

CFRP 含有 ASR 等の非燃焼処理および
事業者間連携による
貴金属等回収・再資源化実証

報告書

令和 2 年 2 月 28 日

三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社

要約

自動車の燃費を向上させるため、車体に炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を使用して軽量化を図る動きが広がっており、使用済み自動車の破碎処理では、CFRPを含む自動車破碎残渣（ASR）の発生増加が将来的に見込まれている。現状、有力な処理・再資源化の方法の一つとしてCFRPの燃焼処理と焼却灰のセメント原料化の組合せが想定されているものの、短時間の燃焼処理ではCFRPが残存してしまい、導電性のためにセメントキルンに付帯する電気集塵機を短絡停止させてしまう可能性や（ASR中に数100ppmのCFRPが含まれるだけで短絡発生）、セメント製品の品質基準を充足しない可能性も懸念されている。

そこで本事業では、セメント産業や鉄鋼電炉産業等にとっての「忌避物質」であるCFRPに新たな前処理技術を適用することで、鉄鋼加炭材等としての再資源化を目指した。また、本事業技術を適用することで、これまでほとんど回収されていなかったASR等中の貴金属や非鉄金属等の再資源化拡大を目指すだけでなく、CFRP中の樹脂分から得られる熱量を活用することにより、エネルギー起源CO₂排出量も抑制できる処理プロセスの構築を目指した。

事業の結果、CFRP含有ASR等の適正処理及び再資源化という観点では、325℃程度の脆化および破碎処理を施すことで、物理選別が可能となり、セメント向けのコークス代替品、非鉄製錬向け想定原料、鉄鋼電炉向け想定原料を回収できる可能性があることがわかった。

セメント向けのコークス代替品のハロゲン含有量は許容量であると見込まれるが、総発熱量には一定の課題を有していた。非鉄製錬向け想定原料には、有用金属（特に銅）の濃縮が確認されており、非鉄製錬において銅滓相当の原料として利用できる可能性が明らかになった。なお、ケイ素、アルミの含有は許容量であると見込まれる。また、乾式銅製錬向けの想定原料に加えて、アルミ製錬向けの想定原料を回収できた。当初回収を想定していた金、銀、銅に加えて、白金族等が微量に含まれており、本提案技術によって未資源化されていた白金族を回収できる可能性があることが明らかになった。鉄鋼電炉向けの想定原料には鉄の濃縮を確認し、塩素やガラスの混入量も許容範囲であると見込まれた。

今後の課題として、コークス代替品を鉄鋼電炉で使用するには、忌避物質である銅の分離性向上や加炭効果をもたらすための固定炭素分の増加、原単位低下を引き起こすガラスの分離が必要であると考えられる。また、将来的にCFRP混入量が多くなった際には、破碎条件の見直しが必要になる可能性がある。

本提案技術によって、ASR・SR由来の複数の未資源化物質を、各産業にとっての忌避物質をコントロールしながら供給できる可能性があることがわかった。

Summary

There is an increasing movement to reduce the weight of car bodies by using Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) to improve fuel efficiency. An increase in the generation of automobile shredder residue (ASR) containing CFRP is expected in the future. A combination of CFRP combustion treatment and recycling of incineration ash in cement production is assumed as an effective method for the treatment of CFRP. However, there is a possibility to cause a short circuit due to the remained conductivity of CFRP in the electric dust collector attached to a cement kiln, and it is concerned that obtained ash would not satisfy the quality of cement product.

This project aims to recycle ASR containing CFRP, which is "repellent material" for the cement industry, steel electric furnace industry, and others by applying new pretreatment technologies. In this project, it is possible to expand recycling of precious metals and non-ferrous metals, etc. in ASR, etc. which had been hardly recovered, but also utilize the heat obtained from the resin in CFRP, which contributes to reducing energy-originated carbon dioxide emissions.

As a result, it is possible to treat ASR containing CFRP and at least to utilize it as the substitutes of cokes for the cement industry by applying embrittlement treatment at 325 degrees C. It is required to improve the separability of the repellent component (copper, glass) and to satisfy a criteria for the amount of fixed carbon in the substitute of cokes for steel electric furnaces. The concentration of useful metals (especially copper) is succeeded in products obtained after sorting, which is possible to utilize as a raw material equivalent to a copper residue in nonferrous smelting. The separation of copper and aluminium is also succeeded in them, and obtained products are suitable for aluminium smelting furnace as a raw material. Some products contain platinum group metals (PGMs) in addition to gold, silver, and copper. A product with a high content of steel is recovered through a magnetic separation process.

Our experimental process recovers several unutilized materials from ASR and SR with CFRP, which the repellent component of the materials are well controlled for each industry, cement industry, nonferrous smelting industry and steel electric furnace industry.

目次

I.	背景と目的	1
II.	事業実施内容	2
II-1.	事業の全体概要	2
II-2.	各実施事項	4
1.	産物特性をコントロールするための非燃焼処理・破砕・選別条件に関する調査検討	4
2.	選別・破砕プロセスの方法や条件の違いによる産物特性の比較実証	6
3.	濃縮および回収可能性に関する検討	11
4.	選好物質の濃縮および忌避物質の分離可能性に関する検討	15
III.	結果および考察	17
III-1.	忌避・選好物質のマテリアルバランスおよびフロー推計（初年度）	17
1.	ASRにおける忌避・選好物質のマテリアルフロー推計結果	17
2.	忌避・選好物質をコントロールするための課題検討	19
III-2.	産物特性をコントロールするための非燃焼処理・破砕・選別条件に関する調査検討（初年度・第2年度）	20
1.	サンプリングおよび成分分析（初年度）	20
2.	技術実証および技術課題に関する検討・分析（初年度）	34
3.	非燃焼処理・破砕・選別条件に関する検討（第2年度）	35
4.	第2年度実証プロセスの検討	37
III-3.	選別・破砕プロセスの方法や条件の違いによる産物特性の比較実証	40
1.	試験①：SR単味（事業所AのSRを投入）	40
2.	試験②：SR単味（事業所BのSRを投入）	44
3.	試験③：SR+CFRP（事業所BのSRを投入）	48
III-4.	濃縮および回収可能性に関する検討	52
1.	ASRおよび副産物の発生量・流通量の推計結果	52
2.	未資源化物質の賦存量推計	53
III-5.	選好物質の濃縮および忌避物質の分離可能性に関する検討	58
1.	CFRPの適正処理・再資源化に関する考察	58
2.	選別・破砕プロセスに関する考察	60
3.	選好物質の濃縮および忌避物質の分離可能性向上に向けた課題検討	74
IV.	まとめ	76
IV-1.	実証成果	76
1.	CFRP含有ASR等の適正処理・再資源化の評価	76

2. セメント・鉄鋼電炉・非鉄製錬（銅等）における新たな選好・忌避物質のコントロール可能性の提示.....	76
3. 環境影響および事業性評価.....	77
IV-2. 今後の課題.....	89
1. 全体の事業構想（ロードマップ）.....	89
2. 事業化に向けて解決すべき課題.....	91

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）

川寄 幹生 埼玉県環境科学国際センター 資源循環・廃棄物担当 主任研究員
大和田 秀二 早稲田大学創造理工学部環境資源工学科 教授

（企業等：企業名五十音順）

酒井 久敬 東京製鐵株式会社 執行役員 宇都宮工場長
片山 浩嗣 東京製鐵株式会社 総務部購買部 課長代理
山本 恵宣 東邦亜鉛株式会社 環境・リサイクル事業部 係長
神倉 慎 東邦亜鉛株式会社 環境・リサイクル事業部
張田 真 ハリタ金属株式会社 代表取締役社長
寺崎 英樹 ハリタ金属株式会社 サイト管理グループ ゼネラルマネージャー
大森 洋輔 三井金属鉱業株式会社 営業統括部 リサイクル営業部 部長補佐
村上 義則 リバーホールディングス株式会社 技術部部长
萩原 慎一郎 リバーホールディングス株式会社 技術開発課 部長補佐
富田 繁 リバーホールディングス株式会社 技術開発課 課長

（事務局）

大桐 哲也 太平洋セメント株式会社 環境事業部 営業企画グループリーダー
花田 隆 太平洋セメント株式会社 環境事業部 営業企画グループ 参事
福田 誠司 太平洋セメント株式会社 環境事業部 営業企画グループ 参事
森 賢一 太平洋セメント株式会社 環境事業部 営業企画グループ
課長補佐
吉川 智久 太平洋セメント株式会社 中央研究所 第3研究部 副部長
石田 泰之 太平洋セメント株式会社 中央研究所 第3研究部 副部長
竹本 智典 太平洋セメント株式会社 中央研究所 第3研究部 分離技術チーム
武藤 恭宗 太平洋セメント株式会社 中央研究所 第3研究部 分離技術チーム
清水 孝太郎 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社
環境・エネルギー部 上席主任研究員
迫田 瞬 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社
環境・エネルギー部 研究員
園原 惇史 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社
環境・エネルギー部 研究員
千賀 太喜 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社
環境・エネルギー部 研究員

（オブザーバー）

木原 忠志 エコメビウス株式会社 代表取締役社長

用語の定義

用語	定義・説明等
ASR	Automobile Shredder Residueの略称であり、自動車破碎残渣のことを指す。使用済自動車からエアバッグ類やフロン類、ドア、エンジンなどの部品を取り外したのちに、破碎（シュレッダー処理）され有用金属等を回収した後の残渣となる。
SR	Shredder Residueの略称であり、スクラップヤード等において破碎（シュレッダー処理）され有用金属等を回収した後の残渣を指す。一般には上記のASR以外の破碎残渣を指すことが多い。
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plasticsの略称であり、炭素繊維強化プラスチックを指す。強化材に炭素繊維を用いた繊維強化プラスチックである。高い強度や剛性を有しながら軽いため、燃料電池自動車の水素タンクや自動車のボディ等に使用される。
非燃焼処理	本報告書では、物質を燃焼させることなく低温（200～500℃程度）で樹脂等を分解させる処理を示す。非燃焼処理によって得られた産物を脆化物と呼ぶ。
選好物質・成分	本報告書では、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	本報告書では、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。
製鋼煙灰	本報告書では、特に電気炉で発生するばいじんを製鋼煙灰と称する。「電炉ダスト」と称することもある。

I. 背景と目的

自動車の燃費を向上させるため、車体に炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を使用する動きが広がっており、使用済み自動車の破砕処理では、CFRPを含む自動車破砕残渣（ASR）の発生量の増加が将来的に見込まれている。CFRPには、難燃性や導電性といった特徴があるため、従来のASR処理方法では対応できない可能性がある。例えば、通常の燃焼処理ではCFRPが残存してしまうため、処理したものをセメントキルン等で再資源化しようとする、導電性のために電気集塵機の機能を停止させてしまう場合や、製品の品質基準を充足しないおそれがある。特に電気集塵機については、ASR中に数100ppm～0.4%のCFRPが含まれるだけで障害が発生してしまうため、ASRの処理能力が大きく制限されてしまう可能性もあり、セメント産業などにおける再資源化「忌避物質」となっている。また、鉄鋼電炉産業においてもそのままCFRPを投入することで、ダストの発生量が増加し、歩留りの低下可能性が懸念されている。

本事業では、セメント産業や鉄鋼電炉産業等にとっての「忌避物質」であるCFRPに新たな前処理技術を適用することで、コークス代替品等としての再資源化を目指した。本事業技術の適用によって、セメント産業や鉄鋼電炉産業におけるコークス代替品として利用することで、これら産業におけるCFRP含有ASR等の受容性が高まることが期待される。

また、本事業技術を適用することで、これまでほとんど回収されていなかったASR等中の貴金属や非鉄金属等の再資源化拡大を目指すとともに、CFRP中の樹脂分から得られる熱量を活用することによって、エネルギー起源CO2排出量も抑制できる処理プロセスの構築を目指した。

II. 事業実施内容

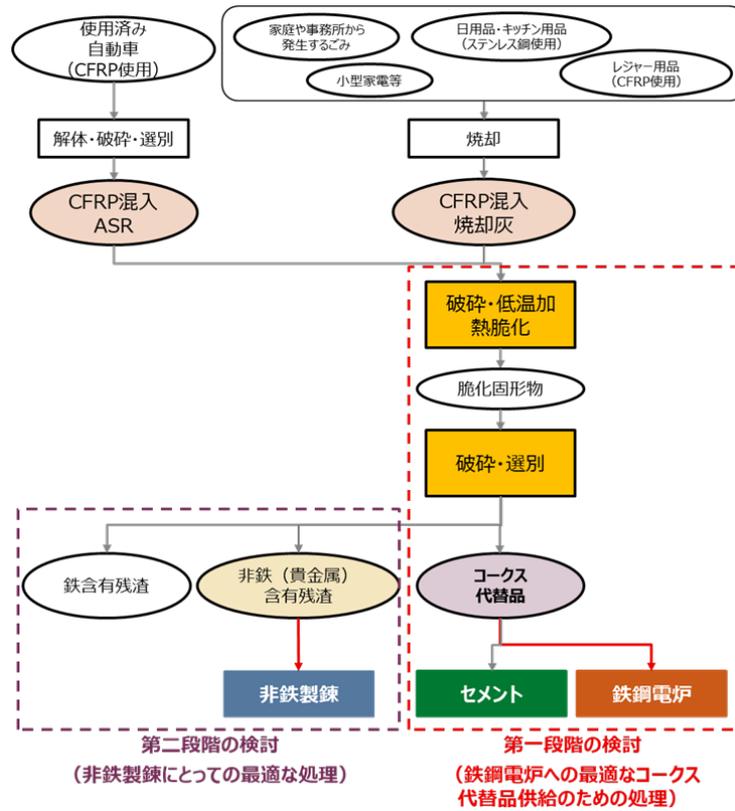
II-1. 事業の全体概要

本事業では、セメント事業者および鉄鋼電炉事業者におけるCFRP含有ASR等の受容性を高める事前処理（脆化处理＋選別）、またコークス代替品（セメント産業における吹込み用微粉炭および鉄鋼電炉産業における加炭材）としての再資源化、貴金属等製錬原料としての再資源化について実証を行った。事前処理では、セメント事業者や鉄鋼電炉事業者が受容可能な性状まで処理できるか、また選別ではセメント事業者や鉄鋼電炉事業者にとって忌避物質となる成分の十分な分離、非鉄製錬事業者に貴金属等製錬原料として売却可能なほどに選好物質を濃集させることができるかを検証した。

初年度（平成30年度）は、まず忌避・選好物質のマテリアルフローを推計し、未資源化物質の賦存量を推計した。そのうち、CFRP含有ASR等を事前処理したものの性状把握や、セメント事業者や鉄鋼電炉事業者における受容可能性の評価、事前処理条件の具体化、破碎・選別プロセスの仕様案を検討した。

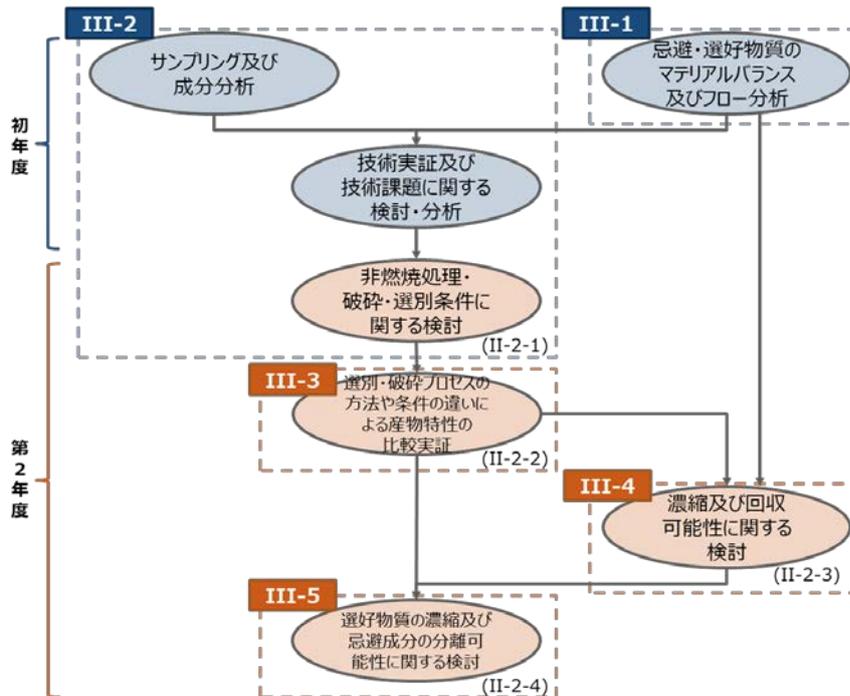
第2年度（平成31年度）は、初年度の成果および課題を踏まえて、CFRP含有ASR等からセメント事業者や鉄鋼電炉事業者向けに供給可能なコークス代替品を回収し、同時に非鉄製錬事業者向けの貴金属等製錬原料を回収するための最適なプロセス仕様を検討した。また、本提案技術によるマテリアルフローの改善効果を推計し、事業化に向けたロードマップを作成し、今後の課題を整理した。

図表 1 事業の全体概要



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 2 事業実施内容



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

II-2. 各実施事項

1. 産物特性をコントロールするための非燃焼処理・破碎・選別条件に関する調査検討

(1) サンプルングおよび成分分析（初年度）

選好・忌避物質等を含むSR（ASR相当）について、SR単体およびSRにCFRP、木屑を添加した試料を調製した。その後、後段の技術実証で処理した産物について、コークス代替品や製錬原料等としての利用可能性を評価するため、成分分析（金属、ハロゲン成分等）および性状分析（熱量、固定炭素量、含水率、粒度分布、嵩密度）を行った。

(2) 技術実証および技術課題に関する検討・分析（初年度）

(1) で得られたコークス代替品、非鉄製錬（乾式銅製錬）向け想定原料の分析結果をもとに、セメント産業および鉄鋼電炉産業におけるコークス代替品、乾式銅製錬産業における非鉄製錬原料としての受入可否、難しい場合の技術的理由と今後の課題について検討を行った。コークス代替品においては、CFRPの処理率を向上させるための温度条件の調整等や、粒度、固定炭素量、含水率およびこれらを最適化させるための温度・処理条件を検討した。非鉄製錬（乾式銅製錬）向け想定原料においては、有用金属を分離、濃縮するための温度・処理条件を検討した。また、非鉄製錬（乾式銅製錬）向け想定原料においては、金属含有量分析の結果から回収可能な有用金属の検討を行った。

上記を踏まえ、CFRP含有ASR等をセメント・鉄鋼電炉両産業向けに適したコークス代替品および乾式銅製錬に供給可能な製錬原料として加工処理するための最適プロセス仕様案を検討し、技術実証を実施した。

また、当初想定していた回収産物に加え、鉄鋼電炉向け想定原料を回収し、受入可否および難しい場合の技術的理由と今後の課題について検討を行った。

(3) 非燃焼処理・破碎・選別条件に関する検討（第2年度）

初年度実証事業の技術実証および成分分析結果をもとに、セメント産業および鉄鋼電炉産業におけるコークス代替品、鉄鋼電炉産業における製錬原料、非鉄製錬（乾式銅製錬）原料として供給可能な産物の回収を目的に、産物特性をコントロールするための非燃焼処理・破碎・選別における技術課題を検討した。

(4) 第2年度実証プロセスの検討

(3) で設定した課題を解決するため、脆化、破碎、選別の処理条件を見直し、また、選別プロセスの組み合わせ最適化を検討した。これを踏まえて、CFRP含有ASR等をセメント・鉄鋼電炉両産業向けに適したコークス代替品、鉄鋼電炉産業

における製錬原料、非鉄製錬（乾式銅製錬）原料として加工処理するための最適プロセス仕様案を検討した。

2. 選別・破碎プロセスの方法や条件の違いによる産物特性の比較実証

(1) 比較実証の概要

第2年度はそれぞれ異なる試料を対象に、3回の試験を行った。試験①と試験②では異なる事業所（事業所A、事業所B）からサンプリングしたSRを対象に、SR単味（100%）を対象に、図表 4の装置を使用して試験を行った。一般的にSRの性状は事業所の処理プロセスによって異なるとされている。そこで、複数の事業所でサンプリングしたSRを試料にすることで、投入物が回収産物に与える影響を把握するとともに、本実証プロセスが国内で発生する（性状の異なる）SR・ASRに対して有効であるか検討した。

試験③では、試験②と同一の事業所（事業所B）からサンプリングしたSRに、人為的にCFRPを混ぜることによって試料を調製した。同一の事業所からサンプリングしたSRの性状は同様と仮定し、SR中にCFRPが混入することによる処理プロセスや回収産物への影響を確認した。試験③のCFRPの混入率は、ヒアリング値およびASR中のCFRP混入量の推計値より、0.5%とした。

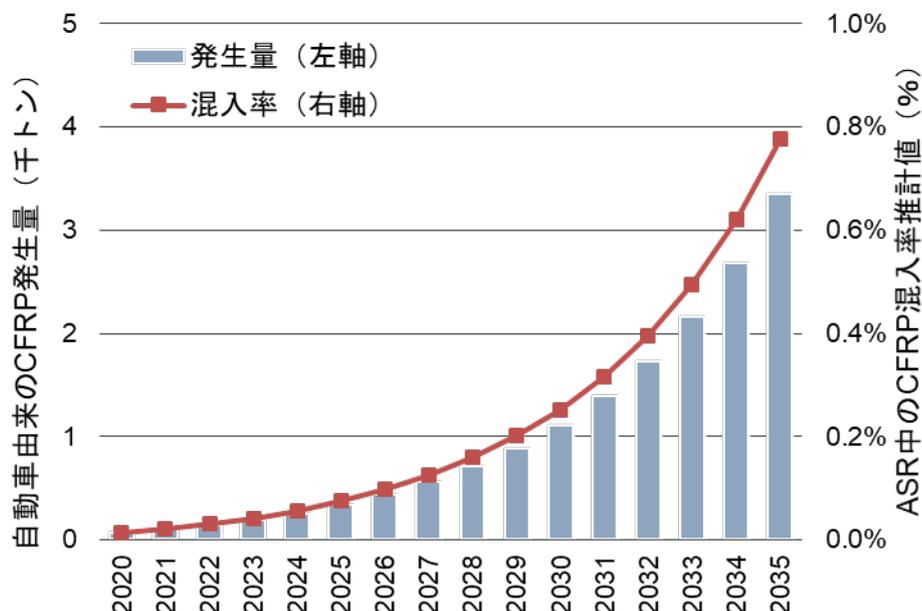
図表 3 本実証における投入物と目的回収産物

投入物	試験①	SR（事業所A）100%
	試験②	SR（事業所B）100%
	試験③	SR（事業所B）99.5%+CFRP0.5%
目的回収産物	<ul style="list-style-type: none"> ・セメント向けコークス代替品 ・鉄鋼電炉向けコークス代替品 ・鉄鋼電炉向け想定原料（鉄） ・非鉄製錬向け想定原料（銅、貴金属等） 	

図表 4 本実証にて使用した装置（一覧）

装置名	装置概要
脆化处理装置	内熱式アントラーキルン（脆化温度・325℃）
破碎処理装置	スイングハンマー式破碎機（スクリーン径：φ8mm, 15mm）
選別装置	風選機（縦型ジグザグ式） 磁選機（吊り下げ式、ドラム式） 篩分機 比重差選別機（3次元式選別機） 渦電流選別機

図表 5 自動車由来のCFRP発生量とASR中の混入率（推計値）



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

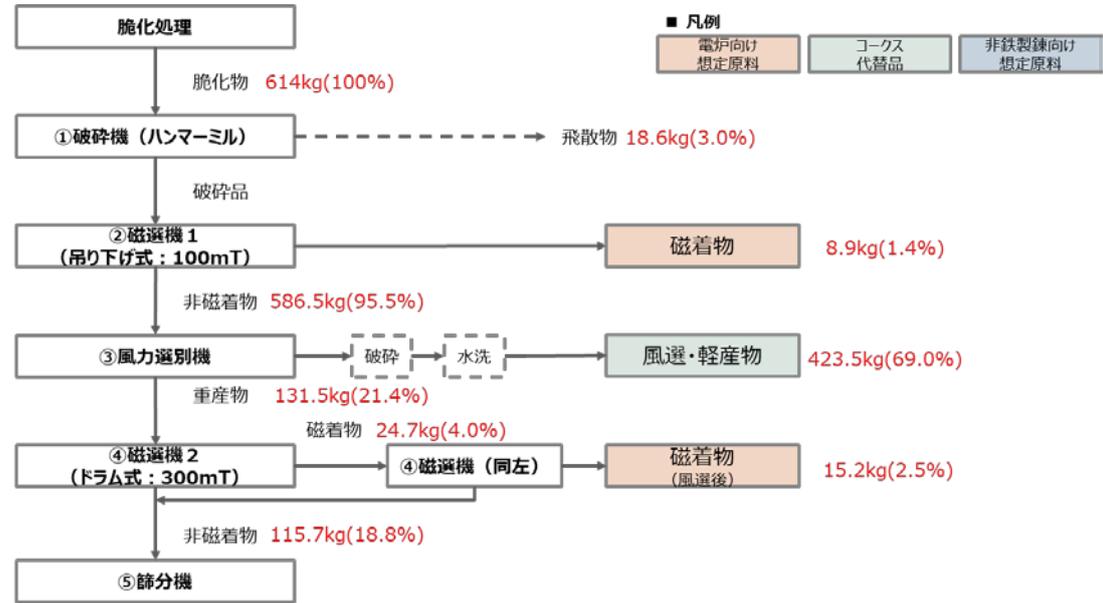
(注) 各種資料より自動車向けのCFRP需要を推計し、耐用年数を乗じてワイブル分布からCFRP発生量を推計。同様に自動車の国内需要よりASR発生量を推計し、各年ごとにASR中のCFRP混入量を算出

(2) 試験①：SR単味

試験①では、事業所AからサンプリングしたSR単味（100%）を投入し、処理を行った。脆化物を破碎後、吊り下げ式の磁選機（磁力：100mT程度）で磁着物（鉄鋼電炉向け想定原料）を回収した。その後、風選により非磁着物から軽産物（コークス代替品としての供給を想定）と重産物を回収した。

風選の重産物に再度磁選を行うことで磁着物（鉄鋼電炉向け想定原料）を回収するとともに、非磁着物をふるい分けによって3つの粒群に分け、粒群ごとに比重差選別と渦電流選別を行い、導電産物（非鉄製錬原料を想定）を回収した。

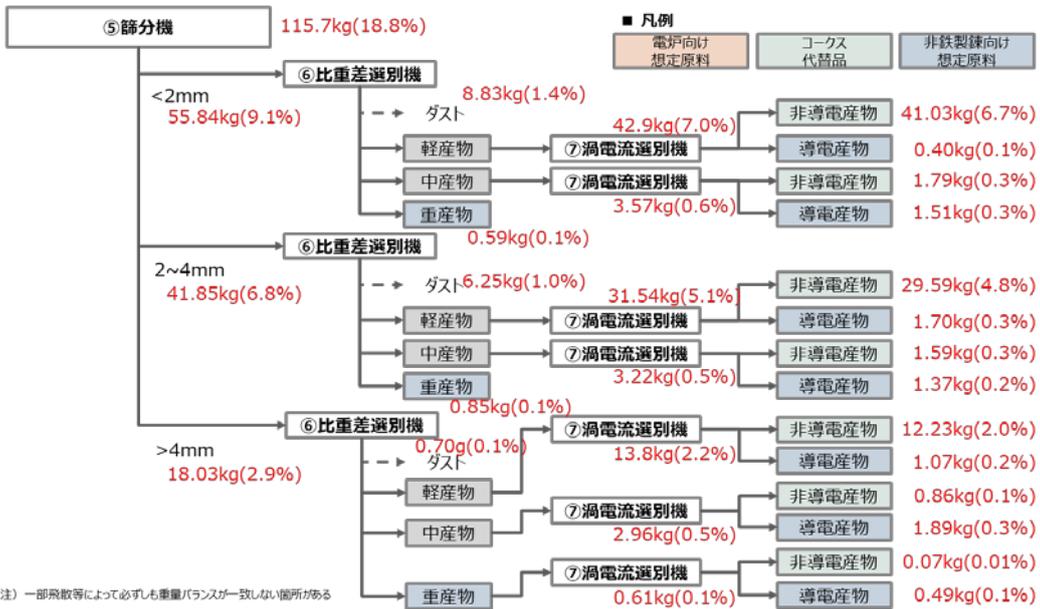
図表 6 破碎および風選・磁選処理（試験①）



(注) 一部飛散等によって必ずしも重量バランスが一致しない箇所がある

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 7 比重差・渦電流選別処理（試験①）



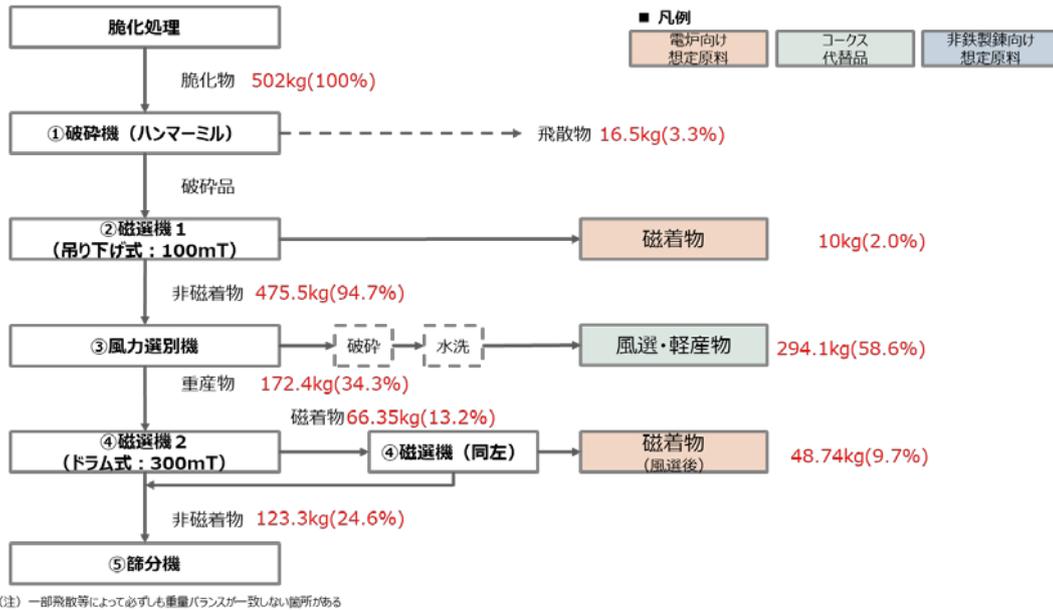
(注) 一部飛散等によって必ずしも重量バランスが一致しない箇所がある

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(3) 試験②：SR単味（事業所BのSRを投入）

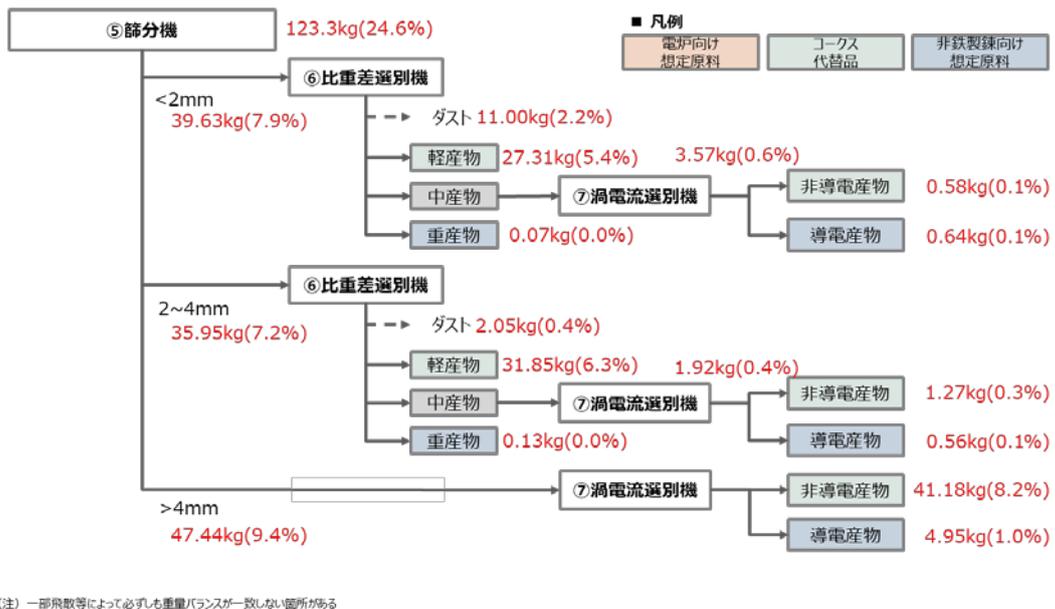
試験②では、事業所BからサンプリングしたSR単味（100%）を投入し、処理を行った。選別フローは試験①とほぼ同様であるが、風選の重産物を篩分けたもののうち、粗粒（4mm以上）分には比重差選別を実施しなかった。

