）品川ら、クロムモリブデン鋼を測定対象とする渦電流形変異センサの温度特性解析

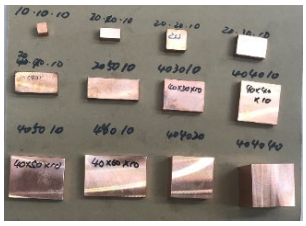
（2） 標準試料を用いた試験の実施

本試験で用いた標準試料の外観、一覧を図表 31、図表 32 に示す。

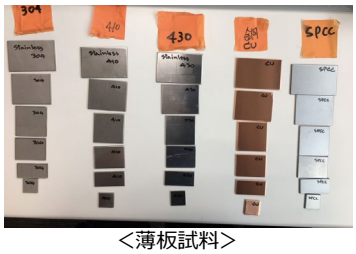
標準試料は 3 種類の試料形状（立方体・直方体試料、薄板試料、二成分系試料）を用意した。立方体・直方体試料、薄板試料はそれぞれ 5 種類ずつの金属（銅、普通鋼（S50C or SPCC）、クロム系ステンレス鋼（SUS410、SUS430）、ニッケル系ステンレス鋼（SUS304））を用意した。二成分系試料は銅と普通鋼（S50C）を組み合わせて作成し、銅素材の割合の異なる同一形状試料を用意した。

また、本事業では標準試料を用いて 3 種類の試験を実施した。各試験の概要を図表 33 に示す。

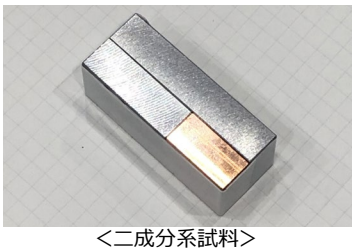
図表 31　試験に用いた標準試料の外観



<立方体・直方体試料>
※写真は銅試料



<薄板試料>



<二成分系試料>
※銅試料と普通鋼（S50C）を組み合わせて作成

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 32　試験に用いた標準試料の一覧

試料形状	試料寸法	金属種別					
		1 銅	2 普通鋼（S50C）	3 普通鋼（SPCC）	4 ステンレス鋼（SUS410）	5 ステンレス鋼（SUS430）	6 ステンレス鋼（SUS304）
立方体・直方体試料	10㎜×10㎜×10㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	20㎜×10㎜×10㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	20㎜×20㎜×10㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	20㎜×30㎜×10㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	20㎜×40㎜×10㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	20㎜×50㎜×10㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	20㎜×20㎜×10㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	40㎜×20㎜×10㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	40㎜×30㎜×10㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	40㎜×40㎜×10㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	40㎜×50㎜×10㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	40㎜×60㎜×10㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	40㎜×40㎜×10㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	40㎜×40㎜×20㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	40㎜×40㎜×40㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	40㎜×40㎜×60㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	40㎜×40㎜×80㎜	○	○		○	○	○
立方体・直方体試料	40㎜×40㎜×100㎜	○	○		○	○	○
薄板試料	20㎜×20㎜×2.0㎜	○		○	○	○	○
薄板試料	40㎜×20㎜×2.0㎜	○		○	○	○	○
薄板試料	40㎜×30㎜×2.0㎜	○		○	○	○	○
薄板試料	40㎜×40㎜×2.0㎜	○		○	○	○	○
薄板試料	40㎜×50㎜×2.0㎜	○		○	○	○	○
薄板試料	40㎜×60㎜×2.0㎜	○		○	○	○	○
二成分系試料	50㎜×20㎜×20㎜（銅素材0%）		○				
二成分系試料	50㎜×20㎜×20㎜（銅素材10%）	○	○				
二成分系試料	50㎜×20㎜×20㎜（銅素材20%）	○	○				
二成分系試料	50㎜×20㎜×20㎜（銅素材30%）	○	○				
二成分系試料	50㎜×20㎜×20㎜（銅素材40%）	○	○				
二成分系試料	50㎜×20㎜×20㎜（銅素材50%）	○	○				

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 33　標準試料を用いた各試験の概要

試験名	変数	試験概要
試験① 試料断面積変化試験	・導電率 ・磁界に垂直な面の試料断面積	同じ高さで底面積の異なる各種標準試料を電磁式ファインダーに投入する。 電磁センサーから得られたデータと磁界に垂直な面の試料断面積変化との相関を確認する。
試験② 試料高さ変化試験	・導電率 ・試料高さ	同じ底面積で高さの異なる各種標準試料を電磁式ファインダーに投入する。 電磁センサーから得られたデータと試料の高さとの相関を確認する。
試験③ 片刃粒子を模擬した二成分系試料試験	・材質の均一性	磁着物中に片刃粒子として混入する可能性の高いモーターコアを想定し、銅と普通鋼を接着させた二成分系試料を電磁式ファインダーに投入する。 電磁センサーから得られたデータと試料断面積に占める銅素材の割合との相関を確認する。

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

(3) 実サンプルを用いた試験の実施

試験に用いた実サンプルの概要、外観を図表 34、図表 35 に示す。実サンプルは 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、400 系ステンレス鋼、300 系ステンレス鋼、モーターコアに分類した。なお，LIBS ハンドヘルドによる分析はすべてアルゴン雰囲気中で行った。LIBS ハンドヘルドの外観、諸元をそれぞれに図表 36、図表 37 示す。

実サンプルを用いた試験では、サンプル種別毎に 1 つずつ電磁式ファインダーに投入した。3D センサーから得られるサンプル体積情報と電磁センサーから得られたデータ等をもとに金属種毎に選別可能かどうか検討を行った。

図表 34　実サンプルの概要

サンプル種別	個数	概要
普通鋼	187 個	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。
クロム系 ステンレス鋼	94 個	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。
ニッケル系 ステンレス鋼	105 個	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。
モーターコア	101 個	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。

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 35　実サンプルの外観

＜シュレッダースクラップ（Cr系SUS）＞

＜モーターコア＞

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 36　本試験で用いた LIBS ハンドヘルドの外観

（出所）早稲田大学大和田研究室提供

図表 37　本試験で用いた LIBS ハンドヘルドの諸元

製造会社	SciAps. Inc.
装置名称・型式	Z-300 LIBS Analyzer
レーザーの種類	Nd:YAG レーザー
レーザー波長 [nm]	1064
レーザーエネルギー [mJ]	7.5
周波数 [Hz]	50

（出所）早稲田大学大和田研究室提供

2.2.5.3 LIBS ソーターによる選別実証

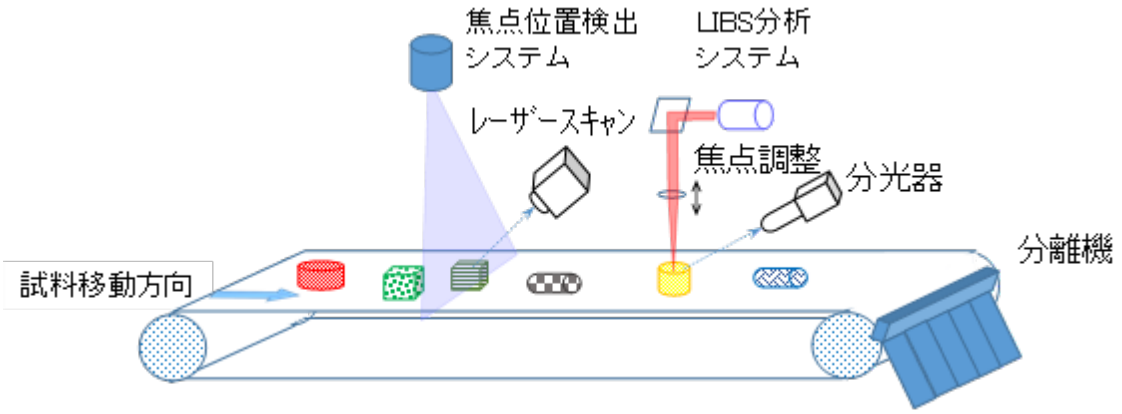
（1） 本試験で用いた試験装置について

本研究で使用した LIBS ソーターは、東北大学「希少元素高効率抽出技術拠点」事業（2012～2016）にて、2015 年に早稲田大学大和田研究室が開発した試験装置である。その外観、構成、諸元をそれぞれ図表 38、図表 39、図表 40 に示す。また、本試験で用いた各種試験における実験条件を図表 41 に示す。

図表 38　本試験で用いた LIBS ソーターの外観

（出所）早稲田大学大和田研究室提供

図表 39　本試験で用いた LIBS ソーターの構成



（出所）早稲田大学大和田研究室提供

図表 40　本試験で用いた LIBS ソーターの諸元

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

（出所）早稲田大学大和田研究室提供

図表 41　LIBS ソーターを用いた各種試験における実験条件

レーザーパルスエネルギー※) [mJ]	1
レーザーの発振周波数率※) [kHz]	20
ベルト速度 [m/s]	1.0
1 粒子あたりの測定回数 [-]	5

※) 装置固定値

（出所）早稲田大学大和田研究室提供

(2) 標準試料を用いた試験の実施

本試験で用いた標準試料の概要を図表 42 に示す。組成比の異なる鉄-クロム二元系合金標準試料とステンレス鋼標準試料を用いて、鉄とクロムを識別するために最適なスペクトル波長を検討した。また、普通鋼とステンレス鋼を識別するべく、スペクトル解析の手法や検量線の作成方法についても検討した。

図表 42　LIBS ソーターを用いた標準試料の概要

サンプル種別	個数	概要
鉄-クロム二元系合金 標準試料	8 個	日本鉄鋼連盟標準化センター蛍光 X 線分析用認証標準物質の鉄-クロム二元系合金（FXS-335～343）で，化学組成が既知のもの
ステンレス鋼標準試料	11 個	JFE テクノリサーチおよび土佐製作所から提供された化学組成既知のステンレス鋼試料

（出所）早稲田大学大和田研究室提供

(3) 実サンプルを用いた試験の実施

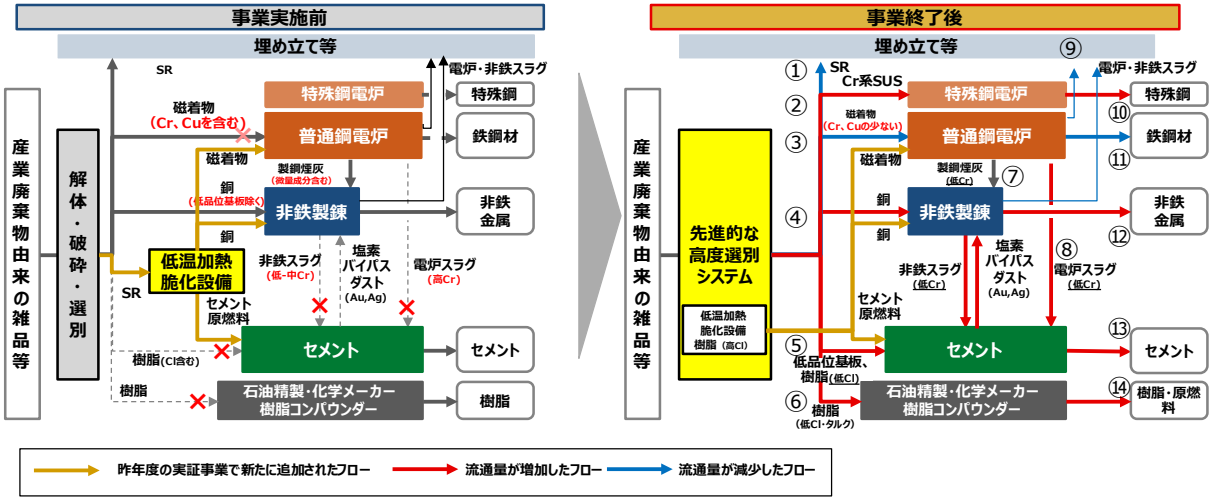
電磁式ファインダーによる選別試験の結果と比較するべく、2.2.5.2 (3) で述べた実スクラップと同様の実サンプルを用いて試験を実施した。標準試料を用いた試験で検討したスペクトル波長および分析手法を用いて金属種毎に識別が可能であるかどうか検討を行った。また、LIBS ソーターでは検知が難しい実サンプルの条件等についても検討を行った。

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

本事業の成果が普及し、産廃由来の雑品等を先進的な高度選別システムで処理することで、中間処理産物・素材生産量が以下の通り増減すると仮定した（図表 43）。本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は以下の仮定に基づいて行う。

- 低品位基板等が適正処理されることで、SR の埋立処分量が減少し、銅、低品位基板・樹脂（低塩素・ﾀﾙｸ等）の再資源化量が増加する。（**図表 43** 中①, ④, ⑤, ⑥）
- 磁着物中のクロム系**ステンレス鋼**を選別することで、普通鋼電炉向け磁着物の供給量は減少するものの、クロム系**ステンレス鋼**が特殊鋼電炉で再資源化される。また、磁着物に微量含まれる銅も選別され、非鉄精錬向け原料として供給される。（**図表 43** 中②, ③, ④）
- 普通鋼電炉向けに供給される磁着物中のクロム品位が低下することで、鉄鋼材の副産物である製鋼煙灰、電炉スラグ中のクロム品位も低下する。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、埋め立て処分される電炉スラグ量が減少する。（**図表 43** 中⑦, ⑧, ⑨）
- 二次資源を原料とした特殊鋼、非鉄金属、セメント、樹脂・原燃料の生産量が増大する。一方、磁着物の供給量減少に伴い二次資源を原料とした鉄鋼材の生産量は減少するものの、磁着物中のクロム品位が減少することで鉄鋼材生産の歩留まりが向上する。（**図表 43** 中⑩, ⑪, ⑫, ⑬, ⑭）

図表 43　本事業の実施前後における中間処理産物・素材生産量の増減



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

2.2.6.1 資源回収による「天然資源採掘量削減効果」

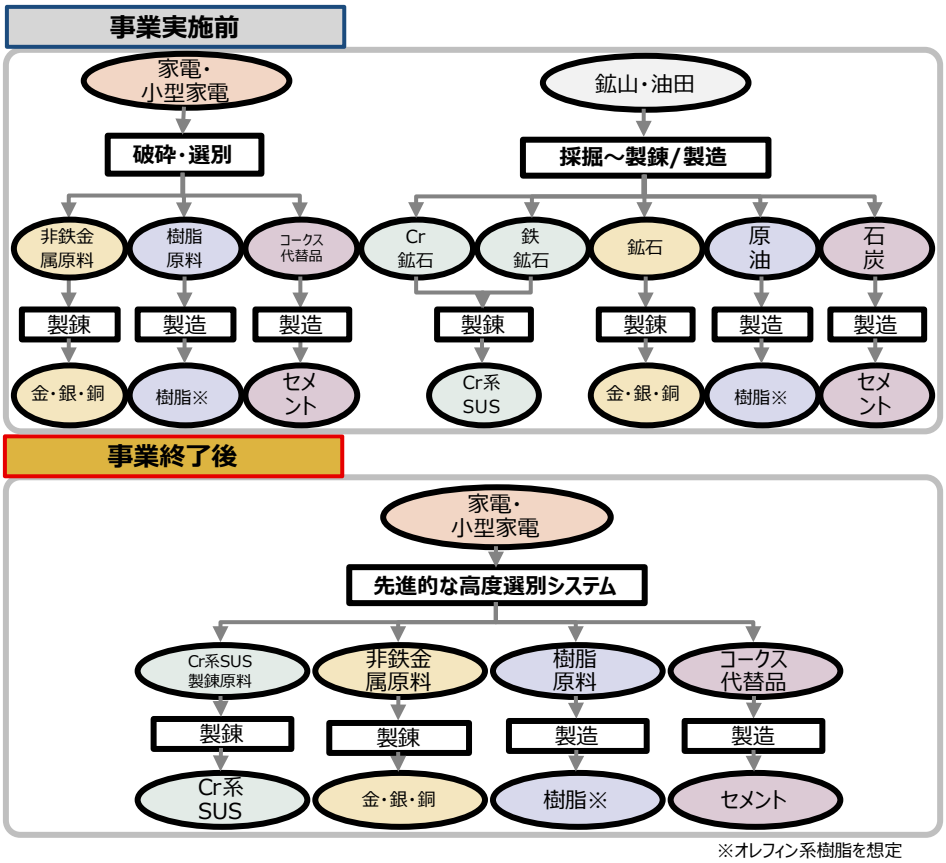
本事業では、産業廃棄物に区分される雑品等への適用を想定した実証ではあるが、それら製品の成分組成や一般的な構成等に関するデータを入手することが容易ではないこと、またシステムそのものは廃小型家電や廃家電等にも適用可能であると考えられるため、ここでは便宜的に国内の認定事業者で回収された廃小型家電および廃家電を対象に評価を行った。評価に際しては、対象物の全量が再資源化処理に流れると仮定した。

事業終了後の新プロセスで生産される（再生）材料量を 100 とし、事業実施前の従来プロセス（天然資源＋二次資源）で同等の材料量を生産しようとする場合に必要な天然資源由来の材料量を計算し、それを生産する際に採掘される資源量（天然資源採掘量）を推計した。

天然資源採掘量では、関与物質総量（Total Material Requirement：TMR）の考え方を適用した。

その他、推計時に設定した具体的数値等は 5 付録で詳細に説明する。

図表 44　天然資源採掘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

2.2.6.2 二次資源単位重量当たりの収益改善効果（資源効率性向上効果）

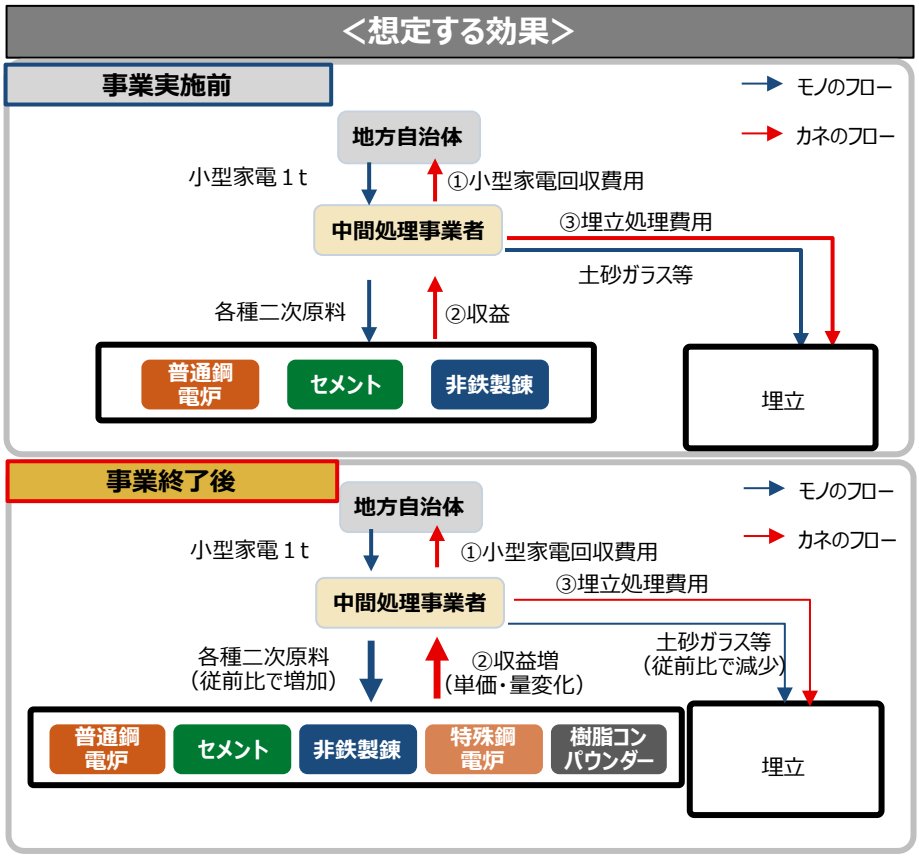
本事業では、産業廃棄物に区分される雑品等への適用を想定した実証ではあるが、それら製品の成分組成や一般的な構成等に関するデータを入手することが容易ではないこと、またシステムそのものは廃小型家電や廃家電等にも適用可能であると考えられるため、ここでは便宜的に国内の認定事業者で回収された廃小型家電を対象に評価を行った。

中間処理事業者で小型家電等を処理する際、処理重量１ｔあたりに得られる収益（図表 45 の②-①-③）の変化をここでは、二次資源単位重量当たりの収益改善効果（資源効率性向上効果）とした。

事業実施後には、それまでよりも再生原料等の品質が向上し（忌避物質品位の低減等）、また従前比で産物生産量も増加し、結果として埋め立てに回る土砂ガラス等が減少するものとした。また、これによって取引単価も見直されるものとした。

その他、推計時に設定した具体的数値等は 5 付録で詳細に説明する。

図表 45　天資源効率性向上効果の評価範囲



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

2.2.6.3 CO_2 排出量削減効果

事業実施の前後における CO_2 排出量を推計、比較した。

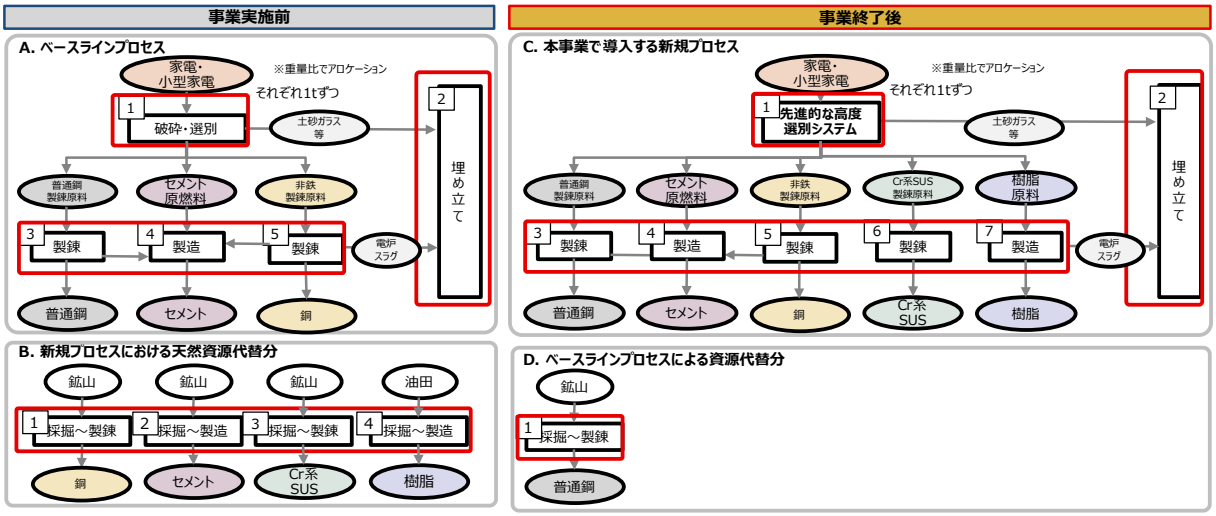
利用できるデータの制約から、機能単位、評価範囲（バウンダリ）を以下の通り設定した。なお、本事業では、産業廃棄物に区分される雑品等への適用を想定した実証ではるが、それら製品の成分組成や一般的な構成等に関するデータを入手することが容易ではないこと、またシステムそのものは廃小型家電や廃家電等にも適用可能であると考えられるため、ここでは便宜的に国内の認定事業者で回収された廃小型家電および廃家電を対象に評価を行った。

利用できるデータの制約から、廃家電・小型家電それぞれ 1t の処理とその際に回収される二次資源を原料とした素材（普通鋼、非鉄金属、クロム系ステンレス鋼、セメント、樹脂）生産量を機能単位とした。

評価範囲（バウンダリ）は破砕・選別、埋め立て、普通鋼電炉製錬、非鉄（金、銀、銅）製錬、ステンレス鋼鋼製錬、セメント製造、本事業導入時に二次資源へ代替される天然資源生産とした。

その他、推計時に設定した具体的数値等は 5 付録で詳細に説明する。

図表 46　CO_2 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

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 金属リサイクルビジネス活性化に向けた検討

本事業成果によって、未回収資源の活用促進と資源価値の高い再生資源の供給が進むことが期待される。そこで、本年度の実証成果を踏まえ、新規に創出が想定される市場を検討した。また、本事業で主な対象としている産業廃棄物のみでなく、自動車や家電、小型家電への応用可能性を検討し、同時にリサイクルビジネスの活性化に向けた課題を検討した。尚、後述する共同実施者等との打合せにて、検討結果に関する意見交換を行った。

2.2.7.2 出口戦略の検討

事業成果を社会実装するために必要な出口戦略を検討し、本年度事業の成果と課題を踏まえて、今後取り組むべき実施項目を整理した。

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

下記の通り、現地視察会を実施した。

- 日時：令和 2 年 10 月 20 日（火）13:45～15:30
- 場所：株式会社サナース 木更津マシンセンター
- 出席者
  - 環境省　事業担当者　　1 名
  - 事業審査委員　　1 名
  - 事務局業務受託者　　1 名
- 応対者
  - 株式会社サナース　　アンソクシリ キッティ
  - イーペックスジャパン株式会社　　矢敷 真一
  - 三菱 UFJ ﾘｻｰﾁ&ｺﾝｻﾙﾃｨﾝｸﾞ株式会社　　清水 孝太郎、園原 惇史、千賀 太喜
  - 早稲田大学創造理工学研究科 地球・環境資源理工学専攻　　米山 基樹
- 議事次第
  （1）　本事業の目的および進捗状況（実証結果）のご説明
  （2）　(株)サナース概要および電磁ファインダーの原理・装置のご説明
  （3）　質疑応答①
  （4）　電磁ファインダーおよび実証試験のご視察
  （5）　質疑応答②

2.2.9. 共同実施者等との打合せ

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

- 日時：令和 2 年 9 月 4 日（金）15:00～17:00
- 実施方法：ビデオ会議（ZOOM）
- 議事次第
  - （1）　昨年度事業の成果について
  - （2）　今年度の提案とその評価結果について
  - （3）　今年度の事業化および目標（案）ついて
  - （4）　今年度実施計画（案）について
  - （5）　研究会における機密保持について
  - （6）　循環経済協会の構想について

- 日時：令和 2 年 10 月 9 日（金）15:00～17:00
- 実施方法：ビデオ会議（ZOOM）
- 議事次第
  - （1）　実証テーマ（1）について
  - （2）　実証テーマ（2）について
  - （3）　今後の予定について（実証テーマ（1）（2））
  - （4）　実証テーマ（5）について
  - （5）　今後の予定について（実証テーマ（5））

- 日時：令和 2 年 11 月 24 日（火）13:00~15:00
- 実施方法：ビデオ会議（ZOOM）
- 議事次第
  - （1）　実証テーマ（3）の進捗報告および今後の予定について
  - （2）　実証テーマ（4）の進捗報告および今後の予定について
  - （3）　実証テーマ（5）の進捗報告および今後の予定について

- 日時：令和 3 年 1 月 28 日（木）10:00～12:00
- 実施方法：ビデオ会議（ZOOM）
- 議事次第
  - （1）　実証テーマ（3）の進捗報告・議論
  - （2）　実証テーマ（4）の進捗報告・議論
  - （3）　実証テーマ（5）の進捗報告・議論
  - （4）　環境負荷低減効果に関する試算結果
  - （5）　次年度に向けた課題

- 日時：令和 3 年 3 月 2 日（木）10:00～12:00
- 実施方法：ビデオ会議（ZOOM）
- 議事次第
  （1）　実証テーマ（5）に関する進捗報告・議論
  （2）　実証テーマ（1）に関する進捗報告・議論
  （3）　今年度報告書案
  （4）　次年度に向けた課題

2.2.10.　評価審査委員会の出席

下記の通り、環境省およ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 2 年 12 月 9 日（水）11:20～11:40
  - 開催方法：ビデオ会議（ZOOM）
  - 参加者：三菱 UFJ ﾘｻｰﾁ&ｺﾝｻﾙﾃｨﾝｸﾞ株式会社　清水、小川、迫田、園原、千賀

- 最終報告会
  - 日時：令和 3 年 2 月 16 日（火）16:10～16:40
  - 開催方法：ビデオ会議（ZOOM）
  - 参加者：三菱 UFJ ﾘｻｰﾁ&ｺﾝｻﾙﾃｨﾝｸﾞ株式会社　清水、小川、迫田、園原、千賀

3. 結果および考察

3.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証事業１）

3.1.1. 忌避元素としての銅に関する既存研究、知見の整理

鉄鋼中のトランプエレメントとしての銅に関する研究は非常に多いが、マテリアルフロー分析を通したものとして近年の代表的なものとしては醍醐らの研究 [14]をあげることが出来る。その重要な示唆は、2018 年のこの論文の発表時点において、20 年近くこの問題が言われてきたにもかかわらず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、ほぼ 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おり、その電炉棒鋼の銅濃度が変化しないということは、これまでについては各鉄鋼品種における銅含有量も大きくは変わらないと考えられる。

次に、同論文はこうした仮定をもとにモデル分析を実施した結果、老廃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。その詳細を見ると、スクラップ中の鋼材品種のシェアが変化したことによる部分と、普通鋼以外の素材が鉄スクラップ中に混在する量が変化したことの二つの要因による結果であると結論づけられている。前者が増加、後者が低下傾向にあると推定されているが、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いずれかであろう。この要因の一つとして雑品スクラップの輸出量の推移から、その増加が結果的に銅の混入量の低下に貢献した可能性を示唆している。

これは本事業にとっても重要な示唆である。言うまでも無く中国の輸入禁止措置以降雑品スクラップの輸出は激減した。とすれば、国内で消費される鉄スクラップに対する銅の混入の可能性は再度増加した可能性がある。それまでの推移については醍醐らの研究グループを中心に多くの検討がなされてきているが、直近の状況については詳細に検討しておく必要があろう。

3.1.2. 塩素に関する既存研究、知見の整理

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ような事例はいくつか存在する。近年のものであれば、熊谷らによる PVC（polyvinyl chloride）の検討 [15]がある。2012 年の日本における PVC に関連するフローが描かれているが、これによれば 407.8 万 t の塩素が輸入され 344.6 万 t が国内産業により利用されている。最終的にそのうちの 134.6 万 t が PVC の生産に用いられ、178.33 万 t がその他の化学工業製品向けに利用されたようである。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

[14] 醍醐 市朗, 纐纈 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）

[15] Kumagai, S., Lu, J., Fukushima, Y., Ohno, H., Kameda, T., Yoshioka, ”Diagnosing chlorine industrial metabolism by evaluating the potential of chlorine recovery from polyvinyl chloride wastes—A case study in Japan”. Resour. Conserv. Recycl.（2018.）

対象として重要なものとなることが確認できる。

そこで、PVC の国内出荷先を製品別、産業別に確認すると図表 47、図表 48 のようになる。このデータからは、製品種としてはパイプが、産業で言えば住建・土木がそれぞれ圧倒的なシェアを占めていることが分かる。

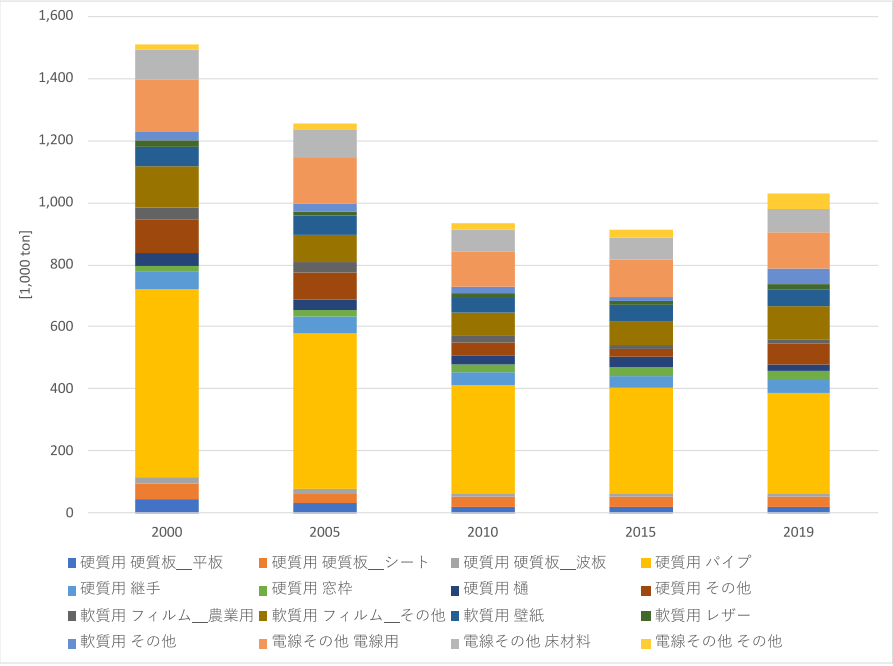
また、熊谷らの推計よりも古いものになるが、中村ら[16]は 2000 年のフローを推計しており、PVC の生産量を 240 万 t、約 80 万 t が輸出、残りが国内消費向けと推定している。

