

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

平成31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・再資源化という観点では、325℃程度の脆化処理を施すことで、CFRP 含有 ASR の適正処理、また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ことがわかった。また、ハンマーミル等の破碎では炭素繊維が綿状になってしまうが、脆化処理後の脆化物を炭素繊維とそれ以外に選別した後、各々を最適な破碎機で処理することで、綿状化の防止、効率的な選別を両立できる可能性がある。鉄鋼電炉向けという観点では、コークス代替品として利用するためには、鉄鋼電炉における忌避成分（主に銅）の分離性を向上させ、また加炭材や微粉炭に準じた粒度、嵩比重にする必要があることもわかった。非鉄成分の分離性を向上させるため、破碎条件等を見直していく必要がある。従来は耐摩耗性の観点からハンマーミルを使用していたが、細粒分の割合を増加させるためには破碎条件の再検討が必要となる。また、鉄鋼電炉向けとするためには、ガラス分を取り除くための選別技術、選別条件、また条件設定を判断するための粒度分布や成分分布（分配状況）を確認する必要がある。

非鉄製錬向け想定原料の回収という観点では、選別後に得られた重産物に有用金属（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、シリカ、アルミの含有は許容量であると見込まれる。重産物には、当初回収を想定していた金、銀、銅に加えて、白金族等が含有しており、ASR 等に白金族等が未資源化物質として賦存していることが明らかになった。本技術を用いることによって、ASR 等に希釈、拡散されている白金族等を新たに回収できる可能性がみられた。白金族の回収が可能となった場合、採算性の向上にも寄与するものと見込まれる。

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 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 not only 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 obtained materials as substitutes of cokes for the cement industry by applying embrittlement treatment at 325 degrees C. It is required that the cotton-like carbon fiber generated in the crushing process by hammer mill should be prevented by optimizing crushing process for effective sorting process. It, recycled materials as substitutes of cokes in steel electric furnaces, is necessary to improve the separability of the repellent component (mainly copper) and to satisfy the standard of particle size and specific gravity for recarburizer or pulverized coal. Also, it is necessary to confirm the sorting technologies for removing glass content, sorting condition, particle size and component distribution for evaluating condition setting. The concentration of useful metals (especially copper) was confirmed in heavy products obtained after sorting, which is possible to utilize as a raw material equivalent to a copper residue in nonferrous smelting. It is obvious that heavy products contain platinum group metals (PGMs) in addition to gold, silver, and copper that were originally expected to be collected. Thus this technology has the potential to recover PGMs.

目次

I.	背景と目的	1
II.	事業実施内容	3
II-1.	事業の全体概要	3
II-2.	各実施事項	4
1.	サンプリング及び成分分析	4
2.	忌避・選好物質のマテリアルバランス及びフロー推計	8
3.	技術課題に関する検討・分析	10
4.	技術実証（脆化試験・脆化物の受入試験）	11
5.	報告書とりまとめ・研究会の運営	14
III.	結果及び考察	15
III-1.	サンプリング及び成分分析	15
1.	非燃焼処理	15
2.	破碎処理結果	18
3.	選別処理結果	21
4.	回収物の製錬原料及びコークス代替品としての評価	28
5.	課題と考察	37
III-2.	忌避・選好物質のマテリアルバランス及びフロー推計	38
1.	処理フローの構築	38
2.	処理後産物・廃棄物発生量の推計	40
3.	未資源化物資賦存量の推計	44
III-3.	技術実証及び技術課題に関する検討・分析	50
1.	コークス代替品：セメント産業向け	50
2.	コークス代替品：鉄鋼電炉向け	51
3.	非鉄製錬向け想定原料	51
IV.	まとめ	53
IV-1.	今年度の成果	53
1.	CFRP含有ASR等の適正処理・再資源化の評価	53
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	54
3.	環境影響及び事業性評価	55
IV-2.	今後の課題	65
1.	今後の事業化への見通し	65
2.	二年目での実証予定	67

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 総務部長代理 兼 購買課長
中山 佳都 東京製鐵株式会社 総務部購買課 係長代理
佐藤 義和 東邦亜鉛株式会社 亜鉛・鉛事業本部 営業部営業部長
環境・リサイクル事業部 営業部長
橋田 幸弘 東邦亜鉛株式会社 亜鉛・鉛事業本部 営業部 課長
長谷部 信之 フェニックスメタル株式会社 代表取締役社長
佐藤 正彦 フェニックスメタル株式会社 工場長
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
今井 佳昭 リバーホールディングス株式会社 執行役員 新事業開発部 部長
水口 剛志 リバーホールディングス株式会社 技術部長
萩原 慎一郎 リバーホールディングス株式会社 技術部 技術開発課長

（事務局）

生田 考 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
鈴木 涼 太平洋セメント株式会社 環境事業部 営業企画グループ
ナッチャヤー 太平洋セメント株式会社 環境事業部 営業企画グループ
海外事業チーム
高野 博幸 太平洋セメント株式会社 中央研究所 第3研究部 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
分離技術チームリーダー
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
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 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