図表 8 破碎および風選・磁選処理（試験②）



（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 9 比重差・渦電流選別処理（試験②）

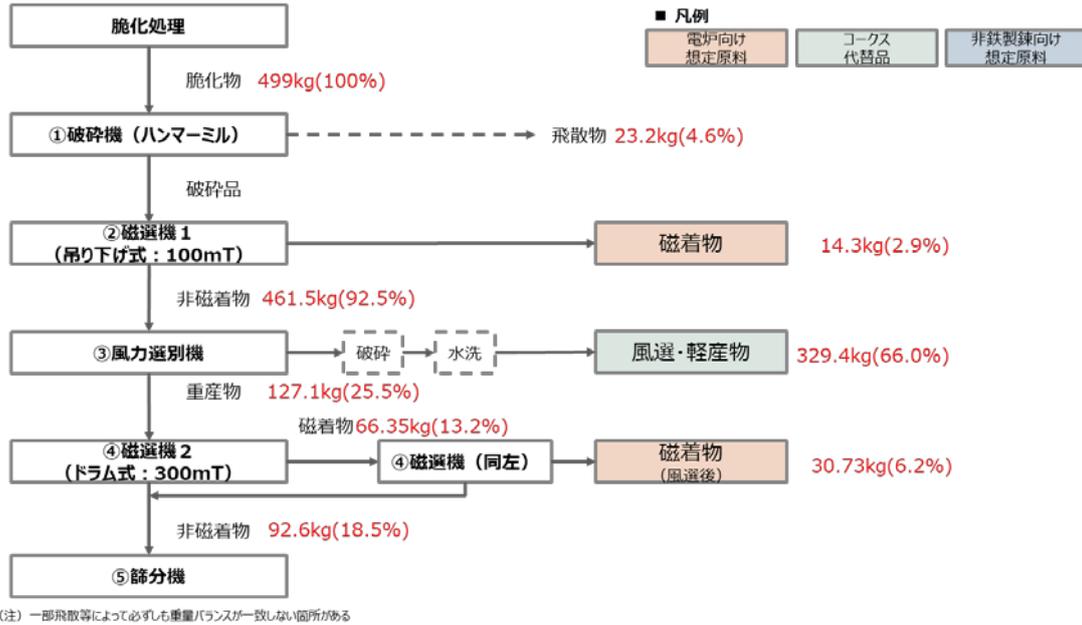


（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(4) 試験③：SR+CFRP（事業所BのSRを投入）

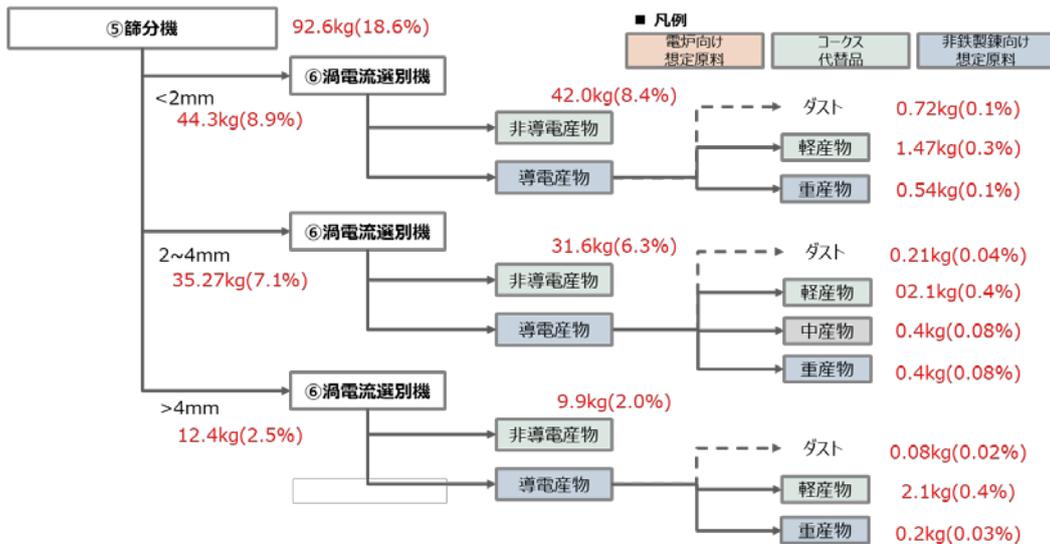
試験③では、事業所BからサンプリングしたSRにCFRPを加えたものを投入した。篩分けまでの処理プロセスは試験①、試験②と同様であるが、産物中のガラス含有量が高かったため、比重差選別と渦電流選別を組み替えて実施した。

図表 10 破碎および風選・磁選処理（試験③）



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 11 比重差・渦電流選別処理（試験③）



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

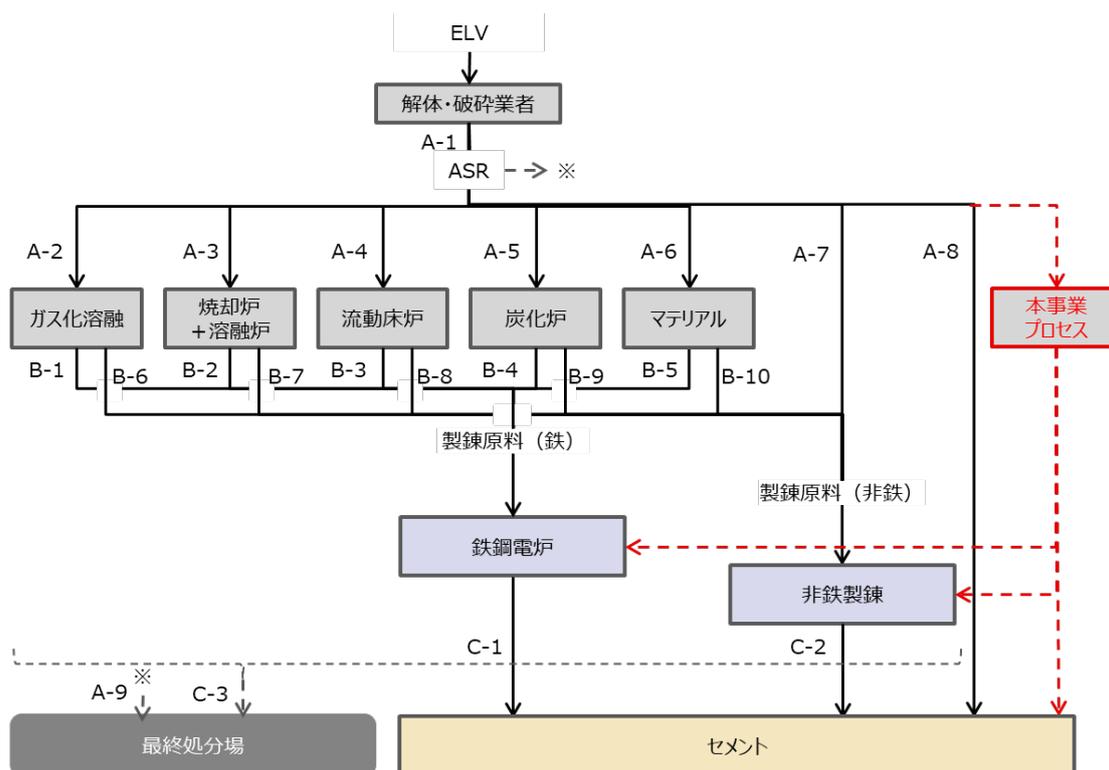
3. 濃縮および回収可能性に関する検討

(1) ASR処理における流通フローの検討

ASRの組成のうち、樹脂等の可燃分が多くを占めているが、一部には鉄や銅などの有用金属が含まれている。2018年現在、ASRのうち97.6%¹は再資源化処理施設に投入され、これら有用金属等が回収されている。しかし、再資源化処理施設のうち、セメント産業に直接投入されるASR中の金属は製錬原料として回収できていない。

本提案技術はASR中のCFRPをセメント産業で受容可能な性状に加工したうえで、有用金属を製錬原料として回収できると期待される。そこで、本提案技術が国内でASRを受けいれているセメント産業で導入された場合に、製錬原料として回収可能な金属の量を推計する。また、セメント産業の忌避物質であるクロムが、ASR由来でどの程度混入しているのか明らかにする。なお、本推計は国内で発生したASRのみを対象にする。

図表 12 本実証で推計対象とするマテリアルフロー



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

¹ 経済産業省自動車課・環境省リサイクル推進室「自動車リサイクル法の施行状況」（令和元年9月10日）

(2) ASRおよび副産物の発生量・流通量の推計

ASRおよびASRを処理して回収した産物等の発生量および流通量は、図表 13に示すインベントリより推計を行った。

図表 13 発生量インベントリ

No	項目	主な情報源	備考（データの使用法、推計方法等）
A-1	ASR発生量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）	(ASR引き取り重量)
A-2	ガス化溶融によるASR処理量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (ガス化溶融への投入率)
A-3	焼却炉・溶融炉によるASR処理量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (焼却炉・溶融炉への投入率)
A-4	流動床炉によるASR処理量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (流動床炉への投入率)
A-5	炭化炉によるASR処理量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (炭化炉への投入率)
A-6	マテリアルによるASR処理量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (マテリアルへの投入率)
A-7	非鉄製錬によるASR処理量（直接）	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (非鉄製錬への直接投入率)
A-8	セメントによるASR処理量（直接）	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (セメントへの直接投入率)
A-9	ASRの最終処分量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）	(埋め立て施設に直接投入されたASR重量)
B-1	ガス化溶融から鉄鋼電炉への原料供給量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (ガス化溶融への投入率) × (鉄原料回収率)
B-2	焼却炉・溶融炉から鉄鋼電炉への原料供給量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (焼却炉・溶融炉への投入率) × (鉄原料回収率)
B-3	流動床炉から鉄鋼電炉への原料供給量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (流動床炉への投入率) × (鉄原料回収率)
B-4	炭化炉から鉄鋼電炉への原料供給量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (炭化炉への投入率) × (鉄原料回収率)
B-5	マテリアルから鉄鋼電炉への原料供給量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (マテリアルへの投入率) × (鉄原料回収率)
B-6	ガス化溶融から非鉄製錬への原料供給量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (ガス化溶融への投入率) × (非鉄原料回収率)
B-7	焼却炉・溶融炉から非鉄製錬への原料供給量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (焼却炉・溶融炉への投入率) × (非鉄原料回収率)
B-8	流動床炉から非鉄製錬への原料供給量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (流動床炉への投入率) × (非鉄原料回収率)
B-9	炭化炉から非鉄製錬への原料供給量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (炭化炉への投入率) × (非鉄原料回収率)
B-10	マテリアルから非鉄製錬への原料供給量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）、 「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」（2016年9月）	(ASR引き取り重量) × (マテリアルへの投入率) × (非鉄原料回収率)
C-1	鉄鋼電炉からセメントへの原料供給（ASR由来）	鉄源協会、鉄源スラグ協会の統計資料ほか	(ASR由来の鉄原料) × (鉄鋼電炉スラグ発生率) × (スラグのセメント供給率)
C-2	非鉄製錬からセメントへの原料供給（ASR由来）	日本鉱業協会、ASR投入施設活用率ほか	(ASR由来の非鉄原料) × (非鉄製錬スラグ発生率) × (スラグのセメント供給率)
C-3	リサイクル施設由来のASRの最終処分量	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WG・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「自動車リサイクル法の施行状況」（2019年9月）	(リサイクル施設から排出された残渣重量)

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(3) 未資源化物質の賦存量推計

ASRおよびASRを処理して回収した産物等の賦存量は、(2)で推計した発生量および流通量に、図表 14図表 13のインベントリより算出した成分情報に乗じることで推計した。

図表 14 成分情報インベントリ

No	項目	備考 (データの使用方法、推計方法等)
A-1	ASR発生量	(ASR中の成分含有量)
A-2	ガス化溶融によるASR処理量	(ASR中の成分含有量)
A-3	焼却炉+溶融炉によるASR処理量	(ASR中の成分含有量)
A-4	流動床炉によるASR処理量	(ASR中の成分含有量)
A-5	炭化炉によるASR処理量	(ASR中の成分含有量)
A-6	マテリアルによるASR処理量	(ASR中の成分含有量)
A-7	非鉄製錬によるASR処理量 (直接)	(ASR中の成分含有量)
A-8	セメントによるASR処理量 (直接)	(ASR中の成分含有量)
A-9	ASRの最終処分量	(ASR中の成分含有量)
B-1	ガス化溶融から鉄鋼電炉への原料供給量	(選別メタル+溶融メタル中の成分含有量)
B-2	焼却炉+溶融炉から鉄鋼電炉への原料供給量	(選別メタル+焼却メタル+非鉄滓中の成分含有量)
B-3	流動床炉から鉄鋼電炉への原料供給量	(選別メタル+焼却メタル中の成分含有量)
B-4	炭化炉から鉄鋼電炉への原料供給量	(選別メタル+炭化メタル中の成分含有量)
B-5	マテリアルから鉄鋼電炉への原料供給量	(選別メタル中の成分含有量)
B-6	ガス化溶融から非鉄製錬への原料供給量	(選別メタル+溶融メタル中の成分含有量)
B-7	焼却炉+溶融炉から非鉄製錬への原料供給量	(選別メタル+焼却メタル+非鉄滓中の成分含有量)
B-8	流動床炉から非鉄製錬への原料供給量	(選別メタル+焼却メタル中の成分含有量)
B-9	炭化炉から非鉄製錬への原料供給量	(選別メタル+炭化メタル中の成分含有量)
B-10	マテリアルから非鉄製錬への原料供給量	(選別メタル中の成分含有量)
C-1	鉄鋼電炉からセメントへの原料供給 (ASR由来)	(鉄鋼電炉スラグ中の成分量)
C-2	非鉄製錬からセメントへの原料供給 (ASR由来)	(非鉄製錬スラグ中の成分量)
C-3	リサイクル施設由来のASRの最終処分量	算出せず

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 15 成分情報の主たる引用元・推計値引用元

- 三菱UFJリサーチ&コンサルティング「平成28年度自動車リサイクル制度の安定的運用および環境配慮設計の推進に向けた検討・調査」報告書（平成29年3月）
- 醍醐ほか「鉄鋼材における不純物元素濃度の日中間比較」鉄と鋼Vol. 100 No. 6（2014）
- 古山ほか「廃自動車シュレッダーダスト（ASR）に含まれるパラジウムの調査」（2011）
- 古山ほか「乾式タワーミル粉砕機と静電選別機による廃車シュレッダーダストからの銅の分離除去」（2003）
- JOGMEC、中部リサイクル株式会社「都市ごみ等の熔融処理により得られる熔融メタル・熔融ダスト中の有価金属の挙動解析に関する共同スタディ」（平成20年5月）

4. 選好物質の濃縮および忌避物質の分離可能性に関する検討

(1) CFRPの適正処理・再資源化に関する考察

本提案技術によって、CFRPを無害化できたのか評価を行う。CFRPは難燃性であり、かつ導電率が高いため、セメントキルン等の工業炉で燃え切らずに残存してしまう。これら残存したCFRPは気流にのり排気系に混入し、電気集塵機を短絡させたり、バグフィルターを目詰まりさせたりする恐れがある。

そこで、CFRPが電気集塵機に悪影響を及ぼさない性状になることを適正処理と定義し、処理後の産物の性状を評価することによって、本提案技術はCFRPの適正処理が可能かどうか考察する。

(2) 処理プロセスに関する考察

① 投入物の代表性に関する検討

SR・ASRの性状は、廃棄物等を受け入れた事業所における処理プロセスによって、性状が異なることが知られている。そこで、本実証で投入した試料の代表性を確認し、本提案技術が国内で発生するSR・ASRに適用できるか検討を行う。

② 投入物の組成変化による産物への影響

投入物の組成が変化することによって、回収産物の性状にどのような影響があるのか検討する。また、将来的にSR・ASR以外の廃棄物等を投入することを検討し、投入物のうち注意すべきパラメータを整理する。

③ 産物の供給可能性に関する考察

本実証にて回収した産物（セメント向けコークス代替品、鉄鋼電炉向けコークス代替品、鉄鋼電炉向け想定原料、非鉄製錬向け想定原料）について、セメント事業者、鉄鋼電炉事業者、非鉄製錬事業者における受容可能性を評価する。技術的な観点のみでなく、経済的な観点も含めて評価を行うものとし、事業者にヒアリングを実施する。

④ 選好物質の濃縮と忌避物質の分離を実現するプロセスの検討

回収した産物の評価を踏まえ、各産業における忌避物質をコントロールし、選好物質を可能な限り濃縮するプロセスを検討する。

(3) 選好物質の濃縮および忌避物質の分離可能性向上に向けた課題検討

本実証で提案したプロセスにおいて、さらに選好物質を濃縮し、忌避物質を分離するための課題や解決策を検討する。

また、本提案技術では対応が難しい課題について、事前の解体や選別処理の高度化等の技術課題、コンソーシアムや情報連携といった制度・社会的な課題の双方について検討し、今後の解決策を提案する。

III. 結果および考察

III-1. 忌避・選好物質のマテリアルバランスおよびフロー推計（初年度）

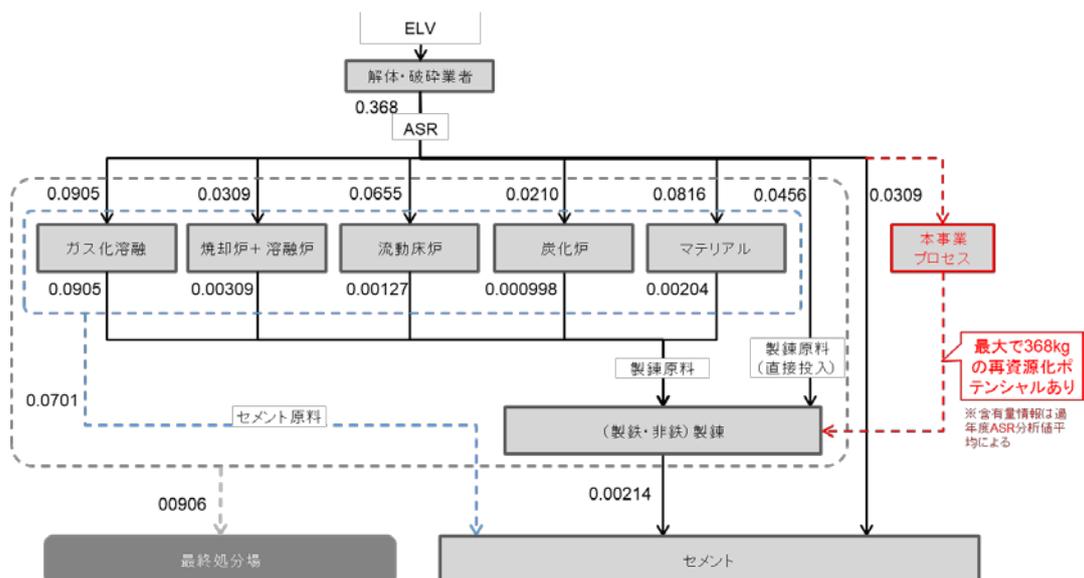
1. ASRにおける忌避・選好物質のマテリアルフロー推計結果

各種公表資料より、ASRの発生量および再資源化処理施設における処理量を推計した。また、ASR再資源化実績の報告値やヒアリングをもとに、各再資源化処理施設から、ASRに由来する回収産物の製錬およびセメント産業向けの流通量を推計した。これらバルク量を推計したのち、各種文献や既往実証における成分分析結果をもとに、推計対象とする選好・忌避物質（金、銀、銅、CFRP）の流通量を推計した。

なお、マテリアルフローは以下の仮定のもと推計している。

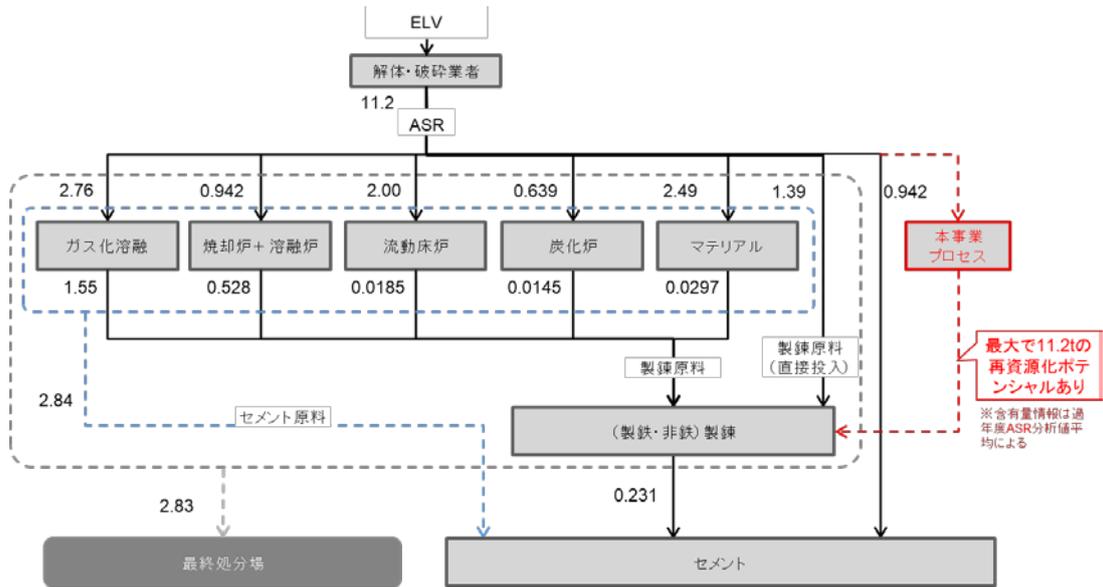
- ・ 金、銀、銅は2017年、CFRPは2029年を推計対象年として設定した。なお、該当年のデータが入手できないものは、過去のデータをもとに推計した。
- ・ ASRの処理施設における産物の回収率はデータ入手が可能な範囲で算出しているため、個別の処理プロセスによる相違を反映できていない可能性がある。
- ・ 推計対象物質の含有率はデータ入手が可能な範囲から引用しているため、個別の処理プロセスによる相違を反映できていない可能性がある。また、どの事業所から発生したASRも同一の組成と仮定している。一部、データが入手できない場合には、類似したプロセスにおける対象物質の回収率から、回収産物中の含有量を推計している。

図表 16 ASR中の金 (Au) のフロー（単位：純分t/年, 2017年）



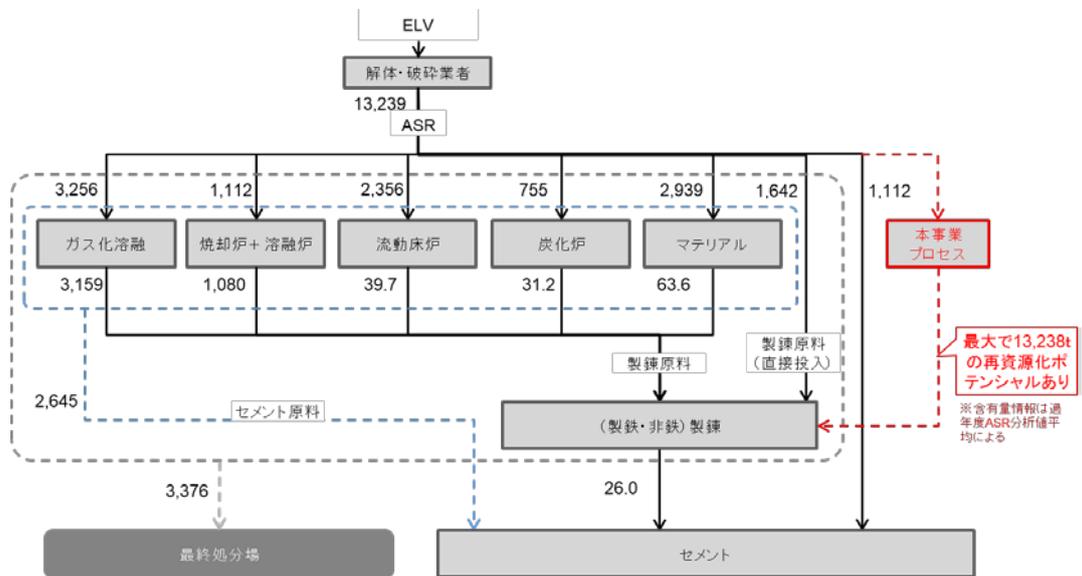
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 17 ASR中の銀 (Ag) のフロー (単位: 純分t/年, 2017年)



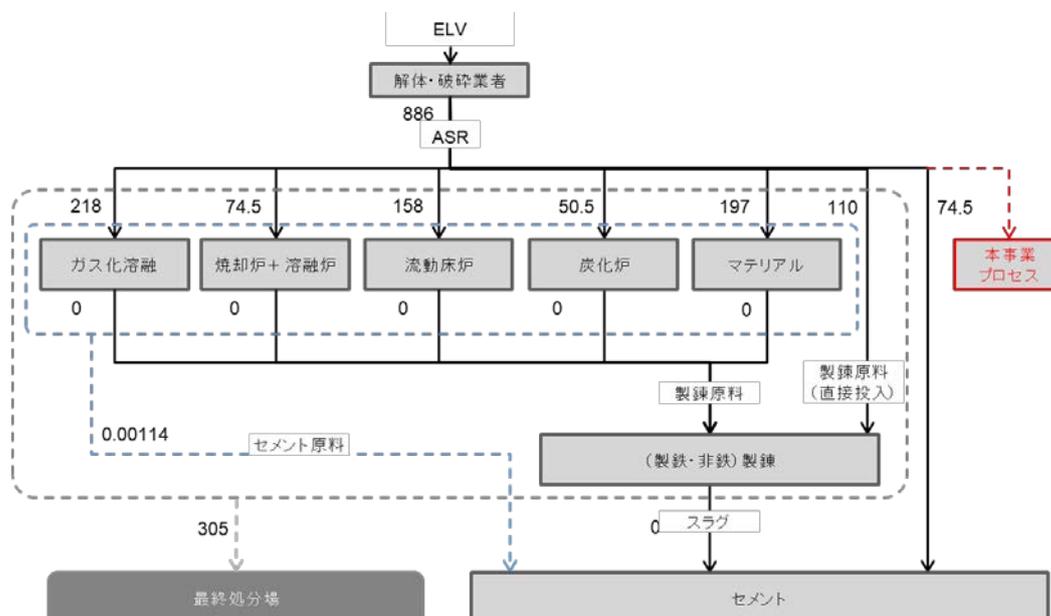
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 18 ASR中の銅 (Cu) のフロー (単位: 純分t/年, 2017年)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 19 ASR中のCFRPのフロー（単位：純分t/年, 2029年）



（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

2. 忌避・選好物質をコントロールするための課題検討

マテリアルフローの推計結果より、ASRに含まれる有用金属の一部は製錬に投入されず、セメントや最終処分場に流入していることが推定される。セメント産業には年間で金45.6kg、銀1.39t、銅1,642tが流入していると試算され、これら有用金属の回収が課題である。また、仮に国内で発生するASRを全量処理とした場合、年間で最大で金368t、銀11.2t、銅13,238tの有用資源を回収できる可能性があるとして試算された。

忌避物資の流通動向を把握するという観点では、将来的にASR中のCFRP含有量が多くなった場合、セメントキルンに74.5tのCFRPが流入すると試算された。セメントキルンは排気温度が高く、バグフィルターではなく、電気集塵機を使用することが多いため、導電性の高いCFRPがダストに混入することによって電気集塵機内で短絡を引き起し、操業に悪影響を及ぼす可能性がある。そのため、現状の解体・処理プロセスでは、将来的にセメント産業がCFRPを受容できなくなる可能性が示唆された。

III-2. 産物特性をコントロールするための非燃焼処理・破碎・選別条件に関する調査検討（初年度・第2年度）

1. サンプルングおよび成分分析（初年度）

（1）試料

初年度は3水準の試料を対象に試験を行った（図表 20）。第1水準の試料では、ASR相当のSR単味を取り上げ、鉄鋼電炉産業およびセメント産業向けに供給可能なコークス代替品を得るための処理条件を明らかにすることを実証課題とした。また、ヒアリングの結果、CFRPは将来的に自動車部品として最大20%程度使用されるとされたため、本提案技術が受け入れうる最大値として、SRにCFRPを20%混ぜた試料を第2水準の試料として調製した。既往実証²において、木屑の投入により脆化物に残存する発熱量や物理選別における単体分離性が改善することが報告されているため、第3水準の試料として、SRの比率は変えず、CFRPのうちの10%を木屑に置き換えたものを調製した。なお、試料の調製に用いた原料の粒度分布、総発熱量、灰分・揮発分・固定炭素分の含有量をそれぞれ図表 21、図表 22、図表 23に示す。

図表 20 初年度実証の投入物と実証要素

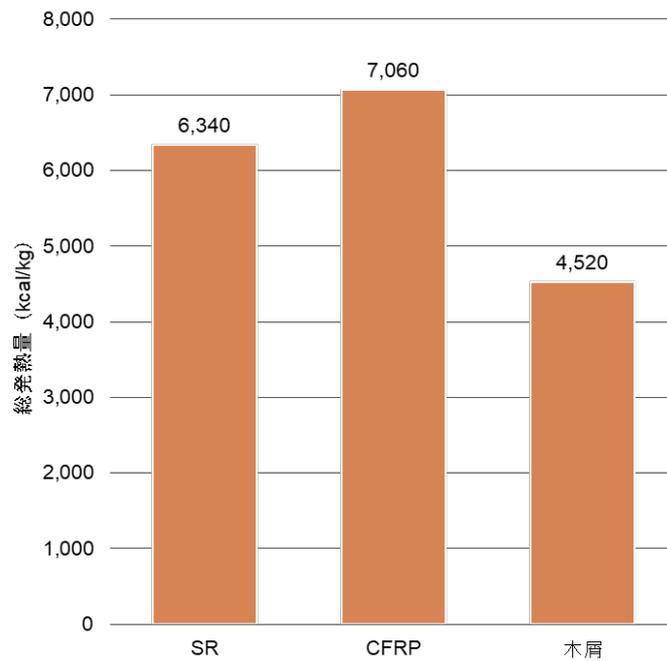
試料	実証要素
① SR100%	ASRから鉄鋼電炉およびセメントに供給可能なコークス代替品を回収する処理条件の特定
② SR80%+CFRP20%	CFRP混入による影響の検証
③ SR80%+CFRP10%+ 木屑10%	木くず添加効果の検証

図表 21 初年度実証試料の粒度分布

原料	粒度分布(wt%)							
	<0.5mm	0.5-1mm	1-2mm	2-5mm	5-10mm	10-20mm	20-30mm	30mm<
SR	6.3	4.5	3.2	7.0	7.6	18.1	15.8	37.4
CFRP	8.0	22.3	24.4	30.3	9.4	4.9	0.6	0.0
木屑	2.7	4.4	4.6	13.1	22.0	36.6	14.7	2.0

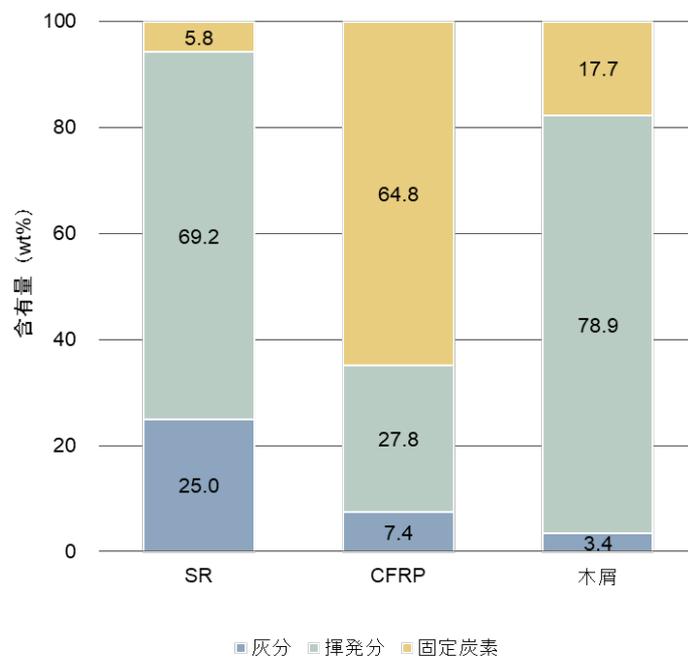
² 太平洋セメント株式会社「平成28年度低炭素型3R技術・システム実証事業（低温加熱脆化技術による省エネ型高度選別マテリアルリサイクルシステムの開発）」（2018年3月）

図表 22 初年度実証で使用した原料の発熱量



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 23 初年度実証で使用した原料の灰分・揮発分・固定炭素含有量



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(2) 非燃焼試験の産物

(1) で調製した3水準の投入物を、図表 24に示す条件で脆化処理を行った。脆化処理は実証用の内熱式の小型アントラーキルンを使用した。アントラーキルン内では、試料に含まれる可燃分が自燃することで樹脂分が脆化するため、金属と樹脂の単体分離性の向上が期待できる。