こうしたデータを踏まえれば、土木・住建を中心に見るべきだが、それについては磯部らの研究[17]がある。同文献では PVC の国内排出量を 118 万 t と予想し、再資源化量を 11 万 t 程度としている。内訳を見れば、塩ビ管が 6.7 万 t 程度、電線被覆材で 2.6 万 t 程度が大きい。塩ビ管、継手については業界がリサイクルシステムを持っており、その中でここ数年は 2 万 t 程度がリサイクルされているとある。(出荷量は 30 万 t 程度)

これを別にすれば、農業用フィルムも比較的リサイクルが進んでおり、ここ数年は排出量が 10 万 t 強でリサイクル率は 72.5%程度とされていることから 7 万 t 程度のリサイクルがあると考えられる。それ以外に大規模なリサイクルは行われていない。

こうした情報を総合的に勘案すると、20 万 t 前後がマテリアルリサイクルされている可能性もある。ただし、国内出荷量から推察される排出量を 100 万 t 程度であると考えれば 80 万 t 程度はリサイクルされておらず、各所に混入している可能性がある。これが様々な素材産業に対して混入する可能性があることから、本事業においても次年度以降より詳細な分析等が必要になることが明らかになった。

図表 47　PVC の製品別出荷量

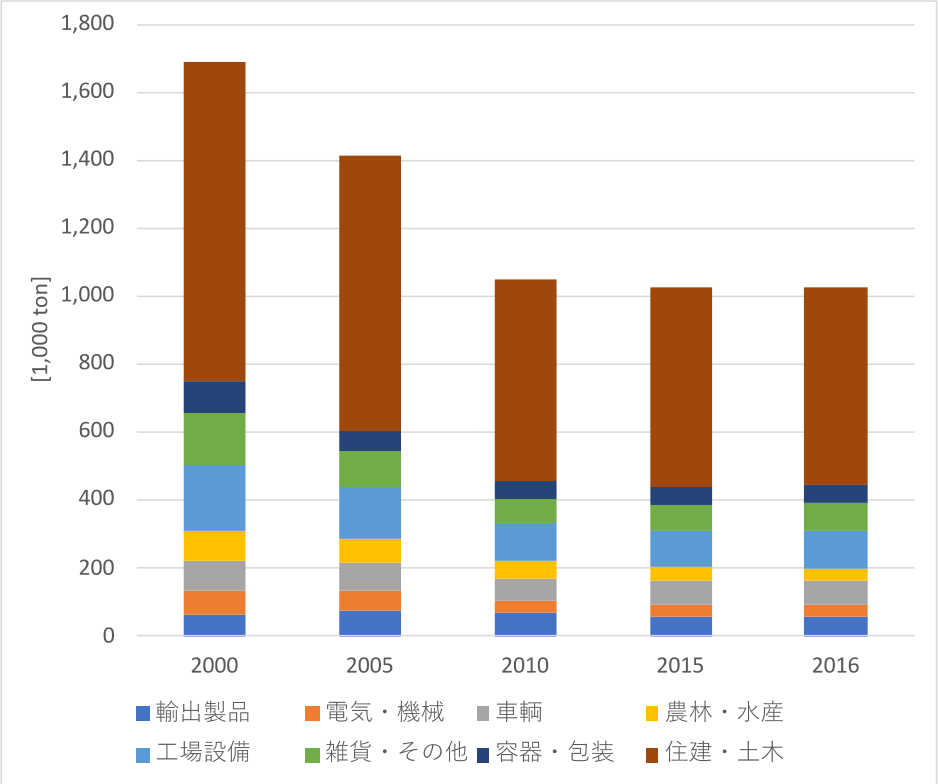


（出所）東京大学村上研究室作成

[16] Nakamura, S. et al. “Analyzing Polyvinyl Chloride in Japan With the Waste Input-Output Material Flow Analysis Model” Journal of Industrial Ecology (2009)

[17] 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）

図表 48　PVC の産業別出荷量



（出所）東京大学村上研究室作成

3.1.3. クロムのマテリアルフロー分析

3.1.3.1 概観

クロムは年間で 40~50 万 t 程度国内に供給されており、ステンレス鋼やクロムめっき、さらに耐熱合金（スーパーアロイ）、耐火レンガなど、工業用に広く使われている金属であるが、全消費量の約 95%がステンレス鋼を始めとする特殊鋼へフェロクロムの形で添加される [18]。またフェロクロムは炭素含有量により高炭素フェロクロムと低炭素フェロクロムに分けられることが多く、マテリアルフロー分析の都合で言えば、よく用いられる財務省貿易統計においては、含有量 4%超が高炭素フェロクロム、それ以外が低炭素フェロクロムと定義される。高炭素フェロクロムは主にステンレス鋼に用いられ、低炭素フェロクロムはそれ以外の特殊鋼に用いられる。

天然に存在するクロムの大半が単体のクロムあるいは酸化数＋３の三価クロムの形であるが、何らかの人為的な影響で酸化されて六価クロムに変わると非常に強い毒性を持ち、様々な規制の対象になる。クリンカを非常に高温で焼成する過程でクロムが酸化され六価クロムに変化する可能性があり、規制の対象になり得ることがセメント産業にとってクロムが忌避物質である理由である。更に現状のセメント製造工程では、クロムを除去することは出来ず、投入された分だけセメントの中に留まってしまうこともあり、原料側の成分調整で対応していると考えられる。

[18] 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）「鉱物資源マテリアルフロー2019」（2020）

より上流に目を向ければ、クロムは様々な鉱物中から産出されるもので、天然資源の上流のマテリアルフローを正確に抑えることは容易ではない。また、主たる用途であるステンレス鋼は合金であり、他の鉱物の需給によってその供給の環境が変化しうるものである。クロムの用途は比較的安定している一方、クロムとともにステンレス鋼に用いられることで、互いに影響しうるニッケルについては、電池[19]、磁性材料等[20]により供給の環境に変化が起きていることもあり、クロム自体の用途が変化しないものの、クロムの需給を把握するためには、合金の供給環境の変化を捉える必要がある。

また次節に示すように、鉄鋼向け原料といっても、合金種によってその含有量は変化することから、鉄鋼内の合金種別の需要構成が変わればクロム需要も変化することになる。これは忌避物質として現れるものの量にも影響を与えることから、注意が必要である。

3.1.3.2 クロムの国内投入フロー

経年変化を追うため、2019 年度に加えて、2014 年度、2009 年度、2004 年度についても、国内投入量の推移を調査した。鋼種(普通鋼、ステンレス鋼、ステンレス鋼以外の特殊鋼、合計)ごとに用途別の投入量推計結果を図表 49、図表 50、図表 51、図表 52 に示す。これらの結果から分かるように、その内訳に変化は見られるが（図表 49～図表 51)、総量に大きな変化は見られない（図表 52)。

また、鋼種別のクロム投入量を図表 53 に、最終的に可視化された 2019 年度のクロム投入マテリアルフロー図を図表 54 に示す。また、このフローに対し、そもそもの素材の量（バルク量と称す）で示したフローを図表 55 に示す。

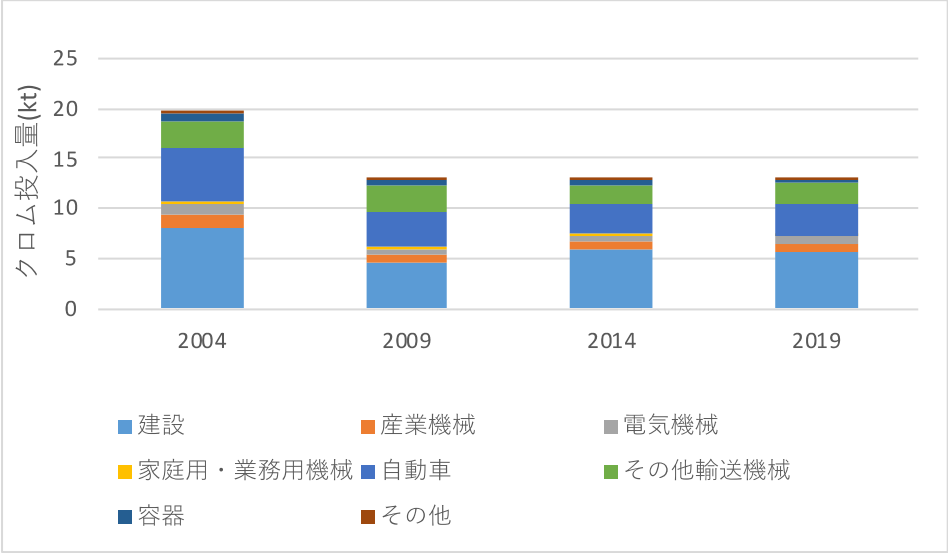
図表 54、図表 55 の比較から、ステンレス系の合金鋼の濃度の高さがうかがえる結果となった。つまり、スクラップに着目した場合、普通鋼以外の高クロム含有鋼が少しでも普通鋼に混入すると、クロム濃度が急激に上昇すると考えられる。

図表 54 から分かるように、ステンレス系の需要家としてだけではなく、(非意図的に混入したクロムを含有する)普通鋼の需要家としても建設、自動車の 2 部門は突出していることが分かる。また、その他主要な鉄鋼材料の需要家（産業機械、電機、他輸送機器など）も、クロムの受け手になっていると示唆された。また、最終的に鋼材として国内の使用中ストックに蓄積されるクロムの量は、普通鋼よりも合金鋼が多いという推計結果になった。

[19] 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC)「鉱物資源マテリアルフロー2019」(2020)

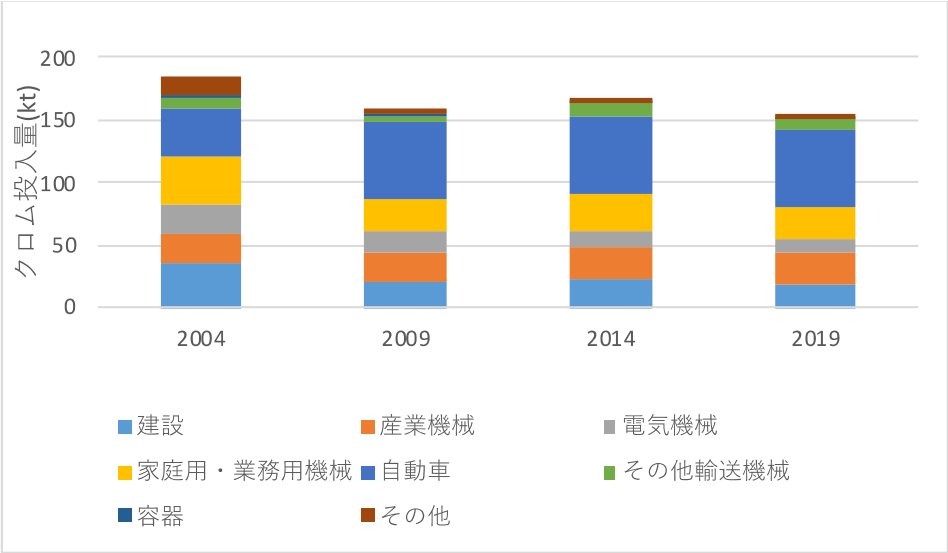
[20] 矢野経済研究所「2020 年版リチウムイオン電池部材市場の現状と将来展望」(2020)

図表 49　普通鋼に含まれるクロムの国内投入量推移



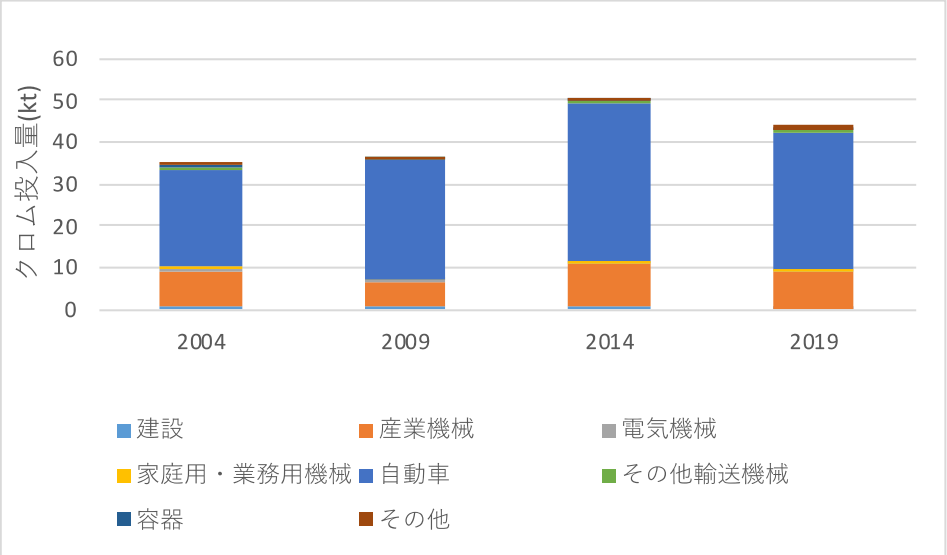
（出所）東京大学村上研究室作成

図表 50　ステンレス鋼に含まれるクロムの国内投入量推移



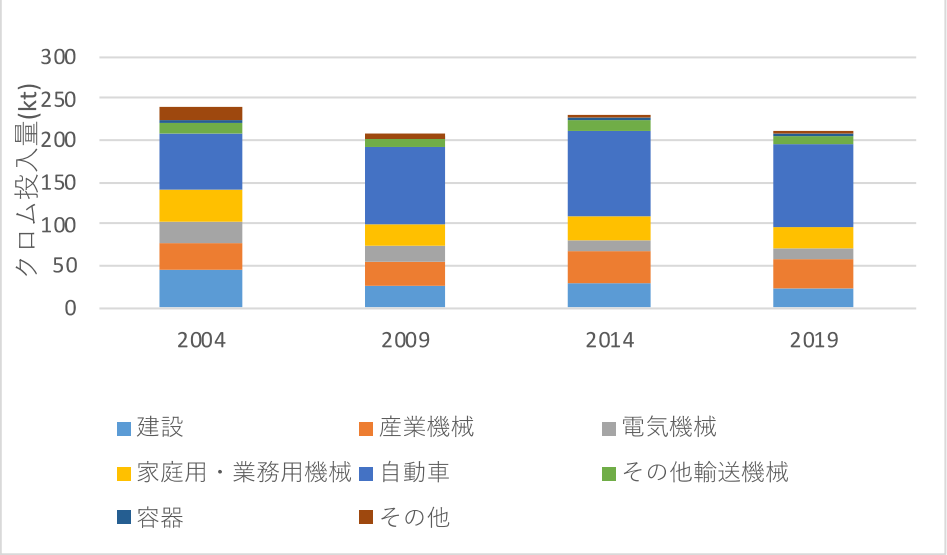
（出所）東京大学村上研究室作成

図表 51　ステンレス鋼以外の特殊鋼に含まれるクロムの国内投入量推移



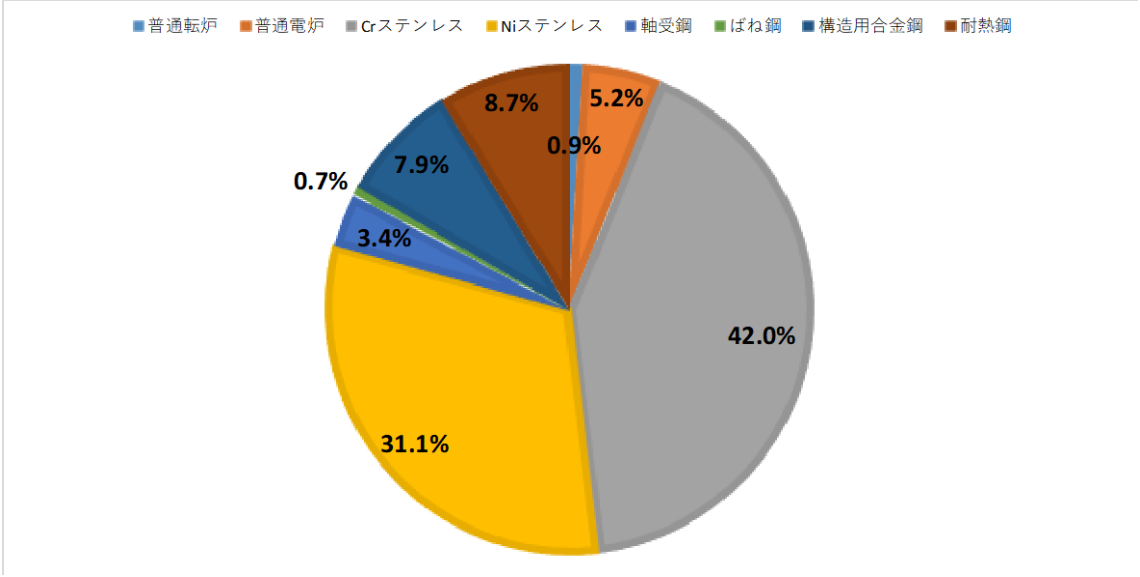
（出所）東京大学村上研究室作成

図表 52　全クロムの国内投入量推移



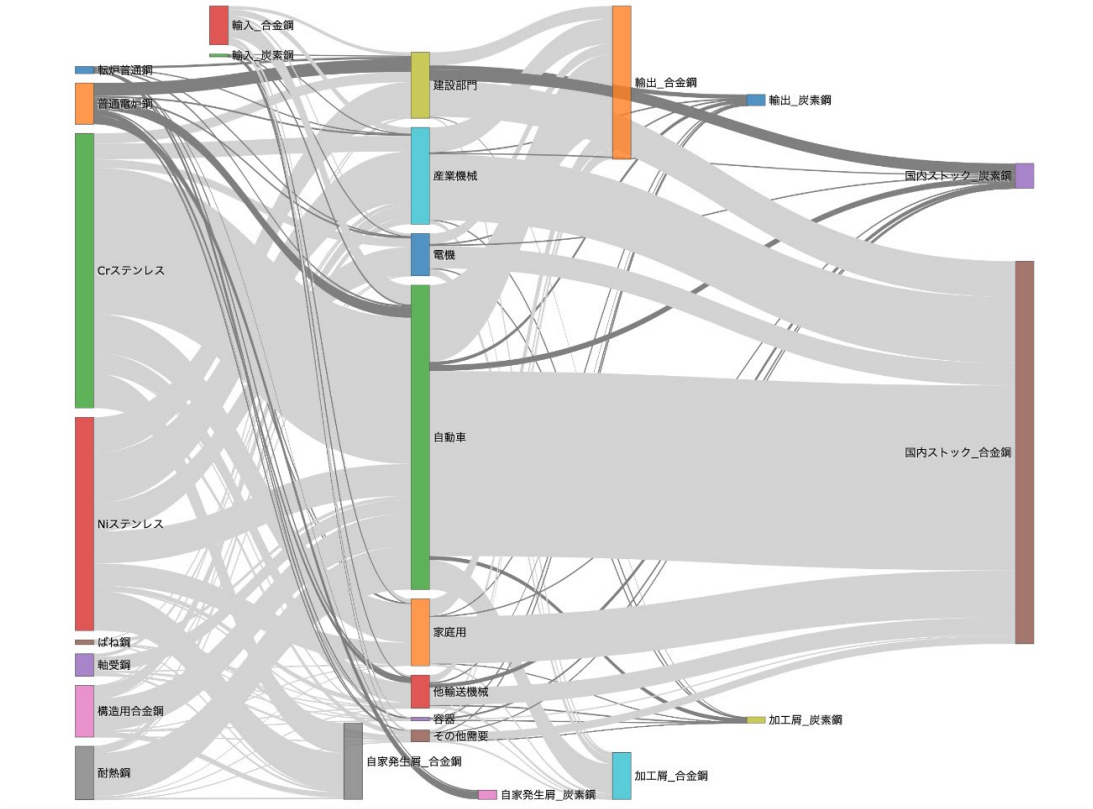
（出所）東京大学村上研究室作成

図表 53　鋼種別クロム投入量(2019 年度)



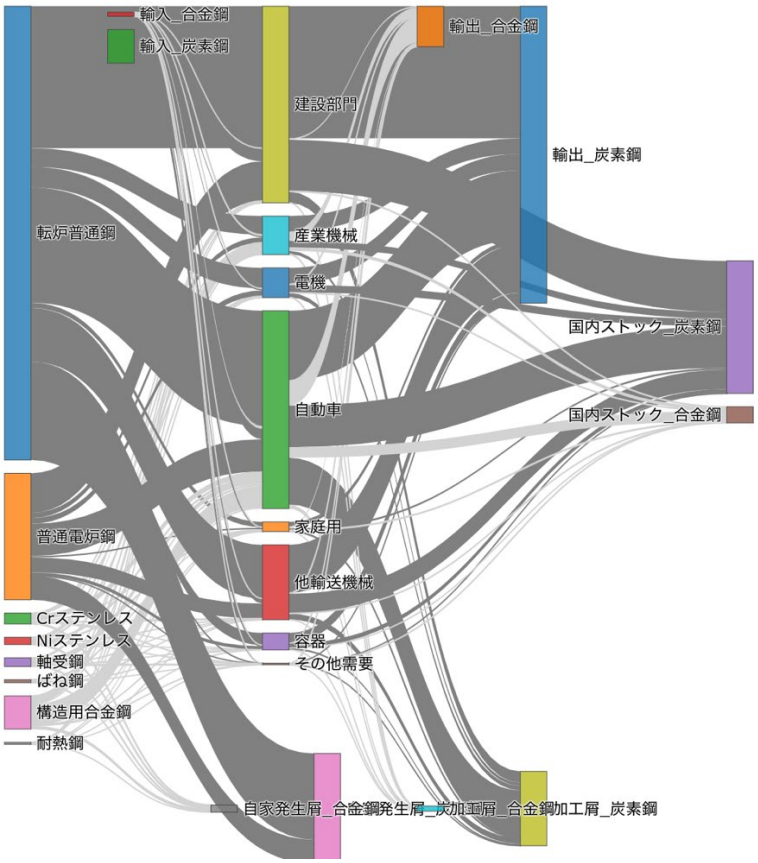
（出所）東京大学村上研究室作成

図表 54　2019 年におけるクロムの国内投入フロー



（出所）東京大学村上研究室作成

図表 55　図表 54 のフローに対する鉄鋼量のフロー



（出所）東京大学村上研究室作成

3.1.3.3 鉄鋼循環におけるクロムのフローについて

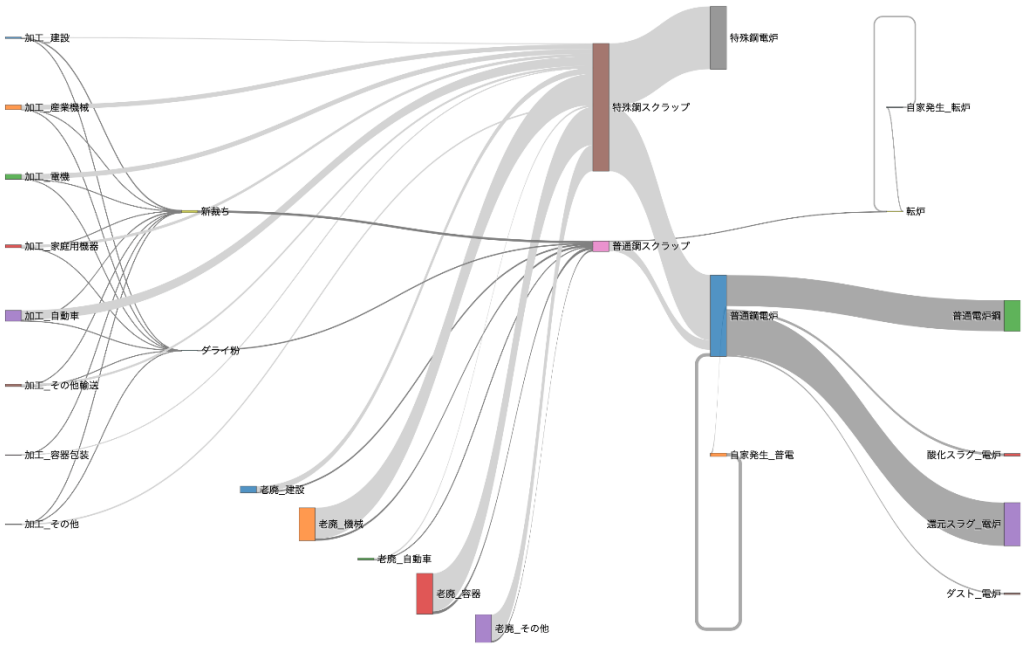
前節の結果を踏まえ、スクラップ側におけるクロムの流れを可視化する。最終的に得られるスクラップの流れを可視化したものを図表 56 に、またバルク量のフローを図表 57 に示す。

図からも分かるように、普通鋼電炉に非意図的混入される特殊鋼スクラップと、普通鋼スクラップに含まれる若干量のクロムの合計値は、特殊鋼電炉で正しく活用される特殊鋼スクラップと大きく違わないという結果を得た。推定精度に若干の課題はあるものの、やはり特殊鋼スクラップ内のクロムの有効活用は進んでいないと言うべきである。図表 57 に示されるスクラップ量から見れば、鉄スクラップとしての量的な感覚と、クロム量の感覚は大きく異なることが分かる。

また、その行く先として普通電炉鋼内に含有される分があることはもちろん、還元スラグにかなり多くの量が流れることが明らかになった。電炉ダストは次工程で、亜鉛製錬に亜鉛原料として投入されることも多く、本事業の調査からもそのような懸念の声は多く聞かれたが、総量としてみれば、電炉ダスト、亜鉛製錬、セメントと経由してセメント中のクロムが上昇するとは言い切れないことも分かる。スラグについてはセメント産業に投入される可能性がかなりあるが、その他の有効利用用途もある。電炉スラグについては亜鉛製錬投入されていることが多いことから、亜鉛製錬おけるクロム濃度向上の原因となっていると考えられる。

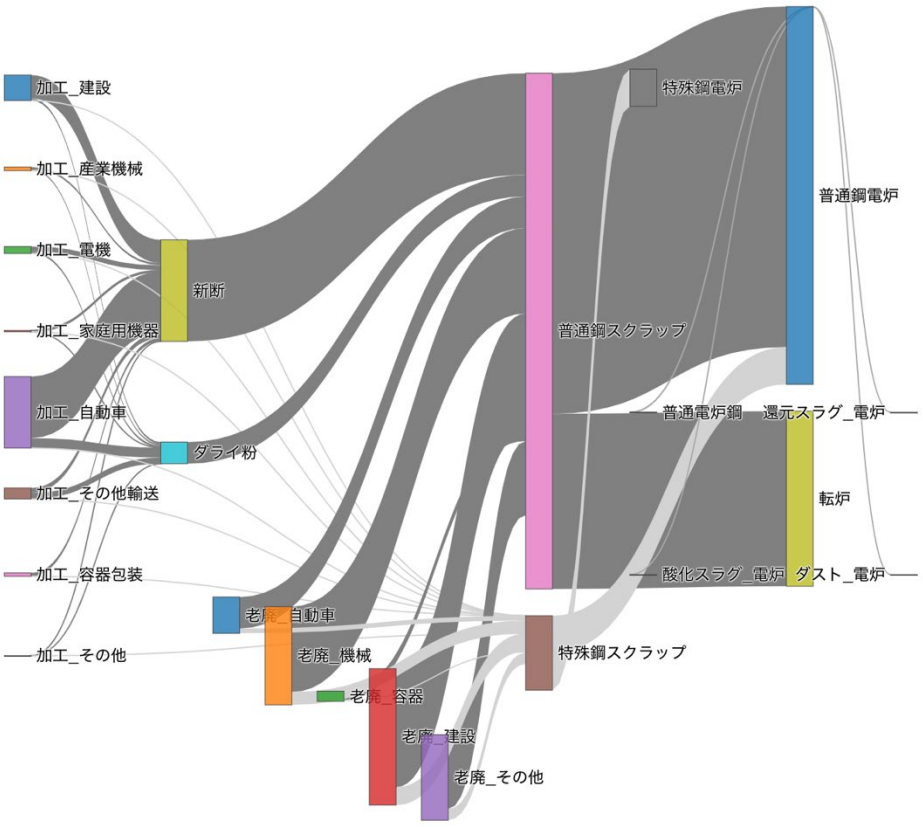
このあたりの精緻化が次年度に向けての課題であると言える。

図表 56　2019 年の鉄鋼の静脈フローにおけるクロムの流れ



（出所）東京大学村上研究室作成

図表 57　図表 56 に対するスクラップ量のフロー



（出所）東京大学村上研究室作成

3.1.4. 成分分析の実施

2.2.1.6 に記載の方法により、鉄スクラップ（新断、ダライ粉、シュレッダー）中に含まれるクロム、銅、錫、鉛等の分析を行った。

3.1.5. 技術仕様の特定に関する検討

3.1.5.1 サンプル分析結果を用いたフローの妥当性検証

本事業では既述の通り、スクラップの成分分析を実施しているが、サンプルの量を考えればフローそのものを書き換えると言うよりは、そこで用いている値の妥当性検証に活用すべきと考えられる。

今回ヒアリングから新断、ダライ粉の 2 種に関してクロム混入に関する指摘がなされたことから、特に新断については多くのサンプルの分析を実施している。ここから見て分かるように非常に大きな幅があり、代表性のある数値を一つに決めるには至らない。また、サンプルは少ないものの業務用冷蔵庫や自治体からの一般廃棄物磁着物などについては非常に高い濃度を示しており、ステンレス等の混入が強く疑われる。

図表 56 を求める際には、新断、ダライ粉ともに、クロム含有率を、転炉鋼は 0.01%、電炉鋼は 0.2%と設定しているが、今回の分析結果に照らし合わせて大きな問題があるとは言えない。ただし、より大きくなるケースもあることを考慮すれば、少なくとも電炉鋼についてはより大きな値を検討する必要があると考えられる。

また、廃車ガラのクロム濃度については、排気系部品等に使用される特殊鋼の混入等の影響を受け、ある程度高い数値になることを予測していたが、結果はさほど高いクロム濃度となっていなかった。各社の解体工程に加えて、分析の N 数が少ないことにも原因がある可能性があり、より詳細な確認が必要と考えられる。また、小型家電由来のシュレッダー中のクロム濃度も比較的高い結果となっており、同様に懸案材料として詳細な確認が必要と言える。

3.1.5.2 クロムの混入要因の整理

マテリアルフロー分析から、普通鋼電炉に多くのクロムが混入していることが判明したが、電炉ダストだけで、セメントのクロム混入を説明できるわけではない。クロム混入は様々な箇所から様々な要因で生じている。天然資源から廃棄物・副産物まで実に多様な原料を多量に使用するセメント産業にクロムが混入するのはある程度仕方がないことであるが、近年問題となっているのはクロム濃度の上昇、すなわちクロム混入量が増加していることである。天然資源自体のクロム濃度が上昇していることは考えにくいことから、各製造産業についてクロム混入・濃度上昇要因を定性的に把握、整理する。