園原 惇史 環境・エネルギー部 研究員
 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。使用済み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、処理破碎（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 Redidue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）されたあとの残渣を指す。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。樹脂を炭素繊維によって強化したものである。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にも使用される。
非燃焼処理	本報告書では、物質を燃焼させることなく200～500℃程度で分解させることを示す。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、複数の物質や成分が混在うち、任意の産業や製造プロセスにとって欲する物質・成分を指す。
忌避物質・成分	本報告書では、任意の産業や製造プロセスにおいて、製品の品質や製造プロセス及び製造装置等に悪影響を与える物質・成分を指す。
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」と称されることもある。

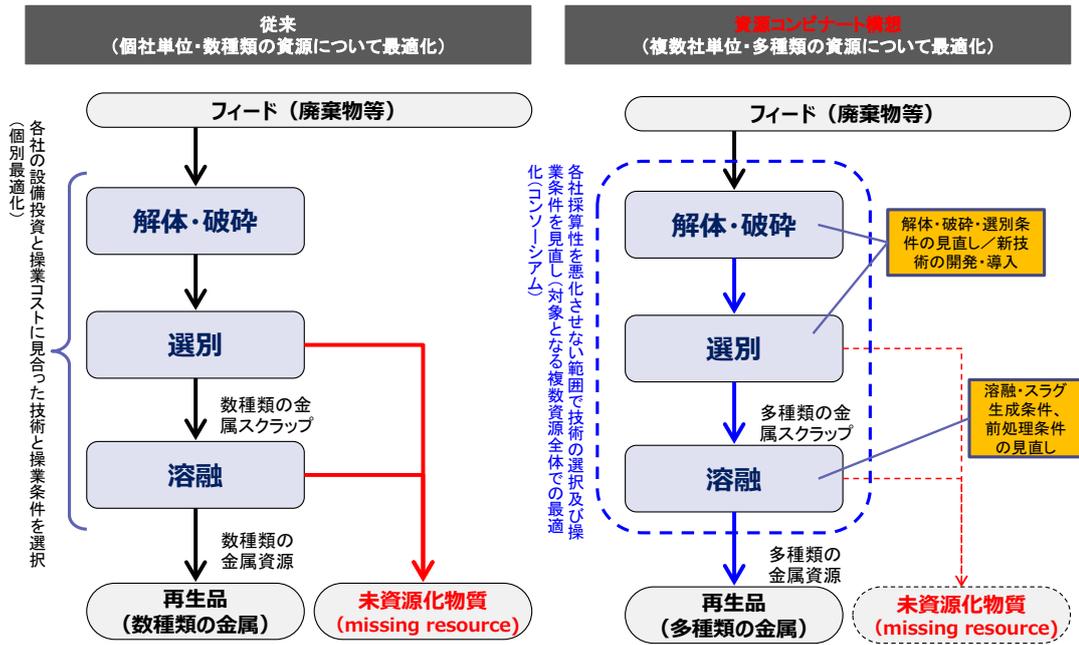
I. 背景と目的

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。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、鉄鋼加炭材等としての再資源化を目指した（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等の受容性も高める）。

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るエネルギー起源CO2排出量も抑制できる処理プロセスの構築を目指した。

図表 1 本技術実証において目標とする処理プロセス



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

II. 事業実施内容

II-1. 事業の全体概要

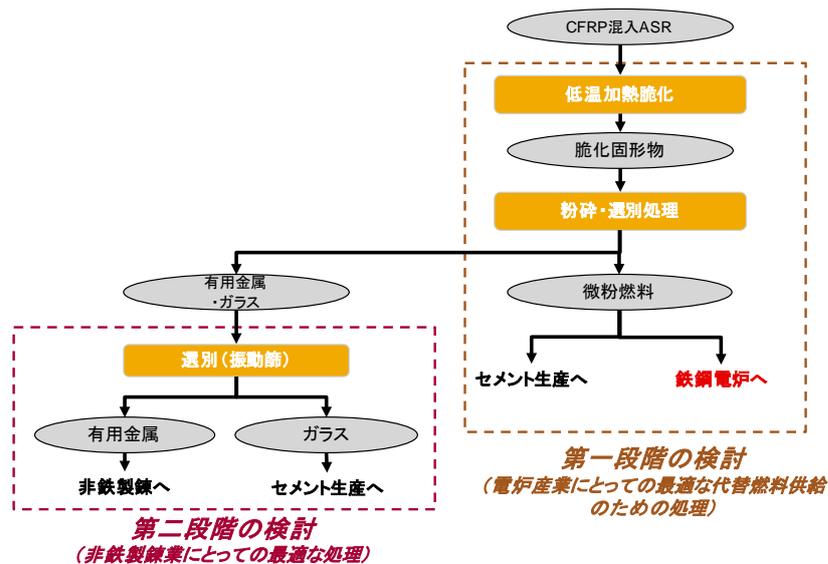
本事業では、セメント事業者及び鉄鋼電炉事業者におけるCFRP含有ASR等の受容性を高める事前処理（非燃焼処理＋選別）、またコークス代替品（微粉炭及び鉄鋼電炉加炭材）としての再資源化、貴金属等製錬原料としての再資源化について実証を行う。事前処理では、セメント事業者や鉄鋼電炉事業者が受容可能な性状まで処理できるか、また選別ではセメント事業者や鉄鋼電炉事業者にとって忌避物質となる成分の十分な分離、また貴金属等製錬原料として売却可能なほどに濃集させることができるかを検証した。