図表 24 脆化処理試験条件

実験パラメータ	条件
脆化処理温度	325℃、450℃
原料投入量	各水準につき30kg/h
脆化品回収量	各水準につき12～17kg/h

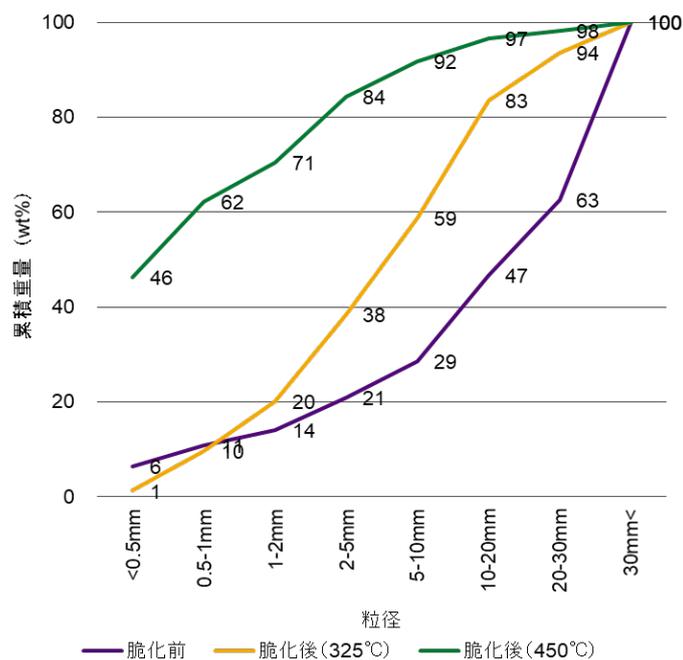
脆化処理の結果、脆化物の粒度は細かくなっていることが確認された。また、脆化温度が高いと脆化物の粒度が細かくなることが分かった(図表 26、図表 27、図表 28)。一方、脆化物に残存する発熱量は脆化温度の上昇によって減少した(図表 29、図表 30、図表 31)。

図表 25 脆化処理前後の産物の粒度分布

試料	処理温度(℃)	粒度分布(wt%)							
		<0.5mm	0.5-1mm	1-2mm	2-5mm	5-10mm	10-20mm	20-30mm	30mm<
SR100%	脆化前	6.3	4.5	3.2	7.0	7.6	18.1	15.8	37.4
	325℃	1.3	8.4	10.4	18.3	20.4	24.7	10.2	6.4
	450℃	46.3	15.9	8.3	13.8	7.6	4.8	1.5	1.9
SR80% +CFRP20%	脆化前	6.7	8.1	7.4	11.6	8.0	15.5	12.8	29.9
	325℃	6.9	16.0	16.0	22.6	13.8	16.7	6.8	1.1
	450℃	24.4	16.9	12.1	22.4	12.6	6.3	4.4	0.9
SR +CFRP10%	脆化前	6.1	6.3	5.4	9.9	9.2	18.7	14.2	30.1
	325℃	2.1	8.7	11.9	19.5	16.8	22.3	9.7	9.0
+木屑10%	450℃	25.0	17.3	14.3	21.8	11.5	7.7	1.0	1.4

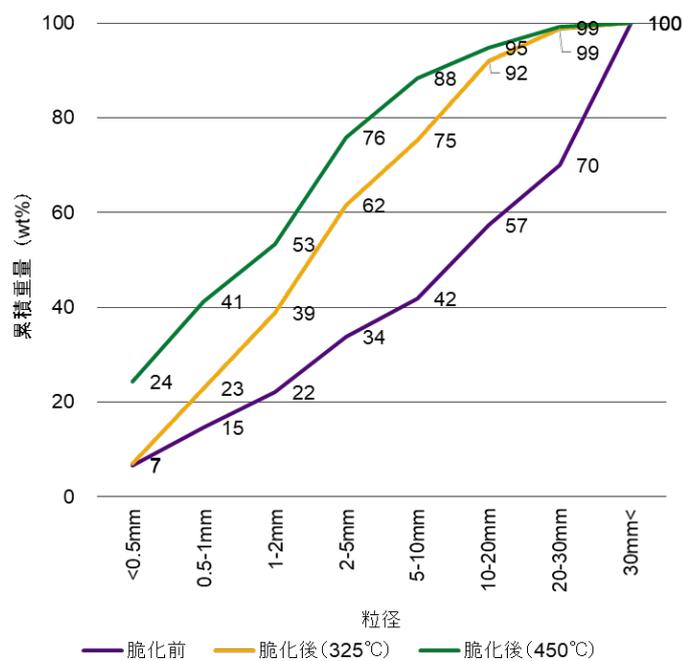
(注) CFRPや木屑を副原料して投入している試料では、原料の粒度分布を投入割合で按分することにより脆化前の粒度分布を算出している

図表 26 脆化処理前後の産物の粒度分布 (SR100%)



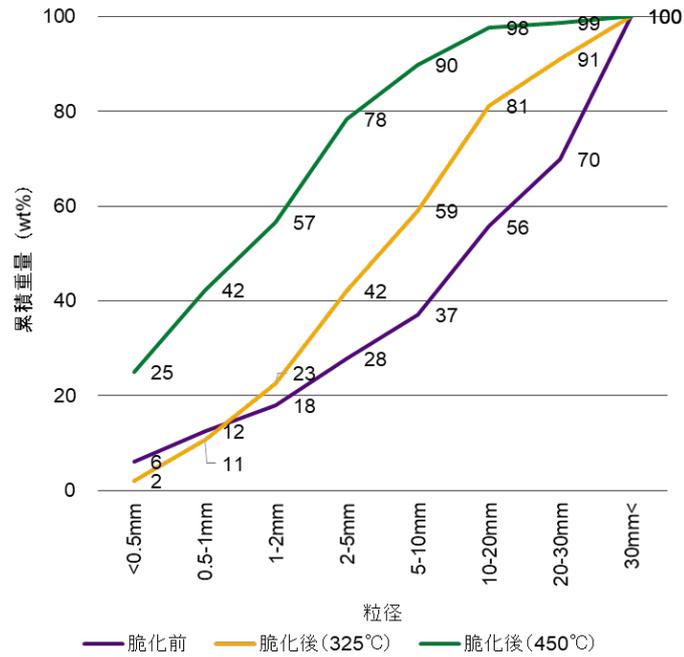
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 27 脆化処理前後の産物の粒度分布 (SR80%+CFRP20%)



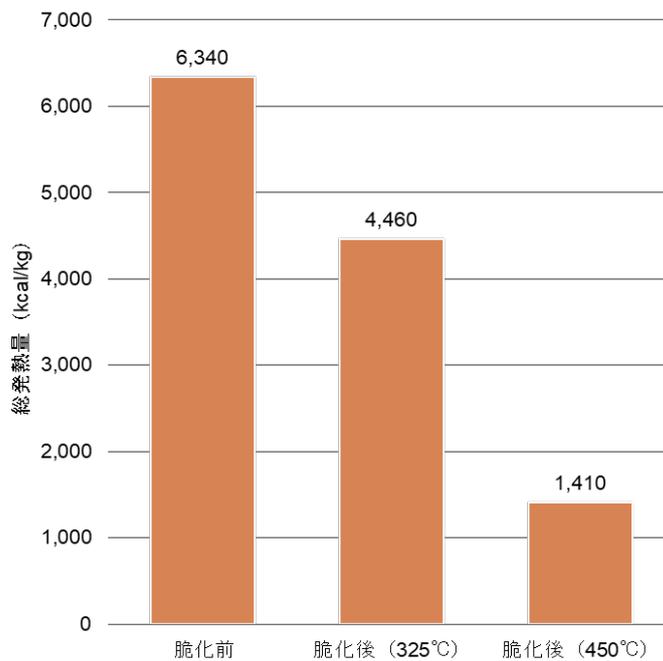
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 28 脆化処理前後の産物の粒度分布 (SR80%+CFRP10%+木屑10%)



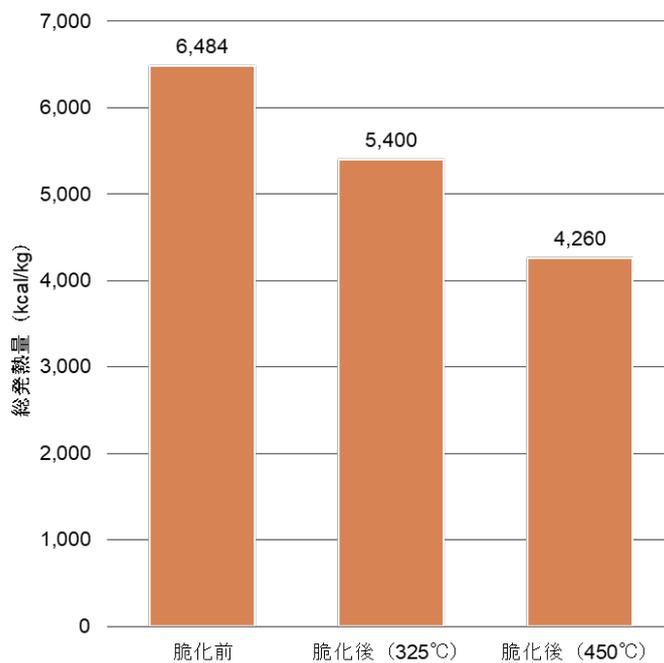
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 29 脆化処理前後の産物の総発熱量 (SR100%)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

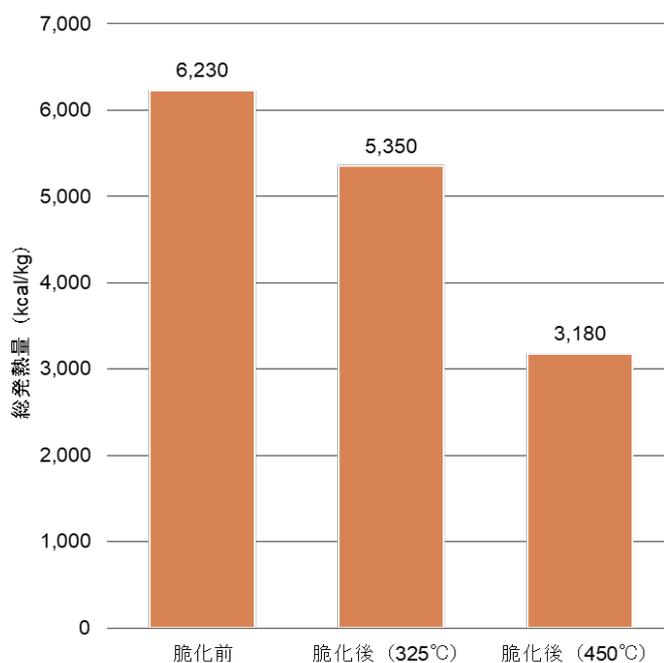
図表 30 脆化処理前後の産物の総発熱量(SR80%+CFRP20%)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(注) 脆化前の総発熱量はSRの発熱量とCFRPの発熱量を投入割合で按分して算出

図表 31 脆化処理前後の産物の総発熱量(SR80%+CFRP10%+木屑10%)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(注) 脆化前の総発熱量はSRの発熱量とCFRP、木屑の発熱量を投入割合で按分して算出

(3) 破碎試験の産物

(2) で回収した脆化物をハンマー式破碎機で破碎した結果、いずれの試験においても粒度20mm以下の産物を回収した(図表 34)。

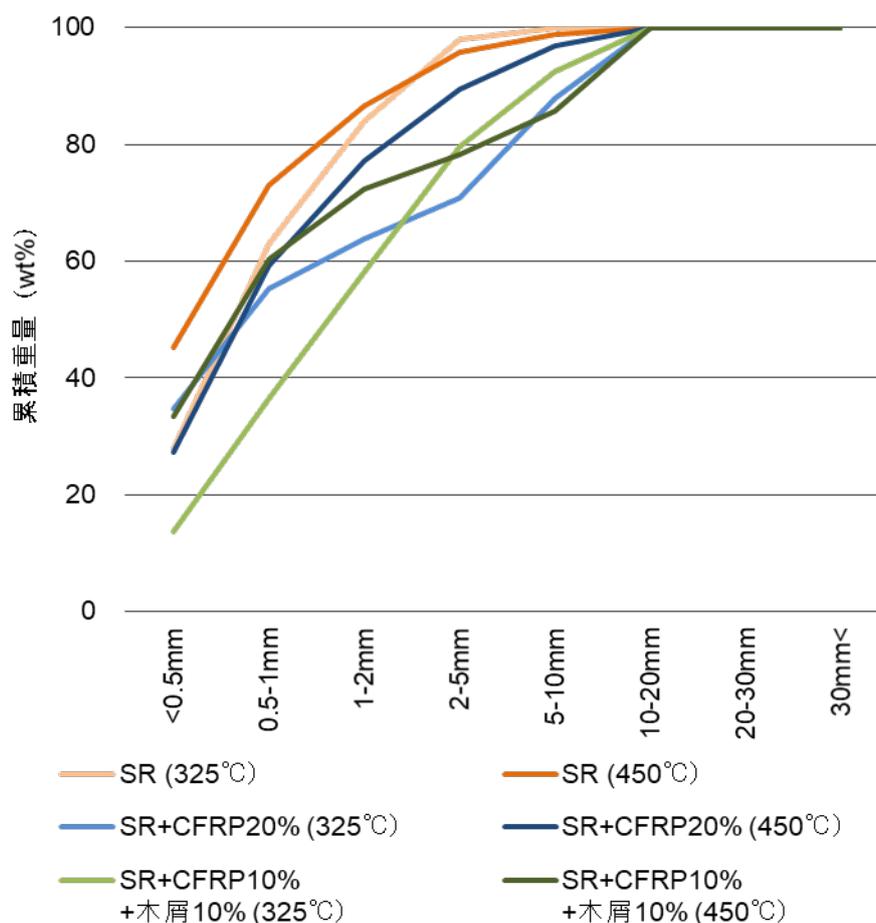
図表 32 破碎処理試験条件

実験パラメータ	条件
破碎方式	スイングハンマー式破碎機
スクリーン径	φ 8mm

図表 33 脆化処理前後の産物の粒度分布

試料	処理温度(°C)	粒度分布(wt%)							
		<0.5mm	0.5-1mm	1-2mm	2-5mm	5-10mm	10-20mm	20-30mm	30mm<
SR100%	325	27.9	35.1	21.0	14.0	1.9	0.1	0.0	0.0
	450	45.2	27.9	13.4	9.2	3.2	1.1	0.0	0.0
SR80% +CFRP20%	325	34.6	20.6	8.6	7.0	17.0	12.2	0.0	0.0
	450	27.2	32.0	18.0	12.1	7.6	3.1	0.1	0.0
SR+CFRP10% +木屑10%	325	13.7	22.7	21.7	21.4	13.0	7.5	0.0	0.0
	450	33.3	26.9	12.1	5.9	7.5	14.2	0.0	0.0

図表 34 破碎処理後の産物の粒度分布

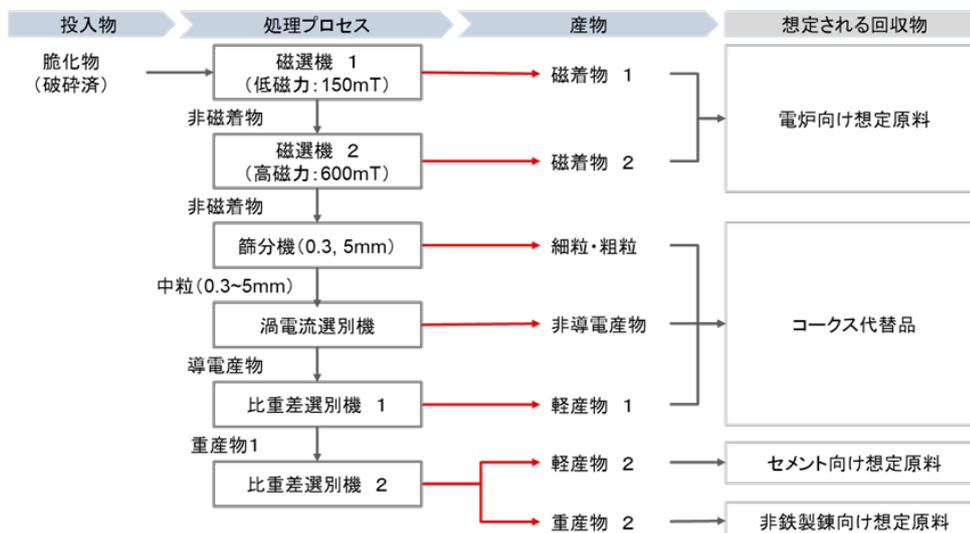


(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(4) 選別試験の産物

破砕品を図表 35のフローで処理し、それぞれ目的産物を回収した。

図表 35 初年度実証の選別フロー



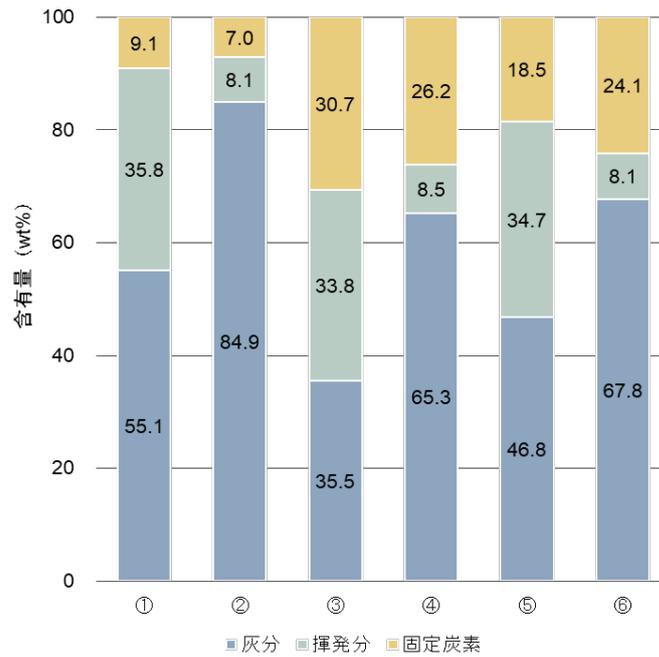
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

① コークス代替品 (想定)

各試験において回収したコークス代替品の工業分析の結果、脆化温度が高いほど灰分の含有量が増加し、揮発分の含有量が減少する傾向であった (図表 36)。また、ASRと比較して固定炭素分や揮発分の含有量が多いCFRPや木屑を投入することで、回収したコークス代替品に含まれる固定炭素分や揮発分も増加した。

コークス代替品の発熱量は工業分析の灰分含有量と反対の傾向にあり、灰分が少ないほど残存する総発熱量が多くなる傾向にあった (図表 37)。また、ハロゲン分析の結果、コークス代替品中には0.5~0.8wt%程度の塩素のほか、微量のフッ素、臭素が含まれていた (図表 38)。

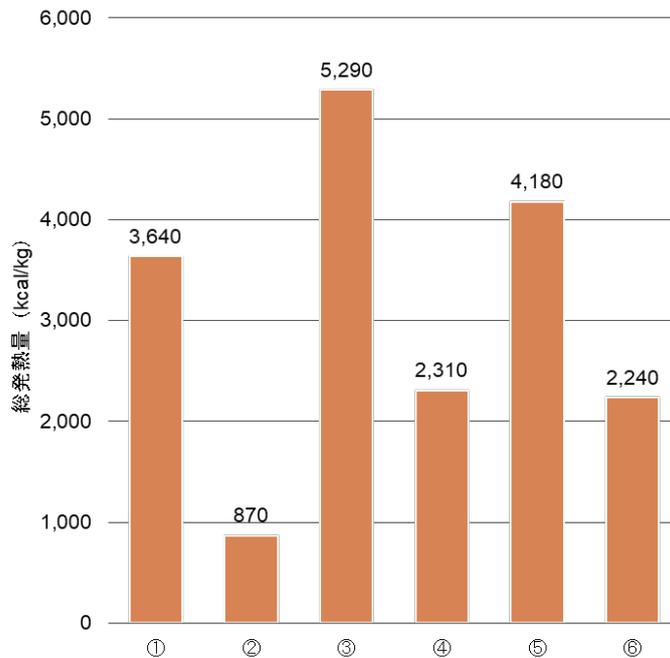
図表 36 コークス代替品（想定）の工業分析結果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(注) ①SR100%, 325℃、②SR100%, 450℃、③SR80%+CFRP20%, 325℃、④SR80%+CFRP20%, 450℃、⑤SR80%+CFRP10%+木屑10%, 325℃、⑥SR80%+CFRP10%+木屑10%, 450℃

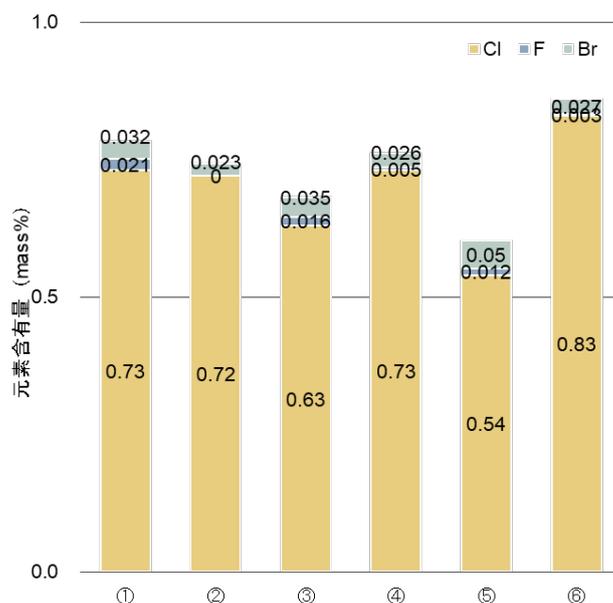
図表 37 コークス代替品（想定）の発熱量分析結果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(注) ①SR100%, 325℃、②SR100%, 450℃、③SR80%+CFRP20%, 325℃、④SR80%+CFRP20%, 450℃、⑤SR80%+CFRP10%+木屑10%, 325℃、⑥SR80%+CFRP10%+木屑10%, 450℃

図表 38 コークス代替品（想定）のハロゲン含有量分析結果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

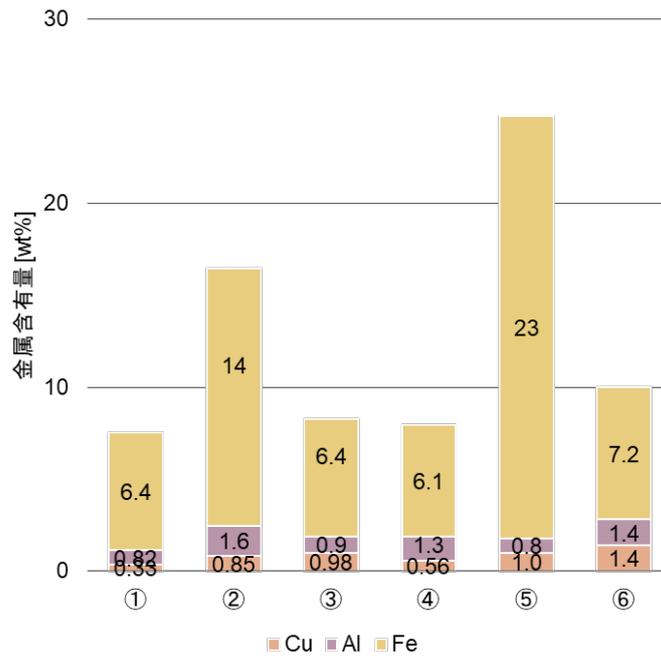
(注) ①SR100%, 325℃、②SR100%, 450℃、③SR80%+CFRP20%, 325℃、④SR80%+CFRP20%, 450℃、⑤SR80%+CFRP10%+木屑10%, 325℃、⑥SR80%+CFRP10%+木屑10%, 450℃

② 鉄鋼電炉向け想定原料

鉄鋼電炉向けに供給を想定した産物の鉄品位は低く、最も鉄品位の高い⑤の条件 (SR80%+CFRP10%+木屑10%を325℃で脆化) で回収した試料でも、鉄の含有量は23%程度であった (図表 39)。

磁着物中の鉄品位が低かった要因として、鉄以外の成分が混在したことが考えられる。工業分析の結果、回収産物中の灰分は30~60wt%程度であり、残りは樹脂分等に由来する揮発分や固定炭素分が占めていた (図表 40)。回収産物の総発熱量結果を考慮しても、産物中には樹脂分が多く分配されていたと考えられる (図表 41)。

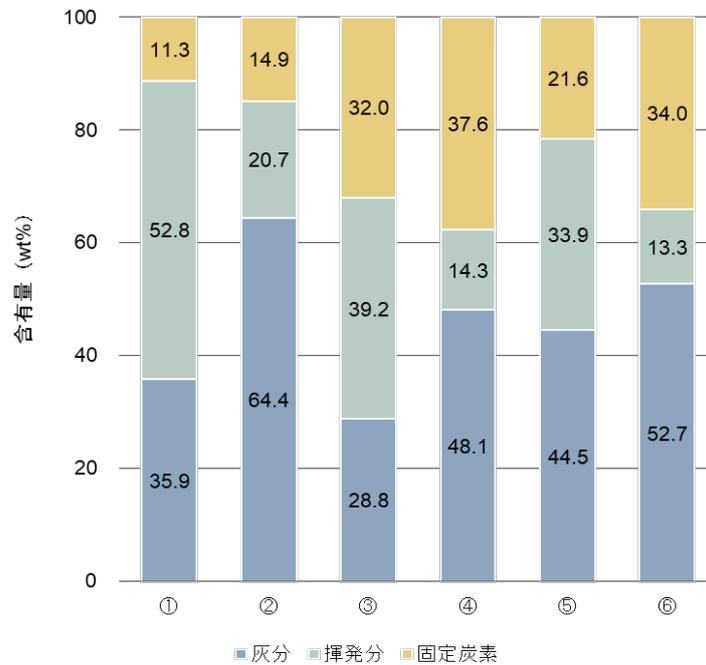
図表 39 鉄鋼電炉向け想定原料の金属含有量分析結果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(注) ①SR100%, 325℃、②SR100%, 450℃、③SR80%+CFRP20%, 325℃、④SR80%+CFRP20%, 450℃、⑤SR80%+CFRP10%+木屑 10%, 325℃、⑥SR80%+CFRP10%+木屑 10%, 450℃

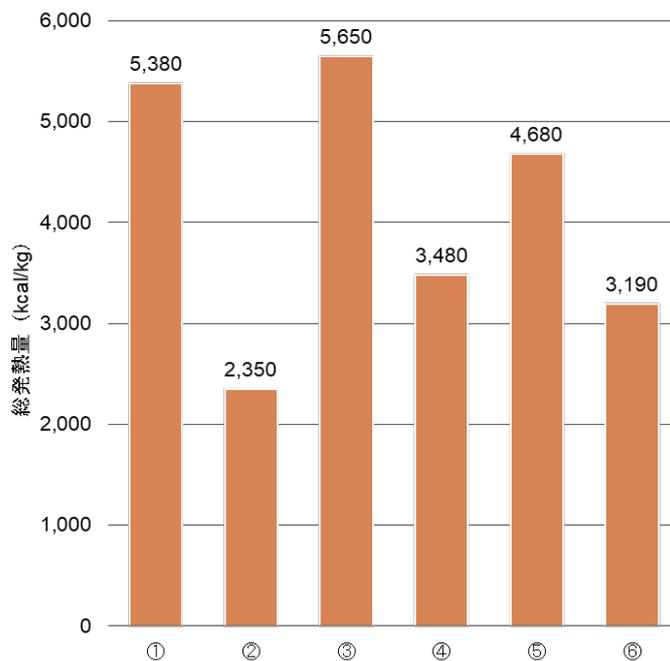
図表 40 鉄鋼電炉向け想定原料の工業分析結果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(注) ①SR100%, 325℃、②SR100%, 450℃、③SR80%+CFRP20%, 325℃、④SR80%+CFRP20%, 450℃、⑤SR80%+CFRP10%+木屑 10%, 325℃、⑥SR80%+CFRP10%+木屑 10%, 450℃

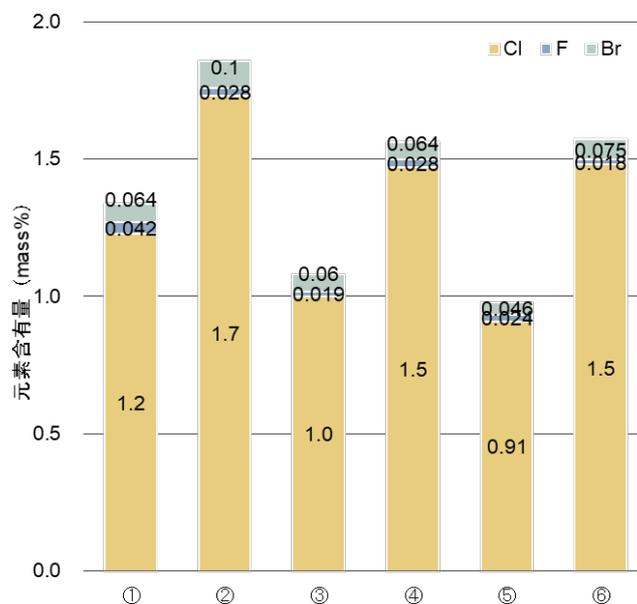
図表 41 鉄鋼電炉向け想定原料の発熱量分析結果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(注) ①SR100%, 325℃、②SR100%, 450℃、③SR80%+CFRP20%, 325℃、④SR80%+CFRP20%, 450℃、⑤SR80%+CFRP10%+木屑10%, 325℃、⑥SR80%+CFRP10%+木屑10%, 450℃

図表 42 鉄鋼電炉向け想定原料のハロゲン含有量分析結果



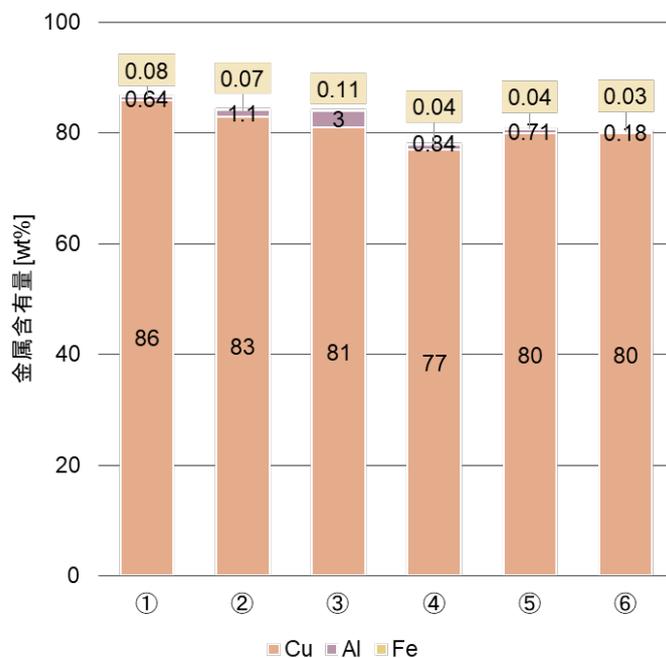
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(注) ①SR100%, 325℃、②SR100%, 450℃、③SR80%+CFRP20%, 325℃、④SR80%+CFRP20%, 450℃、⑤SR80%+CFRP10%+木屑10%, 325℃、⑥SR80%+CFRP10%+木屑10%, 450℃

③ 非鉄製錬向け想定原料

いずれの試験で回収した非鉄製錬向け想定原料にも、銅が80wt%前後含まれていた（図表 43）。また、試験④や⑤で回収した産物には金が10g/t近く含まれていたほか、⑤で回収した産物は銀品位が2,300g/tと非常に高かった。

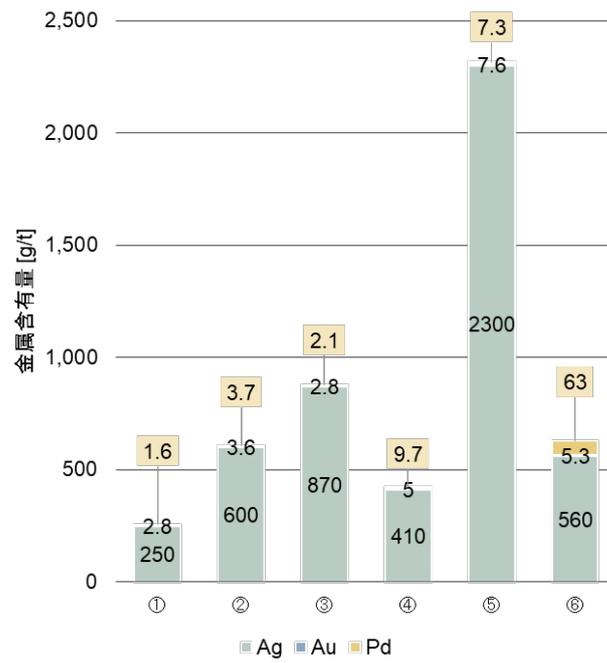
図表 43 非鉄製錬向け想定原料の金属含有量分析結果



（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

（注）①SR100%, 325℃、②SR100%, 450℃、③SR80%+CFRP20%, 325℃、④SR80%+CFRP20%, 450℃、⑤SR80%+CFRP10%+木屑10%, 325℃、⑥SR80%+CFRP10%+木屑10%, 450℃