3.1.5.3 クロム投入量の増加

ここ十数年でクロムの日本国内投入総量は増加していないことから、クロムのフローにおいてセメントへの混入濃度上昇の主な要因は上流側ではなく、廃棄物・副産物等の利用に関わる静脈

サプライチェーン側であると推測される。

3.1.5.4 鉄鋼電炉・非鉄製錬産業のクロム濃度の上昇

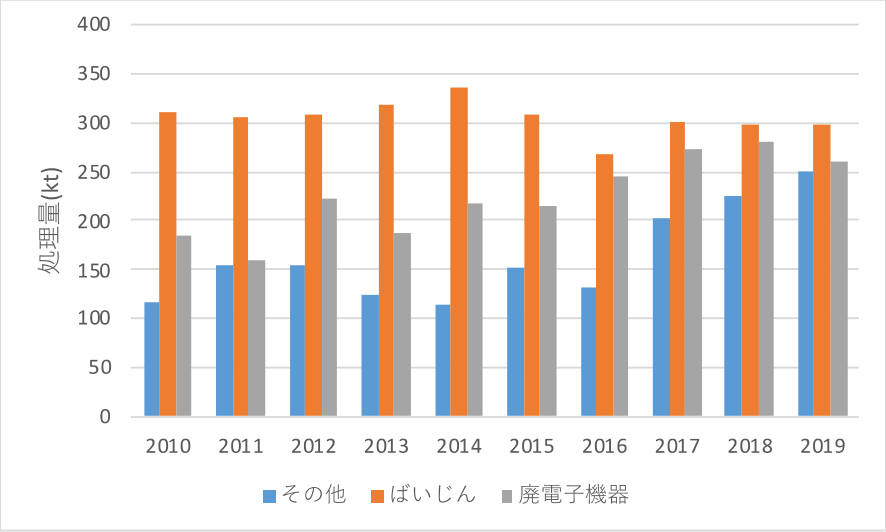
3.1.1、3.1.3.3 では、クロムの絶対量を用いた可視化の結果を示したが、もう一点考えるべきは濃度である。本事業の中でもスポット的なサンプリング調査を行う、関連事業者への聞き取りを行うなどしてきたが、電炉スラグ、電炉ダストの濃度は確認する必要がある。また、これらを利用している事業者、例えば亜鉛製錬におけるスラグ中のクロム濃度についても確認が必要である。

3.1.3.3 では、特殊鋼スクラップの普通鋼電炉への混入について述べたが、本事業におけるヒアリングにより、近年特殊鋼スクラップの価格が下がり、普通鋼スクラップとの価格差が縮まったことによって、選別のインセンティブが下がってきたことが判明した。もし問題が大きいのであれば、比較的選別が容易な加工スクラップでも混入が起こっている可能性があり、これらは本事業の中で引き続き精査する必要がある。

一方、普通鋼転炉では、製造時に使用するスクラップは少量であり、自家発生スクラップを主なスクラップ原料としていることを考えると、特殊鋼スクラップが混入してクロム濃度上昇に引き起こす可能性は低いと推測される。その他に受け入れている廃棄物は代替コークスとしての容器包装廃プラスチックが主であり、こちらもクロム混入の可能性は低いと考えられる。一方で、もし高炉・転炉において副産物の濃度上昇が見られるのであれば、天然資源由来である可能性が高いものの、クロムに関する濃度上昇については炉の耐火物に含有されるクロムが老朽化に伴って混入している可能性も否定は出来ない。こちらについては現時点で数値データ等得られていないのでさらなる調査が必要である。

非鉄金属製錬に目を向けた場合、一つの可能性は先程来述べている電炉ダストから亜鉛製錬への流れである。それ以外に可能性があるものは廃棄物軽減量であると考えられることから、まず非鉄産業全体としての廃棄物減量の投入量の推移を図表 58 に示す。

図表 58 非鉄産業の廃棄物・リサイクル原料処理量(一部抜粋)



（出所）東京大学村上研究室作成

なお、このグラフにおける非鉄産業とは、日本鉱業協会に所属している 12 社を指し、グラフの

値はこれら 12 社が扱っている非鉄製錬事業者の合計値であり、ベースメタルと呼ばれる銅・亜鉛・鉛製錬以外にもニッケルやその他貴金属も含む。しかし、その生産量や銅製錬でも貴金属回収が行われていることを考慮すると、実質受け入れているのはベースメタル製錬とニッケル製錬とみなすことができる。「その他」の中に ASR が含まれており、電炉ダストと溶融飛灰で「ばいじん」を占めている。ばいじんは概ね横ばいである一方で、それ以外の二種は量の増加が見られた。よってこれらの濃度等について、改めて精査する必要がある。

3.2.　成分情報を反映した再生資源の規格化（実証事業２）

3.2.1. 素材産業における規格・検収基準等の調査

鉄スクラップ（シュレッダー）および廃プラスチック原燃料を対象として、分類（品質等級）に関する既存規格の調査を実施した。鉄スクラップ（シュレッダー）に関する既存規格としては、日本鉄源協会が公表している「鉄スクラップ検収統一規格」（2008 年 6 月改訂）、東京製鐵株式会社が公表している「国内鉄スクラップ検収規格表」等が存在する。なお、JIS 規格においても鉄スラップの分類に関する規格として「JIS G 2401:1979 鉄くず分類基準」が存在するものの、シュレッダーくずに関する分類は含まれていない。また、廃プラスチック原燃料に関する既存規格としては、「ISO/FDIS 21640 Solid recovered fuels — Specifications and classes」[21]が存在するが、これは現在策定中の規格である。

各既存規格および既存規格で品質判断軸として考慮されている項目を図表 59 に示す（なお、廃プラスチック原燃料に関する既存規格は検討中のものであるため、内容を確認することはできなかった）。考慮されている項目を整理するにあたっては、仮説的にいくつか項目を設定し、それらが含まれるか否かを検証した。鉄スクラップ（シュレッダー）に関する既存規格では、材質（軟鋼炭素鋼、軸受鋼等）、品質形状が判断軸となる項目として設定されているが、本事業で着目する忌避物質の成分情報に関する項目は確認できなかった。ただし、「鉄スクラップ検収統一規格」の 1997 年改訂版では銅の成分値に関する項目が設定されていた。なお、成分情報に関する項目（要求）はないものの、「明らかに銅の混入が分かるものは受け入れしない」、「錫メッキ品は受け入れしない」等の要求事項は含まれているため、忌避物質の管理は一定程度行われている。

一般的に、鉄スクラップの既存規格の現在の運用に関して、受け入れ時の検収を実施する際には、目視での確認が中心となっている。トレーサビリティシステムのもとで成分情報に着目した分類（品質等級）規格を運用することができれば、忌避物質のより厳密な管理や検収プロセスの簡素化に繋がることが期待される。廃プラスチック原燃料に関しても、同様に忌避物質のより厳密な管理や原料評価プロセスの簡素化を実現できることが期待される。

図表 59　分類（品質等級）に関する既存規格および考慮されている項目

再生資源名	既存規格名	考慮されている項目					
		材質	寸法／粒度	品質形状（発生源等も含む）	重量	成分情報（選好物質）	成分情報（忌避物質）
鉄スクラップ（シュレッダー）	鉄源協会「鉄スクラップ検収統一規格」	–	–	○	–	–	△（1997年版にはCu値の項目）
	東京製鐵「国内鉄スクラップ検収規格表」	○	–	○	–	–	–
廃プラスチック原燃料	ISO/FDIS 21640 Solid recovered fuels — Specifications and classes（検討中のため内容は不明）	検討中のため不明					

（出所）各種資料をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

[21] FDIS は最終国際規格案（Final Draft International Standards）のことである。正式に国際規格（IS）として発行される以前の段階のものである。

3.2.2. 再生資源規格案の検討

再生資源の分類（品質等級）の規格案を作成するにあたって、品質の判断軸とすべき項目（管理・伝達対象とすべき項目）を設定するために、各素材産業（鉄鋼電炉、セメント産業）における忌避物質を整理した。図表 64 は鉄鋼電炉およびセメント産業における忌避物質を示すものである。規格案で取り扱う項目が多すぎる場合には、コストが高くなってしまう可能性もあるため、文献調査やヒアリング調査をもとに、特に直近で管理すべき忌避物質（特に影響が大きい、現実的に管理が可能な忌避物質等）を選定した。鉄鋼電炉においては、熱間脆性を発生させる（現在も厳格に管理されている）銅や錫、延性の低下や鋼の溶接性を悪化させるクロム等を直近で管理・伝達対象とすべき項目として選定した。

一方、セメント産業においては、六価クロム溶出のリスクとなるクロムのほか、ハロゲン（塩素、フッ素）を直近で管理・伝達対象とすべき項目として選定した。なお、将来的には、ナトリウム、マンガン、鉄、銅、臭素、アンチモン、水銀、鉛等も管理・伝達対象とすべき項目として規格案に反映していくことも検討する。

図表 60　鉄鋼電炉およびセメント産業における忌避物質

元素記号	鉄鋼電炉	セメント産業
F		◎
Na		○
P	△	
S	△	
Cl		◎
Cr	◎	◎
Mn		○
Fe		○
Ni	△	
Cu	◎	○
Zn		△
As	△	
Br		○
Mo	△	
Cd		△
Sn	◎	
Sb		○
Hg		○
Pb	△	○

（注）△は既存文献およびこれまでの研究会での議論で忌避物質として言及されているもの、◎はこれまでに忌避物質として言及され、かつ直近で管理が求められると考えられるもの（規格案に反映するもの）、○はこれまでに忌避物質として言及され、かつ近い将来に管理が求められると考えられるもの（将来的に規格案に反映する可能性があるもの）

（出所）各種資料およびヒアリングをもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

「3.2.1 素材産業における規格・検収基準等の調査」で特定した既存規格で考慮されている項目および本項で特定した管理・伝達対象とすべき項目をもとに、今回作成する規格案で品質の判断軸とすべき項目（管理・伝達対象とすべき項目）を整理した（図表 61）。鉄スクラップ（シュレッダー）においては、材質、寸法、形状等、成分情報（クロム、銅、錫）を項目として設定し、廃プラスチック原燃料においては、粒度、発熱量、灰分、水分、成分情報（フッ素、塩素、クロム）を項目として設定した（廃プラスチック原燃料に関しては、成分情報のほかに、一般的に品質判断の項目とされているとみられる粒度、発熱量、灰分、水分も項目として加えている）。

図表 61　分類（品質等級）を設定するにあたって考慮すべき項目（○の項目は既存規格に従い、それ以外の項目を追加して分類を細分化または新規設定）

再生資源	考慮すべき項目（品質を判断するための項目）										
	材質	寸法/粒度	形状等	発熱量	灰分	水分	成分値（忌避物質または選好物質）				
							F	Cl	Cr	Cu	Sn
鉄スクラップ（シュレッダー）	○（既存規格あり）		○（既存規格あり）								
廃プラスチック原燃料（マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクルに適したものを除く）											

（注）○の項目は既存規格に従い、それ以外の項目を追加して分類を細分化または新規設定

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

以上で特定した項目について、文献およびヒアリング調査によって得られた再生資源の受入管理の実態、再生資源における忌避物質の含有状況等に関する情報を参考にしながら、各品質等級の設定および各等級において求められる要求水準の段階を設定したうえで、段階に応じた類型（品質等級）を整理し、規格案を作成した。なお、鉄スクラップ（シュレッダー）における忌避物質の要求水準を検討するにあたっては、既存文献にある管理基準の最大値（最低限受入れ可能な水準設定の参考）、鉄スクラップ中の元素濃度の最小値（現実的に達成可能な水準設定の参考）を参考にしている。これらをもとに作成した鉄スクラップの分類（品質等級）に関する規格案を図表 64 に、廃プラスチック原燃料（セメント産業向け）を図表 65 に示す。

なお、実際の取引においては、素材産業が項目ごとに厳密な管理をできるように、規格案の項目ごとにどの類型（等級）に該当するかを判断することを想定している。また、情報伝達の方法としては、図表 66 に示すようなラベル等を用いることを想定している。

図表 62　鉄鋼電炉における不純物元素管理基準の例（%）

元素記号	最小値	最大値
Cu	0.35	0.40
Sn	0.04	0.08
Cr	0.20	0.30

（注）文献中で言及されている管理基準の例（3 社）をもとに最大の値と最小の値を抜粋している。

（出所）伊藤秀夫（1997），「鉄鋼のリサイクルと不純物元素」『表面技術』，48 巻，2 号，132 頁～137 頁をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 63　鉄スクラップ中の不純物元素の濃度の例（%）

元素記号	最小値	最大値
Cu	0.1	0.5
Sn	0.005	0.016
Cr	0.03	0.3

（注）文献中で言及されているスクラップ中の元素濃度の最大の値と最小の値を記載している。

（出所）経済産業省「平成 15 年度環境問題対策調査等に関する委託事業報告書（自動車リサイクルに係る処理技術等の調査）をもとに三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 64　鉄スクラップ（シュレッダー）の分類（品質等級）に関する規格案

品質項目				S級	A級	B級	C級	D級	等級外
材質				軟鋼炭素鋼、軸受鋼、バネ鋼					
寸法				―					
品質形状				自動車（ボディー）及びそれに準ずるもの					
忌避成分（含有濃度：wt%）	Cu	Sn	Cr						
	0.50	0.016	0.30						
	0.40	0.013	0.23						
	0.30	0.010	0.16						
	0.20	0.007	0.09						
	0.10	0.005	0.03						
その他				－錫メッキ缶をプレスしたものは受け入れしない。 －銅コーティング等、明らかに銅の混入が分かるものは受け入れしない。 －等級外の原料であっても取引不可とは限らない 例：Cu 0.12%，Sn 0.005%，Cr 0.19%の再生原料の場合には、「シュレッダー；Cu-A級; Sn-S級; Cr-C級」					

既存文献（1）の不純元素管理基準の情報をもとに設定

既存文献（2）のスクラップ中の不純元素の濃度データをもとに設定

（出所）伊藤秀夫（1997），「鉄鋼のリサイクルと不純物元素」『表面技術』，48 巻，2 号，132 頁～137 頁（文献１）、経済産業省「平成 15 年度環境問題対策調査等に関する委託事業報告書（自動車リサイクルに係る処理技術等の調査）（文献２）、東京製鐵「国内鉄スクラップ検収規格表」（各種材質、寸法、品質形状、その他に関する事項）をもとに三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

図表 65　廃プラスチック原燃料の分類（品質等級）に関する規格案

品質項目				S級	A級	B級	C級	D級	等級外
総発熱量（kcal/kg）				≧10,000	≧8,000	≧6,000	≧4,000	≧3,000	<3,000
灰分（%）				≦0.1	≦1	≦5	≦20	≦50	>50
水分（%）				≦0.1	≦1	≦3	≦10	≦20	>20
粒度（mm） ※廃プラの種類によって異なるため、目安値				≦5	≦15	≦50	≦100	≦200	>200
忌避成分 (Cl, F, Crは含有濃度：ppm)	Cl	F	Cr						
	20,000	10,000	3,000						
	5,000	5,000	1,000						
	3,000	1,000	500						
	500	300	100						
	300	100	50						
その他				－等級外の原料であっても取引不可とは限らない －CFRPが混入しているものは受け入れしない 例：発熱量9,000kcal, 灰分1%, 水分2%, 粒度16mm, Cl400ppm, F1,000ppm, Cr45ppmの再生原料の場合には、「廃プラスチック原燃料; 発熱量-A級; 灰分-A級; 水分-B級; 粒度-B級; Cl-A級; F-B級; Cr-S級」					

（注）将来的には鉄、銅、臭素、鉛、アンチモン、マンガン、ナトリウム、水銀等も品質項目として検討の必要性が出てくる可能性がある。

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 66　再生資源の分類（品質等級）に関する規格に沿ったラベリングの一例

名称		廃プラスチック原燃料
総発熱量		A
灰分		A
水分		B
粒度		B
忌避成分	Cl	A
	F	B
	Cr	S

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.3.　低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証事業３）

3.3.1. 全体最適化を実現する処理プロセスの検討

図表 14 に示す通り、使用済み製品の排出形態や資源価値、また現行のシステムにおける管理が必要な部品等の有無により、事前解体の精緻化と、破砕品の高度選別の 2 つの方針で、全体最適化に向けた処理プロセスを検討した。

事前解体の精緻化を検討する対象製品として、自動販売機を選定した。これは、2.2.4 にも記載の通り、使用済み自動販売機は、自動販売機の運営・管理を行う商社等から引き渡されることが多く、個体管理が比較的容易であること、また、冷媒としてフロンが使用されており、フロン排出抑制法のもと管理・報告義務があることにより、使用済み製品を管理し、解体を行うことが比較的容易と考えられるためである。情報連携システムとの親和性も高いことが期待される。

また、破砕品の高度選別を検討する対象製品として、低品位な小型家電を選定した。携帯電話・スマートフォンなど、一部の小型家電は資源価値が高いため、これらのみ分別・回収する動機付けがあるが、こうした資源価値の高いものを除く雑多な小型家電は、資源価値が低く、ある程度大量に処理を行わない限り、経済的に成立しない可能性が高い。多様な製品が一度に投入されるため、それぞれの製品に応じた解体を行うには、膨大な解体情報の整備が必要となるほか、解体作業に多くのコストを要する。そこで、破砕後の選別方法することにより、選好物質・忌避物質ともに適切な分配を行える条件を検討する。

3.3.1.1 自動販売機を対象にしたプロセス案の検討

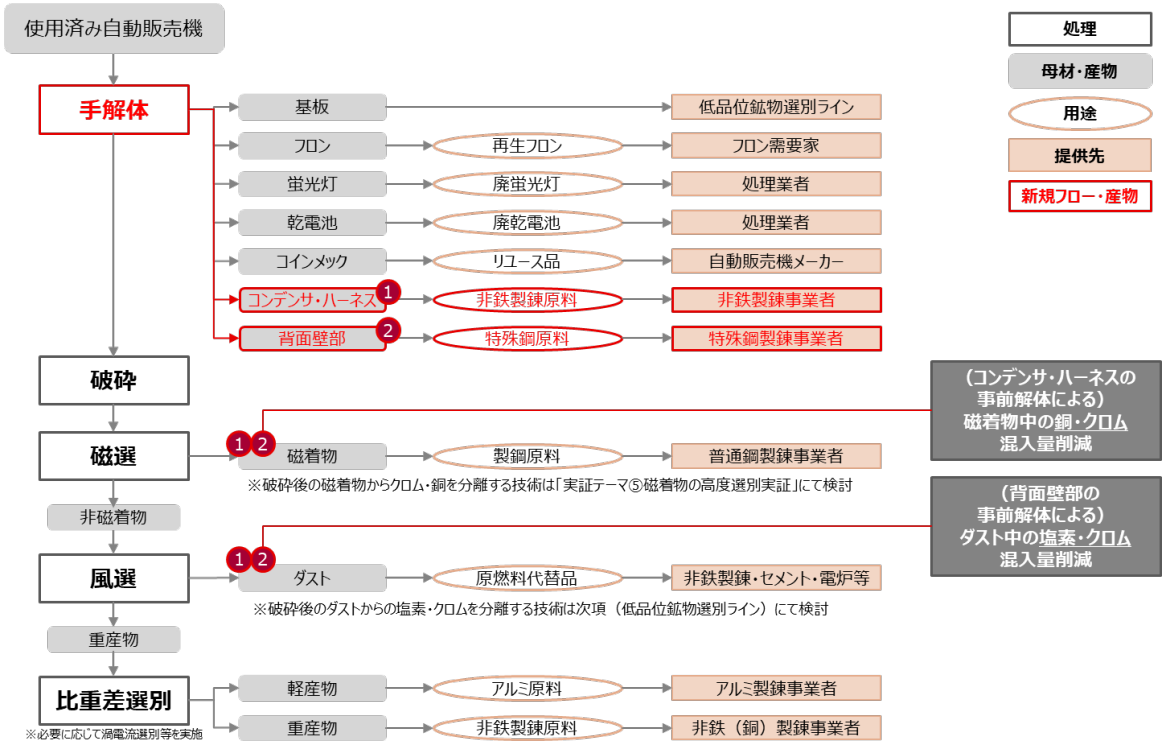
現行の使用済み自動販売機の処理は、既述の通りフロン排出抑制法に則り、フロンガスを回収する義務がある。また、蛍光灯や乾電池は、市況に応じて解体・回収されることがあるほか、コインメックはベンダーにリユース品として返却することもある。

忌避物質の管理という観点では、解体後の自動販売機は破砕もしくはプレスされ、その多くが鉄鋼電炉に供給されることを考えると、まずは鉄鋼電炉における忌避物質の管理が必要になる。具体的には、コンデンサやハーネスを事前に解体し、銅を分離することが必要とされる。

また、背面等の筐体の一部には、クロムを用いた鋼材が使用されており、こうした鋼材を事前に取り除くことにより、製鋼原料やセメント産業等の工業炉原燃料代替品に含まれるクロムを低減できる可能性がある、

尚、回収した基板類は、貴金属や銅品位が必ずしも高くないため、非鉄製錬原料として供給することは難しいものも含まれる可能性がある。この場合、小型家電で検討する、低品位人工鉱物の選別技術により、基板類を破砕・選別して、それぞれ有用金属（銅など）と原燃料代替品を回収することが望まれる（図表 67）。

図表 67　使用済み自動販売機を対象にした処理プロセス案



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.3.1.2 小型家電を対象にしたプロセス案の検討

現在、小型家電のうち、一部の資源価値の高いもの（携帯電話・スマートフォン等）は自治体や事業者経由で回収され、再資源化されている。特に、携帯電話・スマートフォンやデジタルカメラ等について、国立研究法人産業技術総合研究所では、製品の個体識別と自動解体・単体分離技術の研究を進めている [22]。

一方、資源価値の低い小型家電は、中間処理事業者等で破砕・選別され、鉄などの回収と残渣（シュレッダーダスト）の処分がされている。こうした残渣中に、選別工程で取り除けない塩素やクロムが混入してしまい、セメント産業をはじめとした工業炉での利用を阻害する可能性がある。

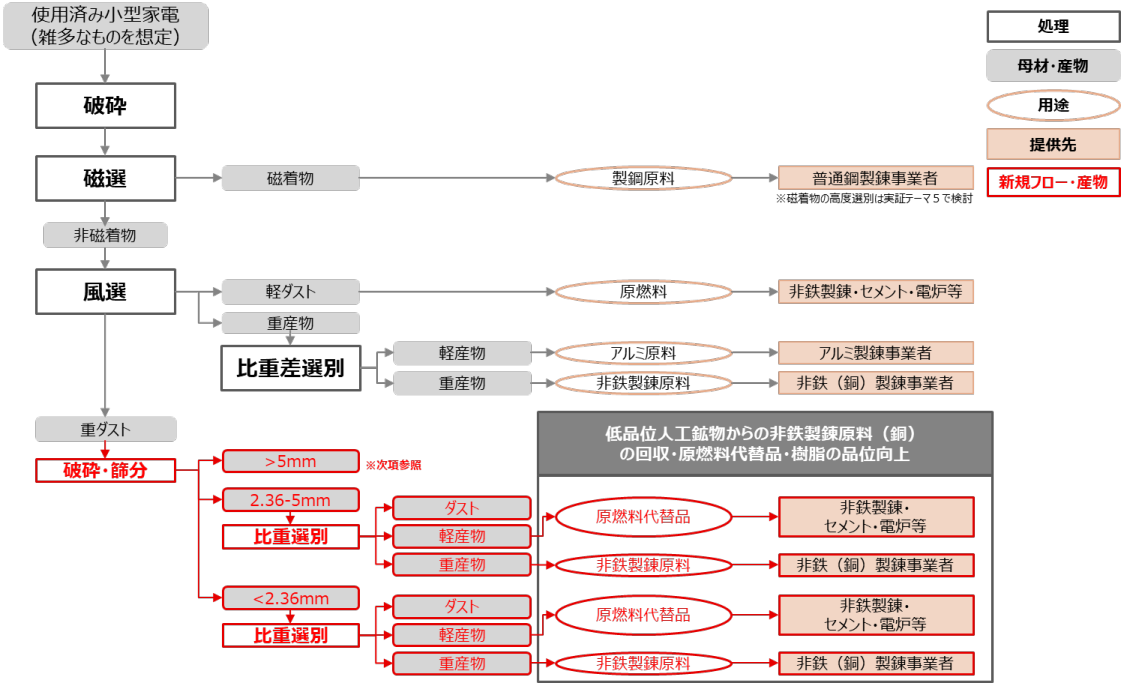
そのため、破砕品から磁選等により金属を分離した残渣から、こうした忌避物質を分離し、高品質な原燃料代替品を回収することが求められている。具体的には、燃焼時に塩化水素ガスを発生させるおそれのある塩素、セメント製品の品質悪化を引き起こすクロムを分離する必要がある。同時に、残渣中に含まれる有用金属（銅など）を回収することで、未利用資源の有効活用にも繋がることが可能である。

上記を実現するため、目的回収物とする物質の比重に着目して、選別工程の見直しを検討した。具体的には、重液もしくは流動層と、エアテーブルの利用を想定しており、5mm 以上の粗粒群は重液もしくは流動層で、5mm 以下の細粒群は改めて 2 つの粒群に選別し、エアテーブルにより選

[22] 産業技術総合研究所 SURE コンソーシアム事務局ウェブサイト（2020 年 3 月閲覧）

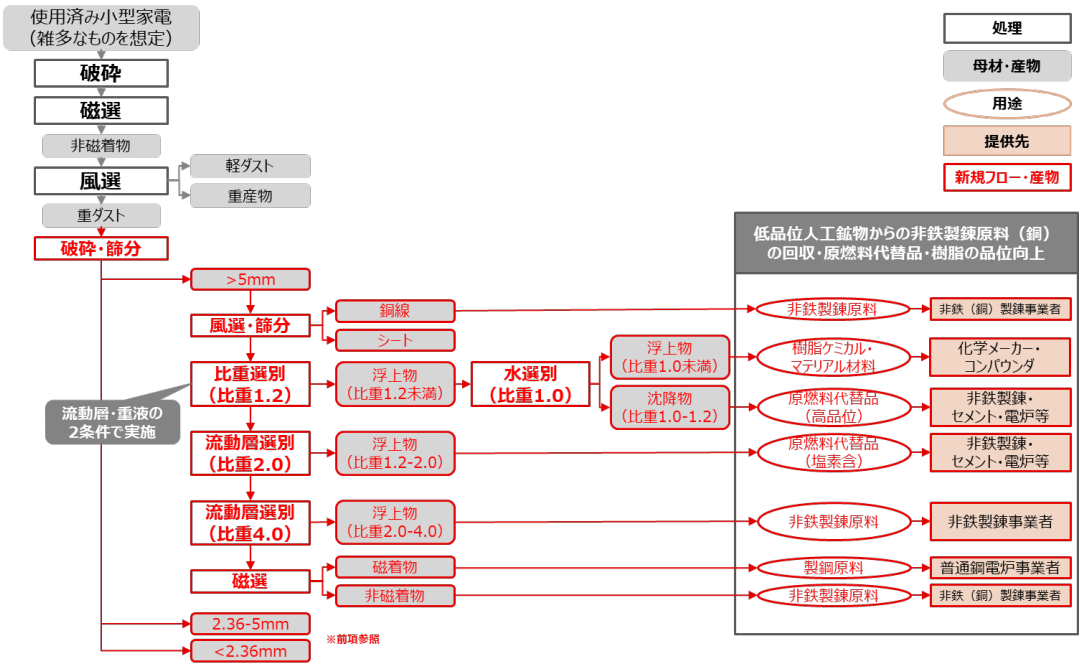
別を実施するフローを検討した。（図表 68、図表 69）

図表 68　使用済み自動販売機を対象にした処理プロセス案①



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

図表 69　使用済み自動販売機を対象にした処理プロセス案②（>5mm の詳細）



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

3.3.2. 樹脂・金属成分を分離する要素技術の検討

3.3.2.1 各回収物の重量比

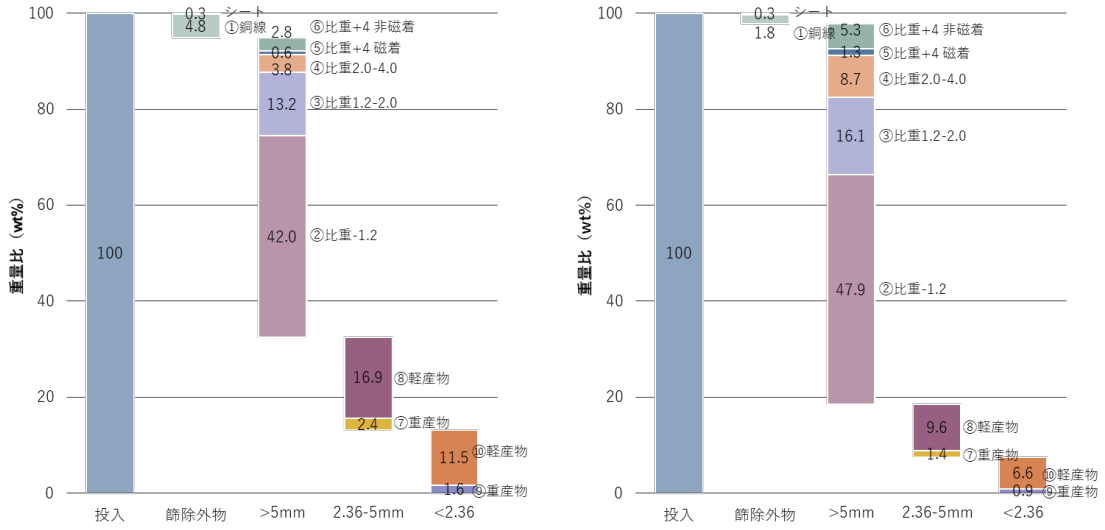
2.2.3.1 で検討したプロセス仕様案のうち、小型家電を対象としたプロセスについて、選別要素技術の検証を行った。

重ダストを粒径 20mm 以下に破砕したものを試験サンプルとし、流動層もしくは重液（比重 1.2）に投入する前に、篩選別によって、粒径 5mm 以上の粒群、粒径 2.36-5mm の粒群、粒径 2.36mm 未満の粒群、銅線およびシートを回収した。銅線およびシートが全体重量に占める割合は 5%未満であった。

粒群別では、粒径 5-20mm の粒群が占める割合が最も多く、次いで、粒径 2.36-5mm、粒径 5mm 以上の粒群であった。尚、比重 1.2 における選別を、Ⓐ流動層で実施する条件と、Ⓑ重液で実施する条件の 2 つの条件で試験を行っており、同一ロットから回収した異なるサンプルを使用しているため、原料のばらつきが回収重量や以後の選別結果に影響を与えている。

また、粒径 5-20mm の粒群のうち、最も回収重量の割合が大きかったのは比重 1.2 未満（②）であり、比重が大きい側になるほど、回収量が減少する傾向が確認された（図表 70）。これより、投入物中には、金属と比較して比重の小さい、プラスチック類が多く含まれていることが示唆された。

図表 70　選別回収物の重量比（左：Ⓐ流動層／右：Ⓑ重液）



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.3.2.2 各回収物の写真

各選別回収物の写真を図表 71～図表 73 に示す。

流動層・重液いずれを用いた場合でも、比重 1.2 以下（②）や比重 1.2-2.0 の回収物（③）には樹脂分が濃縮し、比重 4.0 以上の回収物（⑤、⑥）には金属分が濃縮している様子が確認できる。特に、比重 4.0 以上の非磁着物（⑥）には、銅が分配されている様子が確認された。また、比重 1.2-2.0（③）および比重 2.0-4.0（④）、比重 4.0 以上の非磁着物（⑤）には、破砕された基板が含まれている様子も確認された。

粒径 5mm 未満の粒群では、軽産物（⑧、⑩）に樹脂分、重産物（⑦、⑨）に金属分が分配されている様子が目視にて確認できた。しかし、粒径 5mm 以上の粒群と比較すると、非鉄製錬原料としての回収を想定した重産物中にも、樹脂が比較的多く含まれていた。

図表 71　選別回収物（粒径 5-20mm、Ⓐ比重 1.2：流動層を使用）

比重:-1.2 （②）	比重:1.2-2.0 （③）	比重:2.0-4.0 （④）
比重:+4.0 磁着物 （⑤）	**比重:+4.0 非磁着物 （⑥）**	

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 72　選別回収物（粒径 5-20mm、Ⓑ比重 1.2：重液を使用）

比重:-1.2 （②）	比重:1.2-2.0 （③）	比重:2.0-4.0 （④）
比重:+4.0 磁着物 （⑤）	**比重:+4.0 非磁着物 （⑥）**	

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 73　選別回収物（粒径 5mm 以下）

2.36-5mm：重産物（一部）（⑦）	2.36-5mm：軽産物（一部）（⑧）
<2.36mm：重産物（一部）（⑨）	**<2.36mm：軽産物（一部）（⑩）**

（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

3.3.2.3 主要金属の分配状況

成分分析の結果を用いて、各回収物への主要金属（銅、鉄、アルミ、クロム）の分配状況を図表 74 に示す。

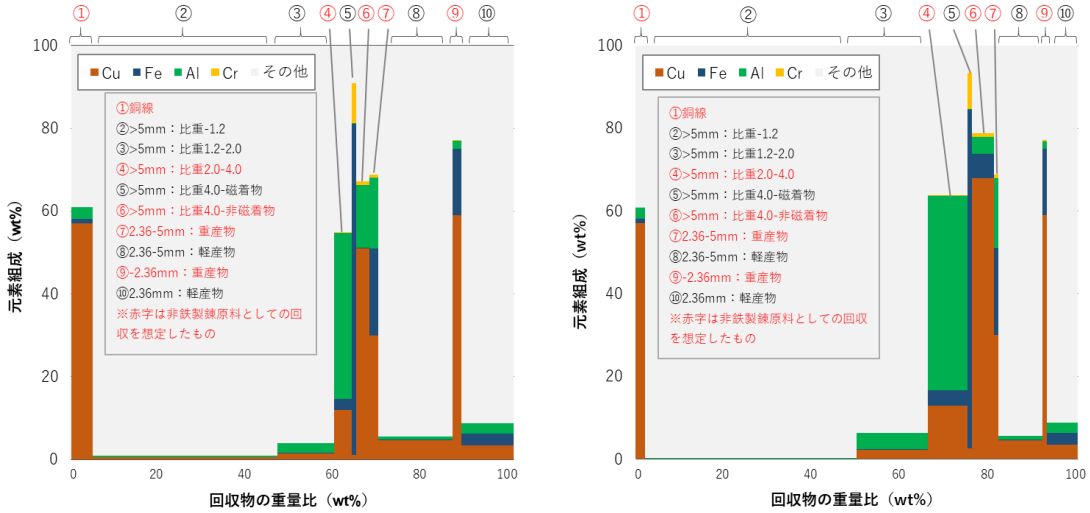
いずれの条件でも、銅線（①）や粒径 5mm 以上の比重 4.0・非磁着物（⑥）、粒径 5mm 未満の重産物（⑦、⑨）に銅が分配されている様子が確認された。一方で、粒径 5mm 未満の比重 2.0-4.0 の回収物（④）や、粒径 5mm 未満の軽産物（⑧、⑩）にも銅が分配されており、細かい銅線等がこうした低比重側の回収物に分配された可能性がある。

鉄は、粒径 5mm 以上の比重 4.0・磁着物（⑤）に最も多く含まれていたが、粒径 5mm 以上の比重 2.0-4.0 の回収物（④）にも鉄が含まれていた。細かい鉄線や他の部品に微量に使用された鉄の一部が、低比重側の産物にも分配された可能性がある。また、粒径 2.36-5mm の粒群では、重産物側に鉄が分配されている様子を確認できた（⑦）。粒径 2.36mm 未満の回収物には、軽産物（⑨）・重産物（⑩）ともに鉄が分配されており、細粒群中の細かな鉄粉等に含まれる鉄の回収は難しい可能性が示唆された。

アルミニウムは主に粒径 5mm 以上の比重 2.0-4.0 の回収物（④）に分配されていたが、比重 1.2-2.0 の回収物（③）や比重 4.0 以上の非磁着物（⑥）、粒径 2.36-5mm の重産物（⑦）にも分配されていた。アルミニウムの比重（2.7）を考慮すると、粒径 5mm 以上で比重 2.0-4.0 の範囲に分配されるのは妥当な結果であるが、その他比重にも分配された要因の究明が必要である。

クロムはほとんどが粒径 5mm 以上の比重 4.0 以上の磁着物（⑤）に分配されていた。これは、ステンレス鋼に含まれるクロムの影響と考えられ、一定度、その他の産物からクロムを分離することに成功した。

図表 74　主要金属の分配状況（左：Ⓐ流動層／右：Ⓑ重液）



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

3.3.2.4 ハロゲン（塩素・臭素）および硫黄の分配状況

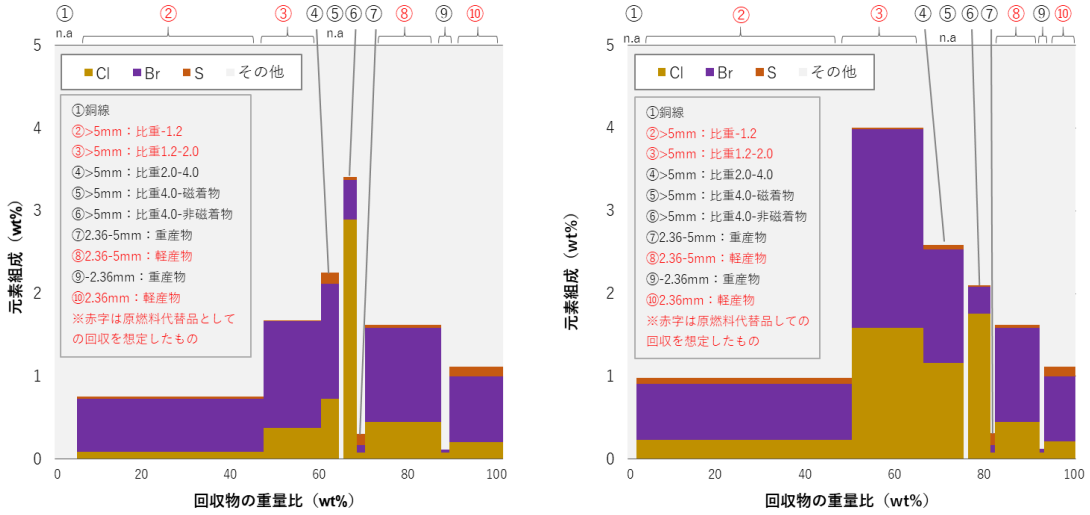
次いで、ハロゲン（塩素・臭素）および硫黄の、各回収物への分配状況を図表 75 に示す。

まず、塩素は、主に粒径 5mm 以上の比重 1.2-2.0（③）、比重 2.0-4.0（④）、比重 4.0 以上の非磁着物（⑥）、粒径 5mm 未満の軽産物（⑧、⑩）に分配されていた。いずれも PVC に由来する塩素分と推測され、粒径 5mm 以上の比重 1.2-2.0 や粒径 5mm 未満の軽産物には単体の樹脂、比重 2.0 以上の回収物には被覆銅線など金属と一体となった樹脂が含まれていたことに起因すると考えられる。

臭素の分配状況は塩素と類似しており、特に粒径 5mm 以上の比重 1.2-2.0（③）や粒径 5mm 未満の軽産物（⑧、⑩）に分配されていた。塩素の分配状況と異なるのは、粒径 5mm 以上の比重ごとの分配状況であり、臭素では、高比重側で含有率が小さくなる傾向が確認された。この要因は、塩素と比較して、被覆線としての使用頻度が低く、金属との片刃粒子が少ないことと考えられる。

硫黄の含有率は全体的に非常に少量であったが、主に粒径 5mm 以上の比重 2.0-4.0 の回収物（④）および粒径 2.36mm 未満の軽産物（⑩）に分配されていた。粒径によって含有率が高い比重の傾向が異なるため、硫黄分を十分に管理できているとは限らず、硫黄分を分離する必要が生じた際には、選別プロセスや条件を見直すことが必要である。

図表 75　ハロゲン（塩素・臭素）・硫黄の分配状況（左：Ⓐ流動層／右：Ⓑ重液）



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

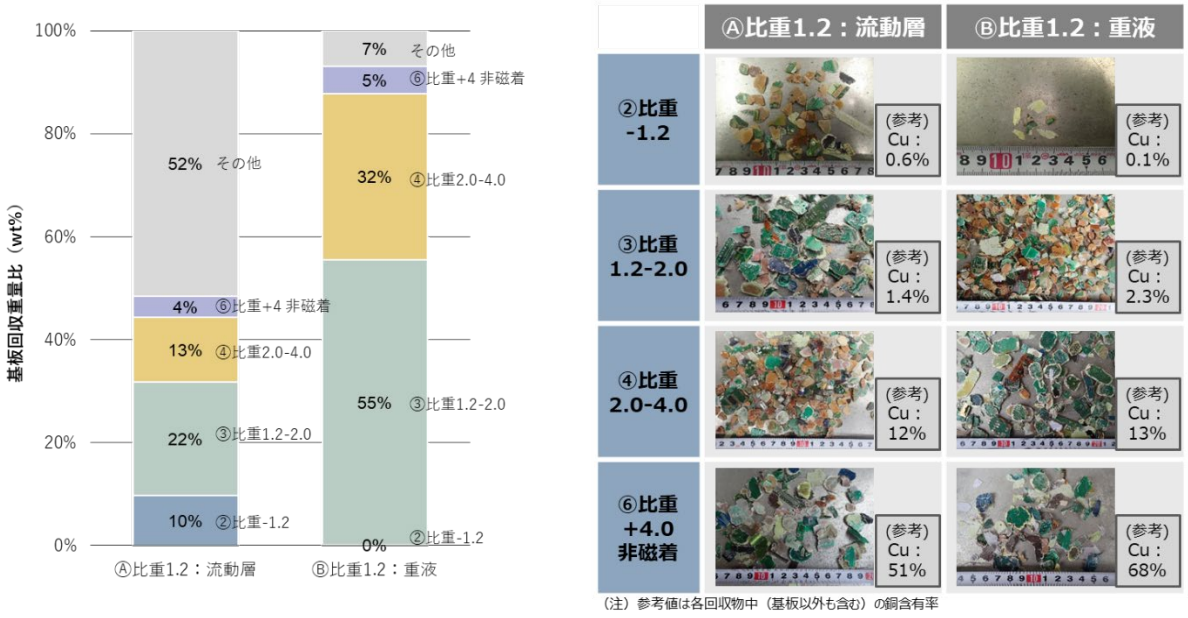
3.3.2.5 基板類の分配状況

流動層の比重選定では、基板（特にガラスエポキシ基板）を参考にしたため、投入物（重ダスト・破砕品）および各回収物中の基板含有量（重量ベース）によって評価を行った（図表 76）。尚、分析対象は粒径 5mm 以上の粒群のみとした。尚、「その他」は、粒径 5-20mm の粒群以外に分配された基板の重量を示し、具体的には細粒群等への分配を意味するが、ⒶとⒷのサンプルは（同一発生源・処理を行ったものの）異なるバッチから採取したものであるため、サンプル中に含まれる基板重量のばらつきも影響している。

流動層のみを用いた場合と、比重 1.2 で重液を用いた場合のいずれでも、基板は比重 1.2-2.0（③）に最も分配され、次いで比重 2.0-4.0（④）に分配された。ガラスエポキシ基板の比重が 1.8 前後であることを踏まえると、素子や銅線がついた状態では比重 2.0 を超える可能性もあり、妥当な結果であると言える。基板以外に由来する影響は排除できないが、銅の含有量は比重 1.2-2.0 と比重 2.0-4.0 で大きく異なるため、比重 2.0-4.0 に含まれる基板には、銅線が残存していた可能性が示唆された。また、比重 4.0 以上の非磁着物（⑥）には、いずれの条件でも基板はあまり分配されておらず、比重 4.0 以上では高品位な非鉄製錬想定原料を回収することを目標に、文献値および比重の簡易測定から設定した条件が一定度妥当であると考えられた。

尚、目視で確認したところ、ガラスエポキシ基板のほかに、紙フェノール基板のようなものも多く含まれていることがわかった。紙フェノール基板のほとんどは比重 2.0 未満に分配されていたが、比重 1.2 未満の回収物（②）の銅品位は極めて低く、銅を回収する観点では、紙フェノール基板は無視できるものと考えられる。

図表 76　基板の分配状況



（注）参考値は各回収物中（基板以外も含む）の銅含有率

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.3.2.6 非鉄製錬原料（銅）としての評価

上記では分配状況に関する議論を行ってきたが、ここからは回収物ごとに、素材産業の要求水準を満たすか、品位の観点から評価を行う。

まず、非鉄製錬への供給を想定した回収物に関して、非鉄製錬原料の選好物質・忌避物質の観点から評価を行った（図表 77）。

銅製錬原料を想定して回収した産物のうち、銅線（①）には銅が 60%程度含まれているが、金や銀は微量しか含まれていなかった。一方、忌避物質にあたるアルミニウムの含有量も軽微であった。

粒径 5mm 以上の比重 4.0 以上の非磁着物（⑥）は、金はほとんど含まれていないものの、銀や銅の品位が高い結果となった。しかし、銅製錬の忌避物質にあたるアルミニウムや（非鉄スラグのセメント供給を阻害する要因となりうる）クロムも多く含まれていた。

粒径 2.36-5mm の重産物（⑦）には、金が多く含まれているほか、銀も 1,000g/t 程度含まれているものの、銅品位は 30%程度と低く、また忌避物質であるアルミニウムやクロムが含まれていた。

粒径 2.36mm 未満の重産物（⑨）には、金、銀および銅の品位が高く、またアルミニウムやクロムの含有量も比較的抑えられているため、非鉄製錬原料としての評価対象水準まで濃縮できたものと考えられる。

図表 77　非鉄製錬原料（銅）としての評価

条件	No	回収物	選好物質			忌避物質				
			Au	Ag	Cu	Al	Cr	全塩素	全臭素	全硫黄
			(g/t)	(g/t)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Ⓐ 比重1.2：流動層	①	銅線	6.4	16	57	2.8	<0.01	-	-	-
	⑥	>5mm：比重+4非磁着物	1.1	3,500	51	15	1	2.90	0.48	0.03
	⑦	2.36-5mm：重産物	22	1,100	30	17	0.76	0.08	0.09	0.14
	⑨	-2.36mm：重産物	21	1,900	59	1.9	0.31	0.08	0.04	<0.01
Ⓑ 比重1.2：重液	①	銅線	6.4	16	57	2.8	<0.01	-	-	-
	⑥	>5mm：比重+4非磁着物	6.7	2,800	68	4.2	0.74	1.76	0.32	0.02
	⑦	2.36-5mm：重産物	22	1,100	30	17	0.76	0.08	0.09	0.14
	⑨	-2.36mm：重産物	21	1,900	59	1.9	0.31	0.08	0.04	<0.01

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.3.2.7 原燃料代替品としての評価

次に、セメント産業等に原燃料代替品（コークスや微粉炭等の代替品）として供給することを想定した回収物に関する評価を行った（図表 78）。

粒径 5mm 以上の比重 1.2 未満の産物（②）は、総発熱量を 8,000kcal/kg 以上有しており、また忌避物質であるクロムや塩素、臭素、硫黄分の混入も少ない。そのため、原燃料代替品として一定の評価が期待できる。

粒径 5mm 以上で比重 1.2-2.0 の産物（③）は、流動層のみを使用した条件と、比重 1.2 で重液を使用した条件で、総発熱量や塩素、臭素含有量に相違がみられた。流動層のみを使用した場合は、総発熱量が 6,000kcal/kg 近くあるが、重液を使用した場合は総発熱量 4,600kcal/kg 程度であった。また、重液を使用した条件での回収物では、塩素や臭素の含有量が比較的多い結果となった。上記の結果を比較すると、回収物の品質という観点から、流動層のみを使用した方が好適との見方もできるが、一方、重液を用いた方が、塩素や臭素、タルク分を含まない高品質な樹脂のみを比重 1.2 未満に濃縮できるという可能性も考えられる。投入した原料のばらつきによる影響も大きいものと考えられるため、現時点で結論づけることは困難であり、完全に同一の原料を対象に試験を実施して、検証する必要がある。

粒径 2.36-5mm の軽産物（⑧）は、総発熱量を 6,300kcal/kg 程度有しているが、塩素含有量が 0.4%程度とやや高く、また銅の含有量が多いのが特徴であった。また、粒径 2.36mm 未満の軽産物（⑩）は、総発熱量が 3,100kcal/kg 程度と極めて低く、銅に加えて鉄やアルミニウムを含んでいた。

図表 78　原燃料代替品としての評価

条件	No	回収物	総発熱量	選好・忌避物質※			忌避物質			
				Cu	Fe	Al	Cr	全塩素	全臭素	全硫黄
			(kcal/kg)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
比重1.2：流動層	②	>5mm：比重-1.2	8,387	0.56	0.05	0.31	0.01	0.09	0.64	0.03
	③	>5mm：比重1.2-2.0	5,841	1.4	0.19	2.4	<0.01	0.38	1.29	0.01
	⑧	2.36-5mm：軽産物	6,365	4.6	0.19	0.79	<0.01	0.45	1.14	0.03
	⑩	-2.36mm：軽産物	3,143	3.4	2.9	2.5	0.02	0.21	0.79	0.12
比重1.2：重液	②	>5mm：比重-1.2	8,757	0.05	<0.01	0.18	<0.01	0.23	0.68	0.07
	③	>5mm：比重1.2-2.0	4,644	2.3	0.07	3.9	<0.01	1.59	2.4	0.01
	⑧	2.36-5mm：軽産物	6,365	4.6	0.19	0.79	<0.01	0.45	1.14	0.03
	⑩	-2.36mm：軽産物	3,143	3.4	2.9	2.5	0.02	0.21	0.79	0.12

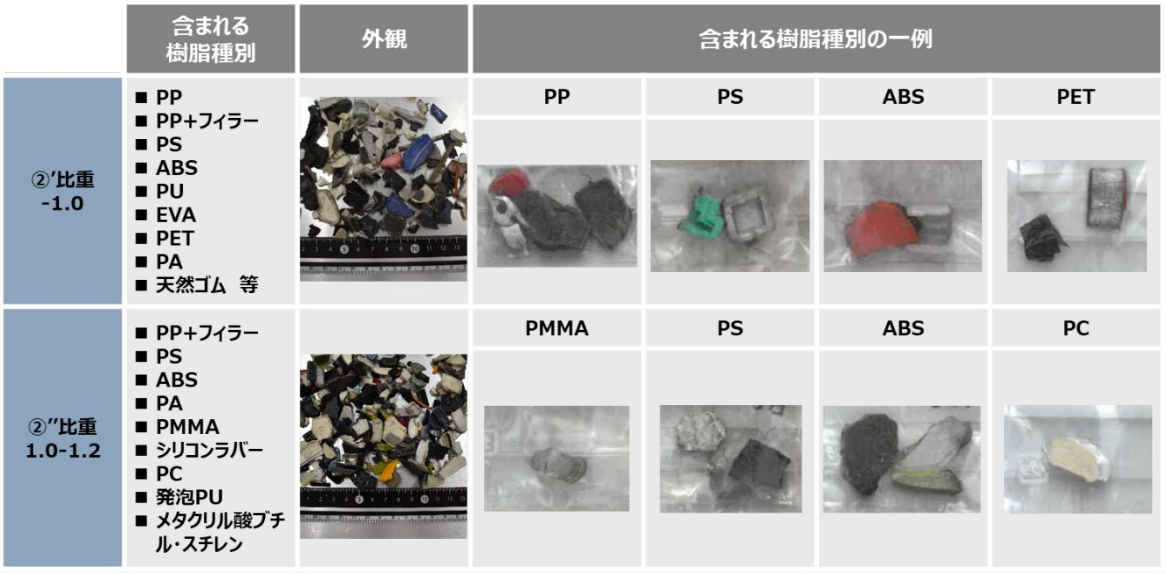
（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

3.3.2.8 樹脂マテリアルリサイクル原料としての評価

工業炉原燃料代替品としての良好な品質を示した、粒径 5mm 以上の比重 1.2 未満の産物（②）を対象に、さらに水（比重 1.0）で比重選別を行い、リサイクル樹脂コンパウンドとしての利用可能性を評価するため、回収物中に含まれる樹脂の種別を特定した。

まず、目視や着火時の臭気などにより、人力で含まれる樹脂の種別を予想したうえで、赤外線分光分析によって樹脂の同定を行った。分析の結果、比重 1.0 未満および比重 1.0-1.2 の双方に、多様な種別の樹脂が含まれることが明らかになった（図表 79）。比重 1.0 未満の産物にも、本来比重 1.0 より大きな PS（ポリスチレン）や PU（ポリウレタン）、PET（ポリエチレンフタレート）が含まれており、単一種の樹脂を回収するための工夫が必要であることが示唆された。

図表 79　樹脂マテリアルリサイクル原料としての評価



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

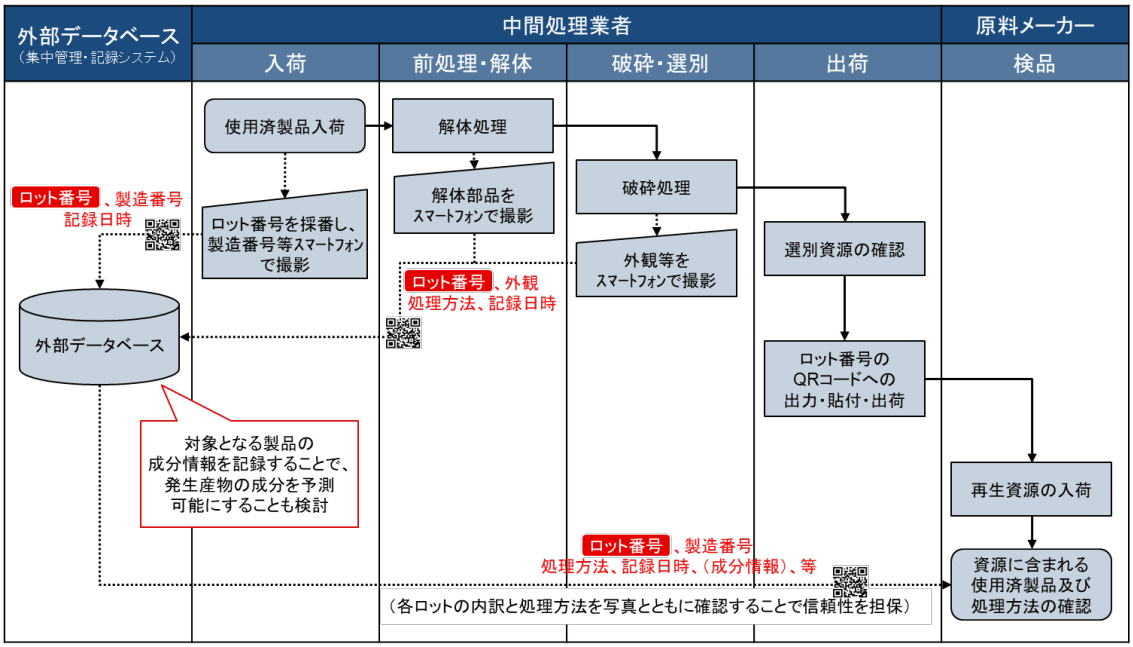
3.4.　情報連携システムの検討（実証事業４）

3.4.1. 情報連携システムの仕様検討

3.4.1.1 活動記録のワークフロー

2.2.4 で実施した検討を通じて、本事業では使用済自動販売機を対象とした中間処理工程での処理記録（活動記録）システムの検討を進めることにした。実際に現場で必要となる作業等を図示したのが図表 80 である。

図表 80　活動記録を行うワークフロー



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

本事業では中間処理業者の自己申告のみによる記録としないために、実際の処理記録をスマートフォンで撮影することで、処理を行った証跡とともに記録を管理することを想定している。

主なフローとしては、使用済製品（自動販売機）が入荷した際に、当該製品を破砕後に再生材料として販売する際のロット番号（バッチ処理の単位ごとに採番）を採番する。このロット番号の下に、各製品の個体番号（製造番号等）や処理方法を記録することで、ロット番号を呼び出す（QR コードを読み込む）ことでそこに含まれる個体および個体の処理方法を参照可能にすることを想定している。

ロット番号の採番後は、各製品の個体番号を記録し、ロット番号と個体番号が記録された QR コードを印刷して、各個体に貼り付ける。個体番号の記録に関しては、QR コードを読み込み、スマートフォンの入力フォーム上で入力することを想定するが、将来的な工数削減やヒューマンエラーの削減を目指して、スマートフォンで銘版を撮影し、画像認識により自動的に個体番号を取得する仕組みも検討する（後述）。

前処理・解体工程では各個体に貼り付けられた QR コードをスマートフォンで読み込むことで、各個体情報への入力画面を呼び出し、解体部品をスマートフォンで撮影・保存する。これにより、

事前解体した部品を特定するとともに、画像に記録される撮影日時等で他製品の混入等がないことも確認可能とする。破砕処理工程についても同様に、QR コードにより各個体情報への入力画面を呼び出し、当該事業所で採用している選別技術を入力するとともに、破砕機投入時の写真等を記録することで、投入時の概観や使用済製品の入替等が行われていないことを示す証跡とする。

その後の破砕工程を経た出荷時には、最初に採番したロット番号を QR コードに印刷し、販売荷姿となるフレコンやドラム缶に貼り付ける。その後、原料メーカーでの検品時にその QR コードをスマートフォンで読み込めば、当該製品（販売ロット）に含まれる個体番号や、各個体の処理方法、処理日時等が記録写真とともに参照できる。

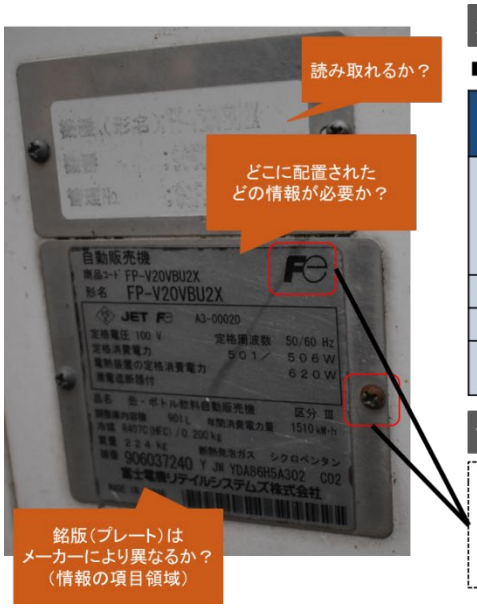
さらに、今後の展開として、各型式や製品番号に対して大まかな成分情報もしくは、特定元素（例えば忌避物質となるクロムや硫黄など）が分かれば、販売ロットに含まれる成分が定量的に把握可能になる。そのため、静脈産業だけでも有用な情報連携システムは構築可能であるが、メーカーからの情報提供や、特定の事前解体・破砕選別を行った製品の成分分析データを蓄積していけば、さらなる成分情報の精緻化が実現できる可能性もある。

3.4.1.2 情報検出方法

自動販売機はフロン処理の観点から、個体管理が行われている場合もあり、自動販売機に取り付けられた銘版等を確認することで、手作業で個体番号のメモ及および記録が行われている。一方で、将来的に個体番号の記録や管理に関して画像認識技術等を用いて効率化することで、従来作業からの工数削減や正確性向上も達成できる可能性がある。

図表 81 に銘版の情報検出における課題と実現方法を整理する。物体検出アルゴリズムの検討や、マーカ検出アルゴリズムの活用検討など、メーカーも多様かつ必ずしも明確ではない使用済製品の銘版を正確に検出するには課題も多いと考えられるが、本事業においても将来的な導入に向けて実現可能性を検討する。

図表 81　情報検出における課題とアプローチ



主な物体検出アルゴリズム（誤認識を減らし、特定領域のみの文字認識を行う）

■ **適切なアルゴリズムや他の製品（自動車等）への応用可能性も検討が必要**

	機械学習	深層学習		
	HOG	R-CNN	YOLO	SSD
アルゴリズム	隣接画素間の輝度の差を活用して特徴量を算出	画像から領域候補を割り出し、リサイズすることで目標物の特徴量を特定	最初に画像全体をグリッド分割し、領域ごとに目標物を特定	畳み込みネットワークを実行し、計算した特徴マップ上で対象物を予測
検出精度	―	◎	△	○
処理速度	―	△	◎	○
平均適合率（mAP）	―	△	○	○

マーカ検出アルゴリズム（物体検出の対象と一定の位置にあるマーカを検出する）

■ メーカーのロゴマークやねじ等のマーカーを設定することで検出対象とする領域を限定することで、物体検出の補助とする。

■ 精度向上のためマーカ検出アルゴリズムを活用する必要があれば、多様な銘版に共通するマーカを特定し、位置検出機能を付加する。

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

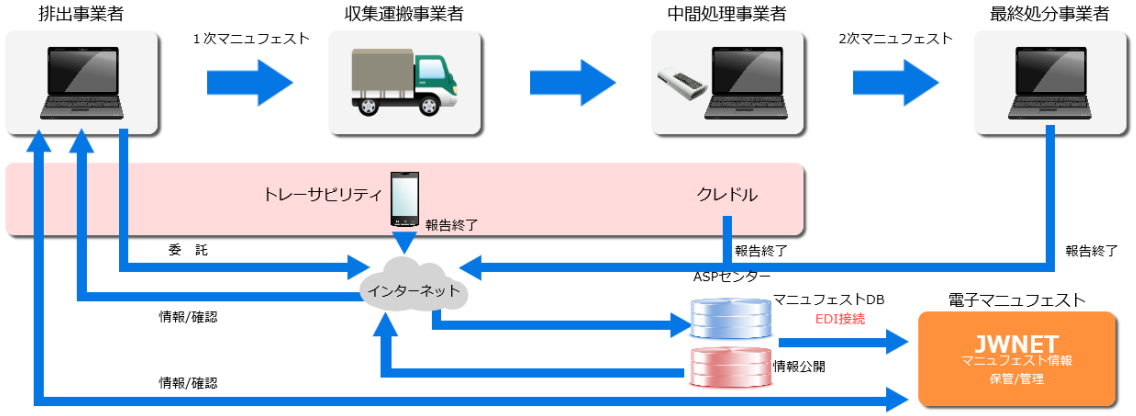
3.4.1.3 活動記録管理システム

本事業で検討するシステムでは、主にスマートフォンや既存の QR コードプリンター等の市販品を活用して構築できるシステムを想定している。一方で、ソフトウェアとしては、自社で引き取った対象物に対して各工程で実施した解体、破砕等の活動を記録する活動記録システムが必要である（例：電子マニフェストや、引取、解体、破砕等の工程を記録する自動車リサイクルシステム等）。

廃棄物業界では電子マニフェストのように国内全体で運用されるシステムに留まらず、適切な運搬・処理を証明するために活動記録を行うシステムの開発は多い。実際に JWNET の EDI システム（加入者と情報処理センターのサーバー間で電子マニフェスト情報のデータ授受を行う方式）の ASP 事業者（Application Service Provider）は 32 社に及ぶ[23]。一方で、法規制遵守を超えて自社で実施しているプロセスの詳細を記録し、本事業で検討を予定している破砕前後のトレーサビリティを担保するシステムは確認できない。また、複数事業者間に跨る情報連携システムもほとんど確認できず、これらが本事業の開発課題となると考えられる。