図表 44 非鉄製錬向け想定原料の貴金属含有量分析結果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(注) ①SR100%, 325℃、②SR100%, 450℃、③SR80%+CFRP20%, 325℃、④SR80%+CFRP20%, 450℃、⑤SR80%+CFRP10%+木屑10%, 325℃、⑥SR80%+CFRP10%+木屑10%, 450℃

2. 技術実証および技術課題に関する検討・分析（初年度）

（1）産物特性を踏まえた供給可能性の検討

各産業における要求仕様と初年度実証の回収産物を比較した結果、非鉄製錬向け想定原料は受容可能性が高いと評価された一方、コークス代替品（セメント産業、鉄鋼電炉）および鉄鋼電炉向け想定原料は、いくつかの点で課題を確認した（図表 45）。

図表 45 初年度実証における回収産物の受容可能性

	粒径・粒度分布	嵩密度	総発熱量	選好物質含有量	忌避元素含有量
セメント向け コークス 代替品	<ul style="list-style-type: none"> ■投入時は<2mm ■<15mmは破砕可能 		<ul style="list-style-type: none"> ■微粉炭は7,000kcal/kg ■SR代替として受け入れる場合には4,000kcal/kg 		<ul style="list-style-type: none"> ■ハロゲン及びCrが主要な忌避成分 ■Clは投入時に0.5% ■アルカリが少ないこと
	○	-	△	-	?
鉄鋼電炉向け コークス 代替品	<ul style="list-style-type: none"> ■0~3mm（粉）、30mm（塊） ■粉コークスは1mm前後で粒度をそろえる 	<ul style="list-style-type: none"> ■炉内において鉄と化合する程度の高密度が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ■6,000kcal/kg程度 	<ul style="list-style-type: none"> ■固定炭素の含有量が多いこと（理想は70~80%） 	<ul style="list-style-type: none"> ■銅は0%が好ましい ■Clは8,000ppm以下 ■Sは1~2%程度 ■ガラス分は少ないこと ■水分1%以下
	△	△	△	✖	?
鉄鋼電炉向け 想定原料		<ul style="list-style-type: none"> ■投入時に飛散しない程度の高密度が必要 		<ul style="list-style-type: none"> ■鉄は80%以上が好ましい 	<ul style="list-style-type: none"> ■銅は全投入量換算で0.3%以下に抑えること
	-	✖	-	✖	△
非鉄製錬向け 想定原料		<ul style="list-style-type: none"> ■軽炉の場合は飛散しない程度の高密度が必要 ■自焙炉では2.0程度 		<ul style="list-style-type: none"> ■金は5g/t以上（10g/tが好ましい） ■銅は400g/t以上 ■銅は銅鉱石以上（20~30wt%程度） 	<ul style="list-style-type: none"> ■ハロゲンは少ないこと（受け入れ制限を始めているASRは1~3%）
	-	○ ※自焙炉	-	○	○

（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

① コークス代替品（想定）

325℃程度の脆化处理によって、少なくともセメント産業向けのコークス代替品として利用できる可能性がある。実投入を想定した場合、未脆化CFRPによるバグフィルターへの悪影響、キルン内部で着地燃焼することによるクリンカ品質への悪影響を念頭におく必要がある。

他方、鉄鋼電炉向けコークス代替品として利用する場合、忌避成分（主に銅）の更なる除去、投入時の飛散を防ぐための粒度や嵩比重への調整が必要である。鉄鋼電炉でも塩素は忌避物質にあたるが、水洗脱塩を行ったものであれば許容範囲内となる。他方、残存するガラスは歩留まりを悪化させるため、更なる除去が求められる。

② 鉄鋼電炉向け想定原料

初年度実証で回収した磁着物は、鉄鋼電炉産業における鉄原料としての利用は厳しいものであった。破碎処理時にCFRPに由来する綿状の炭素繊維くず塊が発生したことで、細かな鉄粉を抱きこむ形でそのほか不純物が磁着物へ分配され、鉄品位は最高でも20%程度と低かった。また、綿状産物には細かな銅線も絡まっていたため、鉄鋼電炉産業の忌避物質である銅も混入する結果となっていた。

③ 非鉄製錬向け想定原料

回収産物の銅品位をみるかぎり、乾式銅製錬向け原料（銅滓相当品）として利用できる可能性がある。また、金や銀といった貴金属類成分の濃縮は必ずしも十分とはいえないが、白金族等も含まれており、製錬原料としての価値を高める可能性がある。

3. 非燃焼処理・破碎・選別条件に関する検討（第2年度）

(1) 第2年度の実証目標の設定

初年度の課題を解決すべく、第2年度の実証目標と検証すべき課題を設定した（図表 46）。

図表 46 初年度実証課題を踏まえた第2年度の実証目標

	昨年度の成果・課題	今年度の実証目標	検証すべき課題
セメント向け コークス代替品	<ul style="list-style-type: none"> 熱量、ハロゲン含有量等を考慮しても、コークス代替品として利用できる可能性 実用化に向けた検証（キルン内部での燃焼性、微粉碎コスト等） 	<ul style="list-style-type: none"> CFRP含有ASR等の適正処理と（樹脂を残しつつ忌避物質を分離し）コークス代替品の利用価値を高めるための破碎・選別プロセス仕様の特定、技術課題の特定 	<ul style="list-style-type: none"> 風力選別によって金属を分離し、コークス代替品としての品位を向上（総発熱量の増加、灰分の分離）
鉄鋼電炉向け コークス代替品	<ul style="list-style-type: none"> 塩素含有量は投入可能な品位 鉄鋼電炉における忌避成分（主に銅）やガラスの分離性向上 加炭材として投入可能な粒度、高比重の産物の回収 	<ul style="list-style-type: none"> CFRP含有ASR等の適正処理と（樹脂を残しつつ忌避物質を分離して）コークス代替品として利用するための破碎・選別プロセス仕様の特定、技術課題の特定 	<ul style="list-style-type: none"> 風力選別によって金属を分離し、加炭材としての品位を向上（総発熱量の増加、灰分の分離、忌避物質（銅）の分離）
鉄鋼電炉向け 想定原料	<ul style="list-style-type: none"> 鉄鋼電炉における忌避成分（主に銅）の分離性向上 鉄鋼電炉において浮遊しないような高密度の磁着物の回収（綿状の炭素繊維の分離） 	<ul style="list-style-type: none"> 磁着物の品位を向上させる（鉄を濃縮し、忌避物質（主に銅）を最大限分離する）ための破碎・選別プロセス仕様の特定、技術課題の特定 	<ul style="list-style-type: none"> 風力選別によってCFRP由来の綿状の炭素繊維を分離（銅やガラスの分離、高比重の増加） 磁選機における鉄の分配率改善（品位の向上）
非鉄製錬向け 想定原料	<ul style="list-style-type: none"> 有用金属（特に銅）の濃縮が確認され、非鉄製錬において銅滓相当の原料として利用できる可能性 シリカ、アルミの含有は許容量 白金族回収により採択性向上が期待 	<ul style="list-style-type: none"> ASR等に希釈されている有用金属（金、銀、銅、白金族）等の最適な濃縮方法（破碎・選別プロセス仕様）の特定、技術課題の特定 	<ul style="list-style-type: none"> 渦電流選別機における細粒群の選別精度の向上（品位の向上） 比重差選別機における目的元素の分配率・回収率の向上（品位の向上）

（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(2) セメント向けコークス代替品

セメント向けにコークス代替品を供給するためには、回収産物に含まれる灰分を分離して、総発熱量を向上させる必要がある。また、塩素をはじめとしたハロゲン忌避物質であるため、ハロゲンの含有量が高くないようにする必要がある。

(3) 鉄鋼電炉向けコークス代替品

鉄鋼電炉向けにコークス代替品として供給するためには、回収産物に含まれる灰分を分離し、総発熱量を向上させる必要がある。鉄鋼電炉で使用するコークスには、粉状で使用して還元効果を期待するものと、塊状で使用して加炭効果を期待するものがあるが、いずれの場合でもコークスを代替するには固定炭素分を高める必要がある。また、忌避物質やその他成分の管理という観点では、電炉内部で水蒸気爆発を引き起こさないように含水率を1%程度に抑える必要があるほか、樹脂等に夾雑する細かい銅線の分離も必要である。

(4) 鉄鋼電炉向け想定原料

鉄鋼電炉向け想定原料としての鉄品位を向上させるためには、磁着物に鉄以外の成分が分配されないようにする必要がある。特に、CFRP中の炭素繊維に由来する綿状物質による鉄以外の成分（樹脂、ガラス、銅等）の巻き込みを避け、これら含有率を下げる必要がある。

(5) 非鉄製錬向け想定原料

乾式銅製錬向け想定原料としては、銅や貴金属の品位が十分に高く、要求仕様を十分に満たす回収産物が得られている。ただし、由来となる使用済み製品の種類や破碎処理前に予め取り外しされた部品の種類や点数などによっても、ASRやSR中に残存する銅や貴金属の総量がそもそも変化する。そのため、性状の異なるASRやSRに応じた選別方法や条件を選択し、必要な成分が一定以上濃縮されるようにしていく必要がある。

4. 第2年度実証プロセスの検討

(1) 脆化处理

ASRを対象にした既往実証³を踏まえると、脆化物が有する発熱量を一定以上確保し、また物理選別に適した粒径・粒度分布が破碎後に得られるようにするためには、325℃の脆化处理が最適であると考えられる。初年度の成果では、CFRPを大量に含むASRを高温で脆化した場合、産物の発熱量が低下してしまうほか、後段の破碎工程で大量の綿状炭素繊維が発生してしまい、期待する産物が得られないほか、分離性も低下するため、第2年度はCFRPの含有率を現実的な割合(0.5wt%⁴)としたうえで、さらに脆化温度も325℃として脆化处理を行った。

(2) 破碎処理

ASRを対象にした既往実証²では、ボールミルで破碎する場合、被破碎物における細粒群の割合が過度に大きくなってしまい、物理選別の効率を低下させてしまうことが報告されている。また、カッター式やハンマー式の破碎機を使用する場合、物理選別の効率を低下させるような粒群分布にはいたらず、特にハンマー式破碎機の場合、カッター式に比べて炭素繊維や金属分などによる剪断刃の磨耗を避けることができるという利点がある。そのため、第2年度は初年度と同様にハンマー式破碎機を用いた処理を行った。

(3) 選別処理

発熱量の高いコークス代替品を得るためには、コークス代替品とする回収産物中に樹脂等の有機分を濃集させる必要がある。そこで、第2年度では風選機を使用して、比重の軽い樹脂分を風選軽産物へ濃集させることを目指した。また、鉄鋼電炉向けのコークス代替品としての要求仕様を満たすため、忌避物質である銅が軽産物へ分配されないように風選条件を検討した。

鉄鋼電炉向けの原料を回収するためには、磁着物の鉄品位を高める必要がある。そこで、不純物を巻き込んだ磁性体なども磁着してしまわないよう、低磁力の磁選機を複数回使用することにより、鉄品位の高い磁着物の回収を目指した。脆化直後の磁選工程では細かな鉄粉を巻き込んだ産物が夾雑物として混入する可能性があるため、特に低磁力の吊り下げ式磁選機を用いた。

非鉄製錬向けの原料を回収するためには、目的産物における貴金属や銅の品位を高める必要がある。そこで、破碎品の粒群に適した渦電流選別機および比重差

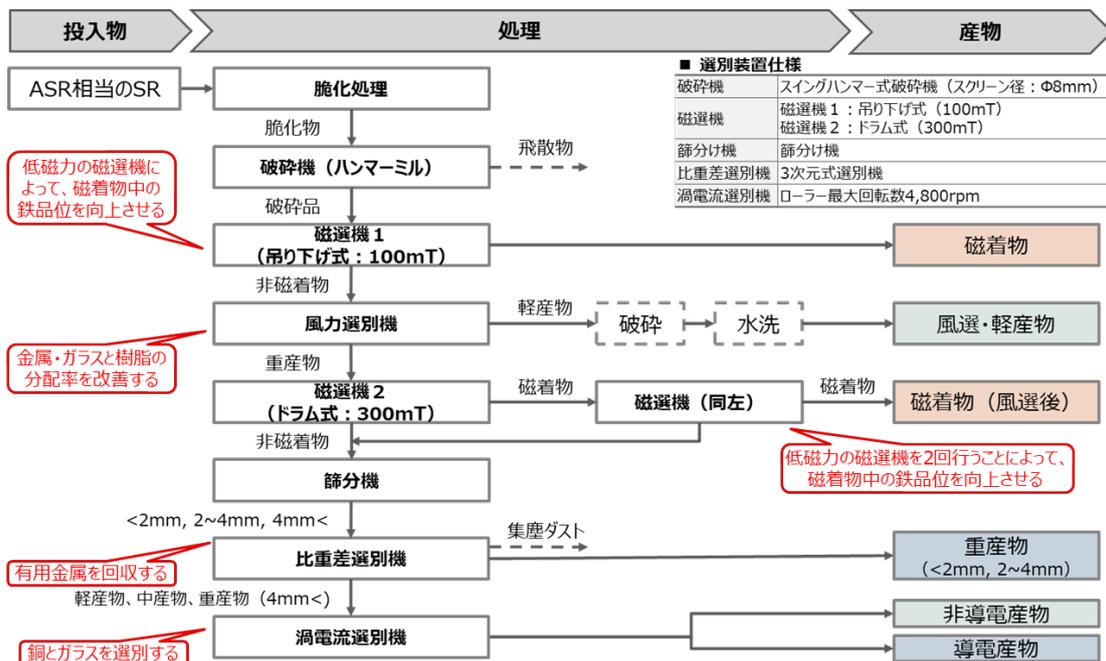
³ 太平洋セメント株式会社「平成28年度低炭素型3R技術・システム実証事業（低温加熱脆化技術による省エネ型高度選別マテリアルリサイクルシステムの開発）」（2018年3月）

⁴ 実際のセメント工場では、0.1～0.3wt%程度のCFRP含有廃棄物をしばしば受け入れることがあり、これで電気集塵機の短絡停止に至っているケースがあること、また昨年度推計ではASR中におけるCFRPの混入率が推計最終年度である2035年度には0.78wt%になると考えられるため、中間的な値として0.5wt%と採用した。

選別機を使用した。初年度は試験室レベルの小型選別装置を使用した。第2年度では小規模事業スケールの選別装置を使用し、比重差選別機における滞留時間を長くすることで選別効率の向上を目指した。また、渦電流選別と比重差選別は、目的産物中の金属品位を高めつつ、また回収率も最大化できるような組み合わせ、条件を検討した。

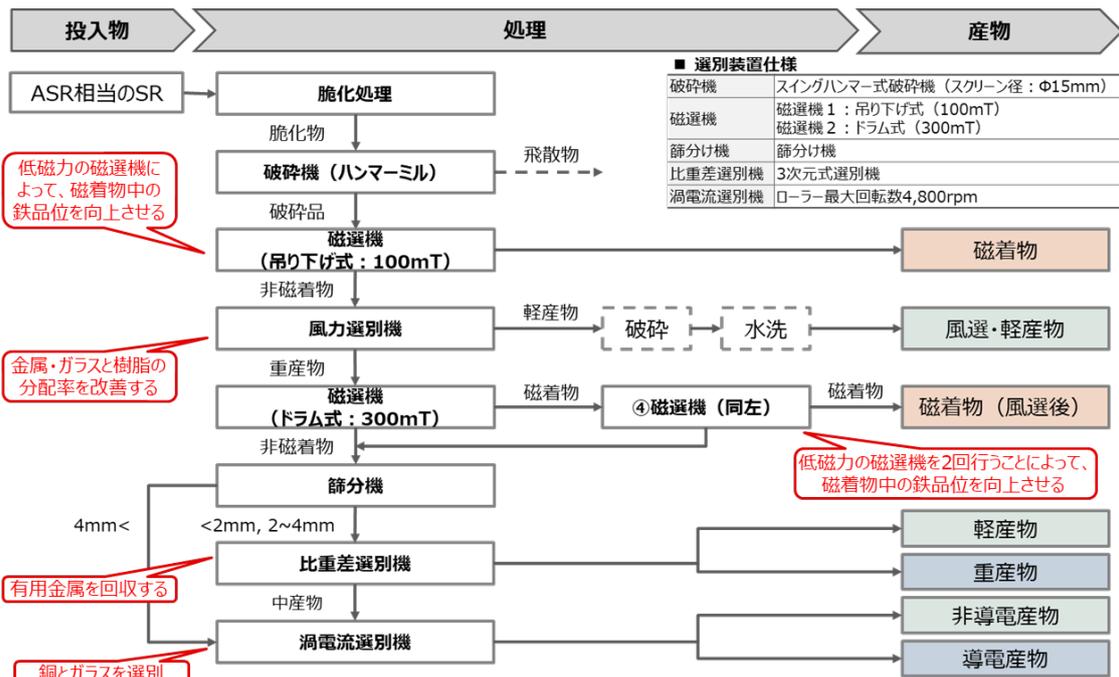
(4) 第2年度実証プロセス

図表 47 試験① (第2年度) の処理フロー



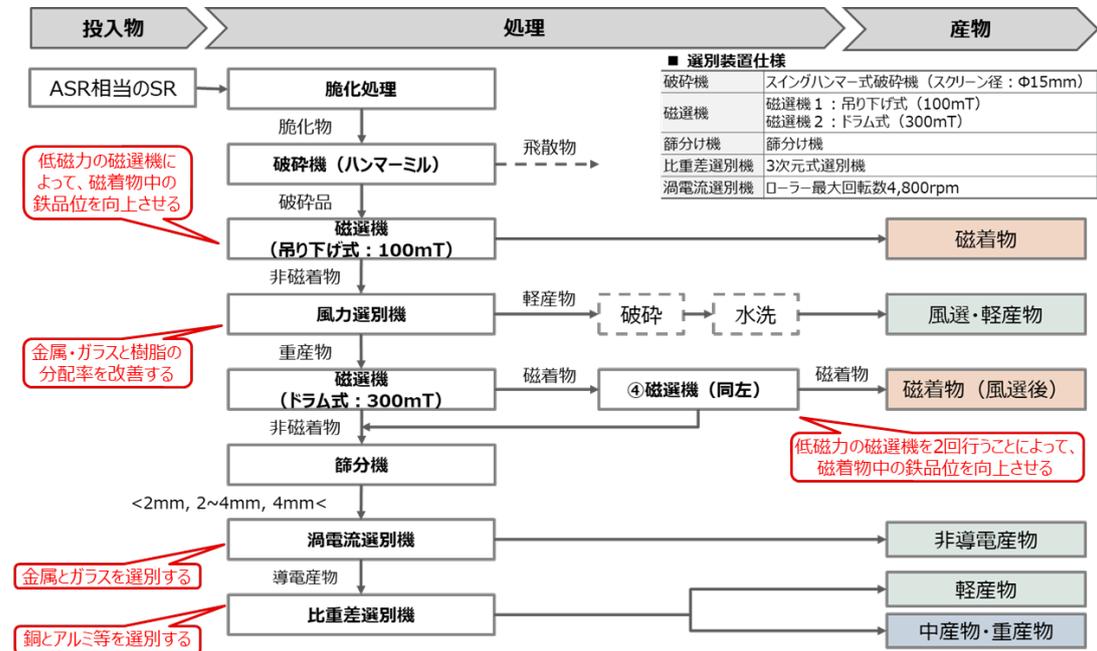
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 48 試験②（第2年度）の処理フロー



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 49 試験③（第2年度）の処理フロー



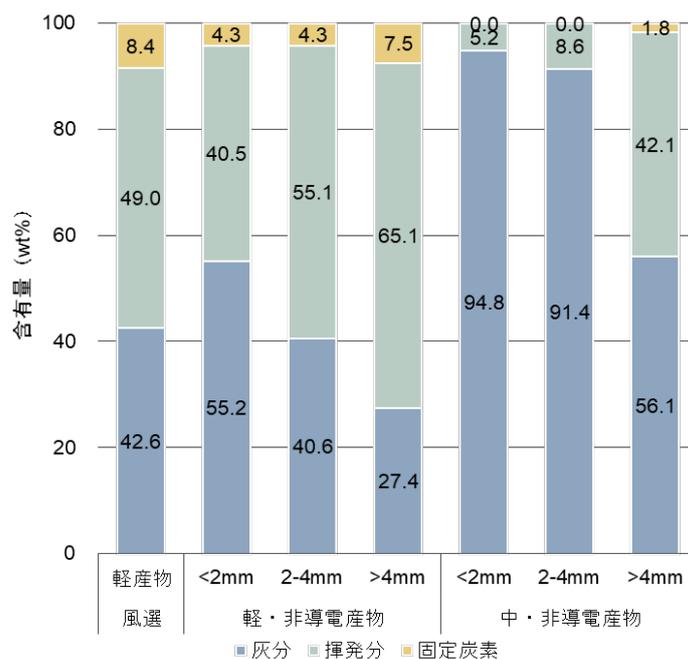
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

III-3. 選別・破碎プロセスの方法や条件の違いによる産物特性の比較実証

1. 試験①：SR単味（事業所AのSRを投入）

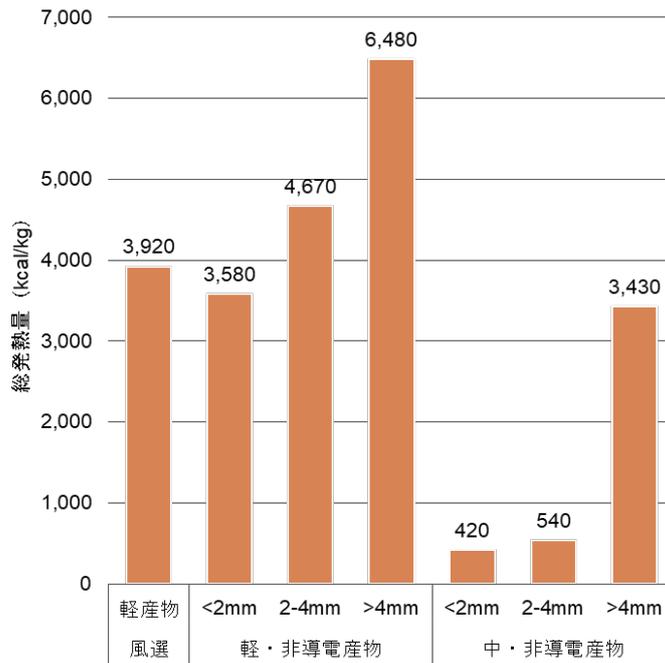
（1）コークス代替品（想定）

図表 50 コークス代替品（想定）の工業分析結果



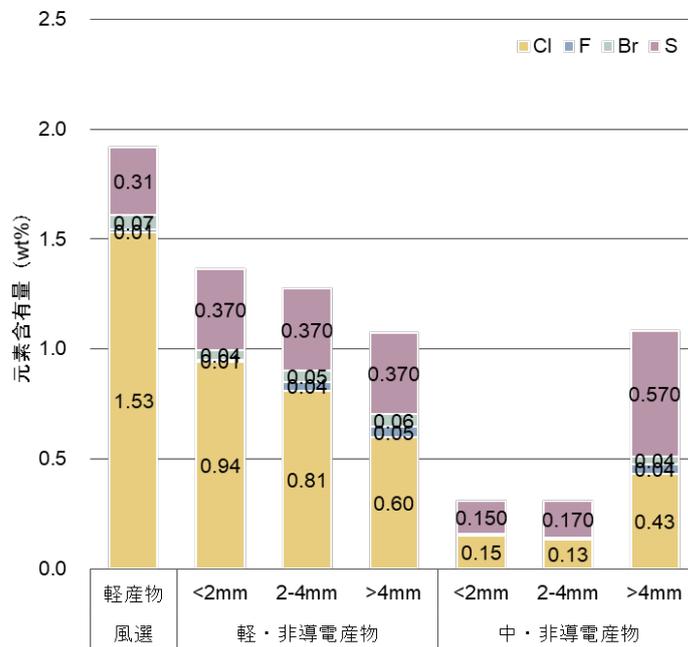
（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 51 コークス代替品（想定）の総発熱量分析結果



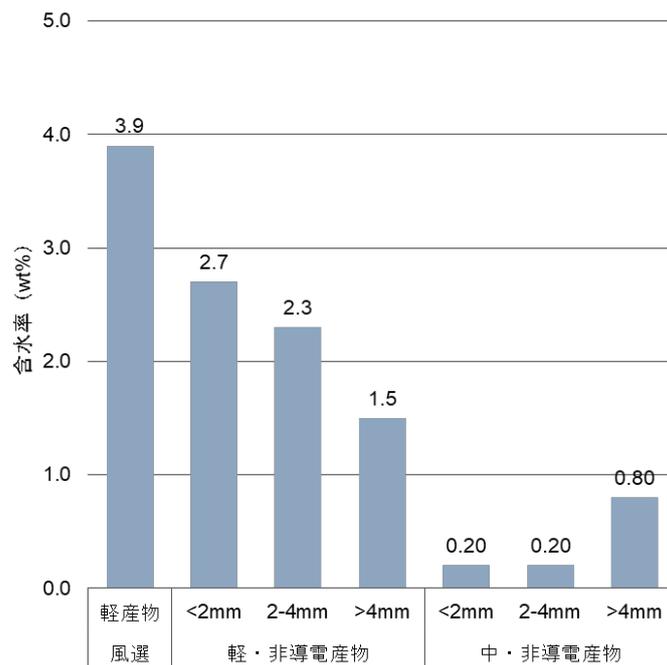
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 52 コークス代替品（想定）のハロゲン等含有量



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

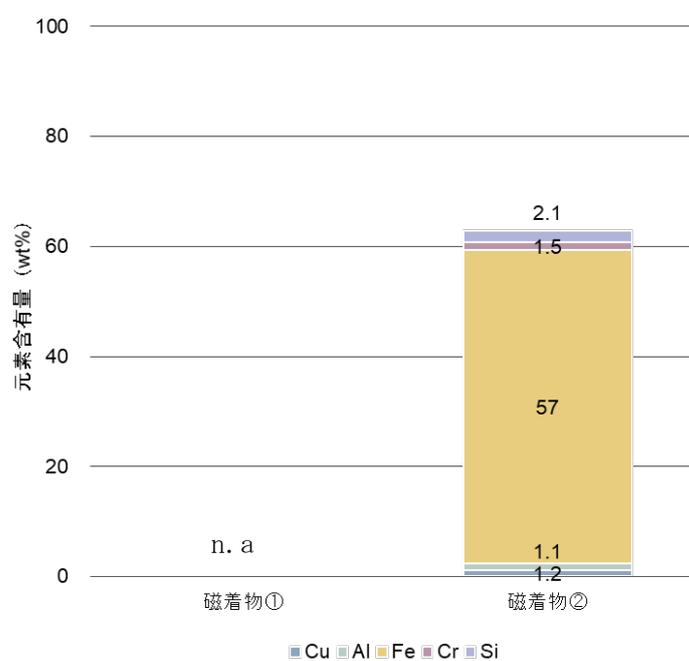
図表 53 コークス代替品（想定）の含水率



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(2) 鉄鋼電炉向け想定原料

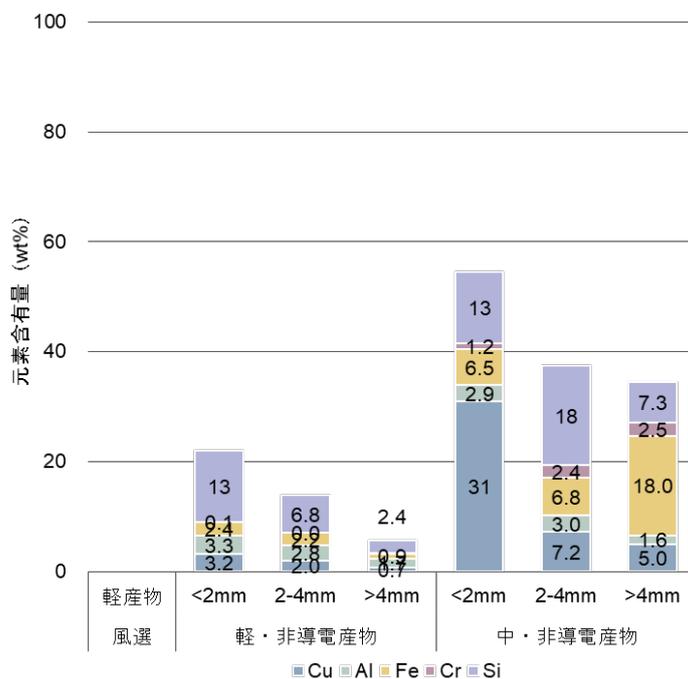
図表 54 磁着物の金属等含有量分析結果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

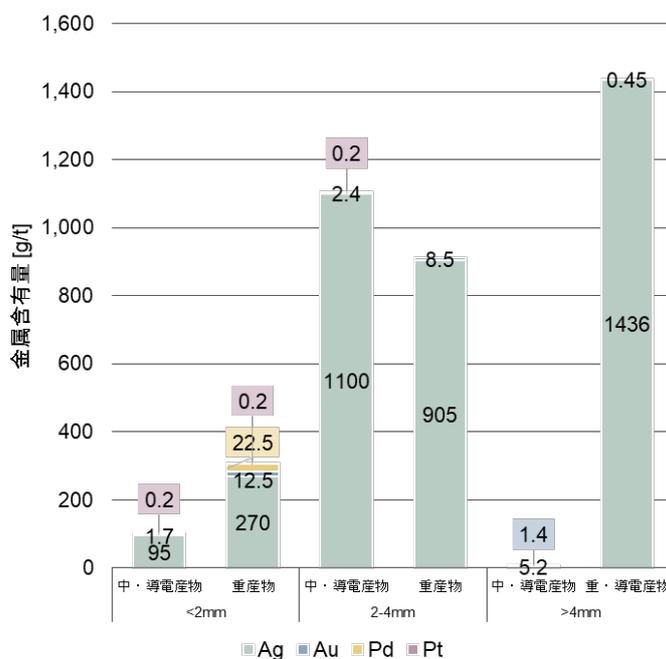
(3) 非鉄製錬向け想定原料

図表 55 非鉄製錬向け想定原料の金属含有量分析結果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 56 非鉄製錬向け想定原料の貴金属含有量分析結果

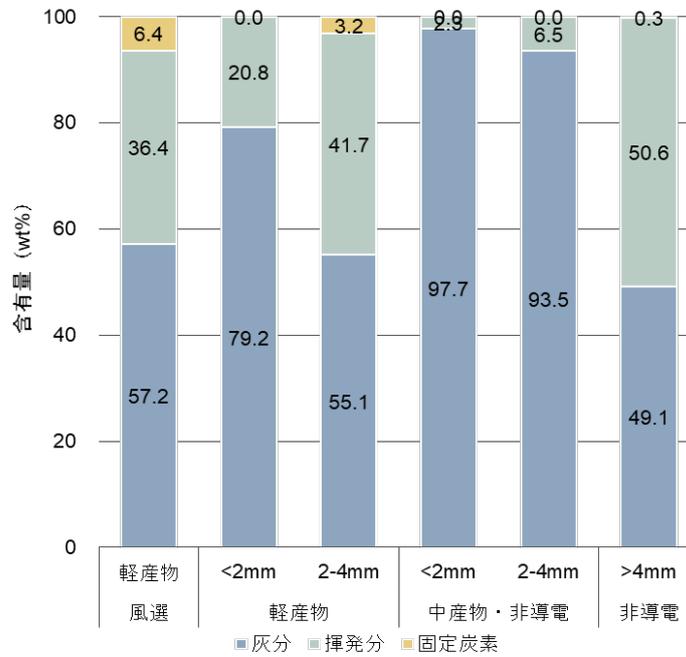


(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

2. 試験②：SR単味（事業所BのSRを投入）

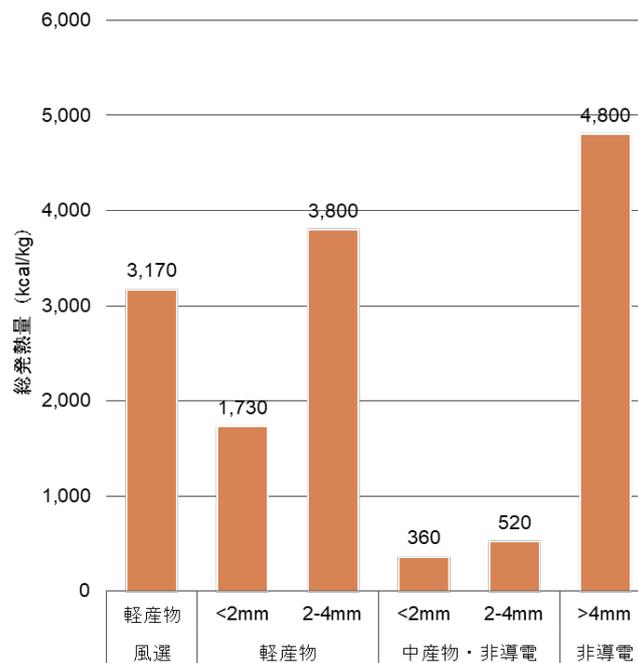
(1) コークス代替品（想定）

図表 57 コークス代替品（想定）の工業分析結果



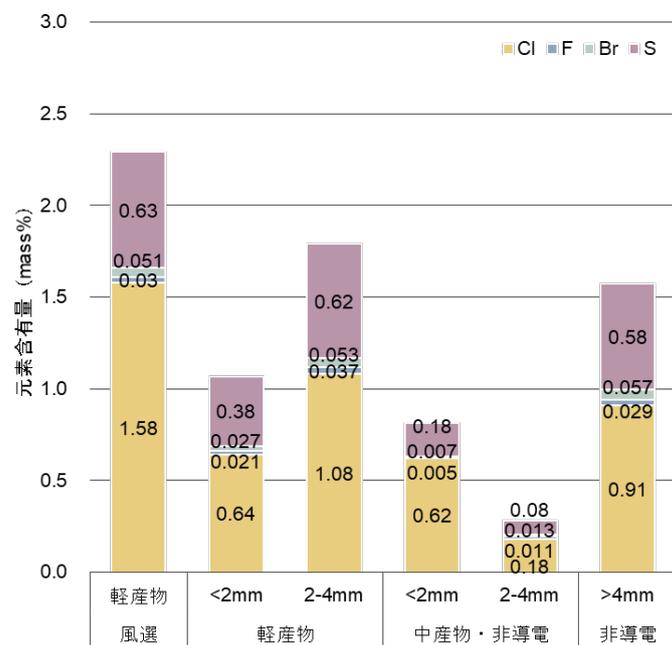
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 58 コークス代替品（想定）の総発熱量分析結果