本事業では図表 82 に示す医療廃棄物トレーサビリティシステム等の構築実績があるシステム会社と意見交換を進めながら情報連携システムの検討を進めてきている。同社では、スマートフォンと QR コード、同社保有の活動記録システムを最大限に活用することで、安価かつ迅速にシステム構築を実現できることを特徴としている。今後は同社が保有するシステムを活用することで、金属資源を中心とした活動記録システムを構築していくことを目指している。

図表 82　医療廃棄物トレーサビリティシステム



（出所）株式会社イーシス（http://www.e-sis.co.jp/medical.html）

[23] https://www.jwnet.or.jp/jwnet/practice/info/edi/support.html

3.4.2. 連携する情報の特定

対象とする使用済製品を自動販売機と特定したことから、従来フローで得られる情報や、情報連携の実証システムを考えた場合に新たに取得が必要となる情報について図表 83 に整理した。

既述の通り、自動販売機に関してはフロン回収の観点から製品番号や製品種別（自動販売機、業務用冷蔵庫など)、フロンの種類、使用済製品の排出者等が管理されている。フロンに関する項目は必ずしも再生素材の高付加価値化の観点では必要なものではないが、個体管理が行われていることは、入口管理がしやすいという点で情報連携システムの対象としては適している。

一方で、現状では一般財団法人日本冷媒・環境保全機構が提供する「フロン回収工程管理表」等を活用した伝票管理が主と考えられるため、情報の記録自体は PC で行われていても、情報確認や PC への入力では手作業が発生するほか、引き渡し時も印刷して情報共有を行うことが必要と考えられる。こうした点は、活動記録システムが導入できれば、フロンに関する情報管理も合わせて行うことで、事業者の工数やヒューマンエラー削減等にも寄与することができると考えられる。

一方、新たに取得が必要な情報としては、既述の通り、事前解体部品や破砕前の概観、選別方法等が挙げられる。また、それぞれの処理日時も偽証防止の観点から記録が求められると考えられる。破砕後に関しては、梱包時に異物混入等がないことを示す意味でも外観の写真等が、販売する素材の数だけ求められると考えられる。但し、これらの追加情報は現状の想定であり、今後実証等を経ることで、作業工数の軽減を目指した取得情報の省略もしくは、原料メーカー側の要望に沿った取得情報の増加等も検討することが必要となる。これらの精度を向上し、最適なシステムを構築していくことが実証段階で求められると考えられる。

なお、図表 83 では各情報の取得及および管理において必要となるデバイスも明記している。多くの工程はスマートフォンや QR コードプリンター等の汎用機器で対応できると考えており、これらのデバイスによる情報記録・管理を実現する活動記録システムの開発が最大の課題となる。

図表 83　使用済自動販売機の情報管理における従来フローと実証フローの比較

■ 従来フロー

入荷前				入荷				前処理・解体				破砕・選別				出荷				検品	
情報種類		記録		情報処理				情報処理				情報処理				情報処理				情報処理	
		記録形式	媒体	確認方法	入力/変換方法	記録方法	出力方法	確認方法	入力/変換方法	記録方法	出力方法	確認方法	入力/変換方法	記録方法	出力方法	確認方法	入力/変換方法	記録方法	出力方法	確認方法	記録媒体
製品番号		刻印	銘版	目視	PC入力	PC（HDD）	ー	ー	ー	PC（HDD）	ー	ー	ー	ー	ー	ー	ー	PC（HDD）	印刷	目視	伝票
製品番号に紐づく対象	製品種別																				
	フロンの種類																				
	排出者	印刷	伝票	目視																	
	取次者																				
	フロン処理者	×	×	作業者確認																	
	フロン回収重量	×	×	×	×	×	×	測定	PC入力												
	フロン引渡先	×	×	×	×	×	×	作業者確認													
必要なデバイス		ー	ー	ー	PC	PC	PC	ー	PC	PC	ー	ー	ー	ー	ー						

■ 実証フロー

入荷前				入荷				前処理・解体				破砕・選別				出荷				検品	
情報種類		記録		情報処理				情報処理				情報処理				情報処理				情報処理	
		記録形式	媒体	確認方法	入力/変換方法	記録方法	出力方法	確認方法	入力/変換方法	記録方法	出力方法	確認方法	入力/変換方法	記録方法	出力方法	確認方法	入力/変換方法	記録方法	出力方法	確認方法	記録媒体
ロット番号		×	×	新規採番	ｽﾏｰﾄﾌｫﾝ入力	ｸﾗｳﾄﾞｻｰﾊﾞｰ	ー	ー	ー	ー	ー	ー	ー	ー	ー	管理番号抽出	自動生成	ｸﾗｳﾄﾞｻｰﾊﾞｰ	QR(ﾌﾚｺﾝ貼付)	QRコード読取	ｸﾗｳﾄﾞｻｰﾊﾞｰ
ロット番号に紐づく管理対象	管理番号に紐づく管理対象情報 製品番号	刻印	銘版	銘版撮影	画像認識	ｸﾗｳﾄﾞｻｰﾊﾞｰ	QR(本体貼付)	ー	ー	ｸﾗｳﾄﾞｻｰﾊﾞｰ	ー	ー	ー	ｸﾗｳﾄﾞｻｰﾊﾞｰ	ー	ー	ー	ー	ー	ｻｰﾊﾞｰｱｸｾｽ	
	製品種別																				
	フロンの種類																				
	排出者	印刷	伝票	目視	ｽﾏｰﾄﾌｫﾝ入力																
	取次者																				
	フロン処理者	×	×	作業者確認																	
	フロン回収重量	×	×	×	×	×	×	測定	ｽﾏｰﾄﾌｫﾝ入力												
	フロン引渡先	×	×	×	×	×	×	作業者確認													
	解体日時	×	×	×	×	×	×	外観撮影	自動記録												
	解体部品A	×	×	×	×	×	×		ー	（画像情報）				（画像情報）				（画像情報）			
	解体部品B	×	×	×	×	×	×			（画像情報）				（画像情報）				（画像情報）			
	解体部品C	×	×	×	×	×	×			（画像情報）				（画像情報）				（画像情報）			
	破砕前外観	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	外観撮影	ー	（画像情報）				（画像情報）			
	選別方法	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	作業者確認	ｽﾏｰﾄﾌｫﾝ入力								
	破砕日時・ロット	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	QRコード撮影	自動認識								
	破砕後外観（鉄）	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	外観撮影	ー	（画像情報）				（画像情報）			
	破砕後外観（MM）	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×			（画像情報）				（画像情報）			
	破砕後外観（ﾌﾟﾗ）	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×			（画像情報）				（画像情報）			
必要なデバイス		ー	ー	ｽﾏｰﾄﾌｫﾝ	画像認識ｼｽﾃﾑ ｽﾏｰﾄﾌｫﾝ	ｸﾗｳﾄﾞｻｰﾊﾞｰ	QRｺｰﾄﾞﾌﾟﾘﾝﾀ	ｽﾏｰﾄﾌｫﾝ	ｽﾏｰﾄﾌｫﾝ	ｸﾗｳﾄﾞｻｰﾊﾞｰ	ー	ｽﾏｰﾄﾌｫﾝ	ｽﾏｰﾄﾌｫﾝ	ｸﾗｳﾄﾞｻｰﾊﾞｰ	ー		自動生成ｼｽﾃﾑ（管理番号ﾏｰｼﾞ）	ｸﾗｳﾄﾞｻｰﾊﾞｰ	QRｺｰﾄﾞﾌﾟﾘﾝﾀ	ｽﾏｰﾄﾌｫﾝ	ｸﾗｳﾄﾞｻｰﾊﾞｰ

（注）　1.　MM：ミックスメタル

2.　「×」情報無し、「ー」アクションなし

3.　記録方法に特記が無い場合はテキスト情報で保存

（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

3.5.　磁着物の高度選別実証（実証事業５）

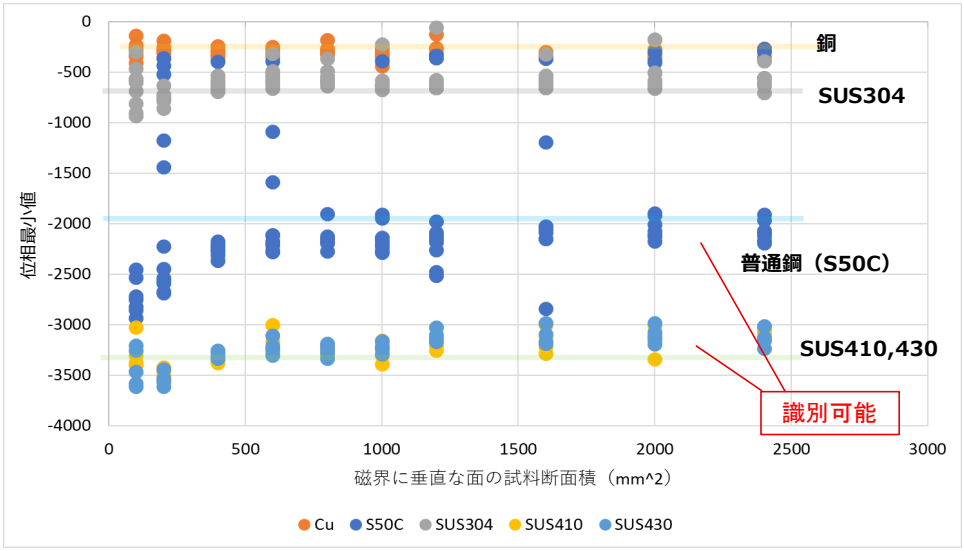
3.5.1. 電磁式ファインダーによる選別実証

3.5.1.1 標準試料を用いた試験結果

試験①試料断面積変化試験では、同じ高さで底面積の異なる各種標準試料を電磁式ファインダーに投入し、電磁センサーから得られたデータと磁界に垂直な面の試料断面積変化との相関を確認した。試料高さ条件 10 ㎜、2 ㎜における結果をそれぞれ図表 84、図表 85 に示す。図表 84、図表 85 に示す通り、試料の断面積によらず、銅、普通鋼（S50C、SPCC）、SUS304、SUS410、SUS430 はそれぞれほぼ一定の位相最小値を示すことが明らかになった。

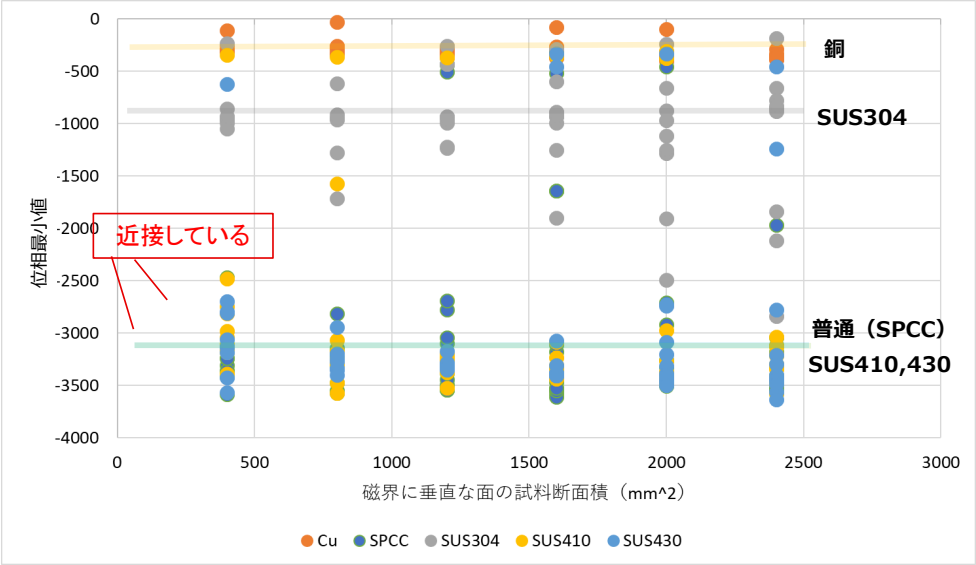
本装置における金属検知領域において、幅 12.5 ㎜の電磁センサーコイルがベルトに敷き詰められている。センサーコイルはそれぞれ独立して頭上を通過する金属に由来する誘導電流を検知しているため、粒径 12.5 ㎜（156.25 ㎜²）以上の試料であれば、試料断面積によらず位相最小値がほぼ一定の値を示したと考えられる。そのため、位相最小値に閾値を設定することで、粒径 12.5 ㎜（156.25 ㎜²）以上の試料であれば、普通鋼（S50C）と SUS410、SUS430 を識別できることが示唆された。一方で、普通鋼（SPCC）は SUS410、430 と近接した位相最小値を示しており、識別が難しいことが示唆された。

図表 84　試験①結果　磁界に垂直な面の試料断面積と位相最小値の関係
※各試料の高さを 10 ㎜で統一



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

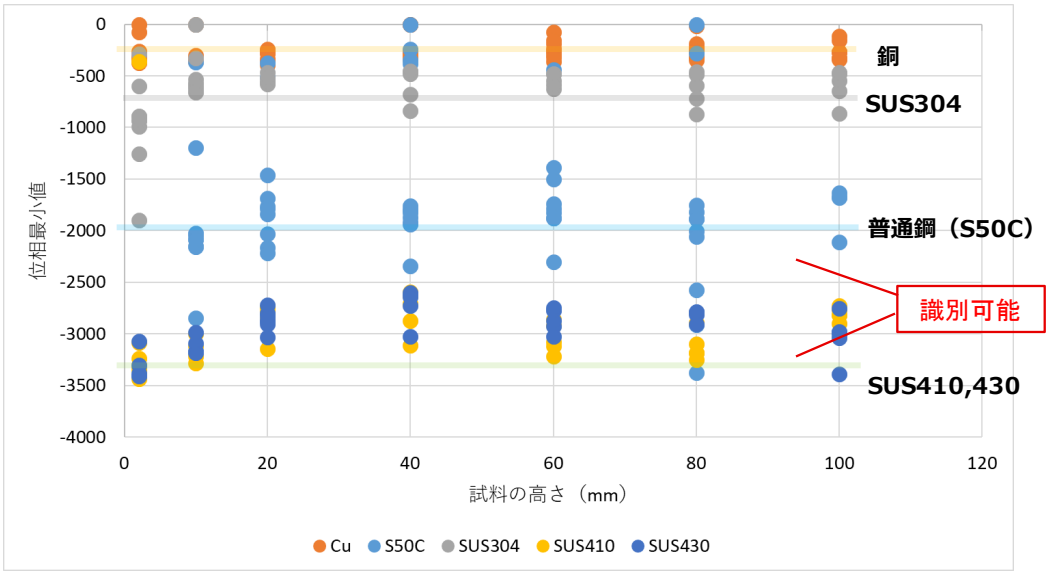
図表 85　試験①結果　磁界に垂直な面の試料断面積と位相最小値の関係
※各試料の高さを 2 ㎜で統一



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

試験②試料高さ変化試験では、同じ底面積で高さの異なる各種標準試料を電磁式ファインダーに投入し、電磁センサーから得られたデータと試料の高さとの相関を確認した。試料の底面条件 40 ㎜×40 ㎜における結果を図表 86 に示す。図表 86 に示す通り、試料の高さによらず、銅、普通鋼（S50C）、SUS304、SUS410、SUS430 はそれぞれほぼ一定の位相最小値を示すことが明らかになった。

図表 86　試験②結果　試料の高さと位相最小値の関係
※各試料の底面を 40 ㎜×40 ㎜で統一

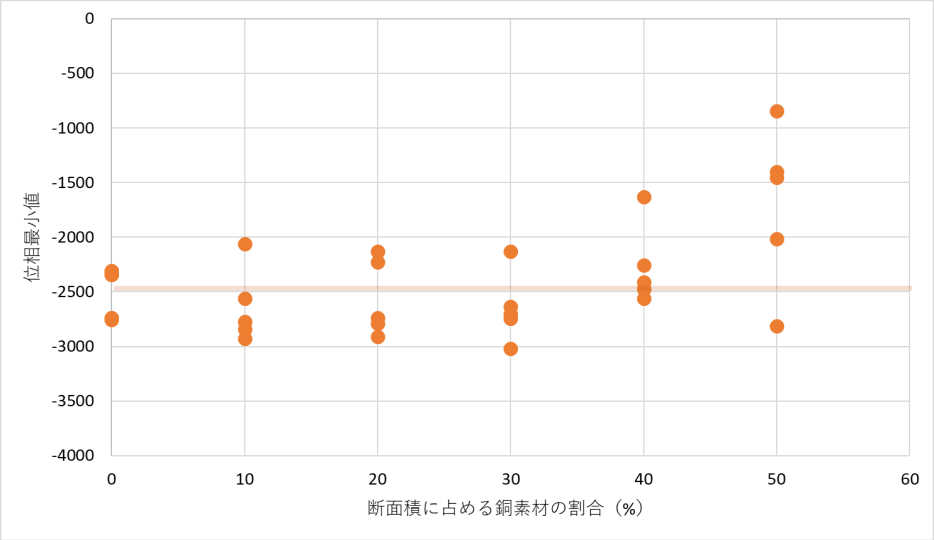


（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

試験③片刃粒子を模擬した二成分系試料試験では、断面積に占める銅素材の割合の異なる二成分系試料を電磁式ファインダーに投入し、電磁センサーから得られたデータと、試料断面積に占める銅素材の割合との相関を確認した。断面積に占める銅素材の割合と位相最小値の関係を図表 87 に示す。

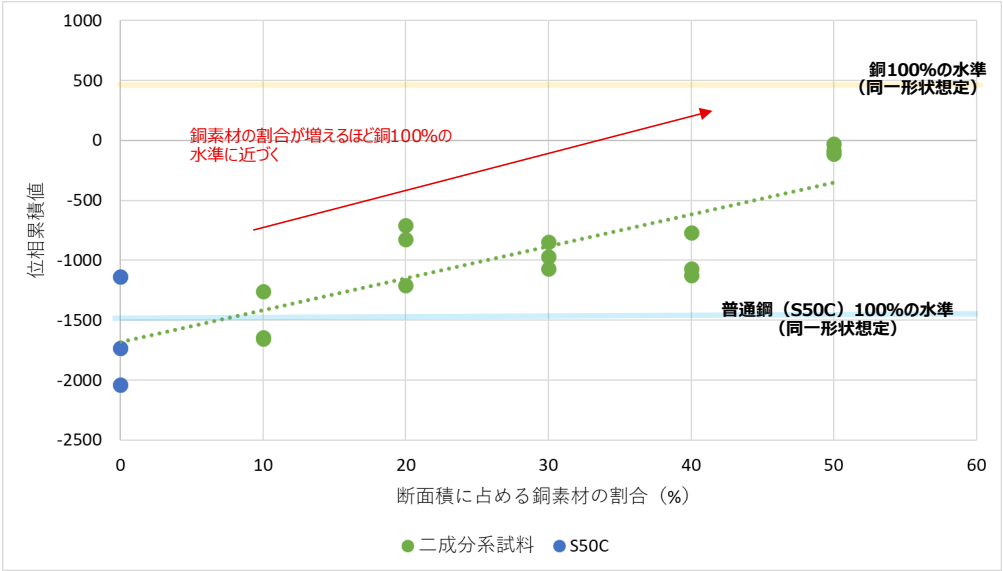
試験①・②で着目した位相最小値に注目しても、普通鋼（S50C）に由来する位相最小値に引きずられてしまい、銅素材の割合に応じた違いは確認されなかった。そこで、位相累積値（Meanphase 値）に注目し、断面積に占める銅素材の割合と位相累積値の関係を確認した（図表 88）。その結果、二成分系試料中の銅素材の割合が増えるにしたがって、銅の単味試料の位相累積値に近づくことが分かった。また、銅、普通鋼（S50C）の各種標準試料における体積と位相累積値の関係を図表 89 に示す。図表 89 に示す通り、銅と普通鋼（S50C）の標準試料において、概ね体積が 20,000mm^3 以上であれば、累積位相値がほぼ一定の値を示すことが分かった。以上を踏まえ、一定以上の体積に限り、位相累積値に着目することで、モーターコアと普通鋼（S50C）を識別できる可能性があることが示唆された。

図表 87　試験③結果　断面積に占める銅素材の割合と位相最小値の関係
※各試料の大きさを底面：50 ㎜×20 ㎜、高さ：20 ㎜で統一



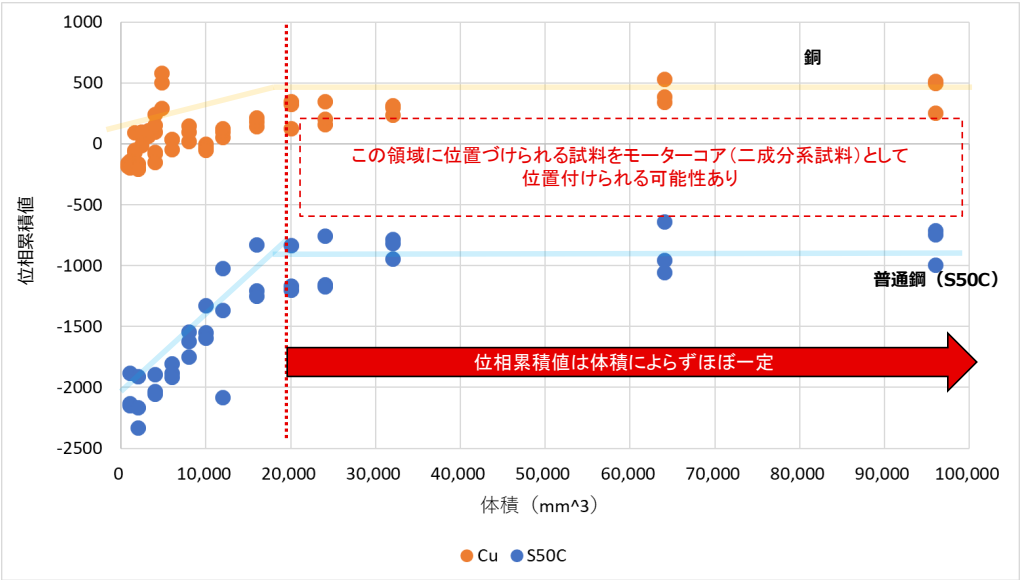
（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 88　試験③結果　断面積に占める銅素材の割合と位相累積値の関係



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 89　銅・普通鋼標準試料における体積と位相累積値の関係

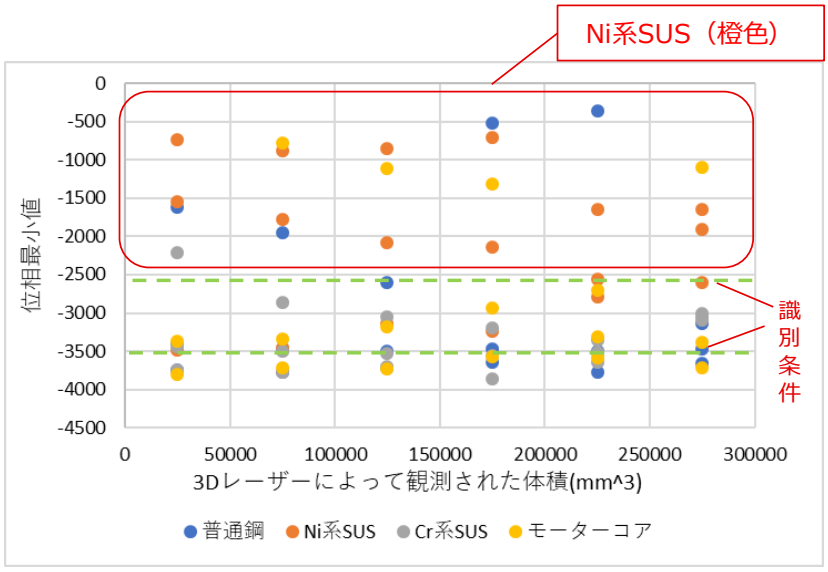


（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.5.1.2 実サンプルを用いた試験結果

実サンプルを用いた試験の結果を図表 90、図表 91 に示す。3D レーザーによって観測された体積と位相最小値の関係に着目すると、ニッケル系ステンレス鋼とそれ以外の金属種（普通鋼、クロム系ステンレス鋼、モーターコア）におおよそ識別できる可能性があることが分かった。また、3D レーザーによって観測された体積と位相累積値の関係に着目すると、位相累積値ではモーターコアはいずれも正の値を示す傾向が多いことが分かった。そこで、図表 92 に示す通り、位相最小値と位相累積値に識別条件を設定し、実サンプルをどの程度回収することができるのか確認した。

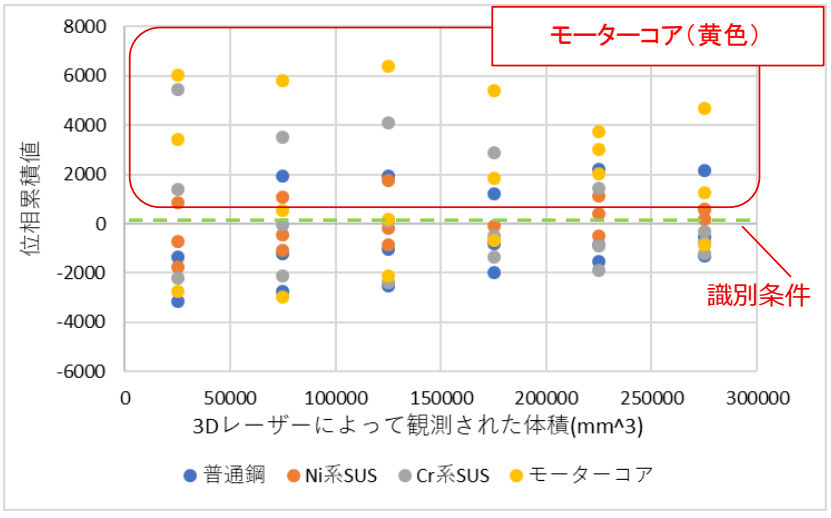
図表 90　実サンプルを用いた試験結果（位相最小値）



※50,000mm³毎に観測された位相最小値の中央値、最大値、最小値をプロット。

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 91　実スクラップを用いた試験結果（位相最小値）



※50,000mm³毎に観測された累積位相値の中央値、最大値、最小値をプロット。

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 92　位相最小値、位相累積値に着目し設定した識別条件

	産物 A （普通鋼濃縮）	産物 B （Ni 系 SUS 濃縮）	産物 C （Cr 系 SUS 濃縮）	産物 D （ﾓｰﾀｰｺｱ濃縮）
位相最小値	-3500 以上 -2600 未満	-2600 以上	-3500 以下	-3500 以上 -2600 未満
位相累積値	0 未満	-	-	0 以上

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

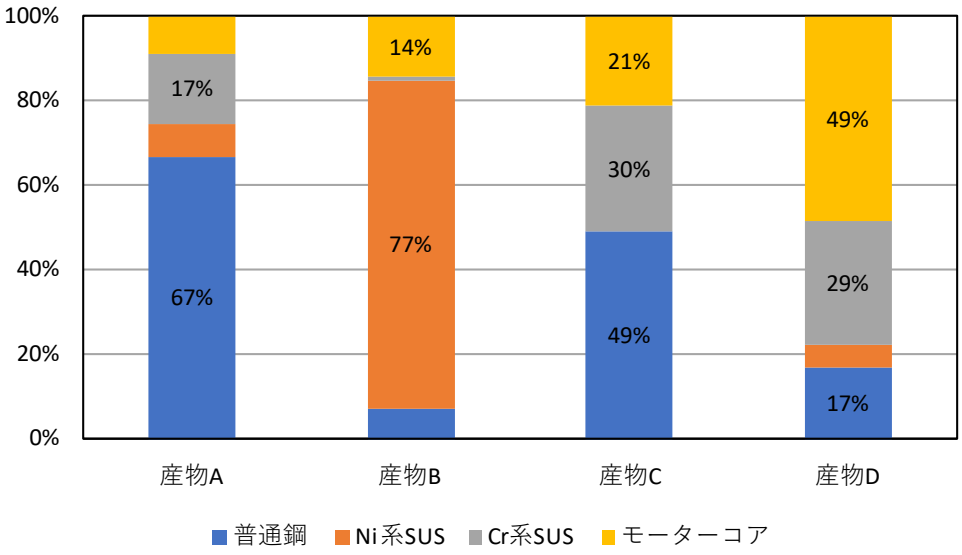
本考察で設定した識別条件に基づく選別を行った場合、得られる各種実サンプルの分配率および各種選別産物における濃縮度（品位）を図表 93、図表 94 に示す。図表 93 において、黄色で着色された数値は正しく識別された各種実サンプルの割合を示している。電磁式ファインダーにおいて最も適切に識別された実サンプルはニッケル系ステンレス鋼で、産物 B への分配率は 85%、濃縮度は 77%であった。クロム系ステンレス鋼は産物 C に最も多く分配されるが（48%）、濃縮度（品位）は 30%に過ぎず、産物 D（濃縮度＝29%）とあまり変わらず、よりよい識別条件を模索する必要がある。一方で、普通鋼の濃縮が期待される産物 A への分配率は 25%であり、普通鋼濃縮産物からクロム系ステンレス鋼が混入する割合を低減させることが可能であることを確認できた。モーターコアは産物 D に最も多く分配され（40%）、濃縮度（品位）も 49%と比較的高い。モーターコアの選別は多くが手選別で行われていることを考慮すると、現状より優れた品質の産物を得ることができると想定される。産物 C と D の総合産物を一段目で分別し、その後二段目で新たな識別条件を与えて分別できるようになれば、クロム系ステンレス鋼とモーターコアを選別できる可能性があることが示唆された。

図表 93　各種実サンプルの分配率

供給された 金属種	産物 A （普通鋼濃縮）	産物 B （Ni 系 SUS 濃縮）	産物 C （Cr 系 SUS 濃縮）	産物 D （ﾓｰﾀｰｺｱ濃縮）
普通鋼	49%	4%	39%	7%
Ni 系 SUS	11%	85%	0%	4%
Cr 系 SUS	25%	1%	48%	26%
モーターコア	12%	16%	32%	40%

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 94　各種選別産物中の濃縮度（品位）



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.5.2. LIBS ソーターによる選別実証

3.5.2.1 標準試料を用いた試験結果

本試験で用いたクロム、鉄のピーク波長は、互いに重ならないピーク波長のうち、最強ピークが観測された波長を使用した。本試験で用いたクロム、鉄のピーク波長を図表 95 に示す。本事業で用いたピーク強度は、観測されたバックグラウンド分を差し引いた積分値を用いることとした。

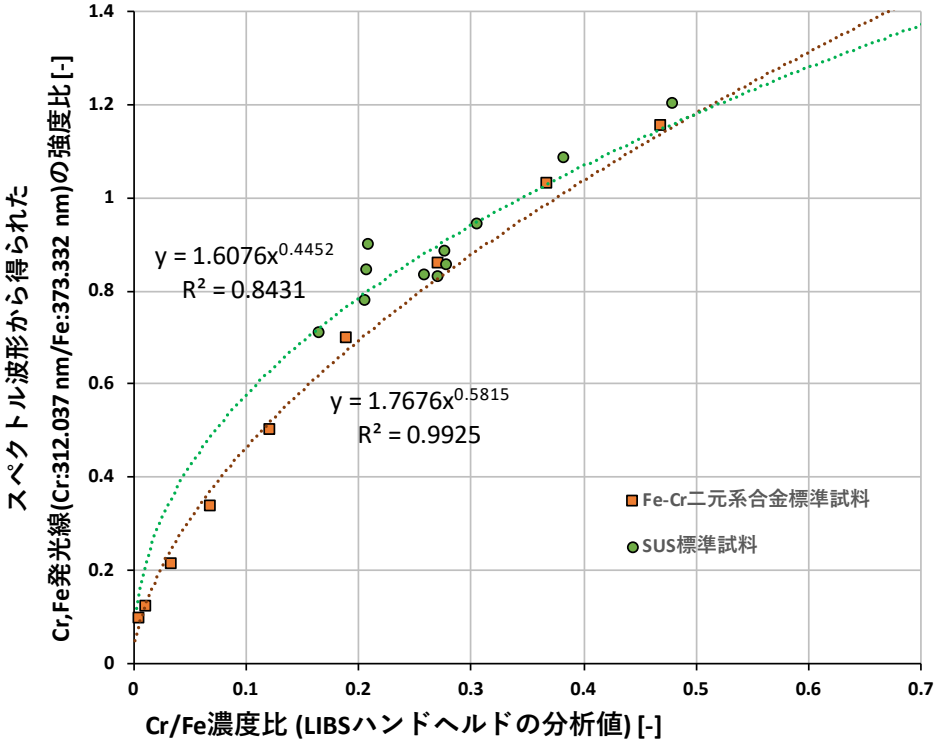
LIBS ハンドヘルド分析から得られた Cr/Fe 濃度比と LIBS ソーターにより得られた Cr/Fe 強度比との関係を図表 96 に示す。各標準試料については累乗近似がほぼ妥当であり、相関係数も比較的高い値を示した。

図表 95　本試験で採用したクロム・鉄のピーク波長

クロムピークの波長 [nm]	312.037
鉄ピークの波長 [nm]	298.483

（出所）早稲田大学大和田研究室提供

図表 96　標準試料における Cr/Fe 濃度比と Cr/Fe 強度比の関係

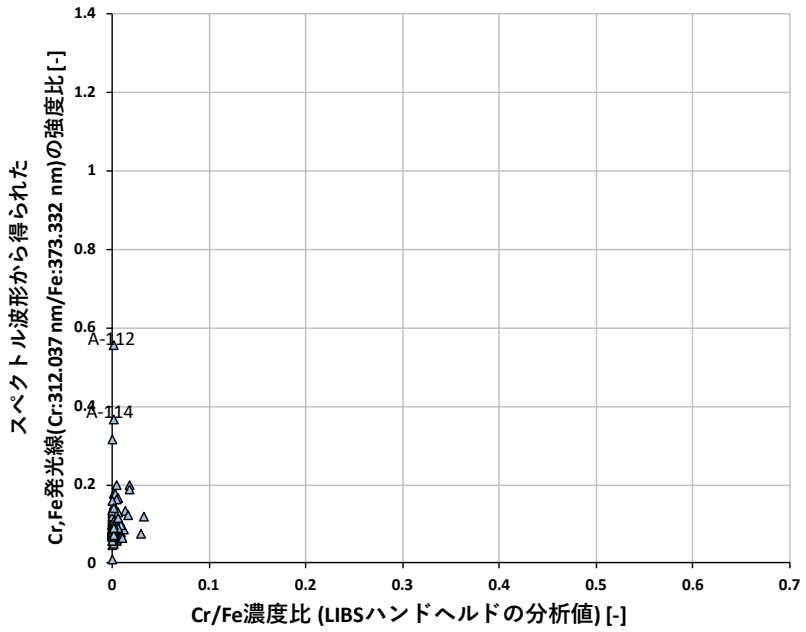


（出所）早稲田大学大和田研究室提供

3.5.2.2 実サンプルを用いた試験結果

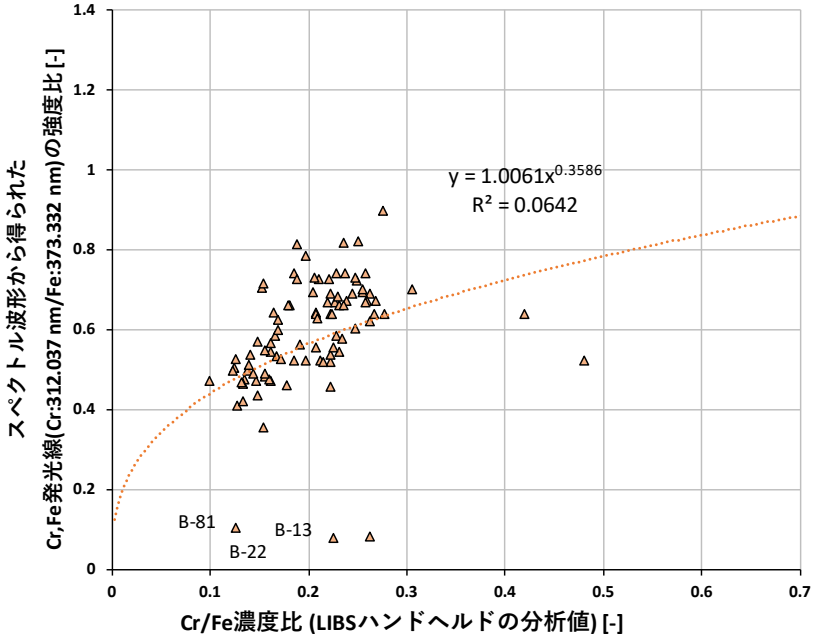
標準試料を用いた試験で得られた結果をもとに、実サンプルを用いた試験でも同様のピーク波長を使用した。試験で使用した各種実サンプルについて，LIBS ハンドヘルド分析から得られた Cr/Fe 濃度比と LIBS ソーターにより得られた Cr/Fe 強度比との関係を図表 97、図表 98、図表 99 に示す。

図表 97　普通鋼における Cr/Fe 濃度比と Cr/Fe 強度比の関係



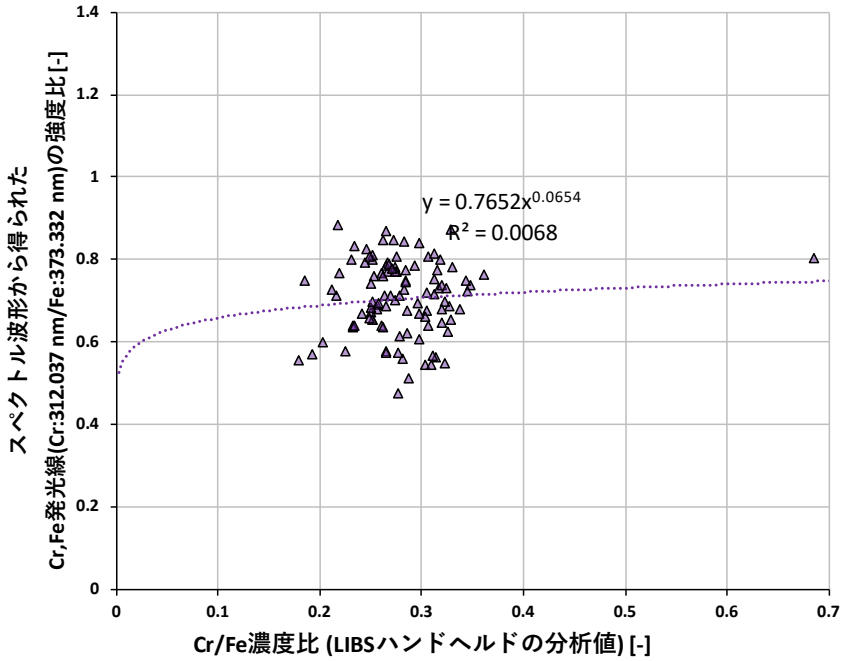
（出所）早稲田大学大和田研究室提供

図表 98　クロム系ステンレス鋼における Cr/Fe 濃度比と Cr/Fe 強度比の関係



（出所）早稲田大学大和田研究室提供

図表 99　ニッケル系ステンレス鋼における Cr/Fe 濃度比と Cr/Fe 強度比の関係



（出所）早稲田大学大和田研究室提供

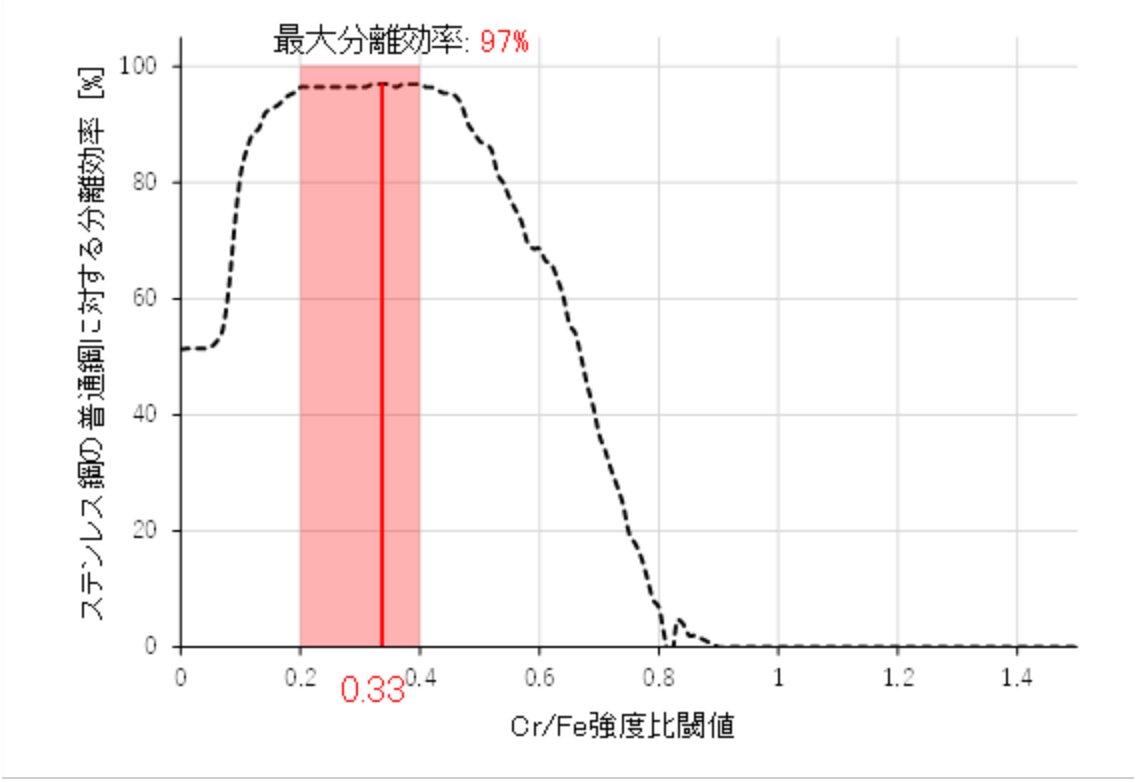
普通鋼とステンレス鋼（クロム系およびニッケル系）の分離可能性を検討するために，LIBS ソーターで得られた Cr/Fe 強度比の閾値を検討した。具体的には、設定した Cr/Fe 強度比閾値より大きい Cr/Fe 強度比を示す金属をステンレス鋼として回収し、小さい Cr/Fe 強度比を示す金属を普通鋼として回収すると仮定し、普通鋼のステンレス鋼に対する分離効率が最大となる閾値を検討することとした。普通鋼のステンレス鋼に対する分離効率の定義を以下に示す。これは全粒子中で普通鋼とステンレス鋼の完全分離が行われる確率を表している。

普通鋼のステンレス鋼に対する分離効率 ＝ 普通鋼の回収率 ― ステンレス鋼の混入率

・・・(式 1)

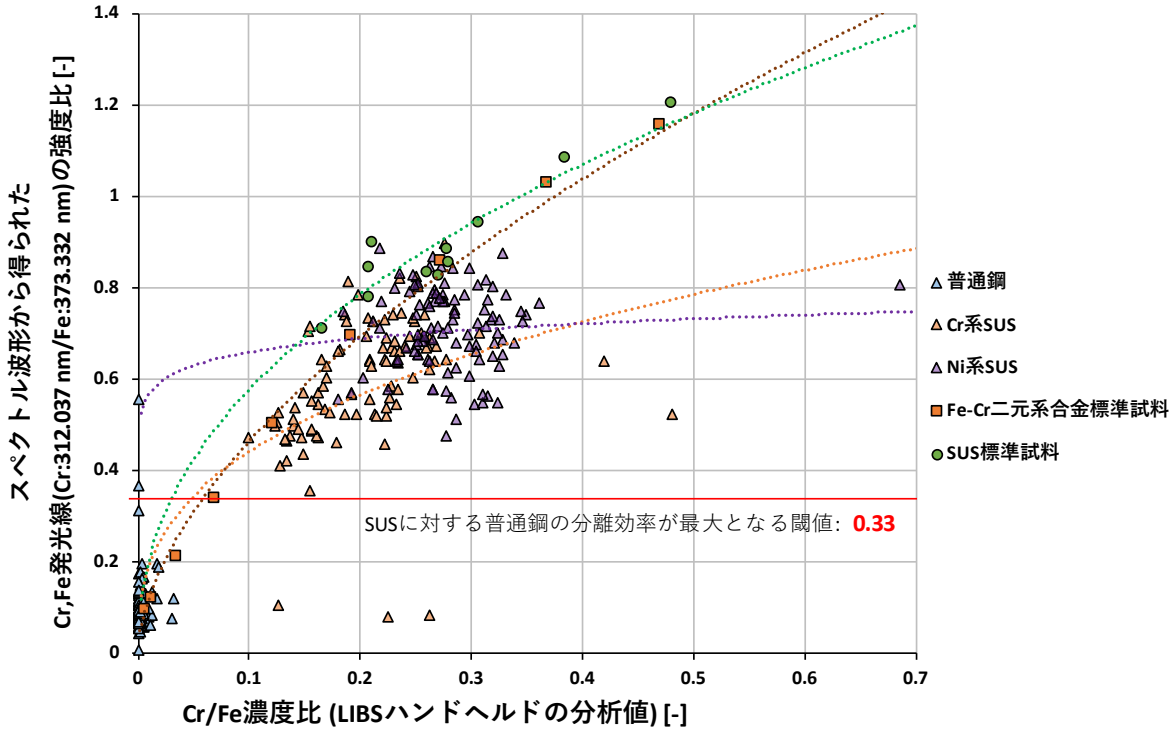
図表 100 に、同閾値を変化させた際の、普通鋼濃縮物における、普通鋼のステンレス鋼に対する分離効率の変化を示す。図表 100 より、同分離効率は Cr/Fe 強度比閾値 0.33 で最大値 97 %を示すとともに、同閾値 0.2~0.4 の広い範囲で高い分離効率を示すことが分かる。このことから、LIBS ソーターにおいて Cr/Fe 強度比を閾値とすれば、普通鋼とステンレス鋼の良好な、そして信頼性の高い分離が達成されることが理解される。図表 101 に全試料（標準試料および実サンプル）における Cr/Fe 濃度比と Cr/Fe 強度比の関係を示す。この結果からも、Cr/Fe 強度比 0.33 以下に普通鋼が多く分布し、0.33 以上にステンレス鋼が多く分布していることがわかる。

図表 100　Cr/Fe 強度比閾値と普通鋼のステンレス鋼に対する分離効率の関係



（出所）早稲田大学大和田研究室提供

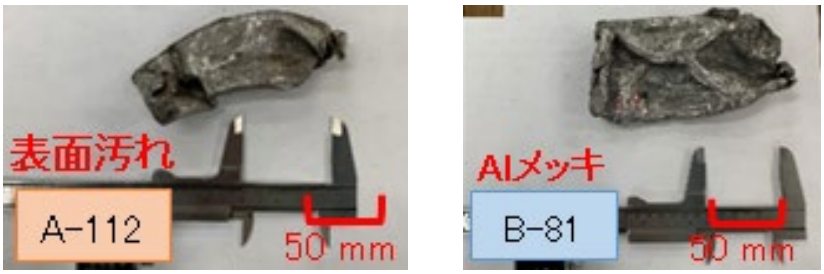
図表 101　全試料における Cr/Fe 濃度比と Cr/Fe 強度比の関係



（出所）早稲田大学大和田研究室提供

なお、本試験において、Cr/Fe 濃度比と Cr/Fe 強度比の関係が不正であった実サンプルが存在した。普通鋼にもかかわらず、Cr/Fe 強度比が大きかった実サンプル(図表 97 中の A-112 と A-114)とステンレス鋼にも拘わらず Cr/Fe 強度比が小さかった実サンプル(図表 99 中の B-13, B-22, B-81)である。図表 102 にその外観を示す。これらのスペクトル波形を観察した結果、いずれの粒子からも亜鉛やアルミニウムなどのメッキ成分や不純物由来と思われる元素の発光が観測された。おそらく粒子表面にこうした不純物が存在しており、レーザーエネルギーの一部がそれらのアブレーションに消費されて母材のアブレーション量が減少したものと考えられる。これら粒子については各種スペクトルの発光強度のバラツキの増大や P/B（Peak/Background）比の低下が認められ、それを裏付ける結果となっている。

図表 102　Cr/Fe 濃度比と Cr/Fe 強度比の関係が不正であった実サンプル

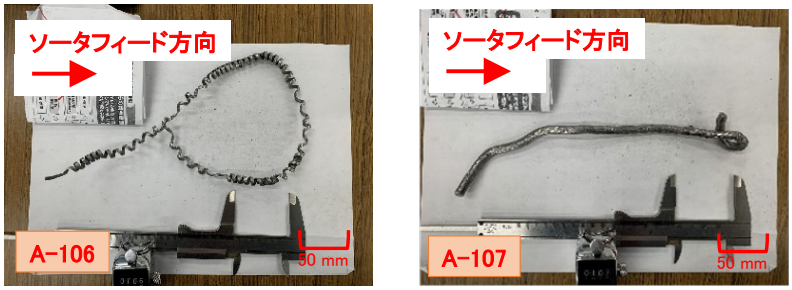


（出所）早稲田大学大和田研究室提供

また、今回の LIBS ソーター試験において非検出であった実サンプルも存在した。試料の例を図表 103 に示す。LIBS ソーターにフィードしてスペクトル波形を観測するためには、3D カメラによる形状認識とともに試料粒子にレーザーが照射され十分な強度のプラズマが生成されなければならない。図表 103 中の実サンプル A-106 は 3D カメラによる形状認識がなされず、粒子 A-107 は、形状認識はされたものの、レーザーが粒子ではなくベルトコンベア上に照射されたものである。

現在の LIBS ソーターでは、始めにベルト表面と平行に走るスキャンレーザーにて試料粒子の通過を認識し、それがトリガーとなって以後のシステムが作動する仕組みになっている。そのため、A-106 のように試料が細線状で高さの低い粒子については，試料粒子の通過を認識することができず、トリガーが働かない可能性がある。また、レーザー照射アルゴリズムでは、試料粒子の 3D 形状を認識し、その重心位置にレーザーが照射される仕組みとなっている。A-107 のようなドーナツ形や L 字形の中空粒子等では、試料にレーザー照射できない確率が高いと考えられる。

図表 103　非検出であった実サンプル

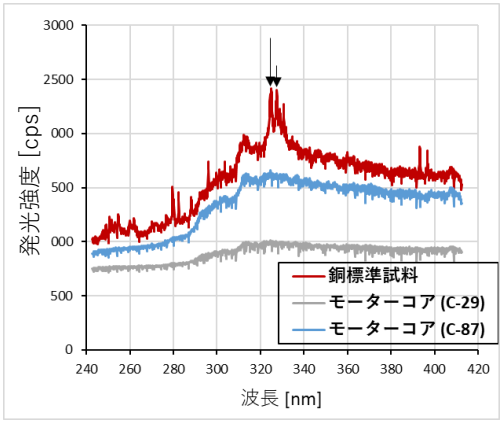


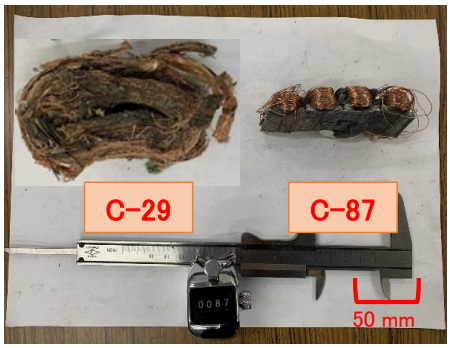
（出所）早稲田大学大和田研究室提供

モーターコアは基本的に鉄心の周りに銅線が巻き付けられている。そのため、シュレッダー破砕処理後、その多くは磁着物として回収される。そこで、LIBS ソーターによりモーターコアの銅を検知することによる除去の可能性を検討した。モーターコアの中でも銅線露出率の高い実サンプル C-29 と C-87（図表 104（右））を LIBS ソーターに投入した際に得られたスペクトル波形と、銅の標準試料を投入した際に得られたスペクトル波形を図表 104（左）に示した。標準試料では銅のピークを確認することができるが、モーターコアではほとんど確認できなかった。

銅は潜熱が大きい（他金属と比較してプラズマ化しにくい）金属であり、LIBS での検知には比較的高いレーザーパルスエネルギーが必要となる。しかし、本 LIBS ソーターの同エネルギーは 1 mJ と非常に低く、モーターコア中の銅線が絡み合った複雑な形状のものを検知することが困難であることが示唆された。一方で、レーザーパルスエネルギーが低ければ、省エネルギーに分析を行うことができるという利点もある。そのため、今後、モーターコアを識別するために必要なレーザーパルスエネルギーの最小値の検討などが望まれる。

図表 104　モーターコアのスペクトル波形（左）およびモーターコアの外観（一部）（右）





（出所）早稲田大学大和田研究室提供

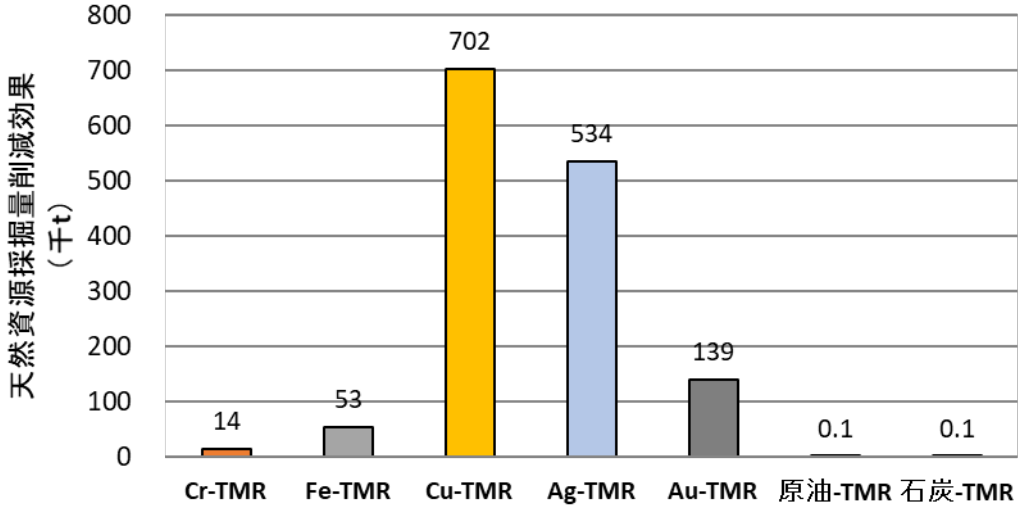
3.6.　事業における環境影響改善効果、CO_2 排出量削減効果の評価

3.6.1. 資源回収による「天然資源採掘量削減効果」

本事業が普及されることによる天然資源採掘量削減効果の推計結果を図表 105 に示す。

本事業の成果が普及することにより、TMR 換算で、クロムで 14 千 t、鉄で 53 千 t、銅で 702 千 t、銀で 534 千 t、金で 139 千 t、原油で 0.1 千 t、石炭で 0.1 千 t の天然資源採掘量削減効果をもたらすことが分かった。

図表 105　天然資源採掘量削減効果の推計結果



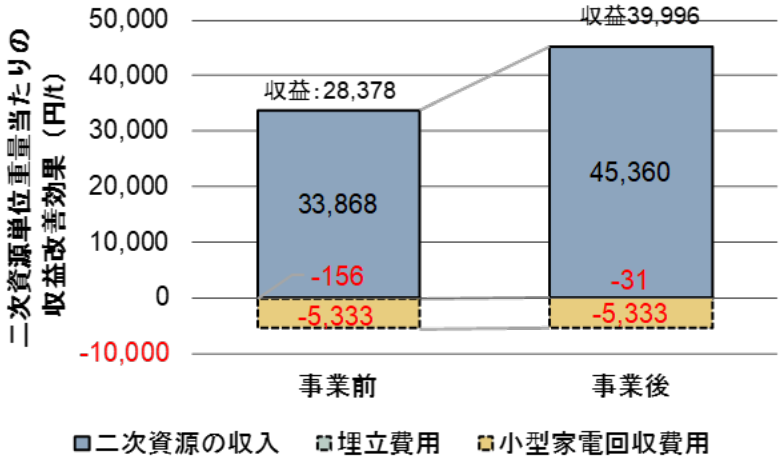
（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.6.2. 二次資源単位重量当たりの収益改善効果（資源効率性向上効果）

本事業が普及されることによる二次資源単位重量当たりの収益改善効果（資源効率性向上効果）の推計結果を図表 106 に示す。

本事業の成果が普及することにより、各種二次原料の取引単価が忌避物質の品位低下に応じて上昇し、また取引量も増加する等により、二次資源の売却収入は増加し、結果として中間処理事業者における収益は改善する（1t あたり約 1 万 1 千円増加）ことが示唆された。

図表 106　二次資源単位重量当たりの収益改善効果（資源効率性向上効果）の推計結果

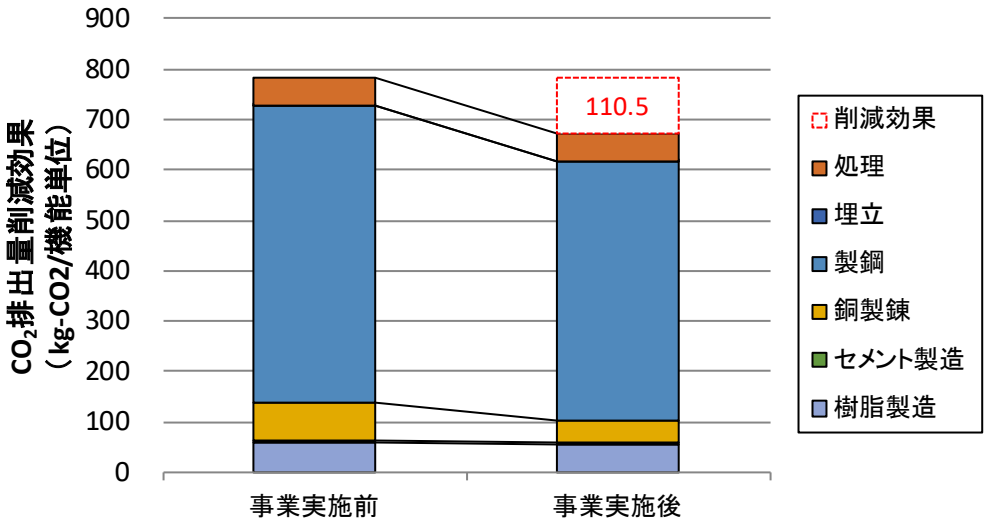


（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.6.3. CO_2 排出量削減効果

本事業が普及されることによる CO_2 排出量削減効果の推計結果および各プロセスにおける CO_2 排出量推計結果をそれぞれ図表 107、図表 108 に示す。
本事業の成果が普及することにより、機能単位あたり 110.5kg の CO_2 を削減する効果があることが推計された。

図表 107　CO_2 排出量削減効果の推計結果



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 108　各プロセスにおける CO_2 排出量推計結果

プロセス		事業実施前	事業実施後
処理		55.3	55.9
埋立		0.2	0.0
製鋼		589.1	513.0
	鉄鋼電炉	477.1	477.1
	ステンレス鋼製造	35.9	35.9
銅製錬		74.7	43.1
セメント製造		2.5	2.5
樹脂製造		59.8	56.6
合計		781.6	671.1

（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

金属リサイクルの分野では、スクラップに含まれる成分情報などの不足により、情報の非対称性に起因する「市場の失敗」がしばしば起きている。忌避物質の含有情報が不明であるために取引が成立しておらず、選別技術や成分を客観的に示す方法が原因で付加価値の低い再資源化に回されている場合がある。本事業の「ソーティングセンター4.0」が実現すれば、資源の需要家となる素材産業へ適切な（再生資源の）製品情報を正しく伝達し（情報完全性の向上）、新たな価値判断、取引を促すことができる。情報の非対称性により停滞していた取引が活性化するだけでなく、資源の適正な価値判断による売却益の増加も期待される

また、既存の資源売却益の向上だけでなく、これまで埋立処理やセメント原料となっていた資源が、高度選別によって新たに得られるため、さらなる資源売却益の増加にも繋がる。例えばステンレス鋼を選別することで、これまで鉄スクラップ中に拡散していたクロムを有効に活用することにも繋がるため、中間処理業の活性化に繋がる。

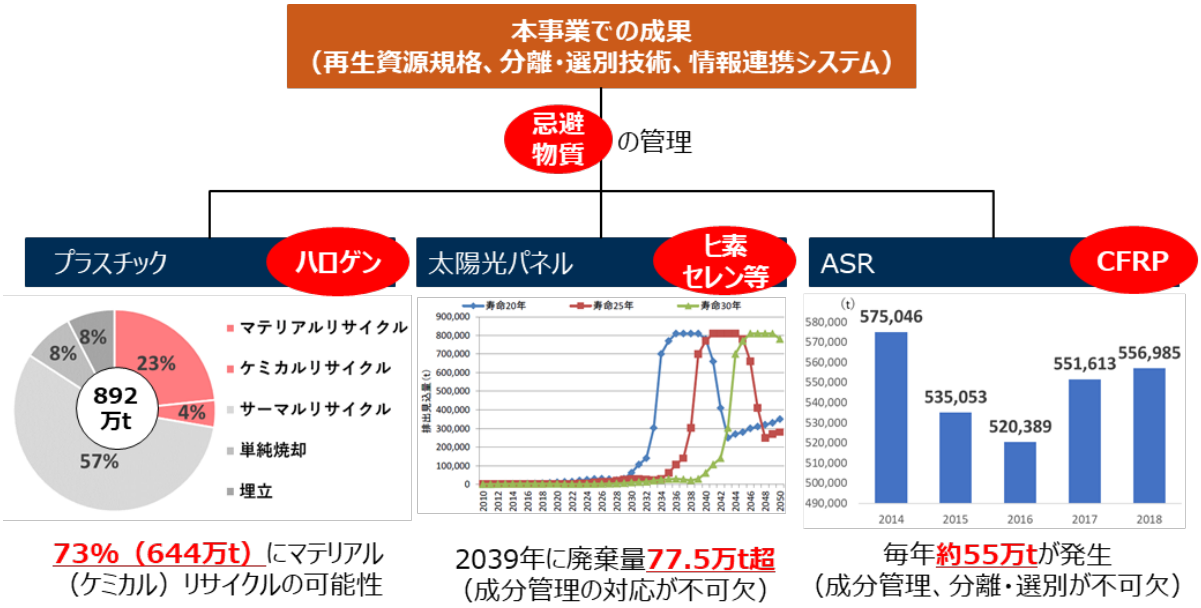
本事業では、産業廃棄物由来の使用済み製品のうち、いわゆる雑品類を主な処理対象物に想定しているが、使用済み自動車（ELV: End-of Life Vehicle）、廃家電、廃小型家電等にも本事業の成果を展開させることが可能である。中国への輸出実績などから国内で処理が求められる雑品は、年間 100～150 万 t 程度と推測されるが、ELV は年間 300 万台以上、廃家電（4 品目）は 1,300 万台、廃小型家電の回収量も 10 万 t に達しており、これらのスクラップも同様に取引の活性化や売却益の増加が進めば、金属リサイクル市場に与える影響は非常に大きい。

実際に ELV のリサイクルでは、ASR 削減の観点からプラスチック部品やガラスが取り外され、資源としてのリサイクルが試みられているが、事前に部品を除去しても鉄スクラップとしての取引価格（鉄スクラップーダスト引き）は変わらず、中間処理業の取り組みを促すような取引となっていない。十分な価値評価ができれば、プラスチックやガラスのリサイクルも拡大できる可能性がある。

また、スクラップ等の成分情報を可視化し、実際に売上向上につながっていると思われる事例としてアルミ合金のリサイクルがあるが、本事業を通じてスクラップ等の製品情報を価値評価ができるまでに開示できれば、同様な効果を期待できる。