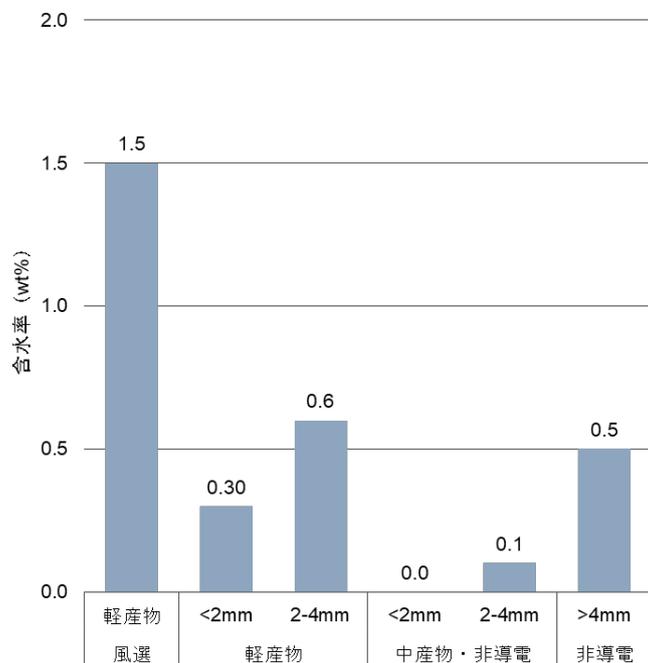
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 59 コークス代替品（想定）のハロゲン等含有量



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

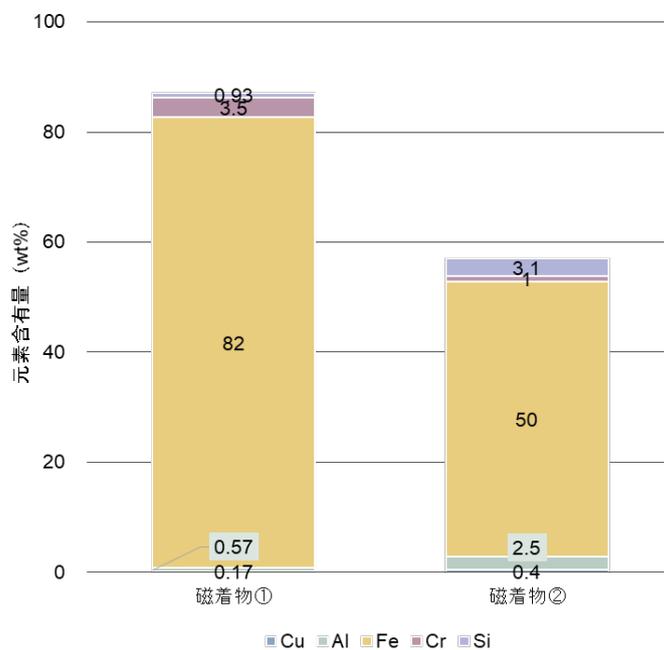
図表 60 コークス代替品（想定）の含水率



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(2) 鉄鋼電炉向け想定原料

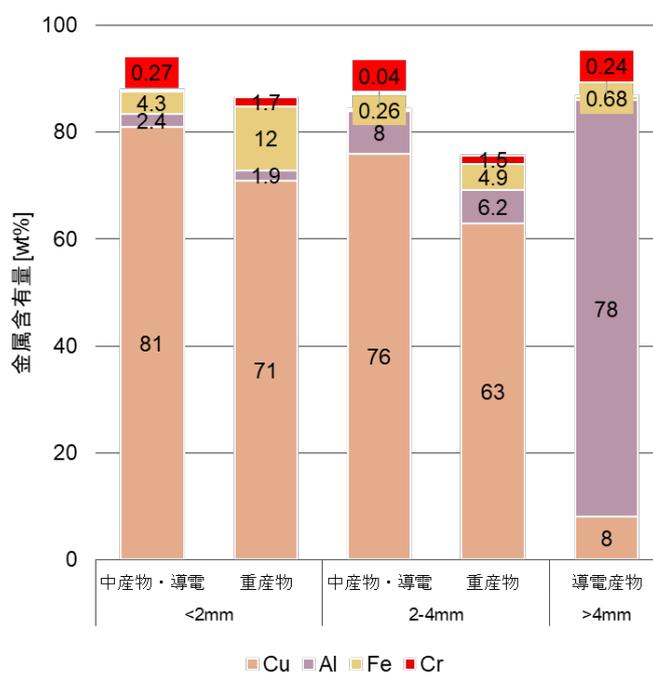
図表 61 磁着物の金属等含有量分析結果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

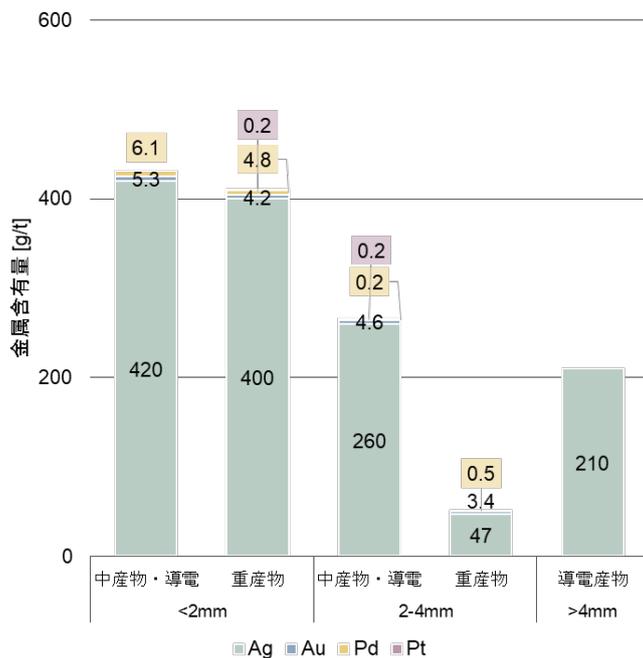
(3) 非鉄製錬向け想定原料

図表 62 非鉄製錬向け想定原料の金属含有量分析結果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 63 非鉄製錬向け想定原料の貴金属含有量分析結果

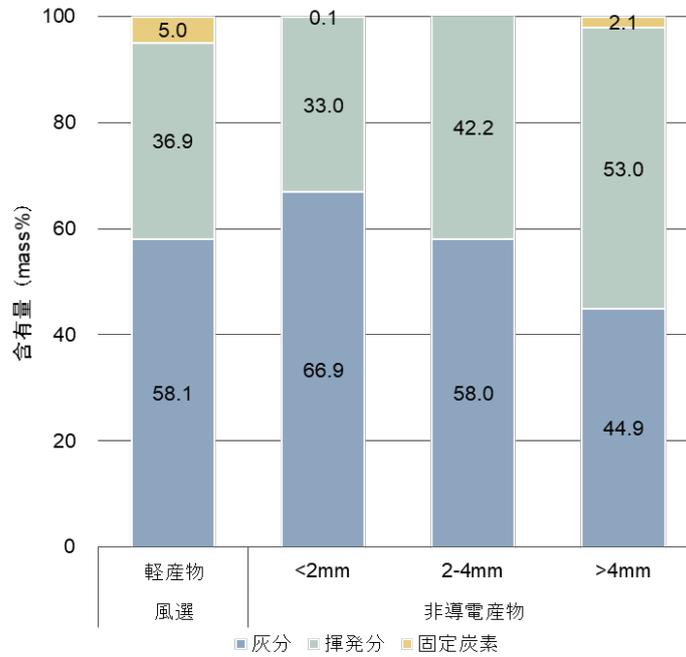


(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

3. 試験③：SR+CFRP（事業所BのSRを投入）

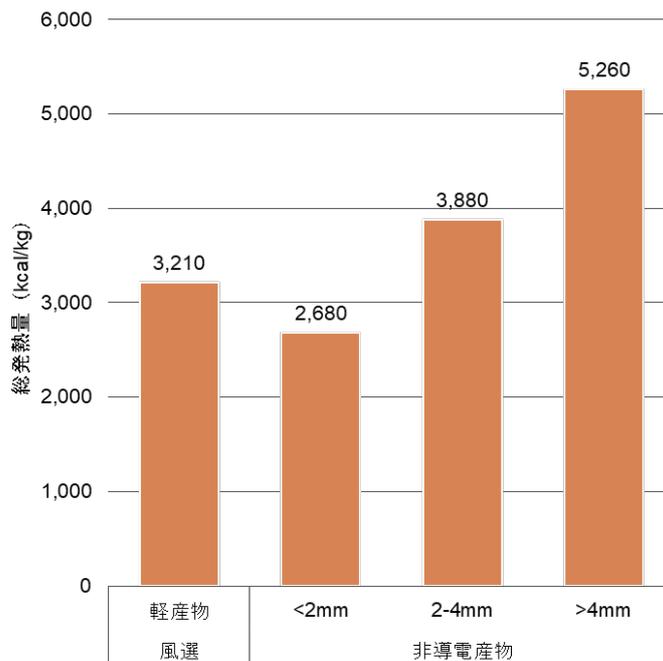
(1) コークス代替品（想定）

図表 64 コークス代替品（想定）の工業分析結果



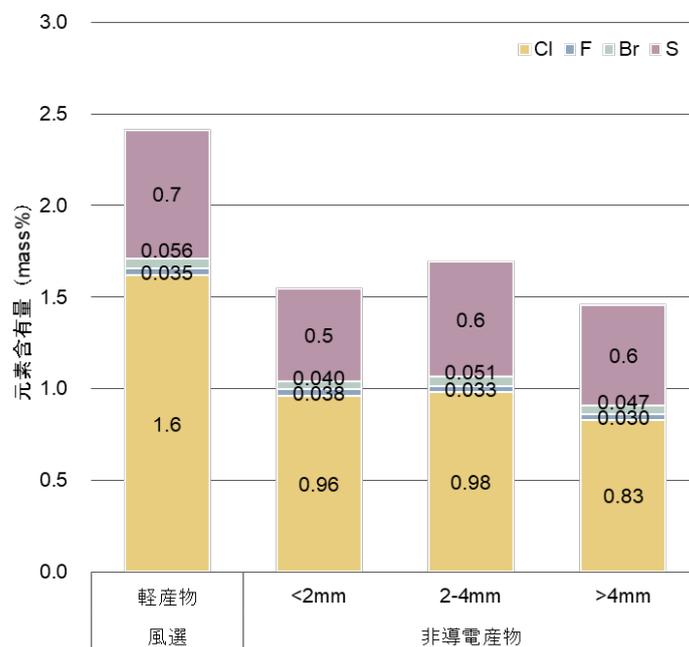
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 65 コークス代替品（想定）の総発熱量分析結果



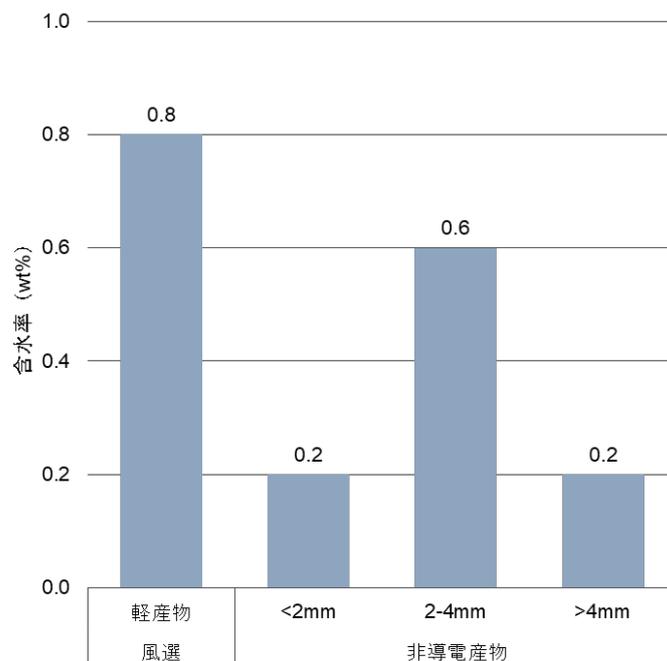
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 66 コークス代替品（想定）のハロゲン等含有量



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

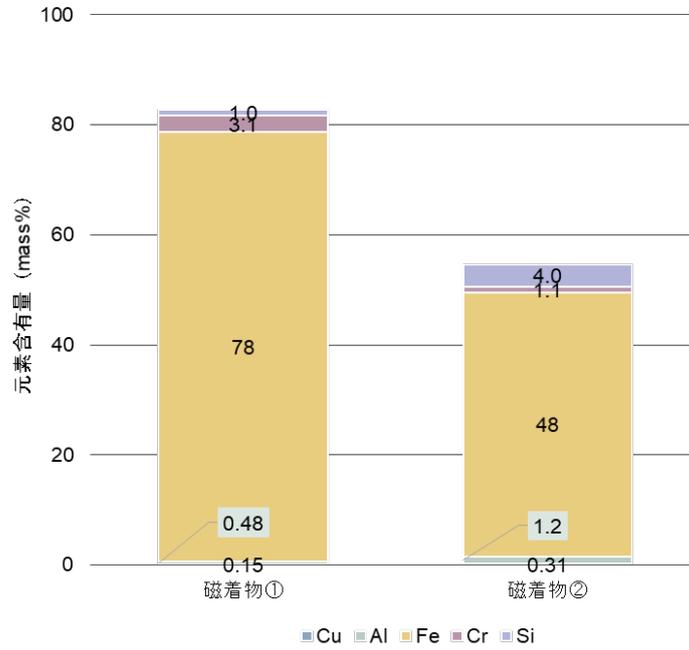
図表 67 コークス代替品（想定）の含水率



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(2) 鉄鋼電炉向け想定原料

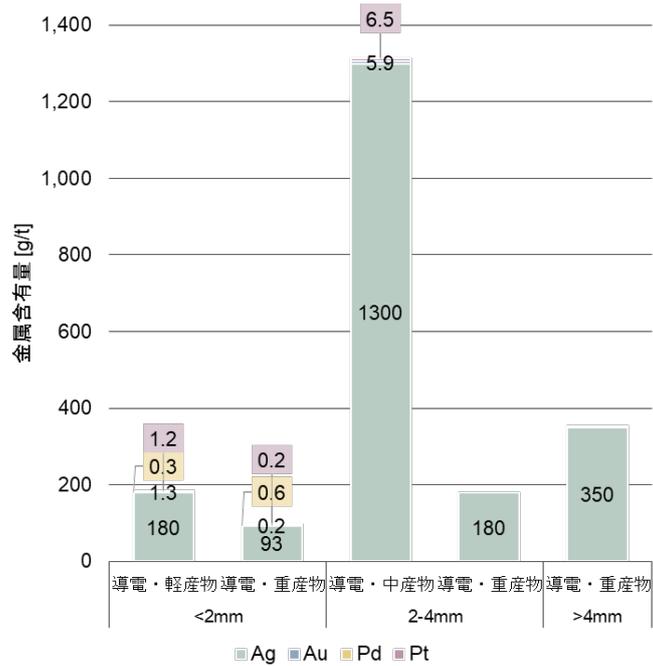
図表 68 磁着物の金属等含有量分析結果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

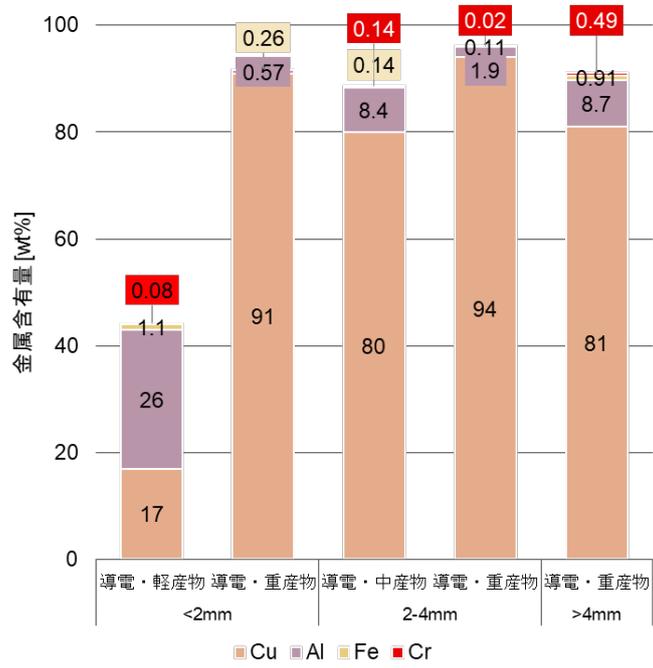
(3) 非鉄製錬向け想定原料

図表 69 非鉄製錬向け想定原料の金属含有量分析結果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 70 非鉄製錬向け想定原料の貴金属含有量分析結果



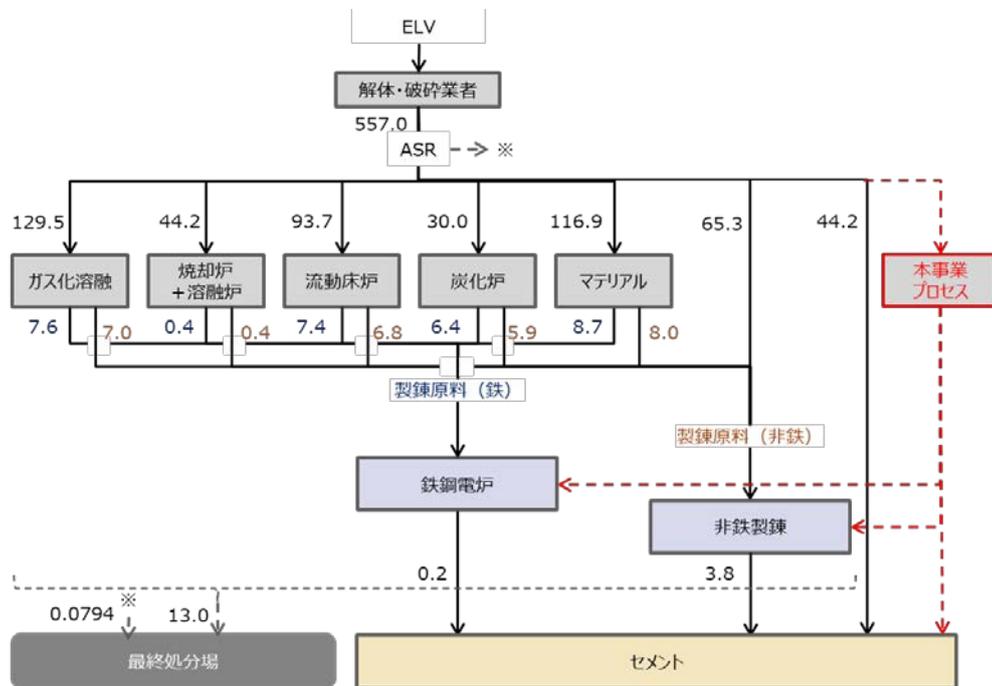
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

III-4. 濃縮および回収可能性に関する検討

1. ASRおよび副産物の発生量・流通量の推計結果

各種文献及び本事業取得分析データ等よりASRおよびASR由来の製錬原料等の発生量・流通量を推計すると、1年間で557ktのASRが発生し、各種一次処理を経て鉄鋼電炉産業向け製錬原料となるものが30.5kt、同様に非鉄製錬産業向け製錬原料となるものが28.1ktあると推計された。また、直接非鉄製錬産業に入るASRが65.3kt、同様に直接セメント産業に入るASRが44.2ktあると推計された(図表 71)。

図表 71 ASRおよび副産物の発生・流通量 (推計値、単位: kt)



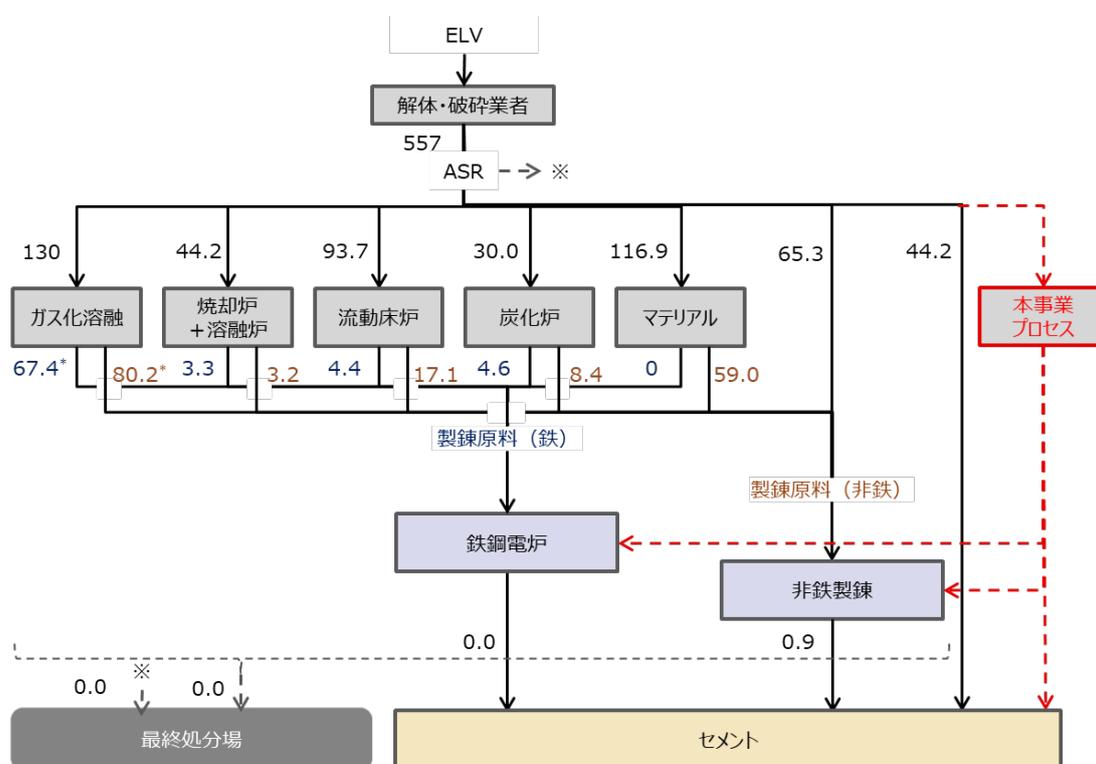
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

2. 未資源化物質の賦存量推計

各種文献及び本事業取得分析データ等よりASRに含まれる各種資源で資源化されていないものを未資源化賦存量として推計すると、金で0.3t、銅で2,557tが製錬原料（非鉄）として、鉄で9,804tが製錬原料（鉄）として回収できていないと推計された。忌避物質の観点では、ASR由来のクロムがセメントキルンに32t投入されていると推計された。

また、これらのうち、金は44.2kg、銀は0.65t、銅は1,062t、鉄は1,313tがセメント産業に投入されていると推計された。これは、セメントキルンに併設して本提案技術を導入した際に回収できる最大賦存量となる。忌避物質の観点では、ASRに含まれる8.2tのクロムが、セメントに直接投入されていると推計された。

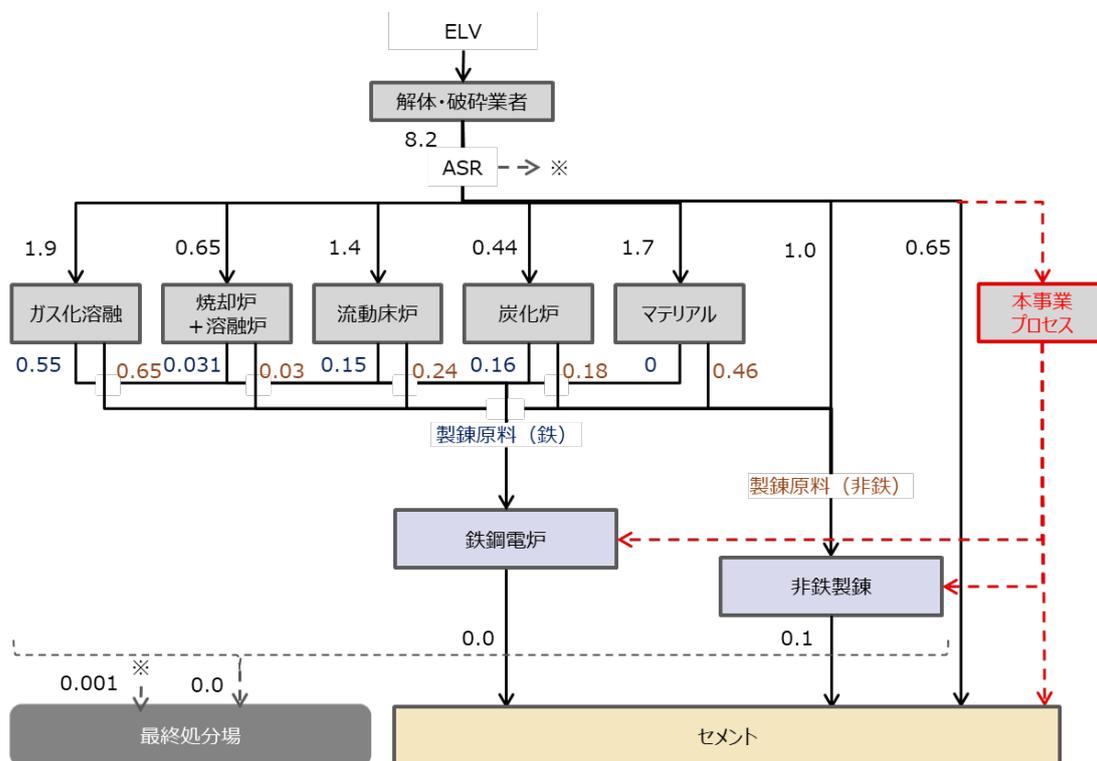
図表 72 ASR中の金 (Au) のマテリアルフロー (推計値、単位kg)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

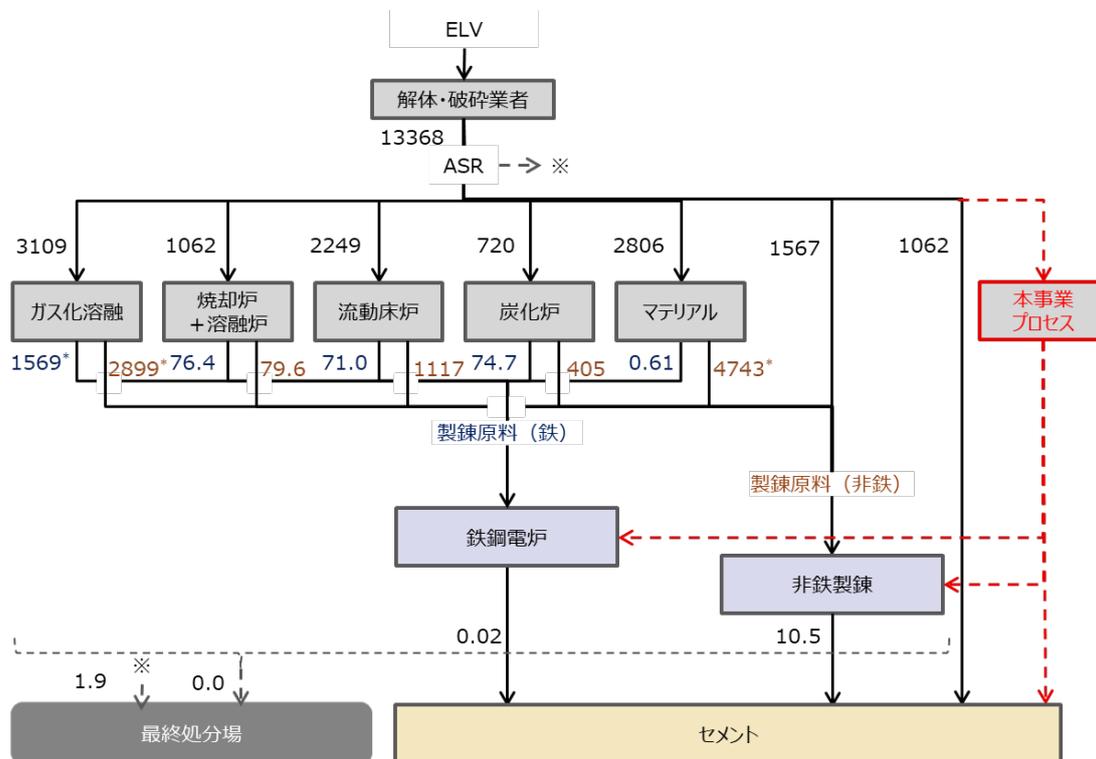
(注) ガス化溶解ではマテリアルバランスがとれていない (ASR再資源化処理実績より金属回収率を算出する際にその他原料における含有量を考慮せず重量比で按分していること、また成分情報を入手可能な情報から推計していることに由来すると考えらえる)

図表 73 ASR中の銀 (Ag) のマテリアルフロー (推計値、単位t)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

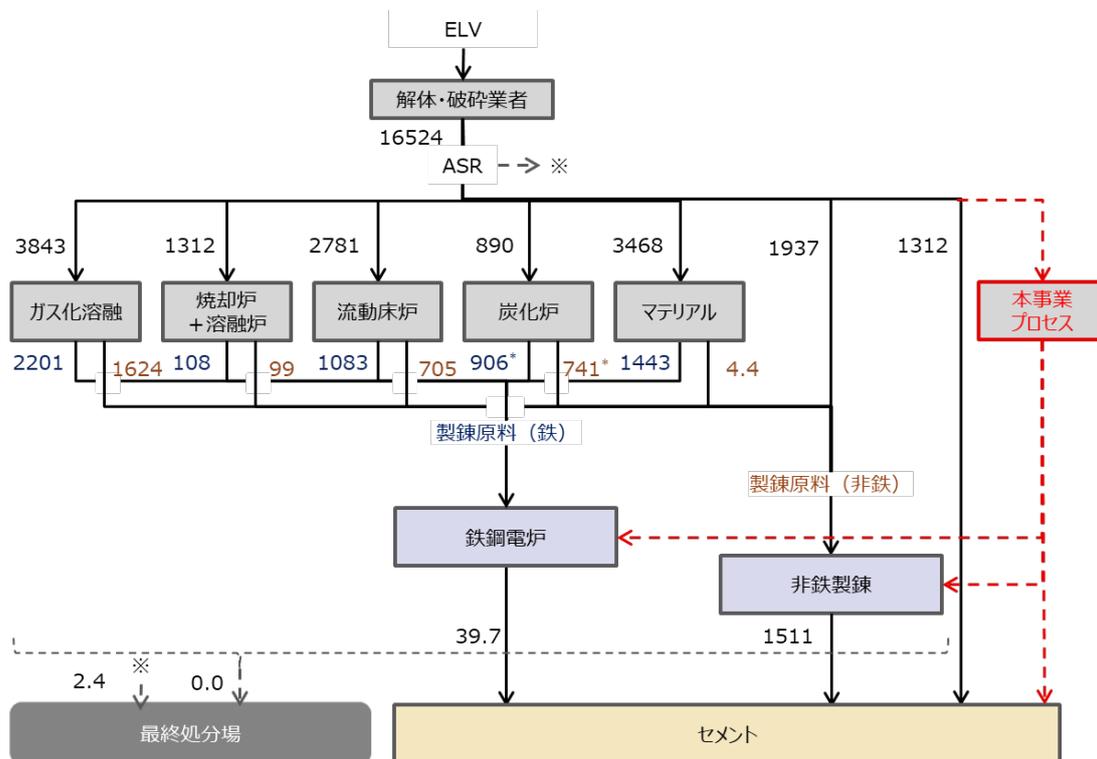
図表 74 ASR中の銅 (Cu) のマテリアルフロー (推計値、単位t)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(注) ガス化溶融、マテリアルではマテリアルバランスがとれていない(ASR再資源化処理実績より金属回収率を算出する際にその他原料における含有量を考慮せず重量比で按分していること、また成分情報を入手可能な情報から推計していることに由来すると考えらえる)