さらに、将来的な横展開の可能性も期待され、金属だけに留まらず、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。例えばリサイクル時の混入が問題となる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等、ASR 中の炭素繊維強化プラスチック（CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics）などは、これら成分情報を明確にし、また忌避成分等を分離できるようになれば、再資源化の拡大を期待できる。成分上の問題でマテリアル・ケミカルリサイクルに回っていないプラスチックが 73%（644 万 t）も存在しており、本事業の成果や考え方を援用できれば、循環型社会の構築に貢献できると考えられる。

図表 109　事業成果を活用した他の資源における忌避物質管理の実現イメージ



（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

3.7.2. 出口戦略の検討

「ソーティングセンター4.0」の実現により、再資源化の障害となっている忌避物質等の成分管理を行うことができるようになり、その結果、付加価値の高い再生資源の供給拡大、また鉄鋼・セメント産業等における資源循環の受け入れ能力拡大にも繋がることが期待される。資源売却益の向上が期待されるほか、成分の明らかな再生資源を安定的に供給できるようになるため、スムースな社会実装や普及を期待できる。

一方、中間処理プロセスの手間は増えることが見込まれるものの、基本的には既存設備の操業条件の見直しを目指すものであり、また情報連携システムも QR コードといった既存技術を活用した廉価で操作性の高いものを想定しているため、経済性と実用性に優れた情報連携システムを構築できる予定である。

将来的には、本事業の参画事業者を中心に、中間処理事業者と各種素材生産事業者とを連携させたコンソーシアムとして、実用化を進める予定である。同コンソーシアムでは、図表 110 に示すように、素材産業側での受入品質の明確化および適正価格での買取、品質確保と、中間処理事業者による基準に適合した品質確保が重要になると考えられる。

本年度事業では、鉄スクラップや原燃料代替品の再生資源規格案の策定や、こうした受入品質を満たすための解体・破砕・選別プロセス案の検討とここで必要になる要素技術の実証、また、情報連携システムの仕様案を検討した。

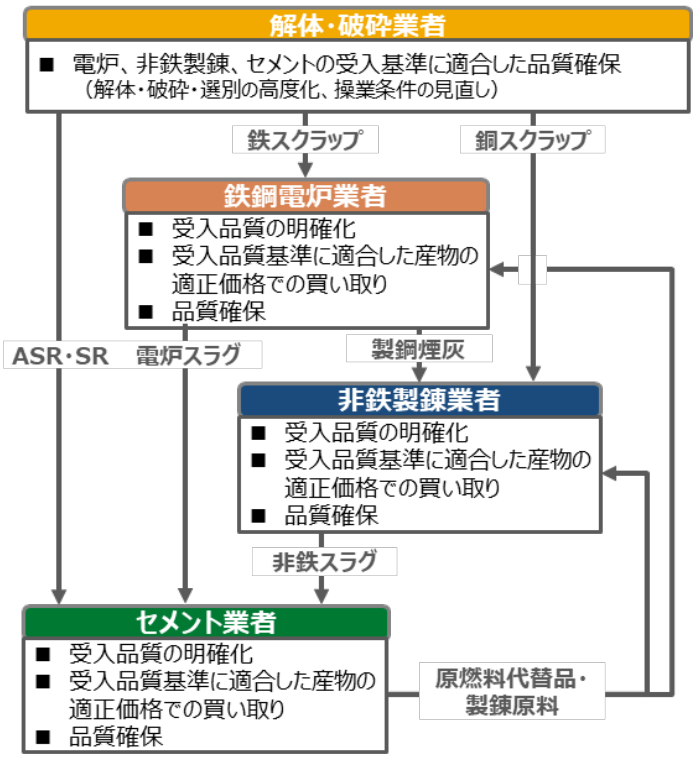
事業出口に向けて、一つにはコンソーシアム内で運用する規格策定を進める必要がある。そのためには、本年度検討した規格を満たす解体・破砕・選別プロセス仕様を具体化する必要があり、次年度以降、本年度検討したプロセス案を実証して、規格導入の実現性を確認することが求められる。並行して、現状不足している要素技術のうち、金属・樹脂の分離技術に関して、有効

な要素技術を特定し、一連プロセス仕様に組み込んだうえで、経済性の確認を行う。また、鉄・ステンレス鋼の新規分離技術は、次年度実サンプルでの試験により試作機の仕様を具体化し、その後、試験機を組み立てて本格導入に向けた検討を進める。その後、およそ 5 年以内を目途としたパイロットプラントの導入を目指し、検討を進めていく。

中間処理事業者と素材産業を繋ぐ情報連携システムは、次年度、自動販売機をケーススタディにシステムを試作し、システムの有効性や導入に向けた課題を検討することを目指す。具体的には、既述の解体・破砕・選別プロセス案の実証と同時に、情報連携システムの実証を行う。実証結果を踏まえて、自動販売機のみでなく、その他の製品群等の管理への展開可能性を含めて検討を進めて、2025 年頃にシステム構築を完了することを目標とする。

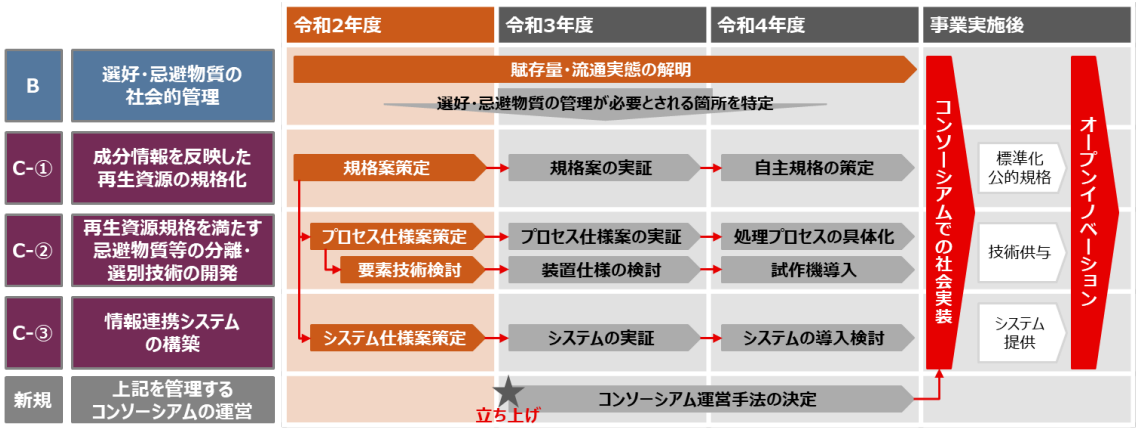
また、再生資源規格の運営や情報連携システムの管理など、コンソーシアムの取りまとめを行う機関として、本事業の実施担当者の参画を念頭に、第三者機関の立ち上げを進めている（一般社団法人循環経済協会等で扱うことを想定）。将来的な規格の標準化や技術供与によるオープンイノベーションの促進を視野に入れ、中立性のある法人格を有する組織を想定している。2021 年内には発足予定であり、およそ 2 年以内に詳細なコンソーシアム運営手法を決定することを目指す（図表 111）。

図表 110　コンソーシアムにおける各事業者の役割分担



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

図表 111　本事業で設定した課題と社会実装に向けた取り組み



（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

4. まとめ

4.1. 実証成果

4.1.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証事業１）

本事業では、忌避物質たるクロムについてそのフローを概観し、その結果主たる発生源であると考えられる鉄鋼産業関連のクロムの流れを可視化することで、問題点を明らかにしつつ、さらに調査すべき点などを整理した。

まず、銅と塩素に関して既存研究等からの知見を整理したが、鉄鋼産業におけるトランプエレメントとしての銅濃度は、雑品輸出の減少を受け、徐々に高まる可能性があることが改めて示唆された。また塩素に関して言えば、その主たる用途である PVC に関して、把握されているマテリアルリサイクル量の少なさから、様々な先へ混入している可能性が高く、その詳細を詰める必要があることも明らかになった。

そのえうえで、これまで余り明らかにされてこなかったクロムのマテリアルフローを精緻に分析した。ただし、基本的に合金添加剤であるというその主たる用途もあり、非常に難しいことが改めて明らかになった。ただし粗い解像度で見れば鉄鋼フローの中におけるクロムの流れを整理すればかなりの部分が明らかになるであろうことは確認された。

4.1.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証事業２）

既存文献およびヒアリング調査をもとに、品質判断項目として設定するべき項目、項目ごとの要求水準の段階、段階に応じた類型（品質等級）を整理し、鉄スクラップ（シュレッダー）および廃プラスチック原燃料の分類（品質等級）に関する規格案を作成した。

4.1.3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証事業３）

対象とする使用済製品の排出形態や資源価値、また対象製品中の管理対象物に応じて、プロセス設計指針を決定した。上記のうち、具体的なケーススタディとして、自動販売機および低品位の小型家電を対象に、プロセス案を検討した。

また、低品位基板等の低品位人工鉱物を対象に、破砕後の品位を向上させる要素技術（流動層選別、重液選別）を検証した。このうち、一部の回収物は、銅製錬原料やセメント産業・鉄鋼電炉における原燃料代替品として利用できる可能性が示唆された。他方、銅製錬原料や原燃料代替品としての要求水準を満たさない産物もあり、今後、要求水準を満たすために取り組むべき課題を明らかにした。また、マテリアルリサイクル原料化には、非常に高い障壁があることが明らかになったため、解体方法を含めた見直しが必要なことが明らかになった（図表 112）。

図表 112　要素技術実証での回収物の利用可能性

想定用途	要求水準（最低限のもの・一例）		回収物	評価	今後の課題
	選好物質等	忌避物質			
銅製錬原料	■ 金：5g/t以上 ※理想は10g/t以上 ■ 銀：400g/t以上 ■ 銅：銅鉱石以上	■ ハロゲン：1~3%で制限の対象になる可能性 ■ アルミ：？	①	▲	■ 銀品位の改善（回収物品位：1.6%）
			⑥	▲	■ アルミの分離（回収物中の含有率：4~15%）
			⑦	▲	■ 銅品位の改善（回収物品位：30%） ■ アルミの分離（回収物中の含有率：17%）
			⑨	●	–
原燃料代替品（セメント）	■ 総発熱量：6,000~7,000 kcal/kg程度 (微粉炭代替を想定)	■ ハロゲン・クロムを可能な限り含まないこと ■ 塩素：0.5%以下	②	●	–
			③	▲	■ 総発熱量の改善（回収物：4,600~5,300kcal/kg） ■ 塩素の分離（回収物中の含有率：0.45~1.59%）
			⑧	●	–
			⑩	▲	■ 総発熱量の改善（回収物：3,100kcal/kg）
原燃料代替品（鉄鋼電炉）	■ 固定炭素量が多いこと ■ 総発熱量：6,000~7,000 kcal/kg (微粉炭代替を想定)	■ 銅：含まれないこと ■ 塩素：0.8%以下 ■ 硫黄：1~2%以下	②	●	–（固定炭素の評価は別途必要）
			③	×	■ 総発熱量の改善（回収物：4,600~5,300kcal/kg） ■ 塩素の分離（回収物中の含有率：0.45~1.59%） ■ 銅の分離（回収物中の含有率：1.4~2.3%）
			⑧	▲	■ 銅の分離（回収物中の含有率：4.6%）
			⑩	▲	■ 総発熱量の改善（回収物：3,100kcal/kg） ■ 銅の分離（回収物中の含有率：3.4%）
樹脂コンパウンド原料	■ 目的樹脂が100%近く含まれること	■ タルク、目的樹脂以外	②*	×	■ 樹脂の単一化

（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

4.1.4. 情報連携システムの検討（実証事業４）

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が、現在の取引では成分情報が明らかにはなっておらず、中間処理後の産物を素材産業側で客観的に評価することは困難である。こうした中、本項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、選好・忌避物質の含有状況を複数事業者間で管理・運用できる情報連携システムの設計仕様の具体化を目指した。

最大の課題となる破砕前後で情報連携を実現する基本的なワークフローを検討し、適用可能な対象物としてサブスクリプション型ビジネスの中で運用されている自動販売機を選定した。また、従来フローと新規フロー（情報連携システム導入フロー）を比較検討し、初期投資を抑えつつ、産物の付加価値向上に繋がるシステム仕様を設定した。さらに、既知の情報、新たに取得可能な情報、その中から連携させる情報等を具体化することで、各情報の入出力、処理・変換方法、またトレーサビリティを実現する基本的仕様を作成した。

これにより、今後実際の使用済製品の移動を伴う情報連携システムの実証に移行することができると考えている。

4.1.5. 磁着物の高度選別実証（実証事業５）

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。また、電磁式ファインダーを使うことで、磁着物からモー

ターコアを取り除き、現状よりも優れた産物を得ることができる可能性が示唆された。

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スクラップを高い分離効率（92%）で選別できることを確認した。

4.1.6. 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

本事業の成果が普及することにより、以下の環境影響改善効果、CO_2 排出量削減効果が見込まれた。

- TMR 換算で、クロムで約 41 千 t、鉄で約 153 千 t、銅で約 702 千 t 、銀で約 2,009 千 t、金で約 521 千 t、原油で約 0.1 千 t、石炭で約 0.1 千 t の天然資源採掘量削減効果をもたらすことが推計された。
- 各種二次原料の取引単価が忌避物質の品位低下に応じて上昇し、また取引量も増加する等により、二次資源の売却収入は増加し、結果として中間処理事業者における収益は改善する（小型家電処理 1t あたり約 1 万 1 千円増加）と推計された。
- 機能単位（廃家電・小型家電それぞれ 1t の処理とその際に回収される二次資源を原料とした素材（普通鋼、非鉄金属、クロム系**ステンレス鋼**、セメント、樹脂）生産量）あたり約 110.5kg の CO_2 が削減されると推計された。

4.1.7. 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

情報の非対称性の解決と、素材産業の要求水準を満たすような解体・破砕・選別システムの実現により、停滞していた取引の活性化、資源の適正な価値判断による売却益の増加、未資源化物質の回収による資源売却益の増加が期待され、金属リサイクルビジネスの活性化に寄与しうることが明らかになった。また、本事業で対象とした雑品のみでなく、自動車や家電等、また他の忌避物質の管理が必要な製品にも応用できる可能性を明らかにした。

また、事業成果を実装するコンソーシアムの姿を特定し、今後の社会実証に向けて取り組むべき事項を検討した。

4.2.　今後の課題

4.2.1. 素材産業における忌避物質の賦存量・流通量調査（実証事業１）

鉄鋼原料としてのクロムの投入量について確認したところ、ここ 10 年以上を見てもその投入量が増加しているとは言いがたいことが確認された。よって、本事業が懸念しているセメントなどを中心にしたクロム濃度の増加が実際に起きているのであれば、循環の流れの中で起こっているものと考えることが自然である。

そこで鉄鋼循環におけるクロムの流れを可視化したところ、特殊鋼の原料としてのクロム含有スクラップの有効利用量の少なさが浮き彫りになり、普通電炉鋼へ高濃度で含有されること、あわせて電炉からの還元スラグにかなりの量が存在することが明らかになった。こうした、鋼材以外へ向かうクロムの行く先を、データ分析等を通して精緻化していくことが次年度へ向けた大きな課題である。

今年度明らかになったことだけから見ても、クロム混入について一つの大きな原因を同定することは難しく、かなりの複合的な要因が背後に存在することも明らかである。3.1 で整理したさらに調査すべき点を中心に精査を進めることで、クロムの発生源として重要な箇所を明らかにし、これに対して中間処理をかけることをソーティングセンター4.0 の一つの機能として実装することが必要であろう。

4.2.2. 成分情報を反映した再生資源の規格化（実証事業２）

実際に規格として活用するためには、規格を満たす（各等級に当てはまる）原料が生産可能であることが前提となり、この検証が課題となる。今後は、規格案の各分類（等級）に適合する再生資源の回収が可能か中間処理業で検証（等級合格の是非）したうえで、規格案が素材産業で受け入れられるために必要な改善点を検討していく必要がある（もしくは素材産業が中間処理業の品質管理水準を評価する際の目安としての活用可能性など)。

4.2.3. 低品位基板等の適正処理・再資源化システムの検討（実証事業３）

事前解体による低品位人工鉱物の発生量低減に向けて、対象製品やその形式ごとに、製品・部品中の選好・忌避物質の含有量や、それら部品の取り外しに係る作業性、また取り外した部品の処理方法を検討し、製品・形式レベルでの解体・破砕・選別プロセス案を策定する。同時に、これらプロセス案の実証を行い、回収物の成分分析を行うことで、策定したプロセス案によって管理できるようになる忌避物質の重量を明らかにする。また、4.2.2 で検討した規格案を満たすものか評価を行い、回収した再生資源の販売額・処理費用を踏まえて、最適なプロセス案を検討する。

また、破砕後の低品位人工鉱物から高付加価値な資源を回収するため、今年度の課題を踏まえて、選別装置や条件の見直しを行う必要がある。具体的には、銅製錬想定原料からのアルミニウムの分離と、原燃料代替品からの金属（鉄鋼電炉向けの場合には銅、セメント産業向けの場合にはクロム）および塩素の分離が求められる。また、樹脂のマテリアルリサイクル原料化には、樹脂の単一化を進めることが重要であり、含まれる樹脂の種別もわからないまま破砕してしまうと、

その後の回収には非常に大きな手間がかかってしまう。そこで、事前解体に関する検討の中で、単一樹脂を使用している部材を特定し、事前解体を行うこと、また比較的単一の樹脂で構成される母材を破砕したのちに、赤外線やラマン分光法により選別するなどの対応が求められる。

4.2.4. 情報連携システムの検討（実証事業４）

本項の課題としては、まず自動販売機を対象とすることで、4.2.2、4.2.3 とも連携し、最適な解体方法を具体化することが求められる。最適な解体方法およびそれにより得られる産物の規格化等を前提として、発生産物がそうした処理を経た産物であることを証明するための方法を検討することとなる。具体的には、本年度に検討した仕様案等を踏まえて、実際に情報連携システムを試作し、システムの有効性や作業性、情報の入出力等における効率等を確認する。

システムの実証におけるフローや検証課題を図表 113 に整理した。入荷時には採番や QR コードの貼付に関して実際の使用済製品を用いて検証を進めるとともに、銘版の情報検出技術導入についても検討する。また、前処理・解体工程では従来伝票管理を行っていたフロン管理のシステム化を検証するとともに、外観撮影等による解体記録の管理方法を検証する。また、発生産物と紐づいた解体方法の整理および解体部品の特定等についても 4.2.2、4.2.3 と連携して検討する。

破砕選別工程に関しては、破砕前後の写真記録および詐称困難な記録方法を検証する。その後は出荷段階であるため、QR コードの貼付が行われるが、破砕後に各個体情報をパージして管理することの有効性や課題について検証する。また、本事業のもう一つの特徴である複数事業者間での情報連携を実現するために、QR コードを読み取ることで付加価値向上に繋がる情報の読出可否や、受け入れ側での作業性も検証事項となる。

図表 113　情報連携システムの実証モデル

（出所）三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング作成

4.2.5. 磁着物の高度選別実証（実証事業５）

電磁式ファインダーは、LIBS ソーターから比較すると投資コストや処理能力に優れる可能性が高いものの、実サンプルを用いた識別実験ではより優れた識別条件を模索する必要がある。3D カメラや AI 等を用いた体積推計手法等の導入可能性などを検討し、選別が可能となる識別条件を検討する。

LIBS ソーターは、発光強度比から正確な含有率を算出できるよう、発光線の選択や分析条件の検討を行う。また、試料表面の汚れやメッキ、表面形状による発光強度観測への影響を低減できるよう、前処理（表面研磨）や分析条件を見直す。

4.2.6. 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

本事業における環境影響改善効果、CO_2 排出量削減効果は、本事業の目標値などをもとに算出を行った。今後、各事業の成果を踏まえ、本事業成果の普及によって期待される環境影響改善効果、CO_2 排出量削減効果についてより精緻な推計を行うことが課題である。

4.2.7. 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

再生資源の規格案と、規格を満たす再生資源を回収可能な解体・破砕・選別システム、また取引の効率化のための情報連携システムの導入可能性やその有用性を検証し、社会実装に向けた課題の特定と、課題解決に資する取り組みを進めていく必要がある。

忌避物質の流通量調査においては、今後も引き続きバルク量や成分情報の入手を進めて、より多くの忌避物質を対象にフローを作成するとともに、フローの精緻化に取り組んでいく必要がある（令和 3~4 年度実施想定）。

こうして、忌避物質を社会的に管理するうえで注目すべきフローを特定しながら、再生資源の規格案を充足する資源を回収できるか、中間処理システム案および情報連携システム仕様案を検証することも重要である（令和 3 年度実施想定）。検証結果を踏まえて、規格導入に向けた課題の深掘りや中間処理システム仕様の確定を行う（令和 4 年度実施想定）。また、現状不足している鉄とステンレス鋼の分離技術について、実サンプルでの実証を重ねることで、電磁ファインダーおよび LIBS ソーターの装置仕様を検討し（令和 3 年度実施想定）、その後、パイロットプラントや実機の導入に向けた検討を進めていく必要がある（令和 4 年度実施想定）。

情報連携システムに関しては、上記検証のためにまずは試作を行い、実証結果を踏まえた修正や社会実装に向けたさらなる課題検証を踏まえて（令和 4 年度実施想定）、2025 年頃までには社会実装を目指す。

並行して、社会実装を目指すコンソーシアム内での契約や取引条件や技術・情報等の管理主体の明確化を進めながら、社会で広く活用を進めていくための互換性の高い中間処理プロセス・情報連携システムの検討を行う必要がある。

5. 付録

5.1. 天然資源採掘量削減効果（天然資源節約効果）の算定根拠

本節では、2.2.6.1 で述べた天然資源採掘量削減効果（天然資源節約効果）の算定根拠について述べる。天然資源採掘量削減効果の内訳、算定根拠、算定時に用いた参考文献をそれぞれ図表 114、図表 115、図表 116 に示す。

図表 114　天然資源採掘量削減効果（天然資源節約効果）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（千 t）
	参照番号	項目	数値	単位	参照番号	数値	単位	
クロム	1-1-1	クロム	4,569	t	1-2-1	8.9	t/metal-t	41
鉄	1-1-2	鉄	25,403	t	1-2-2	5.1	t/metal-t	130
銅	1-1-3	銅	2,341	t	1-2-3	300	t/metal-t	702
銀	1-1-4	銀	12	t	1-2-4	160,000	t/metal-t	1,915
金	1-1-5	金	0	t	1-2-5	1,800,000	t/metal-t	497
樹脂	1-1-6	原油	7,142	L	1-2-6	0.0074	t /L	0.1
セメント原燃料	1-1-7	石炭	6	t	1-2-7	12.4	t / t	0.1

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 115　天然資源採掘量削減効果（天然資源節約効果）の算定根拠

参照番号	項目	算定の考え方	参考文献
1-1-1	クロム	・新規プロセス（電磁式ファインダー）の導入によって、従来回収されていた鉄製錬原料からクロム系ステンレス鋼が回収されると仮定した。回収されたクロム系ステンレス鋼中のクロムが二次資源として活用され、天然資源に代替されると仮定した。 ・2019 年の小型家電の再資源化実績が公開されていなかったため、参考文献 1-1-1 で得られたデータをもとに従来回収されていた小型家電由来の鉄製錬原料量を推計した（認定事業者が引き取った処理場の合計は過去 5 年間の推移通り増加すると仮定し、各種金属の回収率は 2019 年に準拠すると仮定して算出。以下、参考文献 1-1-1 をもとにした推計は同様の手法で算出するものとする）。 ・参考文献 1-1-2 より家電由来の鉄の再資源化量を引用し、家電由来の鉄製錬原料量とした。 ・参考文献 1-1-3 より、小型家電・家電由来の鉄製錬原料中のステンレス鋼の割合を 5.9%と仮定して推計を行った。また、小型家電・家電由来の鉄製錬原料中のステンレス鋼のうち、80%がステンレス鋼製錬原料として回収されると仮定した。回収されるクロム系ステンレス鋼は全て SUS410 と仮定し、参考文献 1-1-4 よりステンレス鋼製錬原料として回収されるクロム量を算出した。	1-1-1 1-1-2 1-1-3 1-1-4
1-1-2	鉄	・新規プロセス（電磁式ファインダー）の導入によって、従来回収されていた鉄製錬原料からクロム系ステンレス鋼が回収されると仮定した。回収されたクロム系ステンレス鋼中の鉄が二次資源として活用され、天然資源に代替されると仮定した。 ・参考文献 1-1-1 より小型家電由来の鉄製錬原料量を推計した。 ・参考文献 1-1-2 より家電由来の鉄の再資源化量を引用し、家電由来の鉄製錬原料量とした。 ・参考文献 1-1-3 より、小型家電・家電由来の鉄製錬原料中のステンレス鋼の割合を 5.9%と仮定して推計を行った。また、小型家電・家電由来の鉄製錬原料中のステンレス鋼のうち、80%がステンレス鋼製錬原料として回収されると仮定した。回収されるクロム系ステンレス鋼は全て SUS410 と仮定し、参考文献 1-1-4 よりステンレス鋼製錬原料として回収される鉄量を算出した。	1-1-1 1-1-2 1-1-3 1-1-4
1-1-3	銅	・小型家電・家電由来の鉄製錬原料のうち、新規プロセス（電磁式ファインダー）の導入によって、銅が回収されると仮定した。なお、参考文献 1-1-3 から、鉄製連原料中の銅の割合を 0.5%と仮定して推計を行った。また、銅は 80%回収されると仮定して推計を行った。 ・従来埋立処理されていた小型家電由来の SR のうち、新規プロセス（重液・流動層選別）の導入によって、銅が回収されると仮定した。なお、参考文献 1-1-3 から、SR 中の銅の割合を 5%と仮定して推計を行った。また、銅は 80%回収されると仮定して推計を行った。	1-1-1 1-1-3 1-1-5

		・なお、小型家電由来の SR 発生量は、SR 発生量に占める熱回収されたプラスチックの重量割合と、ASR の発生量に占める熱回収されたプラスチック等の重量割合が等しいと仮定し、推計した（以下、小型家電由来の SR 発生量は同様の手法で推計）。 ・家電由来の SR は全て熱回収され、埋立処理されないと仮定した。そのため、従来埋立処理されていた家電由来の SR から銅は回収されないと仮定した。	
1-1-4	銀	・従来埋立処理されていた小型家電由来の SR のうち、新規プロセス（重液・流動層選別）の導入によって、銅が回収されると仮定した。なお、参考文献 1-1-3 から、SR 中の銀の割合を 133ppm と仮定して推計を行った。また、銀は 80%回収されると仮定して推計を行った。 ・家電由来の SR は全て熱回収され、埋立処理されないと仮定した。そのため、従来埋立処理されていた家電由来の SR から銀は回収されないと仮定した。	1-1-1 1-1-3 1-1-5
1-1-5	金	・従来埋立処理されていた小型家電由来の SR のうち、新規プロセス（重液・流動層選別）の導入によって、銅が回収されると仮定した。なお、参考文献 1-1-3 から、SR 中の銀の割合を 3.1ppm と仮定して推計を行った。また、金は 80%回収されると仮定して推計を行った。 ・家電由来の SR は全て熱回収され、埋立処理されないと仮定した。そのため、従来埋立処理されていた家電由来の SR から金は回収されないと仮定した。	1-1-1 1-1-3 1-1-5
1-1-6	原油	・従来埋立処理されていた小型家電由来の SR のうち、新規プロセス（重液・流動層選別）の導入によって、樹脂原料向け樹脂が回収されると仮定した。樹脂原料向け樹脂は 2%回収されると仮定して推計を行った。 ・回収された樹脂はオレフィン系の樹脂製造に二次資源として活用され、天然資源（原油）が二次資源に代替されると仮定した。回収された樹脂と同量のオレフィン系樹脂を製造するにあたり必要な原油量を参考文献 1-1-6，1-1-7 から推計した。なお、ここではオレフィン系樹脂の原料として軽量ナフサを使用したと仮定した。軽量ナフサの密度は参考文献 1-1-8 から引用した	1-1-1 1-1-3 1-1-5 1-1-6 1-1-7 1-1-8
1-1-7	石炭	・従来埋立処理されていた小型家電由来の SR のうち、新規プロセス（重液・流動層選別）の導入によって、セメント原燃料向け樹脂が回収されると仮定した。セメント原燃料向け樹脂は 80%回収されると仮定して推計を行った。 ・回収された樹脂はセメント産業の二次資源（原燃料）として活用され、回収された樹脂と同量の熱量を持つコークスが二次資源に代替されると仮定した。回収された樹脂、コークスの熱量は参考文献 1-1-9、1-1-10 を参考にそれぞれ設定した。参考文献 1-1-11 を参考にコークス 1t の生産に係る石炭消費量を推計し、削減される天然資源（石炭）相当量を算出した。	1-1-1 1-1-3 1-1-5 1-1-9 1-1-10 1-1-11

1-2-1	TMR 係数（クロム）	参考文献 1-1-12 より引用した。	1-1-12
1-2-2	TMR 係数（鉄）	参考文献 1-1-12 より引用した。	1-1-12
1-2-3	TMR 係数（銅）	参考文献 1-1-12 より引用した。	1-1-12
1-2-4	TMR 係数（銀）	参考文献 1-1-12 より引用した。	1-1-12
1-2-5	TMR 係数（金）	参考文献 1-1-12 より引用した。	1-1-12
1-2-6	TMR 係数（原油）	参考文献 1-1-13 より引用した。	1-1-13
1-2-7	TMR 係数（石炭）	参考文献 1-1-13 より引用した。	1-1-13

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 116　天然資源採掘量削減効果（天然資源節約効果）算定時に用いた参考文献

記号	参考文献名
1-1-1	環境省、2020、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 小型家電リサイクルワーキンググループ 資料
1-1-2	一般社団法人家電製品協会、2020、家電リサイクル年次報告書 2019 年（令和元年）度版
1-1-3	MURC 過去調査
1-1-4	JIS G 4308,2013
1-1-5	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、2015、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
1-1-6	LCA 日本フォーラム、2003、LCA データベース 2020 年度 1 版検索「オレフィン製造プロピレン」
1-1-7	LCA 日本フォーラム、2003、LCA データベース 2020 年度 1 版検索「ナフサ」
1-1-8	ENEOS、石油便覧、https://www.eneos.co.jp/binran/part02/chapter01/section02.html（2021 年 3 月 4 日閲覧）
1-1-9	社団法人全国産業廃棄物連合会リサイクル推進委員会　2010、RPF 製造に係る基礎調査結果報告書
1-1-10	資源エネルギー庁、2018、「総合エネルギー統計」
1-1-11	文部科学省、2010、平成 22 年度研究開発評価研修（政策評価相互研修会）第 2 回参考資料 2
1-1-12	原田幸明ら、2001、金属の関与物質総量の概算

1-1-13	片桐望ら、2009、NIMS-EMC 材料環境情報データ　NO.18

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

5.2.　資源効率性向上効果の算定根拠

本節では、2.2.6.2 で述べた資源効率性向上効果の算定根拠について述べる。資源効率性向上効果の内訳、算定根拠、算定時に用いた参考文献をそれぞれ図表 117、図表 118、図表 119 に示す。

図表 117　資源効率性向上効果の内訳

カテゴリ	事業前				事業後			
	参照番号	項目	数値	単位	参照番号	項目	数値	単位
①	2-1-1	小型家電一律回収費用	5,333	円/t	2-2-1	小型家電一律回収費用	5,333	円/t
②	2-1-2	単位重量当たりの鉄製錬原料売上高	15,517	円/t	2-2-2	単位重量当たりの鉄製錬原料売上高	14,724	円/t
	2-1-3	単位重量当たりのクロム系ステンレス鋼売上高	0	円/t	2-2-3	単位重量当たりのクロム系ステンレス鋼売上高	643	円/t
	2-1-4	単位重量当たりの銅製錬原料売上高	18,180	円/t	2-2-4	単位重量当たりの銅製錬原料売上高	29,055	円/t
	2-1-5	単位重量当たりの樹脂（セメント・熱回収向け）処理費用	1,436	円/t	2-2-5	単位重量当たりの樹脂（セメント・熱回収向け）処理費用	1,439	円/t
	2-1-6	単位重量当たりの樹脂（樹脂原料向け）売上高	85	円/t	2-2-6	単位重量当たりの樹脂（樹脂原料向け）売上高	342	円/t
③	2-1-7	単位重量当たりの小型家電由来の SR 埋立処分費用	149	円/t	2-2-7	単位重量当たりの小型家電由来の SR 埋立処分費用	30	円/t