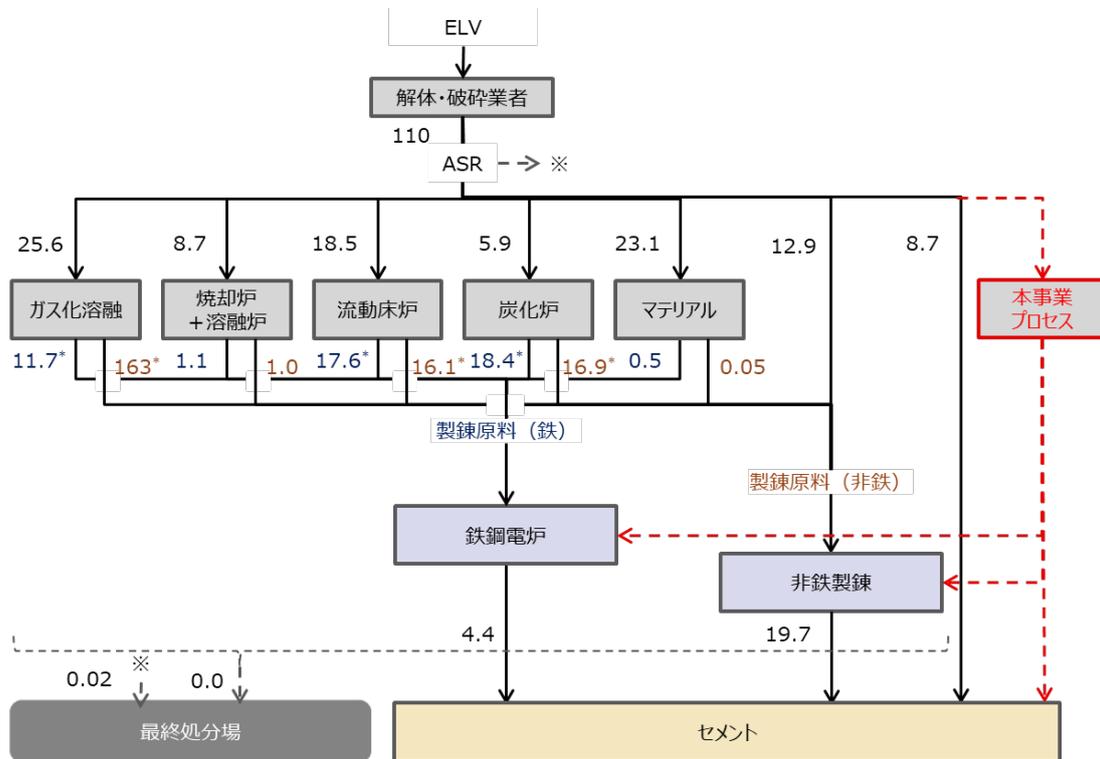
図表 75 ASR中の鉄 (Fe) のマテリアルフロー (推計値、単位t)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(注) ガス化溶融、炭化炉ではマテリアルバランスがとれていない (ASR再資源化処理実績より金属回収率を算出する際にその他原料における含有量を考慮せず重量比で按分していること、また成分情報を入手可能な情報から推計していることに由来すると考えられる)

図表 76 ASR中のクロム (Cr) のマテリアルフロー (推計値、単位t)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(注) ガス化溶融、流動床炉、炭化炉ではマテリアルバランスがとれていない (ASR再資源化処理実績より金属回収率を算出する際にその他原料における含有量を考慮せず重量比で按分していること、また成分情報を入手可能な情報から推計していることに由来すると考えられる)

III-5. 選好物質の濃縮および忌避物資の分離可能性に関する検討

1. CFRPの適正処理・再資源化に関する考察

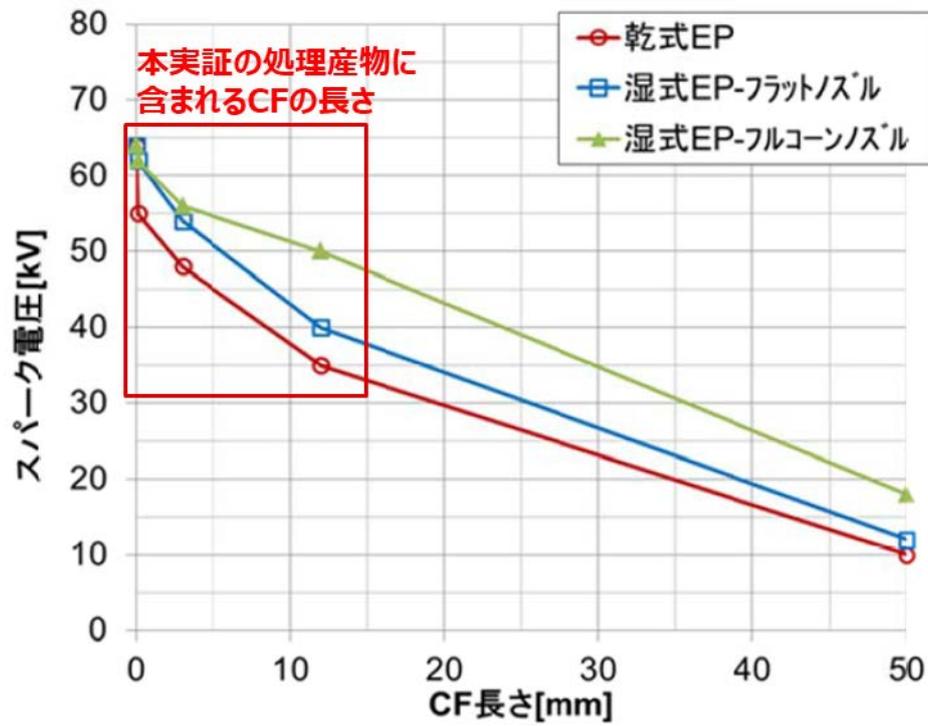
CFRPを0.5%含む試料を脆化・破碎し、風選で軽産物に分配されたものには繊維状・線状の炭素繊維が含まれるが、最長でも15mm程度にとどまっている。炭素繊維の長さが50mm以上では著しくスパーク電圧が著しく落ち、集塵機の作動に支障をきたすことが報告されている。そのため、本事業プロセスによって、CFRPを適正処理できたものと考えられる。

図表 77 本実証で回収したCFRP



(出所) 太平洋セメント株式会社提供

図表 78 電気集塵機に影響を与える炭素繊維の長さ



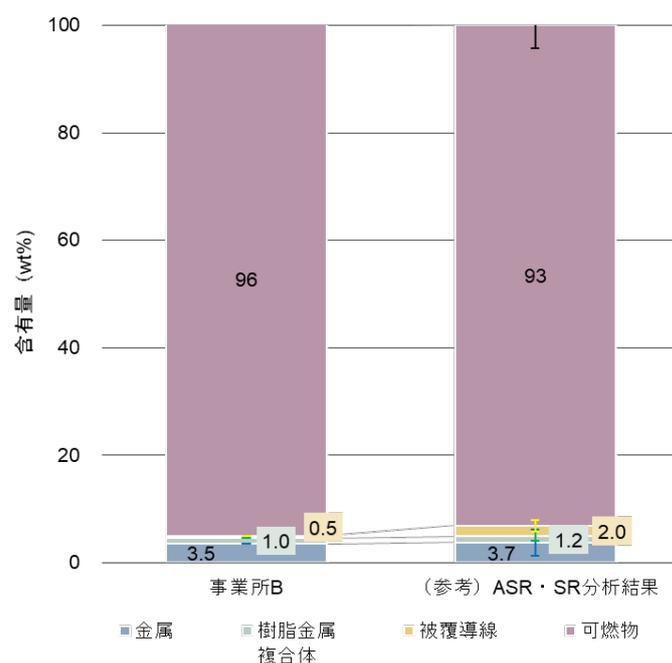
(出所) NEDO革新的新構造材料等研究開発「自動車に用いられる炭素繊維複合材料のリサイクル技術に関する検討」矢野経済研究所(平成28年2月)に加筆

2. 選別・破碎プロセスに関する考察

(1) 投入物の代表性に関する検討

本実証のSRに含まれる金属や可燃分、灰分は、その他の事業所から回収したASR・SRの分析値や既往実証の分析値と同等である（図表 79、図表 80）。脆化物を回収するためには可燃物の含有量が重要となるため、本実証における産物を安定して回収できると期待される。

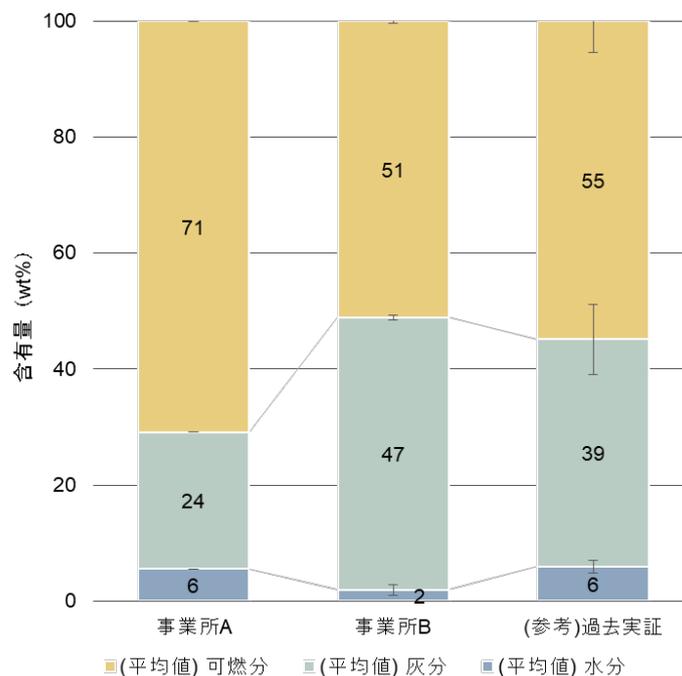
図表 79 SR・ASRの組成分析結果（本事業及びその他事業所からサンプリング）



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(注) 参考値は本年度別途入手したASR (n=4) を手選別により分析した結果

図表 80 可燃分・灰分・水分分析結果（本事業及び既往実証での分析値）



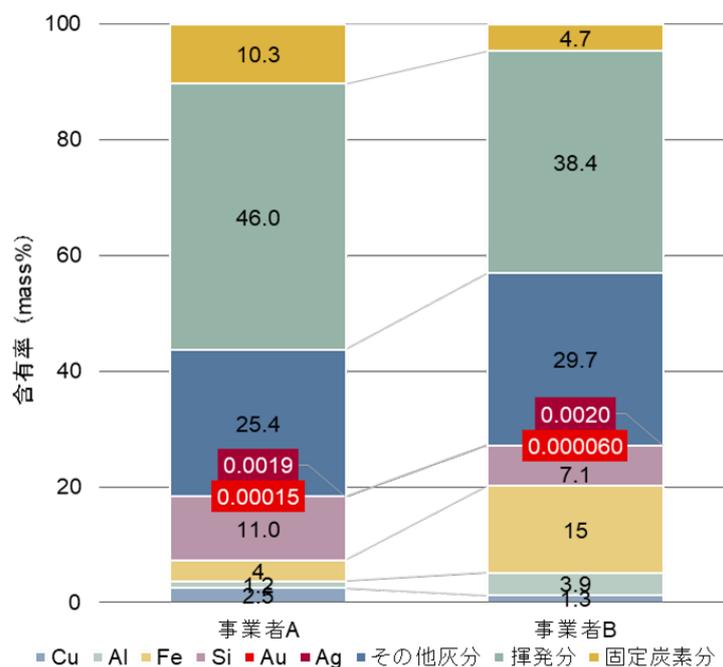
（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

（注）参考値は「平成28年度自動車リサイクル制度の安定的な運用および環境配慮設計の推進に向けた検討調査より」4つの事業所におけるASRの分析結果の平均値および標準偏差を使用。サンプリング手法が異なる可能性がある

(2) 投入物の組成変化に伴う産物の変化に関する検討

事業所Aと比較すると、事業所BからサンプリングしたSRは金や銅の含有量が少なく、アルミや鉄の含有量が多い傾向にあった。また、事業所BからサンプリングしたSRを使用した試験③では、目的産物中の有用金属（鉄、銅、アルミ等）の品位は高いものの、有用金属の回収率は事業所Aからサンプリングした結果（試験①）より低い結果になった。SR中の有用金属の含有率が低い場合、回収産物の金属品位を優先すると回収率は低くなると考えられる。

図表 81 SR脆化物の成分分析結果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(3) 産物の供給可能性に関する考察

① 概要

第2年度で回収した産物のうち、非鉄製錬向け想定原料は初年度同様に有価で販売できる可能性が高いという評価であった。また、鉄鋼電炉向けのコークス代替品については、特に吊り下げ式の磁選機で回収したものに関しては有価で販売できる可能性が高い。セメント及び鉄鋼電炉向けのコークス代替品については、いずれの生産プロセスにも供給自体は可能であるが、総発熱量などに課題を有しているため、有価での販売は難しいとの評価であった。

図表 82 第2年度産物の供給可能性

	粒径・粒度分布	嵩密度	総発熱量	選好物質含有量	忌避元素含有量
セメント向け コークス 代替品	<ul style="list-style-type: none"> ■投入時は<2mm ■<15mmは破砕可能 		<ul style="list-style-type: none"> ■微粉炭は7,000kcal/kg ■SR代替として受け入れる場合には4,000kcal/kg 		<ul style="list-style-type: none"> ■ハロゲン及びCrが主要な忌避成分 ■Clは投入時に0.5% ■アルカリが少ないこと
	○	-	△	-	○
鉄鋼電炉向け コークス 代替品	<ul style="list-style-type: none"> ■0~3mm(粉)、30mm(塊) ■粉コークスは1mm前後で粒度をそろえる 	<ul style="list-style-type: none"> ■炉内において鉄と化合する程度の高密度が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ■6,000kcal/kg程度 	<ul style="list-style-type: none"> ■固定炭素の含有量が多いこと(理想は70~80%) 	<ul style="list-style-type: none"> ■鋼は0%が好ましい ■Clは8,000ppm以下 ■Sは1~2%程度 ■ガラス分は少ないこと ■水分1%以下
	△	△	△	✖	△
鉄鋼電炉向け 想定原料		<ul style="list-style-type: none"> ■投入時に飛散しない程度の高密度が必要 		<ul style="list-style-type: none"> ■鉄は80%以上が好ましい 	<ul style="list-style-type: none"> ■鋼は全投入量換算で0.3%以下に抑えること
	-	△	-	○	○
非鉄製錬向け 想定原料		<ul style="list-style-type: none"> ■転炉の場合は飛散しない程度の高密度が必要 ■自増炉では2.0程度 		<ul style="list-style-type: none"> ■金は5g/t以上(10g/tが好ましい) ■銀は400g/t以上 ■銅は銅鉱石以上(20~30wt%程度) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ハロゲンは少ないこと(受け入れ制限を始めているASRは1~3%)
	-	○ ※自増炉	-	○	○

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

② セメント向けコークス代替品

本実証で回収した産物は、セメントキルンに供給することは可能である。しかし、総発熱量が低いため有価で販売することは難しいため、ガラスを分離して発熱量を高くすることが必要である。また、忌避物資の観点では、水洗脱塩により処理すれば、塩素の含有量は許容範囲であるが、クロムについては可能な限り分離することが必要である。

③ 鉄鋼電炉向けコークス代替品

本実証で回収した産物は、鉄鋼電炉に供給することは可能である。しかし、総発熱量が低く、固定炭素分の含有量も少ないため、有価で販売することは難しい。コークスには加炭効果を期待しているため、コークス相当として供給するためには、固定炭素の量を80%程度まで増加させる必要がある。

また、忌避物質の観点では、電炉に含水率の高いコークスを投入すると水蒸気爆発を引き起こす恐れがあるが、本実証での回収産物であれば許容範囲であると考えられる。また、ハロゲンの含有量も問題ないと考えられる。ガラスはスラグのもとになり、原単位を低下させてしまうため、灰分を減らして固定炭素分を多くすることが必要である。

④ 鉄鋼電炉向け鉄原料

吊り下げ式磁選機で回収した磁着物①であれば、有価で販売できる可能性がある。また、ドラム式磁選機で回収した磁着物②については、鉄品位を向上させる必要があるが、混合物の成分次第では電炉に投入できる可能性はあると考えられる。

⑤ 非鉄製錬向け想定原料

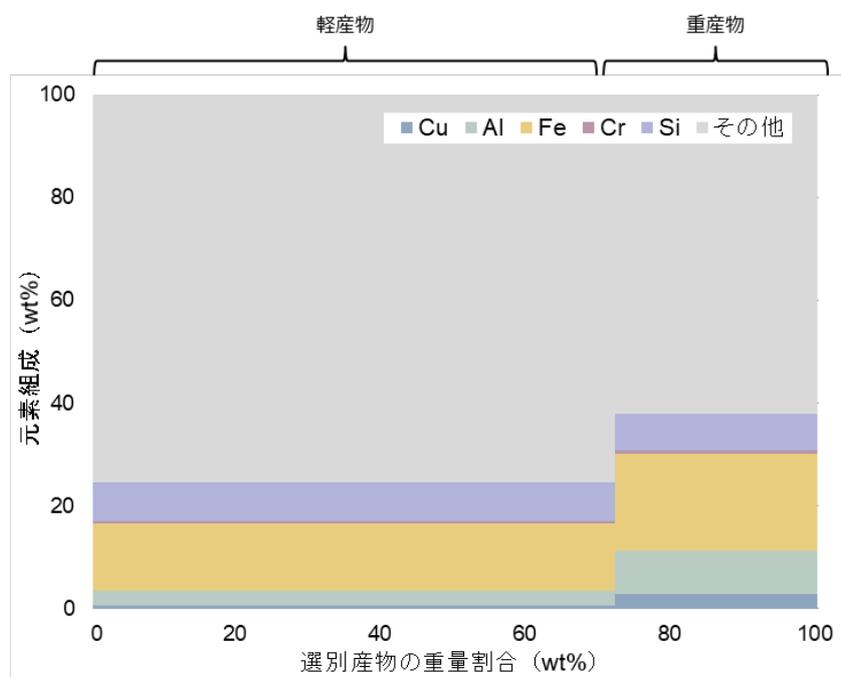
銅が80%程度含まれており、乾式銅製錬において銅滓相当の原料として利用できる可能性があるため、有価で販売できると考えられる。他方、金や銀の品位はあまり高くない印象であり、評価を上げるためには金や銀品位を改善することが必要である。

(4) 選好物質の濃縮と忌避物質の分離を実現するプロセスの検討

① 風選

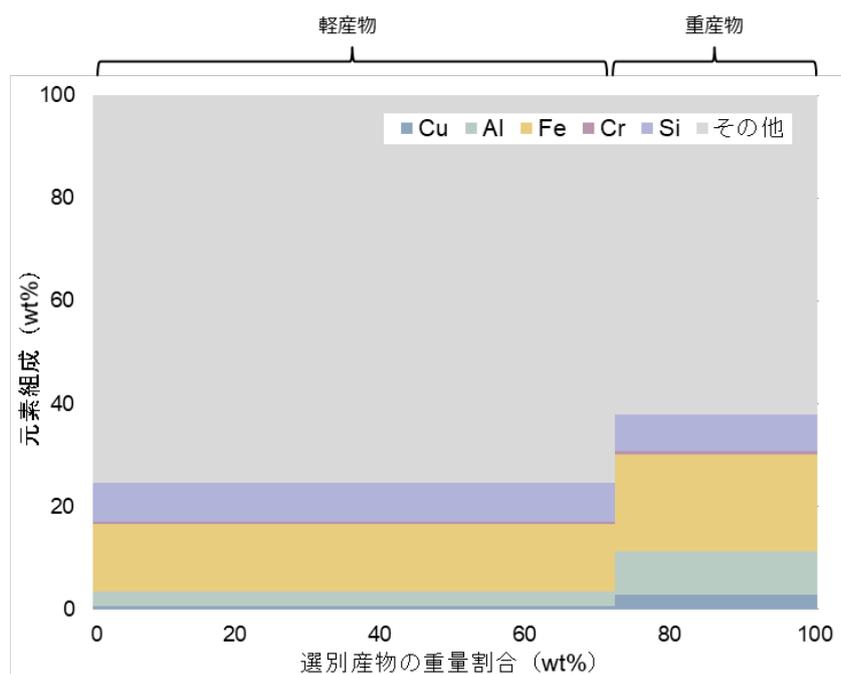
ジグザグ式の縦型風選機を使用することで、非鉄製錬原料の選好物質である銅を重産物中に70wt%程度分配していた。一方、軽産物中にも鉄やアルミを中心とした金属や、ガラスが品位で20wt%程度混入していた。軽産物中の金属やガラスの含有量を下げるためには流量を変化するなど操作条件を変更する必要がある。しかし、軽産物に含まれる金属やガラスは微粉状であり、これらを回収すると重産物中の金属品位が低下し、後段の選別において回収産物の品位を向上できなくなる可能性がある。そのため、風選の仕様検討に加えて、前処理によってガラス等を除去する必要もあると考えられる。

図表 83 風選における産物の元素組成と重量割合 (試験②)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 84 風選における産物の元素組成と重量割合 (試験③)

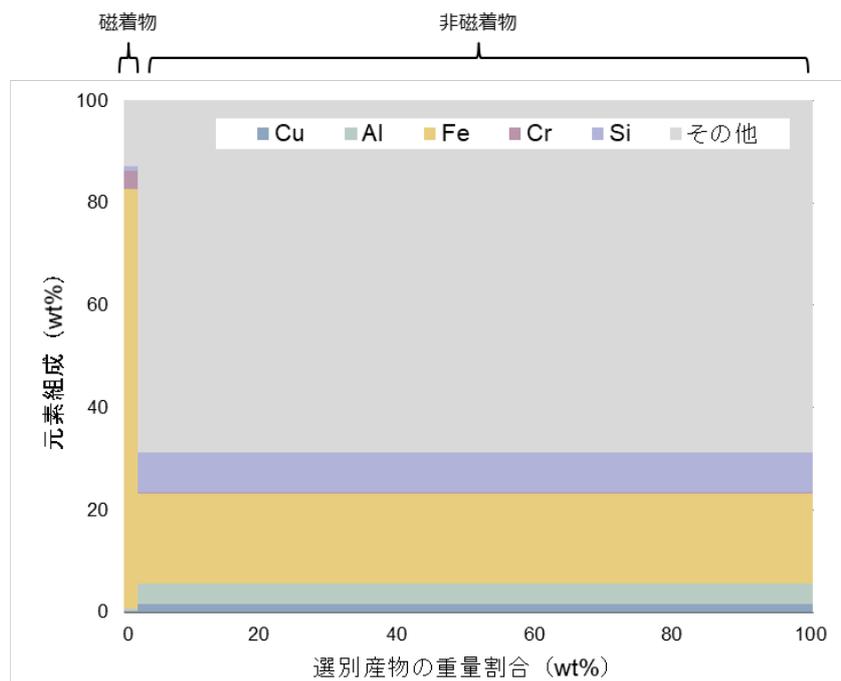


(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

② 磁選

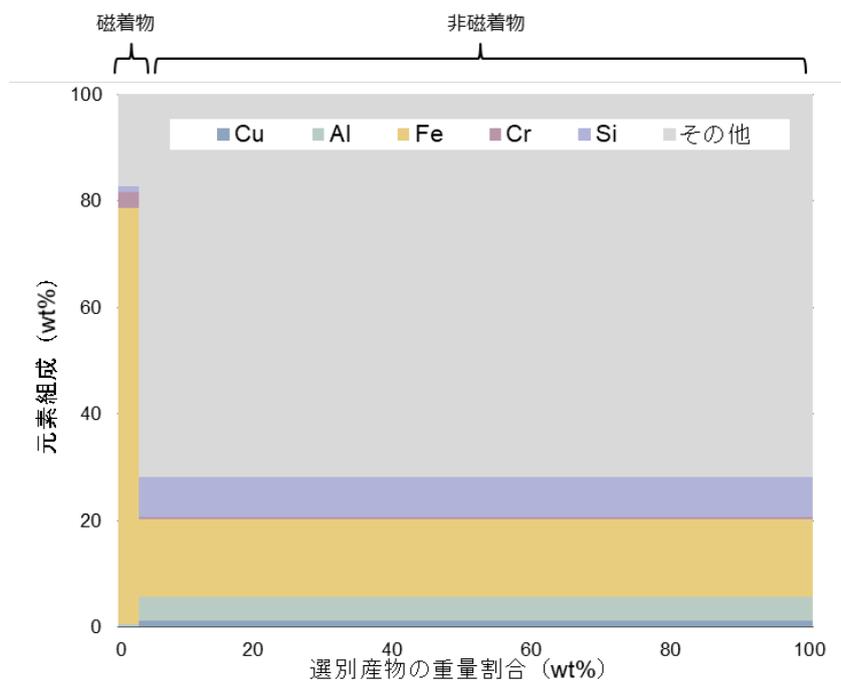
破碎直後の磁選において、低磁力の吊り下げ式磁選機を使用することで、選好物質である鉄品位が80wt%あり、また忌避物質である銅の混入量を0.2wt%以下に抑えた産物を回収できた。また、風選重産物の磁選において、低磁力(3,000 Gauss)のドラム式磁選機を2回に分けて使用することで、選好物質である鉄品位が50wt%程度、忌避物質である銅の混入量を0.3wt%前後に抑えた産物を回収できた。初年度の磁着物における鉄品位は最大で20%程度であったため、風選で綿状の産物を軽産物に除外することと、低磁力の磁選機を使用することが、鉄品位の高い磁着物を回収するために有効だと考えられる。

図表 85 磁選（吊り下げ式）における産物の元素組成と重量割合（試験②）



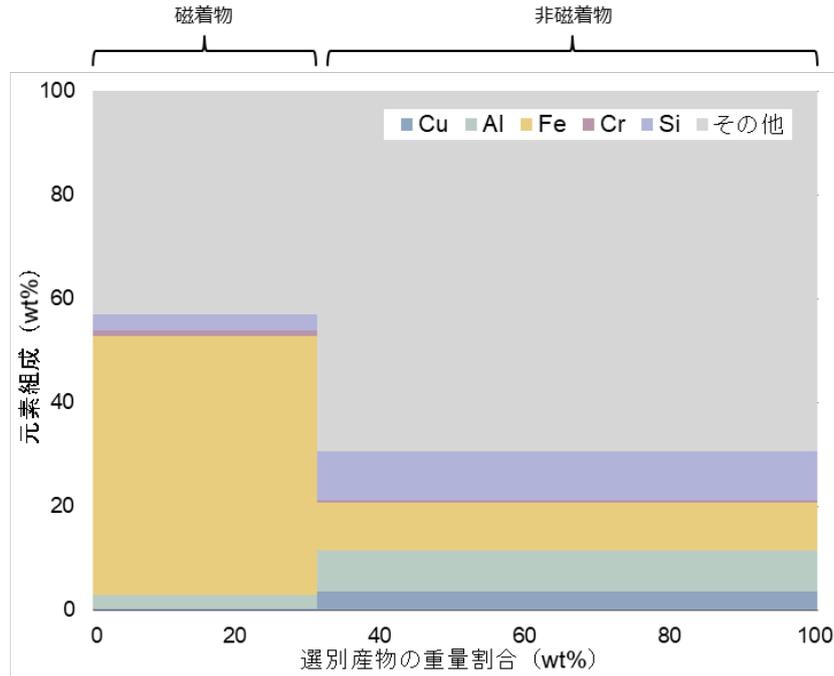
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 86 磁選（吊り下げ式）における産物の元素組成と重量割合（試験③）



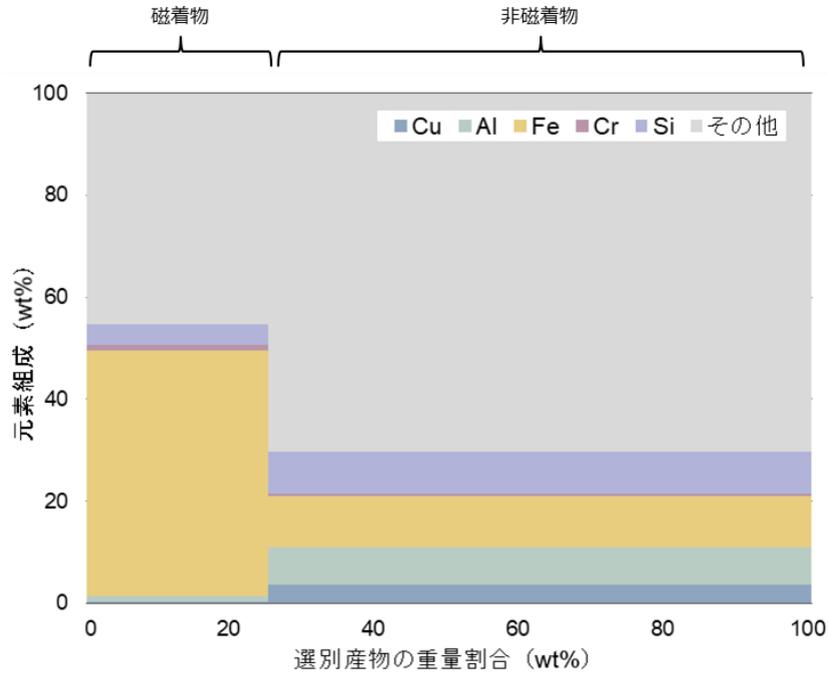
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 87 磁選（ドラム式）における産物の元素組成と重量割合（試験②）



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 88 磁選（ドラム式）における産物の元素組成と重量割合（試験③）



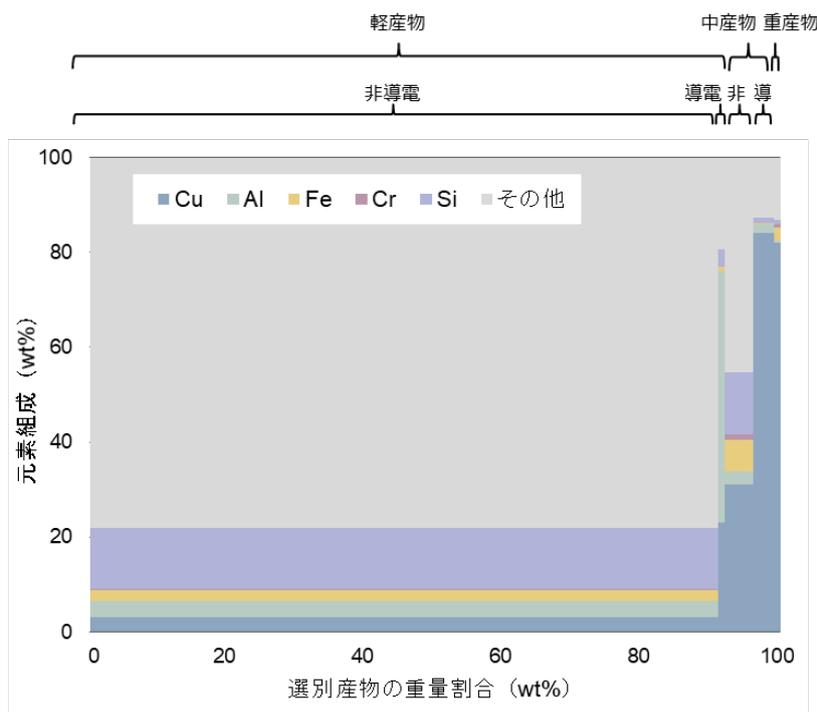
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

③ 比重差選別・渦電流選別

比重差選別によって回収した産物ごとに渦電流選別を行うことによって、<2mmや2～4mmの粒群では銅品位が80wt%前後の産物を回収することができた。一方、4mm<の粒群には銅とアルミを分離できず、銅品位が低い産物であった。乾式銅製錬においてアルミは忌避物質になるため、銅とアルミを分離してそれぞれ乾式銅製錬原料とアルミ製錬原料として回収することが望ましい。

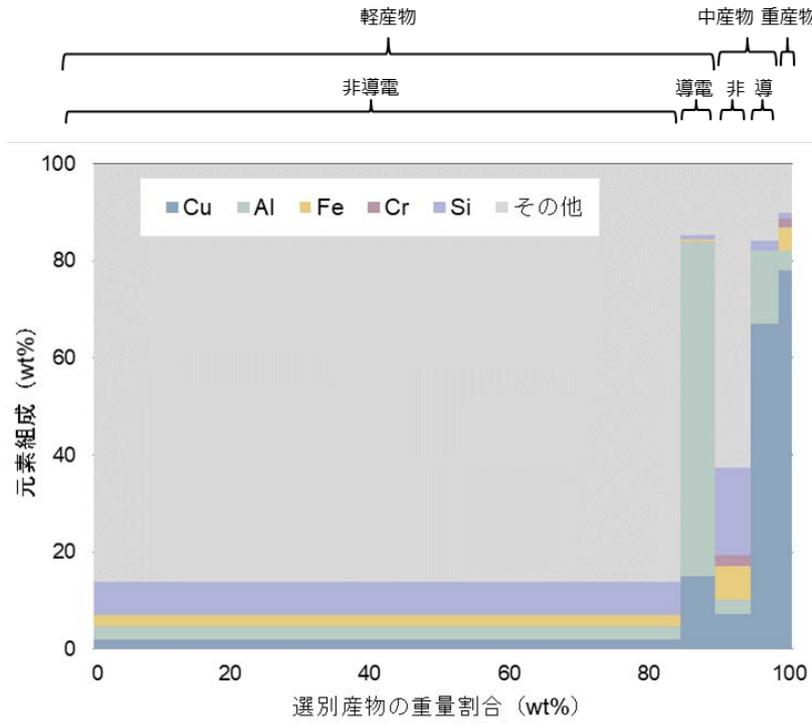
試験①及び試験②の結果より、アルミは粗粒群に分配されやすい傾向があった。そこで、比重差選別と渦電流選別を組み替え、あらかじめ導電産物を回収したのち、比重差選別により銅とアルミを分離することを試みた。その結果、すべての粒群において銅品位80%以上の産物を回収できたほか、4mm<の産物においてはアルミを80wt%程度濃縮した産物も回収できた。従来は乾式銅製錬向けの製錬原料のみ回収することを想定していたが、本選別プロセスによってアルミ製錬向けの製錬原料を回収できる可能性が分かった。

図表 89 比重差・渦電流選別における産物の元素組成と重量割合
(試験①：<2mm)



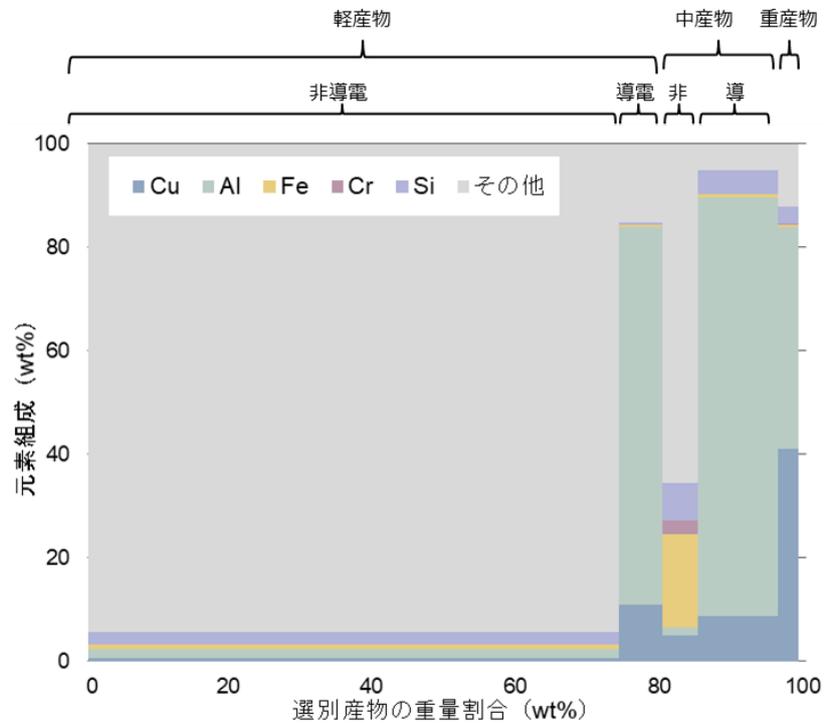
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 90 比重差・渦電流選別における産物の元素組成と重量割合
(試験①：2-4mm)



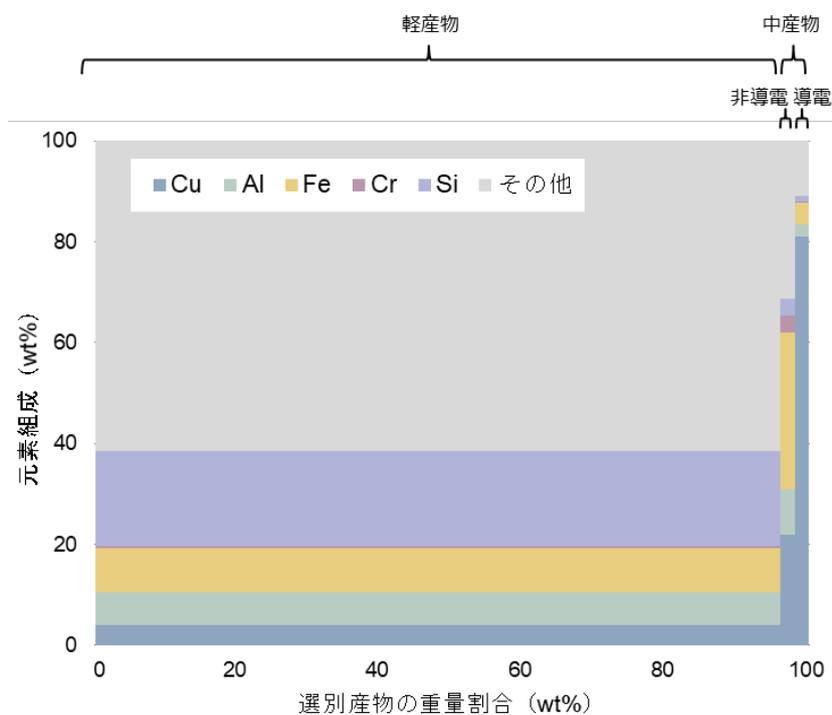
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 91 比重差・渦電流選別における産物の元素組成と重量割合
(試験①：4mm<)



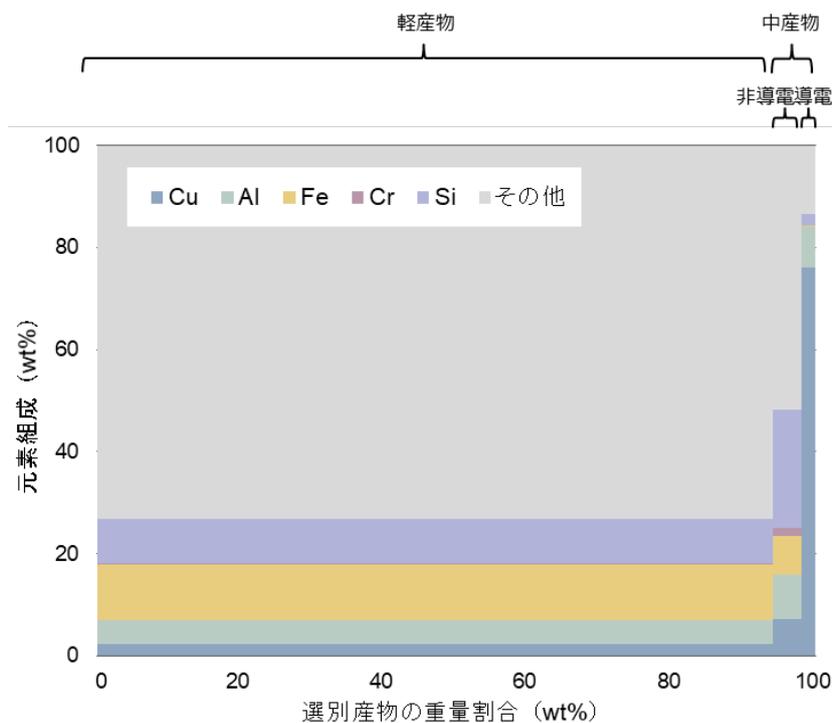
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 92 比重差・渦電流選別における産物の元素組成と重量割合
(試験②：<2mm)



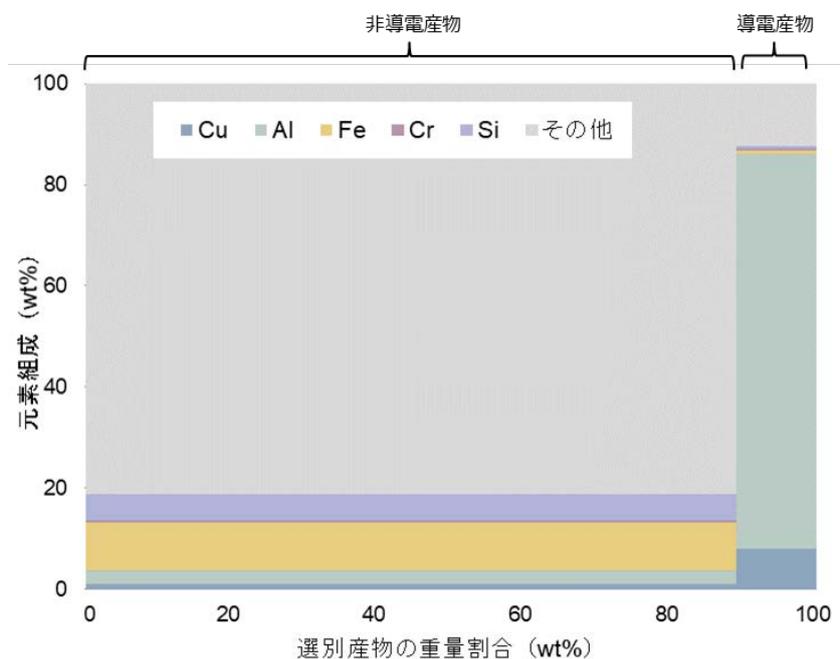
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 93 比重差・渦電流選別における産物の元素組成と重量割合
(試験②：2-4mm)



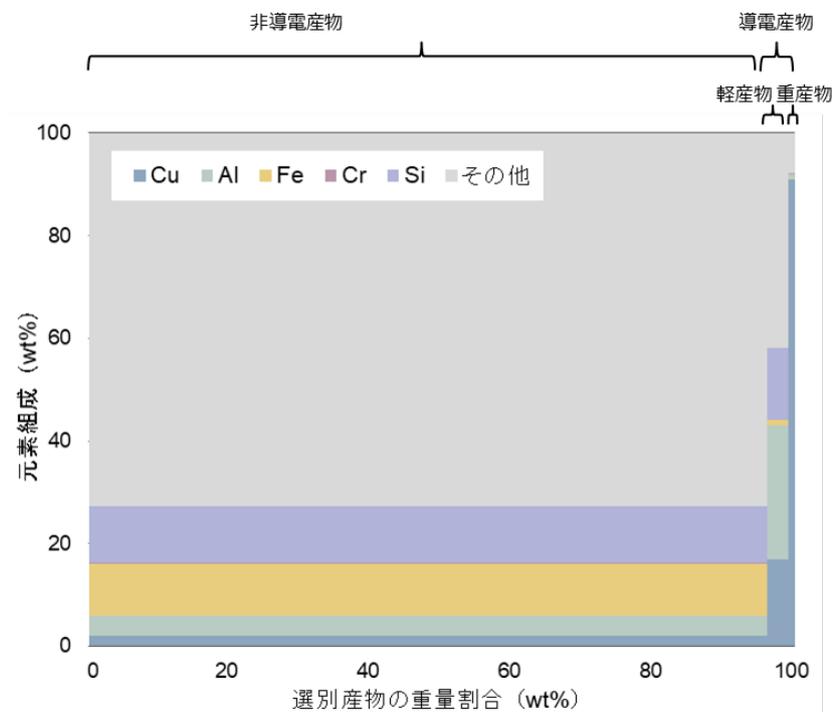
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 94 比重差・渦電流選別における産物の元素組成と重量割合
(試験②：4mm<)



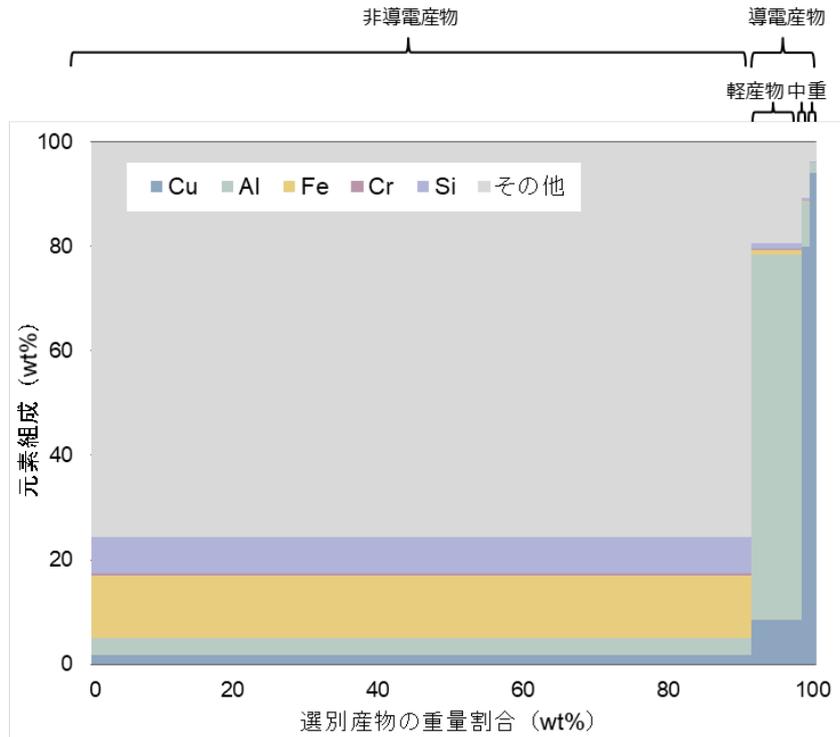
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 95 比重差・渦電流選別における産物の元素組成と重量割合
(試験③：<2mm)



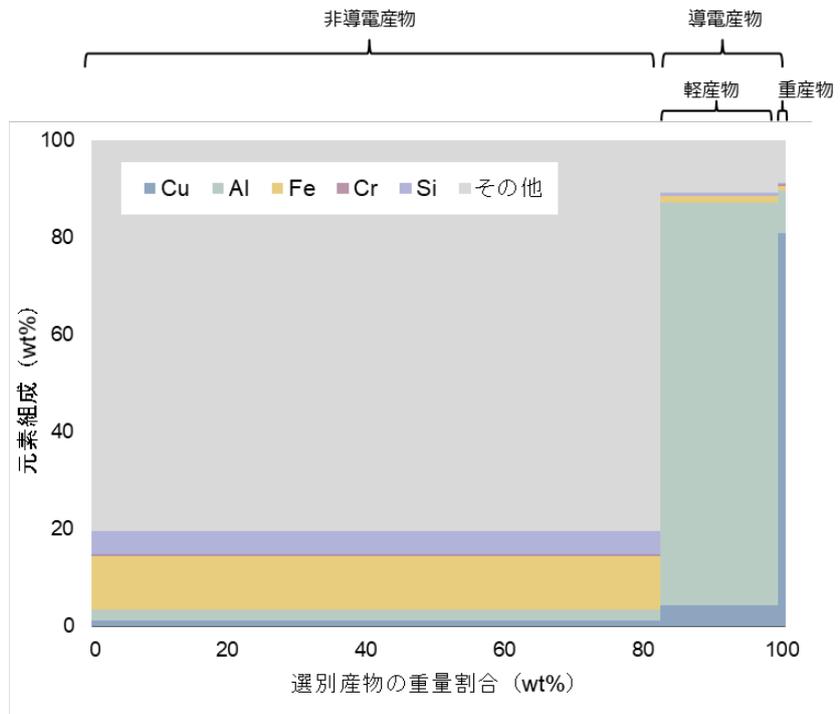
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 96 比重差・渦電流選別における産物の元素組成と重量割合
(試験③：2-4mm)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 97 比重差・渦電流選別における産物の元素組成と重量割合
(試験③：4mm<)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

3. 選好物質の濃縮および忌避物質の分離可能性向上に向けた課題検討

第2年度の当初設定していたコークス代替品、非鉄製錬向け想定原料、鉄鋼電炉向け想定原料を回収するための検証課題について、選別仕様や組み合わせ変更により、鉄鋼電炉向けのコークス代替品を除いて、選好物質を濃縮するとともに忌避物質の分離において、一定の成果があった。特に、非鉄製錬向け想定原料と鉄鋼電炉向けの想定原料については、有価での販売可能性がある水準まで濃縮することができた。他方、コークス代替品においては、ガラスの分離や固定炭素分の濃縮が課題であり、前処理等によって分離する必要があると考えられる。また、忌避物質の観点では、セメント向けコークス代替品に含まれるクロムや、鉄鋼電炉向け想定原料に含まれる銅について、完全に分離することが困難であった。

課題の解決策として、忌避物資の事前分離を実現する解体・破碎・選別技術を開発する必要がある。特に、ASRへのガラスやクロム、銅等の混入を防ぐことで、本提案技術により回収する産物の品位向上が期待される。また、これら高度な選別プロセスによって回収した二次原料を融通させるため、プロセス認証や中間処理事業者・素材事業者間のコンソーシアム形成が必要になる。

図表 98 第2年度の目標と成果及び課題

実証内容	第2年度の目標	第2年度	
		成果と達成度	商用化に向けた課題
(1) 産物特性をコントロールするための非燃焼処理・破碎・選別条件に関する調査検討	<ul style="list-style-type: none"> 過去実証や昨年度の成果・課題を踏まえて) 全体目標を達成するような操業プロセス仕様及び操業条件を特定する 	<ul style="list-style-type: none"> 以下の検証課題を設定 <ul style="list-style-type: none"> ◆ コークス代替品や鉄鋼電炉原料の品位を向上させる風選条件 ◆ 鉄鋼電炉原料の品位を向上させる磁選条件 ◆ 非鉄製錬原料の品位を向上させる渦電流・比重差選別条件 	—
(2) 破碎・選別プロセスの方法や条件の違いによる産物特性の比較実証	<ul style="list-style-type: none"> 全体目標を満たす操業プロセス仕様及び操業条件を特定する 	<ul style="list-style-type: none"> 風選によって、銅の70wt%程度を重産物として回収(分配率)し、3,000kcal/kg程度のコークス代替品を回収(灰分の分離効率向上には課題) 吊り下げ式の低磁力磁選とドラム式の低磁力磁選を併用することによって、鉄の品位を高め(50~80wt%)、銅の混入量を下げる(0.2wt%以下)ことに成功 ローター回転数の高い渦電流選別機によって得た導電産物を、より滞留時間の長い比重差選別機で選別することで、銅品位が80wt%程度の産物と、アルミが高品位で含まれる産物をそれぞれ回収 	<ul style="list-style-type: none"> コークス代替品の品位向上(固定炭素分の増加、総発熱量の増加、ガラスの分離) アルミ品位の高い産物の供給先検討 パイロット規模での装置への影響検証 産物を実投入した考慮した処理プロセスの検討
(3) 濃縮及び回収可能性に関する検討	<ul style="list-style-type: none"> セメント産業、鉄鋼電炉産業、非鉄製錬産業の選好及び忌避物質(いずれも金属)について、未回収となっている資源量を具体化させる 	<ul style="list-style-type: none"> ASR由来のうち、金0.3ton、銅2,557ton、鉄9,804tonがマテリアルリサイクルできていないと推計(全国平均、年間) セメント産業にASR由来のクロムが32ton投入されていると推計 	<ul style="list-style-type: none"> マテリアルフローの精緻化(商用レベルで回収可能な資源の賦存先の把握)
(4) 選好物質の濃縮および忌避物質の分離可能性に関する検討	<ul style="list-style-type: none"> 全体目標を満たす操業プロセス仕様とそれを実現するための課題を具体化し、解決及び事業化に向けたロードマップを作成 	<ul style="list-style-type: none"> 脆化と物理選別の組み合わせによって、CFRPを適正処理(電気集塵機に有害でない)し、鉄鋼電炉及び非鉄製錬向けの原料を回収するプロセス仕様を決定 コークス代替品からのガラスの分離が主な課題 	<ul style="list-style-type: none"> 回収した資源を安定的・効率的に融通するシステムの構築(コンソーシアムによるビジネスモデルの確立)

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 99 実証項目ごとの課題と想定される解決策

項目	本実証での課題	想定される解決策
(1)産物特性をコントロールするための非燃焼処理・破碎・選別条件に関する調査検討	■ (-)	■ (-)
(2)破碎・選別プロセスの方法や条件の違いによる産物特性の比較実証	<ul style="list-style-type: none"> ■ 加炭材の品位向上（固定炭素分の増加、総発熱量の増加、銅など忌避物質の分離） ■ 原燃料代替品の品位向上（総発熱量の増加、灰分の分離） ■ アルミ品位の高い産物の供給先確保 ■ 実投入を考慮した処理プロセスの改善（装置の摩耗、再生原料投入時の素材生産への影響） 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 解体・選別プロセスの改善 <ul style="list-style-type: none"> > ガラスの事前分離（解体手法の改善、ふるい分け） > 樹脂分の事前回収（水流選別等による選別精度向上） > 細銅線・鉄粉の分離（解体手法の改善、ふるい分け） ■ 新たな事業者との連携模索（アルミと若干の銅を需要する特殊銅製錬業者等を想定） ■ パイロット規模での影響評価及び採算性分析
(3)濃縮及び回収可能性に関する検討	■ マテリアルフローの精緻化（成分情報が不十分なことによる推計精度の低下）	<ul style="list-style-type: none"> ■ 素材生産プロセスにおけるマテリアルバランス分析 ■ 素材産業間の流通物に含まれる選好・忌避成分の分析
(4)選好物質の濃縮および忌避物質の分離可能性に関する検討	<ul style="list-style-type: none"> ■ ASRに混入する選好・忌避成分の事前選別 ■ 安定的かつ効率的に資源を融通するシステムの構築（安定的に事業を継続するためのビジネスモデルの開発） ■ 技術の横展開（ASR以外の難処理物の受入） 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 中間処理の高度化（解体・選別の精度を向上する要素技術の開発（LIBS、XRF、電磁ファインダー等）） ■ 投入物・回収物の規格化とプロセス認証及びこれらを効率的に融通するコンソーシアムの構築（産業間を超えた連携） ■ 他の難処理（かつ有用金属が含まれている可能性がある）廃棄物等での検証（例：低品位基板）

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

IV. まとめ

IV-1. 実証成果

1. CFRP含有ASR等の適正処理・再資源化の評価

本提案技術をCFRP含有ASRに適用することによって、CFRPを電気集塵機に悪影響を及ぼさない性状に加工することができ、適正処理が可能性であることがわかった。また、CFRP含有ASRに含まれる樹脂及び金属を、セメント向けのコークス代替品、鉄鋼電炉向け想定原料、非鉄製錬向け想定原料として再資源化できることが分かった。国内でASRを受け入れているセメント工場すべてに本提案技術を導入すると仮定した場合、金0.31kg、銅219t、鉄474tを製錬原料として回収できる可能性があるとして試算された。

2. セメント・鉄鋼電炉・非鉄製錬（銅等）における新たな選好・忌避物質のコントロール可能性の提示

本提案技術によって、セメント産業の忌避物資であるCFRPを適正処理でき、また水洗脱塩と組み合わせることによって、塩素を分離できると考えられる。また、ASRに含まれる金属の多くは鉄鋼電炉向け想定原料および非鉄製錬向け想定原料に分配されているため、金属中に含まれるクロムについても、一定度コントロールできる可能性がある。

鉄鋼電炉産業向けには、本提案技術によって選好物質である鉄を濃縮し、また忌避物質である塩素や銅を分離できる可能性がある。非鉄製錬産業向けには、乾式銅製錬向けの銅やアルミ製錬向けのアルミを濃縮できるほか、忌避物質である塩素をコントロールできる可能性がある。

3. 環境影響および事業性評価

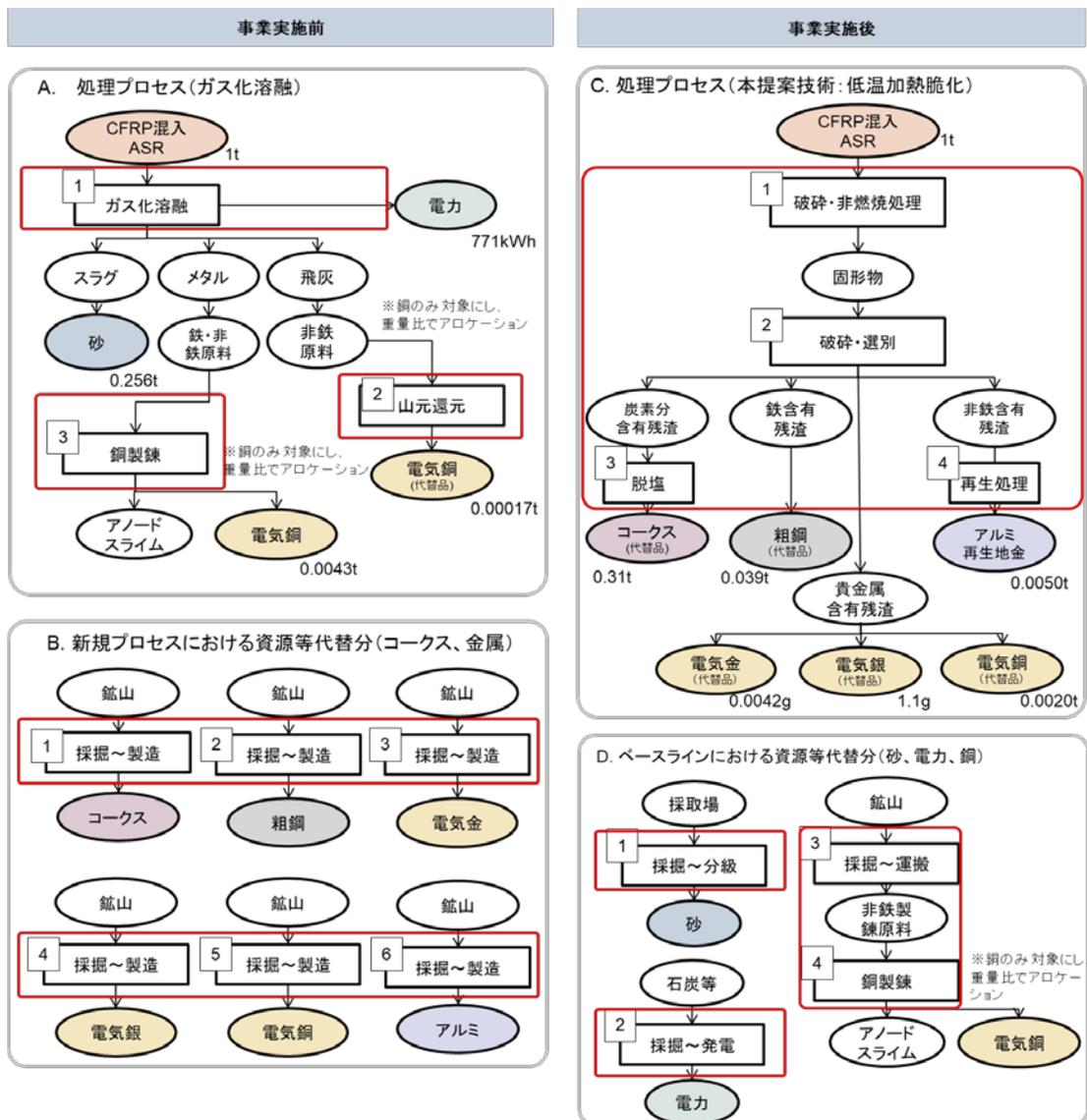
(1) LCA

① バウンダリーの設定

従来プロセス①（ガス化溶融）との温室効果ガス排出量の比較では、CFRP混入ASR 1tの処理、およびそこから得られるコークス代替品、製錬（金、銀、銅、鉄）原料、電力、砂の生産量を機能単位として設定した（図表 100）。

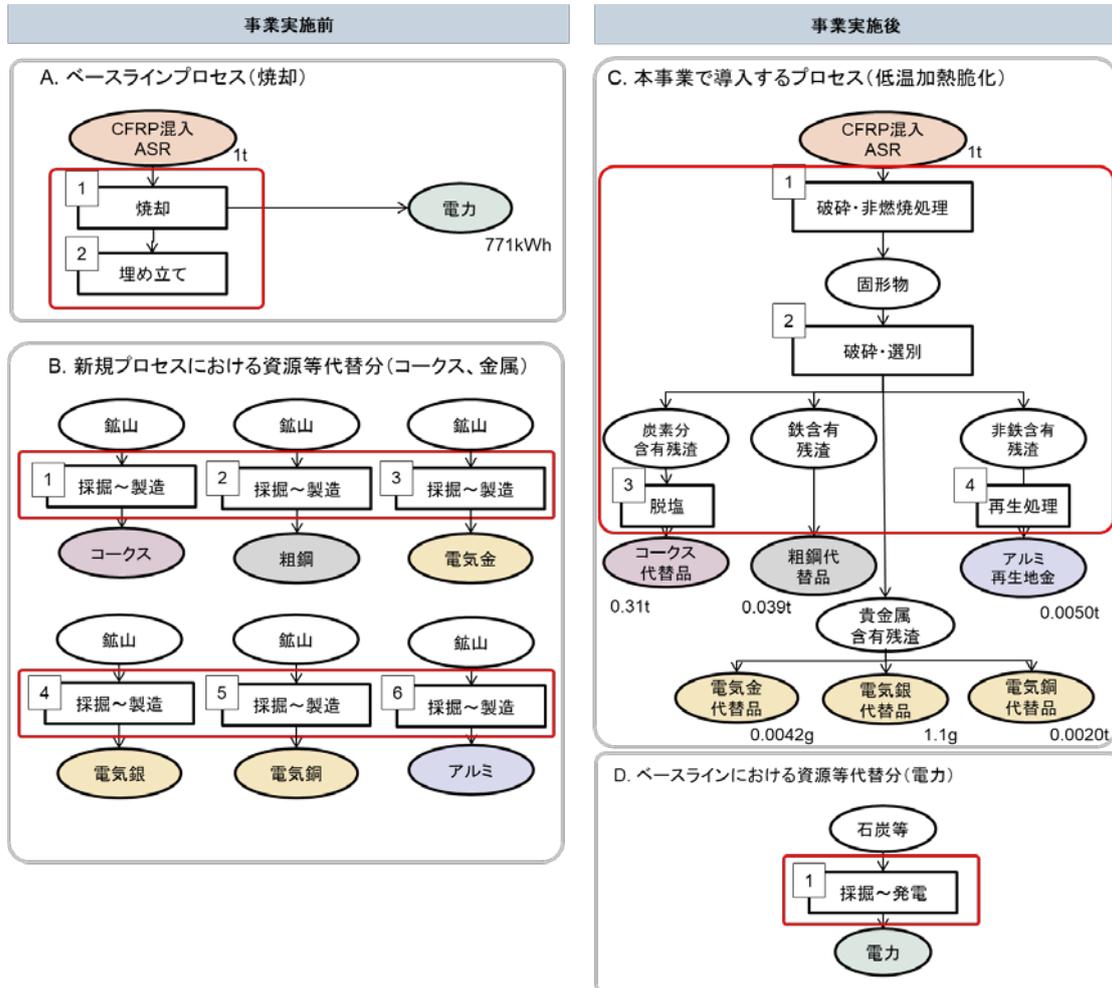
従来プロセス②（焼却）との温室効果ガス排出量の比較では、CFRP混入ASR 1tの処理、およびそこから得られるコークス代替品、製錬（金、銀、銅、鉄）原料、電力の生産量として設定した（図表 101）。

図表 100 LCAバウンダリー図（ガス化溶融・本事業提案プロセス）



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 101 LCAバウンダリー図 (焼却・本事業提案プロセス)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

② 計算根拠

従来プロセス1（ガス化溶融＋原料生産）と本事業提案プロセス（脆化＋選別＋原料生産＋発電）について、事業実施前及び事業実施後の計算根拠を図表102、図表103に示す。また、同様に従来プロセス2（焼却＋原料生産）と新規プロセス（脆化＋選別＋発電）の二酸化炭素排出量の算定結果について、事業実施前及び事業実施後の計算根拠を図表104、図表105に示す。