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 118　資源効率性向上効果の算定根拠

参照番号	項目	算定の考え方	参考文献
2-1-1	小型家電一律売却単価	・参考文献 2-1-1 より複数の自治体の認定事業者への小型家電一律売却単価の平均を採用	2-1-1
2-1-2	単位重量当たりの鉄製錬原料売上高	・認定事業者が引き取った小型家電のうち、再資源化された鉄量に鉄製錬原料の販売価格を乗じて算定した。 ・2019 年の小型家電の再資源化実績が公開されていなかったため、参考文献 2-1-2 で得られたデータをもと	2-1-2 2-1-3

		に活動量を推計した（認定事業者が引き取った処理場の合計は過去 5 年間の推移通り増加すると仮定し、各種金属の回収率は 2019 年に準拠すると仮定して算出。以下、参考文献 2-1-2 をもとにした推計は同様の手法で算出するものとする）。 ・鉄製錬原料の販売価格は参考文献 2-1-3 を参考に、各地域のシュレッダーA 買取価格の平均値を使用した。	
2-1-3	単位重量当たりのクロム系ステンレス鋼売上高	・小型家電を破砕・選別した産物からステンレス鋼製錬向け原料は回収されないと仮定した。	
2-1-4	単位重量当たりの銅製錬原料売上高	・認定事業者が引き取った小型家電のうち、再資源化された銅量に銅製錬原料の販売価格を乗じて算定した。 ・認定事業者が引き取った小型家電のうち、再資源化された銅量を参考文献 2-1-2 をもとに推計した。 ・銅製錬原料の販売価格は参考文献 2-1-4 を参考に 2019 年の平均価格を採用	2-1-2 2-1-4
2-1-5	単位重量当たりの樹脂（セメント・熱回収向け）処理費用	・認定事業者が引き取った小型家電のうち、セメント産業に供給された樹脂量に処理費用を乗じて算定した。 ・小型家電由来の SR 発生量のうち熱回収されたプラスチックの重量が占める割合と、ASR の発生量のうち熱回収されたプラスチック等の重量が占める割合が等しいと仮定し、小型家電由来の SR 発生量を推計した（以下同様）。その後、小型家電由来の SR 発生量のうち、ASR と同様の割合でセメント工程に供給されると仮定し、小型家電由来の SR のうち、セメント産業に供給された樹脂量を推計した。 ・処理費用は参考文献 2-1-6 をもとに設定した。	2-1-2 2-1-5 2-1-6
2-1-6	単位重量当たりの樹脂（樹脂原料向け）売上高	・認定事業者が引き取った小型家電のうち、再資源された樹脂量に樹脂原料販売価格を乗じて算定した。 ・小型家電由来の SR 発生量のうち、ASR と同様の割合で樹脂が再資源化されると仮定し、小型家電由来の SR のうち、樹脂原料として供給された樹脂量を推計した。 ・処理費用は参考文献 2-1-7 をもとにプラスチックの入札価格を参考に設定した。	2-1-2 2-1-5 2-1-7
2-1-7	単位重量当たりの小型家電由来の SR 埋立処分費用	・認定事業者が引き取った小型家電のうち、埋立処分された SR 量に処理費用を乗じて算定した。 ・ASR 発生量のうち、埋立処理量、土砂・ガラスのマテリアルリサイクル量、スラグ・溶融メタルのマテリアルリサイクル量、その他マテリアルリサイクル量が占める割合の合計と、小型家電由来の SR 発生量のうち埋立処理量が占める割合が等しいと仮定し、埋立処分された SR 量を算定した。 ・処理費用は参考文献 2-1-8 をもとに SR の埋立処分料金の平均値より設定した。	2-1-2 2-1-5 2-1-8
2-2-1	小型家電一律売却単価	参考文献 2-1-1 より複数の自治体の認定事業者への小型家電一律売却単価の平均を採用	
2-2-2	単位重量当たりの鉄製錬原料売上高	・認定事業者が引き取った小型家電のうち、再資源化された鉄量に鉄製錬原料の販売価格を乗じて算定した。 ・ベースラインプロセスにおいて回収された鉄製錬原料のうち、新規プロセス（電磁式ファインダー）の導入によって、クロム系ステンレス鋼が回収され、その分鉄製錬原料回収量が減少すると仮定し再資源化された鉄量を算出した。なお、参考文献 2-1-9 から、鉄製連原料中のステンレス鋼の割合を 5.9%と仮定して推計を行った。また、クロム系ステンレス鋼は 80%回収されると仮定して推計を行った。 ・クロム系ステンレス鋼の混入率減少に伴い、買取価格が向上すると仮定した。鉄製錬原料中の鉄品位の向上	2-1-2 2-1-3

		率にベースラインプロセスの鉄製錬原料の販売価格を乗じて算定した。	
2-2-3	単位重量当たりのクロム系ステンレス鋼売上高	・認定事業者が引き取った小型家電のうち、再資源化されたステンレス鋼量にステンレス鋼製錬原料の販売価格を乗じて算定した。 ・ベースラインプロセスにおいて回収された鉄製錬原料のうち、新規プロセス（電磁式ファインダー）の導入によって、クロム系ステンレス鋼が回収され再資源化されると仮定した。なお、参考文献 2-1-9 から、鉄製連原料中のステンレス鋼の割合を 5.9%と仮定して推計を行った。また、クロム系ステンレス鋼は 80%回収されると仮定して推計を行った。 ・ステンレス鋼製錬原料の販売価格は参考文献 2-1-10 の SUS400 系の価格を参考に設定した	2-1-2 2-1-9 2-1-10
2-2-4	単位重量当たりの銅製錬原料売上高	・認定事業者が引き取った小型家電のうち、再資源化された銅量に銅製錬原料の販売価格を乗じて算定した。 ・ベースラインプロセスにおいて回収された鉄製錬原料のうち、新規プロセス（電磁式ファインダー）の導入によって、銅が回収されると仮定した。なお、参考文献 2-1-9 から、鉄製連原料中の銅の割合を 0.5%と仮定して推計を行った。また、銅は 80%回収されると仮定して推計を行った。 ・ベースラインプロセスにおいて埋立処理されている SR のうち、新規プロセス（重液・流動層選別）の導入によって、銅が回収されると仮定した。なお、参考文献 2-1-9 から、SR 中の銅の割合を 5%と仮定して推計を行った。また、銅は 80%回収されると仮定して推計を行った。 ・銅製錬原料の販売価格は参考文献 2-1-4 を参考に 2019 年の平均価格を採用	2-1-2 2-1-9
2-2-5	単位重量当たりの樹脂（セメント・熱回収向け）処理費用	・認定事業者が引き取った小型家電のうち、セメント産業に供給された樹脂量に処理費用を乗じて算定した。 ・ベースラインプロセスにおいて埋立処理されている SR のうち、新規プロセス（重液・流動層選別）の導入によって、セメント原燃料向け樹脂が回収されると仮定した。セメント原燃料向け樹脂は 80%回収されると仮定して推計を行った。 ・処理費用は参考文献 2-1-6 をもとに設定した。	2-1-2 2-1-5 2-1-6
2-2-6	単位重量当たりの樹脂（樹脂原料向け）売上高	・認定事業者が引き取った小型家電のうち、再資源された樹脂量に樹脂原料販売価格を乗じて算定した。 ・ベースラインプロセスにおいて埋立処理されている SR のうち、新規プロセス（重液・流動層選別）の導入によって、樹脂原料向け樹脂が回収されると仮定した。樹脂原料向け樹脂は 2%回収されると仮定して推計を行った。 ・処理費用は参考文献 2-1-7 をもとにプラスチックの入札価格を参考に設定した。	2-1-2 2-1-5 2-1-7
2-2-7	単位重量当たりの小型家電由来の SR 埋立処分費用	・認定事業者が引き取った小型家電のうち、埋立処分された SR 量に処理費用を乗じて算定した。 ・新規プロセスにおける、セメント原燃料向け樹脂回収量および樹脂原料向け樹脂回収量の増加重量分が SR の埋立量から削減されると仮定した。 ・処理費用は参考文献 2-1-8 をもとに SR の埋立処分料金の平均値より設定した。	2-1-2 2-1-8

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 119　資源効率性向上効果算定時に用いた参考文献

記号	参考文献名
2-1-1	総務省、2017、小型家電リサイクルの実施状況に関する実態調査　結果報告書（https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/107317_0920_00002.html）
2-1-2	環境省、2020、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 小型家電リサイクルワーキンググループ 資料
2-1-3	東京製鉄株式会社、2019、国内鉄スクラップ購入価格表（http://www.tokyosteel.co.jp/kb/pdf/2019.04.05.pdf）
2-1-4	一般社団法人日本電線工業会、銅建値（https://www.jcma2.jp/toukei/dou/index.html）（2021 年 3 月 3 日閲覧）
2-1-5	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、2015、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
2-1-6	公益財団法人東京都環境公社、2020、廃プラ市場の現状や変化・課題　処理料金、価格の変化
2-1-7	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（PET 対 PE・PP・PS・EPS）
2-1-8	環境省、2012、使用済み自動車の解体、破砕に係る実態調査結果（概要）
2-1-9	MURC 過去調査
2-1-10	株式会社大畑商事、ステンレスの買取価格（2021 年 3 月 4 日現在）、https://www.ohata.org/stainless.html

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

5.3. CO_2 排出量削減効果の計算根拠

本節では、2.2.6 で述べた CO_2 排出量削減効果の計算根拠について、その詳細を述べる。各プロセスにおける活動量、排出原単位、その算定根拠、算定時に用いた参考文献をそれぞれ図表 120、図表 121、図表 122、図表 123、図表 124 に示す。

図表 120　各プロセスにおける活動量

プロセス	活動量			
	参照番号	項目	数値	単位
処理	3A-1-1	機能単位あたりの小型家電・家電処理量（アロケーション後）	1.20	t/機能単位
埋立	3A-1-2	機能単位あたりに発生する SR の埋立量	0.01	t-SR/機能単位
鉄鋼電炉	3A-1-3	機能単位あたりの鉄製錬原料回収量	0.82	t-鉄/機能単位
セメント製造	3A-1-4	機能単位あたりのセメント原燃料向け樹脂回収量	0.04	t-セメント/機能単位
銅製錬	3A-1-5	機能単位あたりの銅製錬原料回収量	0.05	t-銅/機能単位
ステンレス鋼製造	3A-1-6	機能単位あたりのステンレス鋼製錬原料回収量	0	t-ステンレス鋼/機能単位
樹脂製造	3A-1-7	機能単位あたりの樹脂原料向け樹脂回収量	0.27	t-樹脂/機能単位
セメント製造	3B-1-1	新規プロセスによって代替されたセメント生産における天然資源燃料量	0.0001	t-セメント/機能単位
	3B-1-2	新規プロセスによって代替されたセメント生産におけるリサイクル原料量	0.006	t-セメント/機能単位
銅製錬	3B-1-3	新規プロセスによって代替された天然資源を原料とした機能単位あたりの銅生産量	0.02	t-銅/機能単位
ステンレス鋼製造	3B-1-4	新規プロセスによって代替された天然資源を原料とした機能単位あたりのステンレス鋼生産量	0.04	t-ステンレス鋼/機能単位
樹脂（PP)製造	3B-1-5	新規プロセスによって代替された天然資源を原料とした機能単位あたりの樹脂生産量	0.01	t-樹脂/機能単位
処理	3C-1-1	機能単位あたりの小型家電・家電処理量（アロケーション後）	1.21	t/機能単位
埋立	3C-1-2	機能単位あたりに発生する SR の埋立量	0.001	t-SR/機能単位

鉄鋼電炉	3C-1-3	機能単位あたりの鉄製錬原料回収量	0.78	t-鉄/機能単位
セメント製造	3C-1-4	機能単位あたりのセメント原燃料向け樹脂回収量	0.04	t-セメント/機能単位
	3C-1-5	機能単位あたりのセメント産業における電炉スラグの受け入れ増加量	0.006	t-セメント/機能単位
銅製錬	3C-1-6	機能単位あたりの銅回収量	0.07	t-銅/機能単位
ステンレス鋼製造	3C-1-7	機能単位あたりのステンレス鋼回収量	0.04	t-ステンレス鋼/機能単位
樹脂製造	3C-1-8	機能単位あたりの樹脂原料向け樹脂回収量	0.28	t-樹脂/機能単位
鉄鋼電炉	3D-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	0.04	t-鉄鋼/機能単位

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 121　各プロセスにおける排出原単位

プロセス	排出原単位			
	参照番号	項目	数値	単位
処理	3A-2-1	小型家電・家電処理 1t 当たりの CO_2 排出量	46	CO_2-kg/t
埋立	3A-2-2	埋立処理 1t 当たりの CO_2 排出量	33	CO_2-kg/t
鉄鋼電炉	3A-2-3	（二次原料由来の）粗鋼製造 1t 当たりの CO_2 排出量	580	CO_2-kg/t
セメント製造	3A-2-4	セメント製造 1t あたりのセメント原燃料由来の CO_2 排出量	61	CO_2-kg/t
銅製錬	3A-2-5	（二次原料由来の）銅製造 1t 当たりの CO_2 排出量	600	CO_2-kg/t
ステンレス鋼製造	3A-2-6	（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	930	CO_2-kg/t
樹脂製造	3A-2-7	（二次原料由来の）樹脂製造 1t 当たりの CO_2 排出量	205	CO_2-kg/t
セメント製造	3B-2-1	セメント製造 1t あたりの天然資源燃料由来の CO_2 排出量	286	CO_2-kg/t
	3B-2-2	セメント製造 1t あたりの CO_2 排出量（アロケーション後）	5.8	CO_2-kg/t
銅製錬	3B-2-3	（天然資源由来の）銅製造 1t 当たりの CO_2 排出量	2,453	CO_2-kg/t

ステンレス鋼製造	3B-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	2,900	CO_2-kg/t
樹脂（PP)製造	3B-2-5	（天然資源由来の）樹脂製造 1t 当たりの CO_2 排出量	829	CO_2-kg/t
処理	3C-2-1	小型家電・家電処理 1t 当たりの CO_2 排出量	46	CO_2-kg/t
埋立	3C-2-2	埋立処理 1t 当たりの CO_2 排出量	33	CO_2-kg/t
鉄鋼電炉	3C-2-3	（二次原料由来の）粗鋼製造 1t 当たりの CO_2 排出量	580	CO_2-kg/t
セメント製造	3C-2-4	セメント製造 1t あたりのセメント原燃料由来の CO_2 排出量	61	CO_2-kg/t
	3C-2-5	セメント製造 1t あたりの CO_2 排出量（アロケーション後）	5.8	CO_2-kg/t
銅製錬	3C-2-6	（二次原料由来の）銅製造 1t 当たりの CO_2 排出量	600	CO_2-kg/t
ステンレス鋼製造	3C-2-7	（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	930	CO_2-kg/t
樹脂製造	3C-2-8	（二次原料由来の）樹脂製造 1t 当たりの CO_2 排出量	205	CO_2-kg/t
鉄鋼電炉	3D-2-1	（二次原料由来の）粗鋼製造 1t 当たりの CO_2 排出量	580	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 122　各プロセスにおける活動量の算定の考え方

活動量			
参照番号	項目	算定の考え方	参考文献
3A-1-1	機能単位あたりの小型家電・家電処理量（アロケーション後）	・認定事業者が引き取った小型家電のうち、製錬業者に引き渡した金属等の重量、再資源化されたプラスチックの重量、熱回収されたプラスチックの重量、中間処理残渣の重量の合計重量分が破砕・選別処理されたと仮定した（以下同様）。ベースラインプロセスによって破砕・選別処理された小型家電 1t のうち、埋立量、鉄製連原料回収量、セメント原燃料向け樹脂回収量、銅製錬原料回収量、ステンレス鋼製錬原料回収量、樹脂原料向け樹脂回収量の合計量を小型家電処理における活動量として設定した。なお、2019 年の小型家電の再資源化実績が公開されていなかったため、参考文献 3-1-1 で得られたデータをもとに活動量を推計した	3-1-1 3-1-2

		（認定事業者が引き取った処理場の合計は過去 5 年間の推移通り増加すると仮定し、各種金属の回収率は 2019 年に準拠すると仮定して算出。以下、参考文献 3-1-1 をもとにした推計は同様の手法で算出するものとする）。 ・指定引取場所で引き取られた家電のうち、再商品化等処理重量分がベースラインプロセスによって破砕・選別処理されたと仮定した（以下同様）。参考文献 3-1-2 より破砕・選別処理された家電 1t のうち埋立量、鉄製連原料回収量、セメント原燃料向け樹脂回収量、銅製錬原料回収量、ステンレス鋼製錬原料回収量、樹脂原料向け樹脂回収量の合計量を家電処理における活動量として設定した。 ・上記小型家電 1t 処理における活動量と家電 1t 処理における活動量の合計を本項目における活動量として設定した。	
3A-1-2	機能単位あたりに発生する SR の埋立量	・小型家電由来の SR 発生量のうち熱回収されたプラスチックの重量が占める割合と、ASR の発生量のうち熱回収されたプラスチック等の重量が占める割合が等しいと仮定し、小型家電由来の SR 発生量を推計した（以下、小型家電由来の SR 発生量は同様の手法で推計）。また、ASR 発生量のうち、埋立処理量、土砂・ガラスのマテリアルリサイクル量、スラグ・溶融メタルのマテリアルリサイクル量、その他マテリアルリサイクル量が占める割合の合計と、小型家電由来の SR 発生量のうち埋立処理量が占める割合が等しいと仮定した。以上の仮定より、参考文献 3-1-1、3-1-3 から小型家電 1t の処理当たりに発生する SR の埋立量を推計した。 ・家電由来の SR は全て熱回収されていると仮定し、埋立量は 0 と仮定した。 ・上記小型家電 1t 処理における活動量と家電 1t 処理における活動量の合計を本項目における活動量として設定した。	3-1-1 3-1-3
3A-1-3	機能単位あたりの鉄製錬原料回収量	・認定事業者が引き取った小型家電のうち、再資源化された鉄量を小型家電 1t 処理における活動量として設定した。なお、活動量は参考文献 3-1-1 をもとに推計した。 ・参考文献 3-2-2 の家電リサイクル法実績より鉄の再資源化量を参考に、家電 1t 処理における活動量として設定した。 ・上記小型家電 1t 処理における活動量と家電 1t 処理における活動量の合計を本項目における活動量として設定した。	3-1-1 3-1-2 3-1-3

3A-1-4	機能単位あたりのセメント原燃料向け樹脂回収量	・小型家電由来の SR 発生量のうち、ASR と同様の割合でセメント工程に供給されると仮定し、小型家電 1t 処理における活動量を推計した。 ・参考文献 3-2-2 より、再商品化等処理重量から再商品化処理重量を差し引いた重量を家電由来の SR 発生量と仮定した（以下、家電由来の SR 発生量は同様の手法で推計）。家電由来の SR 発生量のうち、ASR と同様の割合でセメント工程に供給されると仮定し、家電 1t 処理における活動量を推計した。 ・上記小型家電 1t 処理における活動量と家電 1t 処理における活動量の合計を本項目における活動量として設定した。	3-1-1 3-1-2 3-1-3
3A-1-5	機能単位あたりの銅製錬原料回収量	・認定事業者が引き取った小型家電のうち、再資源化された銅量を小型家電 1t 処理における活動量として設定した。なお、活動量は参考文献 3-1-1 をもとに推計した。 ・参考文献 3-2-2 の家電リサイクル法実績より銅の再資源化量を参考に、家電 1t 処理における活動量として設定した。 ・上記小型家電 1t 処理における活動量と家電 1t 処理における活動量の合計を本項目における活動量として設定した。	3-1-1 3-1-2 3-1-3
3A-1-6	機能単位あたりのステンレス鋼製錬原料回収量	・小型家電、家電を破砕・選別した産物からステンレス鋼製錬向け原料は回収されないと仮定した。	
3A-1-7	機能単位あたりの樹脂原料向け樹脂回収量	・小型家電由来の SR 発生量のうち、ASR と同様の割合で樹脂が再資源化されると仮定し、小型家電 1t 処理における活動量を推計した。 ・参考文献 3-2-2 の家電リサイクル法実績よりその他の有価物の再資源化量を参考に、家電 1t 処理における活動量として設定した。 ・上記小型家電 1t 処理における活動量と家電 1t 処理における活動量の合計を本項目における活動量として設定した。	3-1-1 3-1-2 3-1-3
3B-1-1	新規プロセスによって代替されたセメント生産における天然資源燃料量	・C-1-4 における活動量から A-1-4 における活動量を差し引いて算出した。	
3B-1-2	新規プロセスによって代替されたセメント生産におけるリサイクル原料量	・C-1-5 における活動量と同値と設定した。	

3B-1-3	新規プロセスによって代替された天然資源を原料とした機能単位あたりの銅生産量	・C-1-6 における活動量から A-1-5 における活動量を差し引いて算出した。	
3B-1-4	新規プロセスによって代替された天然資源を原料とした機能単位あたりのステンレス鋼生産量	・C-1-7 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。	
3B-1-5	新規プロセスによって代替された天然資源を原料とした機能単位あたりの樹脂生産量	・C-1-8 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。	
3C-1-1	機能単位あたりの小型家電・家電処理量（アロケーション後）	・新規プロセスによって破砕・選別処理された小型家電 1t のうち、埋立量、鉄製連原料回収量、セメント原燃料向け樹脂回収量、銅製錬原料回収量、ステンレス鋼製錬原料回収量、樹脂原料向け樹脂回収量の合計量を小型家電処理における活動量として設定した。 ・新規プロセスによって破砕・選別処理された家電 1t のうち埋立量、鉄製連原料回収量、セメント原燃料向け樹脂回収量、銅製錬原料回収量、ステンレス鋼製錬原料回収量、樹脂原料向け樹脂回収量の合計量を家電処理における活動量として設定した。 ・上記小型家電 1t 処理における活動量と家電 1t 処理における活動量の合計を本項目における活動量として設定した。	3-1-1 3-1-2
3C-1-2	機能単位あたりに発生する SR の埋立量	・新規プロセスにおける、セメント原燃料向け樹脂回収量および樹脂原料向け樹脂回収量の増加重量分が SR の埋立量から削減されると仮定した。	
3C-1-3	機能単位あたりの鉄製錬原料回収量	・ベースラインプロセスにおいて回収された鉄製錬原料のうち、新規プロセス（電磁式ファインダー）の導入によって、クロム系ステンレス鋼が回収され、その分鉄製錬原料回収量が減少すると仮定した。なお、参考文献 3-1-4 から、鉄製連原料中のステンレス鋼の割合を 5.9%と仮定して推計を行った。また、クロム系ステンレス鋼は 80%回収されると仮定して推計を行った。	3-1-4
3C-1-4	機能単位あたりのセメント原燃料向け樹脂回収量	・ベースラインプロセスにおいて埋立処理されている SR のうち、新規プロセス（重液・流動層選別）の導入によって、セメント原燃料向け樹脂が回収されると仮定した。セメント原燃料向け樹脂は 80%回収されると仮定して推計を行った。	

3C-1-5	機能単位あたりのセメント産業における電炉スラグの受け入れ増加量	・新規プロセス（電磁式ファインダー）の導入によって、鉄製錬原料からクロムが取り除かれることで、電炉スラグ中のクロム量が削減されると仮定した。なお、参考文献 3-1-4 から、鉄製錬原料中のクロム量は 2.2%と仮定して推計を行った。また、クロムは 80%削減されると仮定した。 ・電炉スラグ中のクロム量が削減されることで、セメント産業における電炉スラグの受け入れ量が増加すると仮定した。なお、現状セメント産業が受け入れている電炉スラグ由来のクロム量を、セメント産業が受け入れ可能なクロム上限値とした。セメント産業が現状受け入れているクロム量は、セメント産業に投入されている電炉スラグ量（参考文献 3-1-5、3-1-6 をもとに推計）に電炉スラグ中のクロム含有率（参考文献 3-1-4）を乗じて算出した。 ・参考文献 3-1-6、3-1-7、3-1-8 から電炉鋼生産量、電炉スラグ発生量、電炉ダスト発生量を引用した。また、それらに、参考文献 3-1-9、3-1-4 から引用した電炉鋼、電炉スラグ、電炉ダスト中のクロム含有率を乗じることで、電炉鋼、電炉スラグ、電炉ダスト中のクロム量を推計した。また、それらクロム量の合計値を電炉に投入されるクロム量とみなした。電炉に投入されるクロム量と電炉スラグ中のクロム量の関係から、電炉スラグ中へのクロム分配率を算出した。 ・新規プロセスによるクロムの削減量、電炉スラグ中へのクロム分配率もとに新規プロセス後の電炉スラグ中のクロム含有率を算出した。セメント産業が受け入れ可能なクロム上限値を新規プロセス後の電炉スラグ中のクロム含有率で除することで、新規プロセス後のセメント産業における電炉スラグの受け入れ量を算出した。 ・新規プロセスとベースラインプロセスにおけるセメント産業における電炉スラグの受け入れ量の差分を電炉スラグの受け入れ増加量として、本項目における活動量として設定した。	3-1-4 3-1-6 3-1-7 3-1-8 3-1-9
3C-1-6	機能単位あたりの銅回収量	・ベースラインプロセスにおいて回収された鉄製錬原料のうち、新規プロセス（電磁式ファインダー）の導入によって、銅が回収されると仮定した。なお、参考文献 3-1-4 から、鉄製連原料中の銅の割合を 0.5%と仮定して推計を行った。また、銅は 80%回収されると仮定して推計を行った。 ・ベースラインプロセスにおいて埋立処理されている SR のうち、新規プロセス（重液・流動層選別）の導入によって、銅が回収されると仮定した。なお、参考文献 3-1-4 から、SR 中の銅の割合を 5%と仮定して推計を行った。また、銅は 80%回収されると仮定して推計を行った。	3-1-4

3C-1-7	機能単位あたりのステンレス鋼回収量	・ベースラインプロセスにおいて回収された鉄製錬原料のうち、新規プロセス（電磁式ファインダー）の導入によって、クロム系ステンレス鋼が回収されると仮定した。なお、参考文献 3-1-4 から、鉄製連原料中のステンレス鋼の割合を 5.9%と仮定して推計を行った。また、クロム系ステンレス鋼は 80%回収されると仮定して推計を行った。	3-1-4
3C-1-8	機能単位あたりの樹脂原料向け樹脂回収量	・ベースラインプロセスにおいて埋立処理されている SR のうち、新規プロセス（重液・流動層選別）の導入によって、樹脂原料向け樹脂が回収されると仮定した。樹脂原料向け樹脂は 2%回収されると仮定して推計を行った。	
3D-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-1-3 における活動量から C-1-3 における活動量を差し引いて算出した	

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 123　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
3A-2-1	小型家電・家電処理 1t 当たりの CO_2 排出量	小型家電および家電の破砕・選別処理にかかる CO_2 排出量が等しいとして、参考文献 3-2-1 より本項目における原単位を引用した。	3-2-1
3A-2-2	埋立処理 1t 当たりの CO_2 排出量	参考文献 3-2-2 より本項目における原単位を引用した。	3-2-2
3A-2-3	（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 3-2-3 より本項目における原単位を引用した。	3-2-3
3A-2-4	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 3-2-4 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 3-2-5 を参考に設定した。	3-2-4 3-2-5
3A-2-5	（二次原料由来の）銅製造 1t 当たりの CO_2 排出量	参考文献 3-2-6 より本項目における原単位を引用した。	3-2-6
3A-2-6	（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 3-2-7 より本項目における原単位を引用した。	3-2-7

3A-2-7	（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 3-2-8 より本項目における原単位を引用した。	3-2-8
3B-2-1	セメント製造 1t 当たりの天然資源燃料由来の CO_2 排出量	ポルトランド 1t の生産に当たり、化石エネルギー起源の燃焼によって排出される CO_2 量を参考文献 3-2-4 より引用した。	3-2-4
3B-2-2	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 3-2-4 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 3-2-5 を参考に設定した。	3-2-4 3-2-5
3B-2-3	（天然資源由来の）銅製造 1t 当たりの CO_2 排出量	参考文献 3-2-9 より本項目における原単位を引用した。	3-2-9
3B-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 3-2-7 より本項目における原単位を引用した。	3-2-7
3B-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 3-2-10 より本項目における原単位を引用した。	3-2-10 3-2-11 3-2-12
3C-2-1	小型家電・家電処理 1t 当たりの CO_2 排出量	小型家電および家電の破砕・選別処理にかかる CO_2 排出量が等しいとして、参考文献 3-2-1 より本項目における原単位を引用した。	3-2-1
3C-2-2	埋立処理 1t 当たりの CO_2 排出量	参考文献 3-2-2 より本項目における原単位を引用した。	3-2-2
3C-2-3	（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 3-2-3 より本項目における原単位を引用した。	3-2-3
3C-2-4	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 3-2-4 より引用した。	3-2-4
3C-2-5	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 3-2-4 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 3-2-5 を参考に設定した。	3-2-4 3-2-5

3C-2-6	（二次原料由来の）銅製造 1t 当たりの CO_2 排出量	参考文献 3-2-6 より本項目における原単位を引用した。	3-2-6
3C-2-7	（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 3-2-7 より本項目における原単位を引用した。	3-2-7
3C-2-8	（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 3-2-8 より本項目における原単位を引用した。	3-2-8
3D-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 3-2-3 より本項目における原単位を引用した。	3-2-3

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

図表 124　CO_2 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	環境省、2020、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 小型家電リサイクルワーキンググループ 資料
3-1-2	一般社団法人家電製品協会、2020、家電リサイクル年次報告書 2019 年（令和元年）度版
3-1-3	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、2015、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
3-1-4	MURC 過去調査
3-1-5	セメント協会、2020、セメントハンドブック
3-1-6	鉄鋼スラグ需給概要、2019、 2018 年度鉄鋼スラグ需給の概要
3-1-7	一般社団法人日本鉄源教会、2020、我が国のスクラップ国内需給（2019 年度）
3-1-8	中山道夫、2011、溶融還元による電炉ダスト処理プロセス
3-1-9	醍醐市朗ら、2014、鉄鋼材における不純物元素濃度の日中間比較
3-2-1	LCA 日本フォーラム、2006、LCA データベース 2020 年度 1 版検索「破砕･選別(家電) 混合処理」
3-2-2	長田守弘ら、2012、自動車破砕残渣（ASR）の資源化・処理に関するライフサイクルアセスメント

3-2-3	河瀬玲奈ら、2014、2050 年における世界の鉄鋼部門からの CO2 排出量削減ポテンシャルの推計
3-2-4	セメント協会、2020、セメントの LCI データの概要
3-2-5	セメント協会、2020、セメントハンドブック
3-2-6	MURC 過去調査
3-2-7	ISSF、2018 、ステンレスと CO2：事実と科学的観察
3-2-8	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
3-2-9	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
3-2-10	LCA 日本フォーラム、2003、LCA データベース 2020 年度 1 版検索「オレフィン製造プロピレン」
3-2-11	LCA 日本フォーラム、2003、LCA データベース 2020 年度 1 版検索「ナフサ」
3-2-12	LCA 日本フォーラム、2003、LCA データベース 2020 年度 1 版検索「原油」

（出所）三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング作成

令和２年度環境省委託業務

令和２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３年３月

委託先：三菱ＵＦＪリサーチ&コンサルティング株式会社
（連絡先：持続可能社会部　清水・小川・迫田・園原・千賀）

※無許可の転載・掲載を禁じます。