図表 102 従来プロセス1（ガス化溶融＋原料生産）と本事業提案プロセス（脆化＋選別＋原料生産＋発電）の二酸化炭素排出量の算定結果（事業実施前）

カテゴリ	NO	プロセス	活動量				排出原単位				排出量 (CO ₂ e-kg/t)
			参照番号	項目名	数値	単位	参照番号	原単位名	数値	単位	
A	1	ガス化溶融	A001	CFRP混入ASR 1 t 当たり処理に必要な電気使用量	320	kWh/機能単位	A002	電力1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kWh	156.2
			A003	CFRP混入ASR 1 t 当たり処理に必要なコークス使用量	170	kg/機能単位	A004	コークス1kg当たりのCO2排出量	3.170	kg-CO2/kg	538.9
			A005	CFRP混入ASR 1 t 当たり処理に必要なLPG使用量	7.6	Nm3/機能単位	A006	LPG1Nm3当たりのCO2排出量	0.007	kg-CO2/Nm3	0.0497
							A007	CFRP混入ASR1 t 当たりの焼却溶融におけるCO2排出量	1240	kg-CO2/機能単位	1240.0
	2	山元還元	A008	CFRP混入ASR 1 t 当たりの消費電力量(アロケーション後)	0.490	kWh/t-機能単位	A009	電力1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kWh	0.2
			A010	CFRP混入ASR 1 t 当たりの転炉ガス消費量(アロケーション後)	0.086	Nm3/t-機能単位	A011	転炉ガス1Nm3当たりのCO2排出量	1.568	kg-CO2/Nm3	0.1
	3	銅製錬	A012	機能単位当たり必要な電力使用量(アロケーション後)	0.004	kWh/t-機能単位	A013	電力1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kWh	0.0
			A014	機能単位当たり必要な石炭使用量(アロケーション後)	0.009	kg/t-機能単位	A015	1kgの石炭使用当たりCO2排出量	2.330	kg-CO2/kg	0.0
			A016	機能単位当たり必要なC重油使用量(アロケーション後)	0.204	L/t-機能単位	A017	1LのC重油使用当たりCO2排出量	3.000	kg-CO2/L	0.6
	合計										1936.1
カテゴリ	NO	プロセス	活動量				排出原単位				排出量 (CO ₂ e-kg/t)
			参照番号	項目名	数値	単位	参照番号	原単位名	数値	単位	
B	1	固形脆化物(コークス代替)	B001	CFRP混入ASR1t当たりの固形脆化物燃料の石炭代替分	0.3117168	t/t-機能単位	B002	石炭におけるCO2排出係数	2330	kg-CO2/t	726.300
	2	鉄回収(粗鋼代替)	B003	CFRP混入ASR1 t 当たりの鉄回収量	0.0393670	t/t-機能単位	B004	粗鋼製造1 t 当たりのCO2排出量	1.19	kg-CO2/t	0.047
	3	銅回収(電気銅代替)	B005	CFRP混入ASR1 t 当たりの銅回収量	0.0020299	t/t-機能単位	B006	電気銅1t製造当たりの電気使用量	3.67	kg-CO2/t	0.007
	4	金回収(電気金代替)	B007	CFRP混入ASR1 t 当たりの金回収量	0.000000004	t/t-機能単位	B008	電気金1t製造当たりの電気使用量	28	kg-CO2/t	0.000
	5	銀回収(電気銀代替)	B009	CFRP混入ASR1 t 当たりの銀回収量	0.0000011	t/t-機能単位	B010	電気銀1t製造当たりの電気使用量	26.8	kg-CO2/t	0.000
	6	アルミニウム回収	B011	CFRP混入ASR1 t 当たりのアルミニウム回収量	0.0049702	t/t-機能単位	B012	アルミニウム生産1 t 当たりのCO2排出量	9200	kg-CO2/t	45.726
	合計										772.081

図表 103 従来プロセス1（ガス化溶融+原料生産）と本事業提案プロセス（脆化+選別+原料生産+発電）の二酸化炭素排出量の算定結果（事業実施後）

NO	プロセス	活動量				排出原単位				排出量 (CO ₂ e-kg/t)
		参照番号	項目名	数値	単位	参照番号	原単位名	数値	単位	
1	粗破碎	C001	CFRP混入ASR1 t 当たり処理に必要な電力使用量	87.5	kwh/t-機能単位	C002	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	42.700
		C003	CFRP混入ASR1 t 当たり処理に必要な電力使用量	106.400	kwh-t-/機能単位	C004	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	51.923
	低温加熱脆化	C005	CFRP混入ASR1 t 当たり処理に必要な都市ガス使用量	40.000	Nm³/t-機能単位	C006	1Nm³当たりのCO2排出量	2.230	kg-CO2/Nm³	89.200
		C007	CFRP混入ASR1 t 当たりの脆化により燃焼するASR量	0.326	t/t-機能単位	C008	ASR（その他廃プラスチック類）の燃焼におけるCO2排出係数	2770	kg-CO2/t	903.261
2	磁力選別①	C009	CFRP混入ASR1t当たりの電力使用量	0.263	kwh/t-機能単位	C010	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	0.128
	磁力選別②	C011	CFRP混入ASR1 t 当たりの電力使用量	0.263	kwh/t-機能単位	C012	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	0.128
	篩い選別	C013	CFRP混入ASR1 t 当たりの電力使用量	1.610	kwh/t-機能単位	C014	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	0.786
	渦電流選別	C015	CFRP混入ASR1 t 当たりの電力使用量	1.120	kwh/t-機能単位	C016	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	0.547
	乾式比重選別①	C017	CFRP混入ASR1 t 当たりの電力使用量	0.807	kwh/t-機能単位	C018	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	0.394
	乾式比重選別②	C019	CFRP混入ASR1 t 当たりの電力使用量	2.080	kwh/t-機能単位	C020	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	1.015
3	脱塩	C021	CFRP混入ASR1 t 当たりの電力使用量	2.849	kwh/t-機能単位	C022	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	1.390
4	アルミ再生処理	C023	CFRP混入ASR1 t 当たりのアルミ回収量	0.0050	t/t-機能単位	C024	アルミニウム生産1 t 当たりのCO2排出量	310.0	kg-CO2/t	1.541
合計										1093.013
NO	プロセス	活動量				排出原単位				排出量 (CO ₂ e-kg/t)
		参照番号	項目名	数値	単位	参照番号	原単位名	数値	単位	
1	砂生産 (採掘～分級)	D001	従来プロセスで代替される砂を得るため必要な電気使用量	1.432	kwh/t-機能単位	D002	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	0.699
		D003	従来プロセスで代替される砂を得るため必要な軽油使用量	0.225	L/t-機能単位	D004	1L当たりのCO2排出量	2.580	kg-CO2/L	0.581
2	自家発電	D005	CFRP混入ASR1t当たりの発電量	771.395	kwh/t-機能単位	D006	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	376.441
3	銅採掘～運搬	D007	従来プロセスで得られる銅を得るため必要な電気使用量	9.964	kwh/t-機能単位	D008	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	4.862
		D009	従来プロセスで得られる銅を得るため必要なガソリン使用量	0.019461	L/t-機能単位	D010	1L当たりのCO2排出量	0.019	kg-CO2/L	0.000
		D011	従来プロセスで得られる銅を得るため必要な軽油使用量	0.721459	L/t-機能単位	D012	1L当たりのCO2排出量	2.580	kg-CO2/L	1.861
		D013	従来プロセスで得られる銅を得るため必要なA重油使用量	0.001978	L/t-機能単位	D014	1L当たりのCO2排出量	2.710	kg-CO2/L	0.005
		D015	従来プロセスで得られる銅を得るため必要なC重油使用量	0.533379	L/t-機能単位	D016	1L当たりのCO2排出量	3.000	kg-CO2/L	1.600
4	銅製錬	D017	従来プロセスで得られる銅を得るため必要な電力使用量（アロケーション後）	0.004256	kWh/t-機能単位	D018	1kWh電力当たりCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	0.002
		D019	従来プロセスで得られる銅を得るため必要な石炭使用量（アロケーション後）	0.008876	kg/t-機能単位	D020	1kgの石炭使用当たりCO2排出量	2.330	kg-CO2/kg	0.021
		D021	従来プロセスで得られる銅を得るため必要なC重油使用量（アロケーション後）	0.196593	L/t-機能単位	D022	1LのC重油使用当たりCO2排出量	3.000	kg-CO2/L	0.590
合計										386.662

図表 104 従来プロセス2（焼却+原料生産）と新規プロセス（脆化+選別+発電）
の二酸化炭素排出量の算定結果（事業実施前）

カテゴリ	NO	プロセス	活動量				排出原単位				排出量 (CO ₂ e-kg/t)
			参照番号	項目名	数値	単位	参照番号	原単位名	数値	単位	
A	1	焼却	A001	CFRP混入ASR 1 t 当たり処理に必要な電気使用量	205	kwh/機能単位	A002	電力1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	100.0
			A003	CFRP混入ASR 1 t 当たり処理に必要な重油使用量	0.340	L/機能単位	A004	重油1L当たりのCO2排出量	2.710	kg-CO2/kg	0.9
							A005	CFRP混入ASR1 t 当たりの焼却溶融におけるCO2排出量	1240	kg-CO2/機能単位	1240.0
	2	埋立	A006	CFRP混入ASR1tあたり埋立物の処理にかかる電力消費量	24.704	kwh/t-機能単位	A007	電力1kWh当たりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kwh	12.6
			A008	CFRP混入ASR1tあたり埋立物の処理にかかる軽油消費量	0.237	L/t-機能単位	A009	軽油1L当たりのCO2排出量	2.580	kg-CO2/L	0.6
	合計										1354.2

カテゴリ	NO	プロセス	活動量				排出原単位				排出量 (CO ₂ e-kg/t)
			参照番号	項目名	数値	単位	参照番号	原単位名	数値	単位	
B	1	固形脆化物(コークス代替)	B001	CFRP混入ASR1t当たりの固形脆化物燃料の石炭代替分	0.3117168	t/t-機能単位	B002	石炭におけるCO2排出係数	2330	kg-CO2/t	726.300
	2	鉄回収(粗鋼代替)	B003	CFRP混入ASR1 t 当たりの鉄回収量	0.0393670	t/t-機能単位	B004	粗鋼製造1 t 当たりのCO2排出量	1.19	kg-CO2/t	0.047
	3	銅回収(電気銅代替)	B005	CFRP混入ASR1 t 当たりの銅回収量	0.0020299	t/t-機能単位	B006	電気銅1t製造当たりの電気使用量	3.67	kg-CO2/t	0.007
	4	金回収(電気金代替)	B007	CFRP混入ASR1 t 当たりの金回収量	0.0000000	t/t-機能単位	B008	電気金1t製造当たりの電気使用量	28	kg-CO2/t	0.000
	5	銀回収(電気銀代替)	B009	CFRP混入ASR1 t 当たりの銀回収量	0.0000011	t/t-機能単位	B010	電気銀1t製造当たりの電気使用量	26.8	kg-CO2/t	0.000
	6	アルミニウム生産	B011	CFRP混入ASR1 t 当たりのアルミニウム回収量	0.0049702	t/t-機能単位	B012	アルミニウム生産1 t 当たりのCO2排出量	9200	kg-CO2/t	45.726
	合計										772.081

図表 105 従来プロセス2（焼却＋原料生産）と新規プロセス（脆化＋選別＋発電）の二酸化炭素排出量の算定結果（事業実施後）

カテゴリ	NO	プロセス	活動量				排出原単位				排出量 (CO ₂ e-kg/t)
			参照番号	項目名	数値	単位	参照番号	原単位名	数値	単位	
C	1	粗破碎	C001	CFRP混入ASR1 t 当たり処理に必要な電力使用量	87.5	kwh/t-機能単位	C002	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	42.700
		低温加熱脆化	C003	CFRP混入ASR1 t 当たり処理に必要な電力使用量	106.400	kwh-t-/機能単位	C004	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	51.923
			C005	CFRP混入ASR1 t 当たり処理に必要な都市ガス使用量	40.000	Nm ³ /t-機能単位	C006	1Nm ³ 当たりのCO2排出量	2.230	kg-CO2/Nm ³	89.200
			C007	CFRP混入ASR1 t 当たりの脆化により燃焼するASR量	0.326	t/t-機能単位	C008	ASR（その他廃プラスチック類）の燃焼におけるCO2排出係数	2770	kg-CO2/t	903.261
	2	磁力選別①	C009	CFRP混入ASR1t当たりの電力使用量	0.263	kwh/t-機能単位	C010	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	0.128
		磁力選別②	C011	CFRP混入ASR1 t 当たりの電力使用量	0.263	kwh/t-機能単位	C012	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	0.128
		篩い選別	C013	CFRP混入ASR1 t 当たりの電力使用量	1.610	kwh/t-機能単位	C014	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	0.786
		渦電流選別	C015	CFRP混入ASR1 t 当たりの電力使用量	1.120	kwh/t-機能単位	C016	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	0.547
		乾式比重選別①	C017	CFRP混入ASR1 t 当たりの電力使用量	0.807	kwh/t-機能単位	C018	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	0.394
		乾式比重選別②	C019	CFRP混入ASR1 t 当たりの電力使用量	2.080	kwh/t-機能単位	C020	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	1.015
	3	脱塩	C021	CFRP混入ASR1 t 当たりの電力使用量	2.849	kwh/t-機能単位	C022	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh	1.390
	4	アルミ再生処理	C023	CFRP混入ASR1 t 当たりのアルミ回収量	0.0050	t/t-機能単位	C024	アルミニウム生産1 t 当たりのCO2排出量	310.0	kg-CO2/t	1.541
		合計									1093.013
	D	1	自家発電	D005	CFRP混入ASR1t当たりの発電量	771.395	kwh/t-機能単位	D006	1kWh当たりのCO2排出量	0.488	kg-CO2/kwh
		合計								376.441	

③ 計算結果

②の算出根拠を踏まえて計算を行った結果、従来プロセス1（ガス化溶融＋原料生産）と比較して、本事業提案プロセス（脆化＋選別＋原料生産＋発電）では、二酸化炭素排出量を1.2t削減できると試算された（図表 106）。また、従来プロセス2（焼却＋原料生産）と比較した本事業提案プロセス（脆化＋選別＋発電）では、二酸化炭素排出量を0.6t削減できると試算された（図表 107）。

上記の算出結果には、ASRの燃焼によって発生する二酸化炭素も含まれている。そこで、燃焼によって発生する二酸化炭素を除いた結果、従来プロセス（ガス化溶融、焼却処理）と比較して、処理プロセスの省エネルギー化や資源回収による効果により、ガス化溶融と比較して0.89t、焼却処理と比較して0.32tのエネルギー起源CO₂を低減できると試算された（図表 108）。

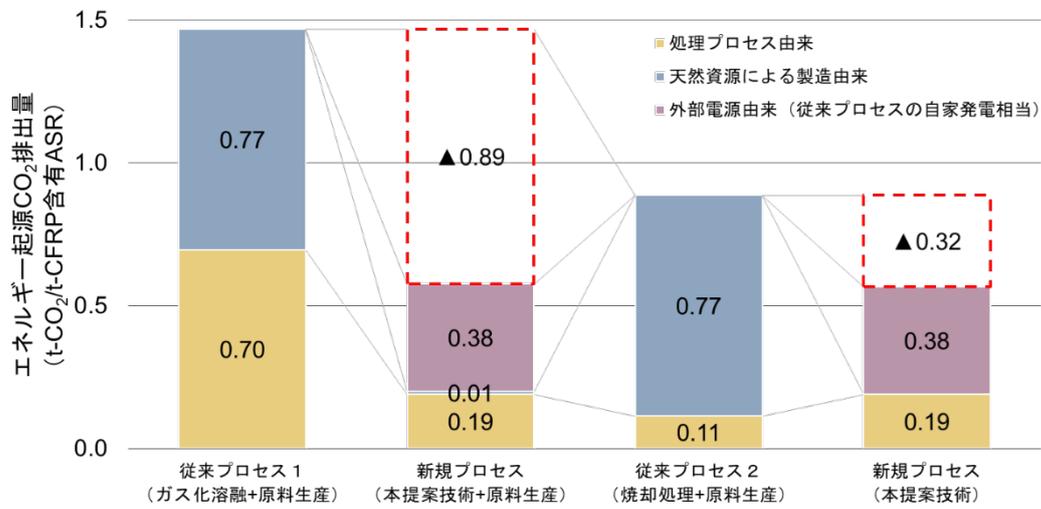
図表 106 従来プロセス1（ガス化溶融＋原料生産）と比較した本事業提案プロセス（脆化＋選別＋原料生産＋発電）における二酸化炭素排出削減効果

カテゴリ	項目	排出量 (CO ₂ e-kg/t)
A	現状(ベースライン)の排出量	1,936.1190
B	事業実施時の代替分	772.0806
C	事業実施時の排出量	1,093.0126
D	現状(ベースライン)の代替分	386.6623
	CO₂削減効果 (A+B) -(C+D)	1,228.5247

図表 107 従来プロセス2（焼却＋原料生産）と比較した本事業提案プロセス（脆化＋選別＋発電）における二酸化炭素排出削減効果

カテゴリ	項目	排出量 (CO ₂ e-kg/t)
A	現状(ベースライン)の排出量	1,354.2222
B	事業実施時の代替分	772.0806
C	事業実施時の排出量	1,093.0126
D	現状(ベースライン)の代替分	376.4409
	CO₂削減効果 (A+B) -(C+D)	656.8493

図表 108 従来プロセスと新規プロセスにおけるエネルギー起源の二酸化炭素排出削減効果



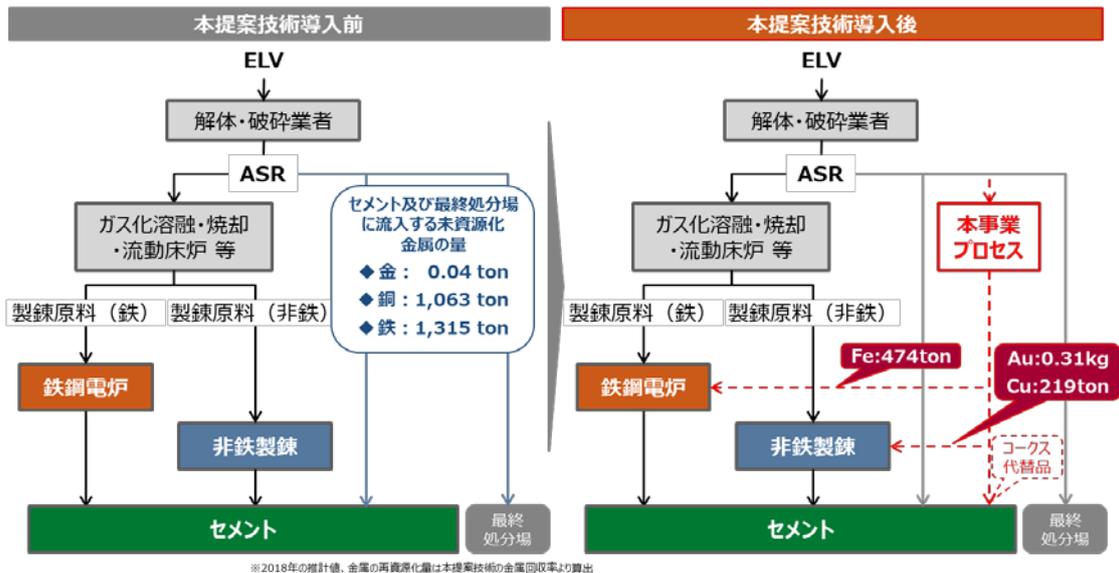
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(注) エネルギー起源のCO2のみを対象 (ASRの燃焼によるCO2排出量はバウンダリー外)、「天然資源による製造由来」は貴金属・銅製錬での金・銀・銅、鉄鋼電炉での鉄、アルミ製錬でのアルミおよび砂の生産を想定

(2) マテリアルフロー改善効果

国内においてASRを再資源化しているセメント工場すべてに、本提案技術を導入することによって、現在はセメントや最終処分場に投入されているASR中の未資源化物質（金0.04t、銅1,063t、鉄1,315t）のうち、金0.31kg、銅219t、鉄474tを製錬原料として回収できる可能性がある試算された（図表 109）。

図表 109 本提案技術によるマテリアルフロー改善効果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(3) 事業性評価

本提案技術では、金属や原燃料代替品の回収による高い収益性を期待できる。特に、非鉄製錬向け想定原料や鉄鋼電炉向け想定原料は有価で販売できる可能性が高く、収入の増加が期待できる。また、発熱量はあまり高くないものの、一定度の原燃料代替品として利用できる可能性があるため、従来と比較して原燃料の調達コストを削減できる可能性がある。他方、熔融や焼却と比較して、本提案技術は時間当たりの処理量が少ないため、規模による経済性を受けられないのが課題である（図表 110）。

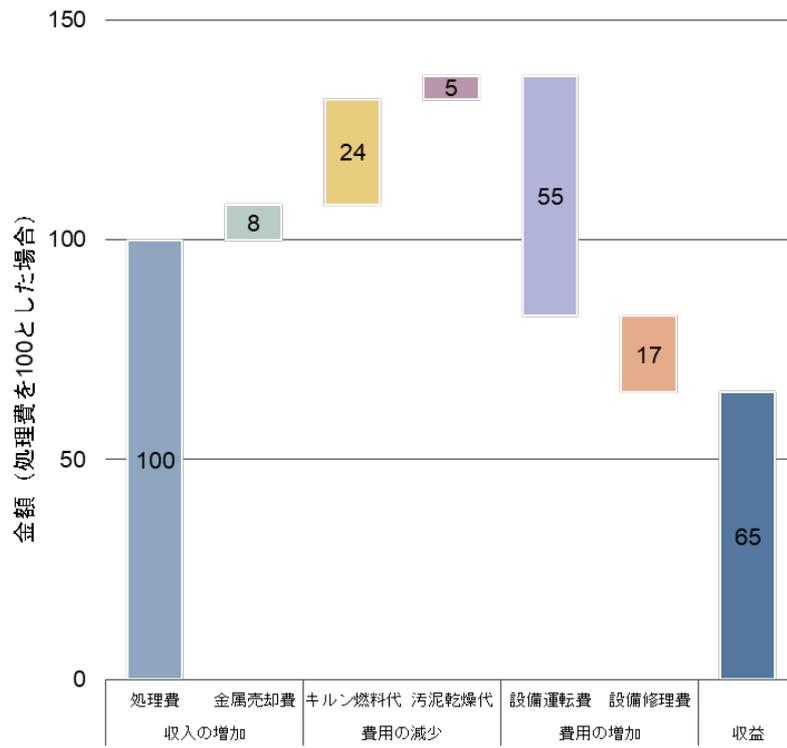
そこで、ASR処理費用や金属の売却益による収入の増加を想定し、また、コークス代替品の回収によるキルン燃料代の削減や排熱の活用による汚泥乾燥費用の削減によるコストの削減効果をもとに経済性分析を行った。その結果、設備運転費や修理費によって新たに発生する費用を考慮しても、ASRの処理費用比で65%程度の収益を見込めると試算された（図表 111）。

図表 110 従来プロセスと新規プロセスの経済性に関連した要素の比較

	金属売却益	原燃料代削減	熱利用 (排熱による発電を含む)
熔融	△	×	○
焼却	×	×	○
本提案 技術	○	○	△

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 111 本提案プロセスによる経済性分析結果



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

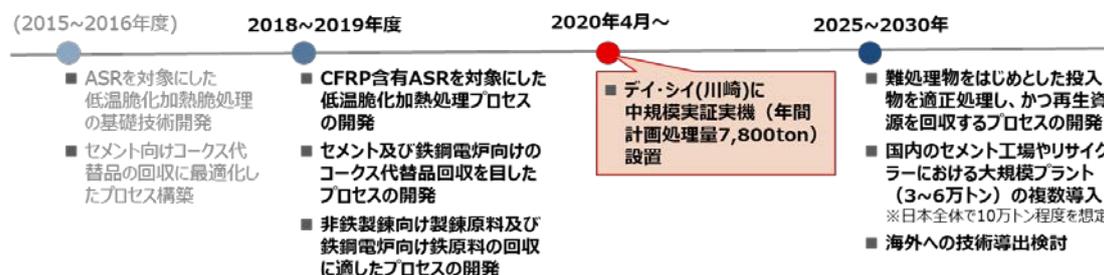
IV-2. 今後の課題

1. 全体の事業構想（ロードマップ）

本事業によって、CFRP含有ASRを対象に、CFRPを適正に処理しながら、セメント産業向けのコークス代替品や鉄鋼電炉向けの製錬原料、乾式銅製錬向けの製錬原料を回収する脆化処理、破碎処理及び選別プロセスを開発した。2020年度にデイ・シイ（川崎）に中規模実証プラントを設置する予定であり、本事業成果や中規模実証を踏まえてプラントの最適な操業条件を検討し、2021年度以降に商用運転の開始を見込んでいる。その後、ASRやSRのみでなく、その他の難処理物についても適正処理・資源回収を行うためのプロセスを検討するほか、3～6万トン規模の大規模プラントの導入、海外への技術導入を検討している（図表 112）。

低温下での脆化性や固定炭素量、総発熱量、有用金属の含有量及び忌避物資の含有量を考慮すると、SRやASRのほかにも低品位基板や使用済みの小型家電に対して本提案技術が有効である可能性が高いと考えられる（図表 113）。そこで、今後は低品位基板や使用済み小型家電を中心に、本提案技術の適用可能性を検証し、難処理物の適正処理と未資源物質の回収を進めていく。

図表 112 事業化に向けた取り組み



（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 113 処理対象物の拡大に関する検討

パラメーター	本実証での対象物		今後取り組む可能性がある対象物			
	ASR	CFRP含有ASR	低品位基板	使用済み家電	使用済み小型家電	一般廃棄物(不燃残渣)
低温下での脆化性	高	高	中?	中?	中?	中?
固定炭素量	低	中	低?	中?	中?	低?
発熱量	低	低	中?	低?	低?	低?
有用金属含有量	中	中	中~高?	中?	中~高?	中~高?
セメントにおける忌避成分含有量	中 (Cl)	中 (Cl, CFRP)	中?	中~高?	中~高?	低~中?
非鉄製錬における忌避成分含有量	低	低	低?	低?	低?	低~中?
鉄鋼電炉における忌避成分含有量	中 (Cu)	中 (Cu)	高? (Al·Cu·Sn)	高? (Al·Cu·Sn)	高? (Cu·Sn)	中~高? (Al·Cu)
本実証技術の有効性	○	○	○	△	○	△

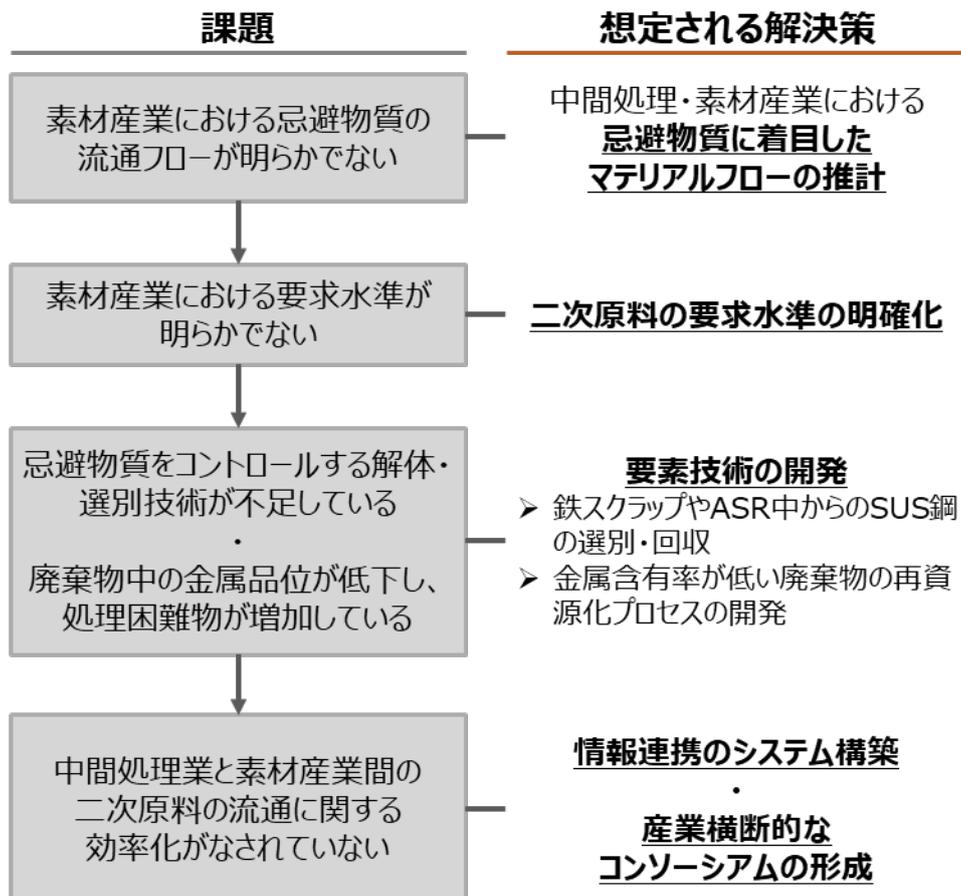
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

2. 事業化に向けて解決すべき課題

本提案技術はセメントキルン等の工業炉における忌避物質であるCFRPの適正処理・再資源化を実現するものであるが、CFRP以外にも各産業における忌避物質が存在する。素材産業間のマテリアルフロー分析は行われているものの、選好物質に着目した事例が多く、忌避物質のフローは明らかになっていない。例えば、本事業でも、セメント産業における忌避物質であるクロムがASR由来で混入している可能性が示唆されたが、一方でその他の混入源は明らかになっていない。そこで、今後は忌避物質にも注目したマテリアルフロー分析を行う必要がある。

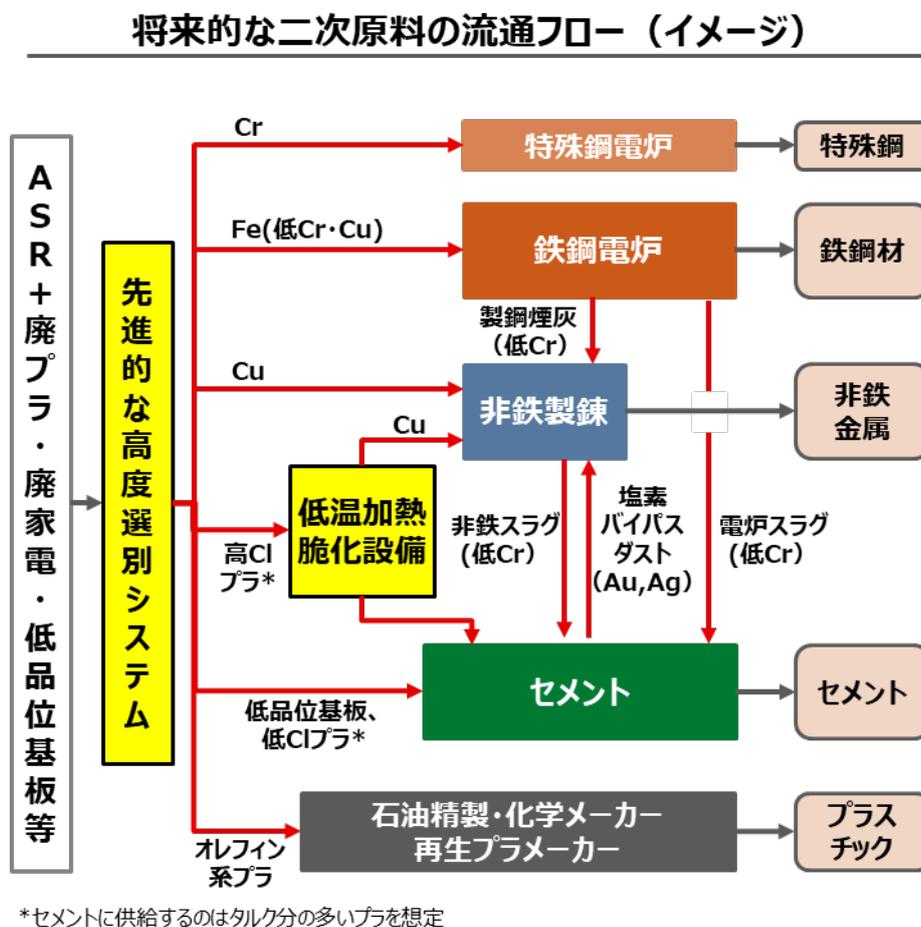
また、本事業において供給を想定した産物については二次原料の要求水準を明らかにすることができたが、多くの二次原料の要求水準は明らかになっていない。そこで、素材産業ごとの要求水準を明らかにしたうえで、これを満たすような要素技術の開発が必要になる。さらに、開発した技術によって回収した二次原料を、経済性を担保するためにも効率的に融通する必要がある。そこで、中間処理業者と素材産業間といった産業間を超えた情報連携や、これを実現するためのコンソーシアムの形成が必要になると考えられる（図表 114）。

図表 114 事業化に向けた課題と想定される解決策



本提案技術はASRのような資源価値の低い廃棄物から、鉄鋼電炉向けの想定原料や乾式銅製錬向けの非鉄製錬原料を回収できるものの、有用金属の回収率やクロム、ガラスの分離性について課題を有している。そこで、ASRが発生する前段で高度な解体・破碎・選別等の処理を行い、各産業に向けて選好物質を濃縮し、また忌避物資をコントロールしたうえで、二次原料を供給していくことが今後必要になる。

図表 115 本実証プロセスを含めた将来的な二次原料の流通フロー（イメージ）



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(以上)

環境省平成31年度省CO2型リサイクル等設備技術実証事業
CFRP含有ASR等の非燃焼処理および事業者間連携による
貴金属等回収・再資源化実証

報告書

令和2年2月28日

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：環境・エネルギー部 清水・迫田・園原・千賀）

※無許可の転載・掲載を禁じます。