初年度（平成30年度）は、特にCFRP含有ASR等を事前処理したものの性状把握、セメント事業者や鉄鋼電炉事業者の受容性可能性の評価、事前処理条件の具体化、また選別プロセスの仕様案を検討した。

前掲目的を念頭に置きつつ、本実証事業（2か年全体）のゴールとしては、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及び製錬原料として供給するための最適プロセス仕様の具体化をゴールとする。

初年度（平成30年度）は、特にセメント・鉄鋼電炉両産業向けに適した事前処理条件（処理温度、炉内での反応を効率化させるための資材添加量等）の具体化及び課題の提示をゴールとした。

図表 2 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

II-2. 各実施事項

1. サンプルング及び成分分析

忌避物質等を含むSR（ASR相当と仮定）について、SR単体及びSRにCFRP、木くず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の利用可能性評価を行うため、成分分析（金属、ハロゲン成分等）及び性状分析（熱量、固定炭素量、含水率、粒度分布、嵩密度）を行った。

（1）試料の調製

本実証における投入物の組成は、SR100%に加え、SR80%+CFRP20%、SR80%+CFRP10%+木屑10%の3水準の試料を調製した（図表 3）。尚、本技術実証では、ASR相当としてSRを対象に処理及び分析を行った。対象のSRはリサイクラーより入手した。SRの母材は主に洗濯機や冷蔵庫などの家電や、自動販売機等である。

CFRPは一般社団法人日本自動車工業会より入手した。実際のセメント製造プロセスにおいては、飛灰中にASR由来とみられる粒径数mm～数十mmのCFRPが微量に混入している。そこで、入手したCFRPをあらかじめ5～10mm程度に破碎し、SR中に混ぜて試料を調製した。自動車業界へのヒアリングの結果、ASR中に最大20%程度CFRPが混入する可能性があるとのことであった。短期的にASR中にCFRPが20%含有される可能性が低い、混入しうるCFRPの最大値を想定することで、混入量が20%に満たない際にも適切な処理が可能という仮定のもと、本実証ではCFRP含有量20%の試料を調製した。

木屑は廃棄物処理企業より入手した。過去に太平洋セメント株式会社が実施した実証¹において、SRとともに木屑を投入することによって残存発熱量が増加し、樹脂がタール状になるのを抑制することで単体分離性の向上に寄与した。そこで、本実証でも木屑を添加した試料を1水準調製した。

これら各投入物の性状については図表 4に、粒度分布については図表 5に示す。

図表 3 本実証における投入物組成

水準	主成分	副成分
1	SR100%	-
2	SR80%	CFRP20%
3	SR80%	CFRP10%+木屑10%

¹ 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」（2017年3月）

図表 4 各投入物の性状

投入物	水分	高密度	工業分析			総発熱量
			揮発分	固定炭素	灰分	
	(wt%)	(t/m ³)	(wt%)			(kcal/kg)
SR	5.5	0.25	69.2	5.8	25.0	6,340
CFRP	0.6	0.40	27.8	64.8	7.4	7,060
木屑	42.6	0.18	78.9	17.7	3.4	4,520

図表 5 各投入物の粒度分布

投入物	粒度分布							
	<0.5mm	0.5-1mm	1-2mm	2-5mm	5-10mm	10-20mm	20-30mm	30mm<
	(wt%)							
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) 産物の分析手法

非燃焼処理・破砕後の産物について、粒度分布を計測した。また、破砕処理後の産物に関しては、工業分析（揮発分、固定炭素分、灰分）、発熱量分析、ハロゲン及び金属成分の分析も行った。尚、非燃焼処理条件について図表 6に、破砕処理条件について図表 7に示す。

その後、図表 8に示す処理プロセスによって回収した産物は、想定する再生原料の供給先ごとに4水準の分析試料を調製した。すべての分析試料において水分量及び一部の金属（金、銀、パラジウム、銅、アルミニウム）成分の分析を行ったが、その他の分析においては分析試料ごとに優先順位をつけて実施した（図表 9）。

まず、磁着物1と磁着物2を重量比によって併合し、電炉向け想定原料を調製した。鉄鋼電炉向け想定原料では、選好元素にあたる鉄及び忌避元素にあたるハロゲンの成分分析を実施した。また、電炉投入時には固定炭素分が多く、発熱量が大きいことが望ましいため、工業分析と発熱量の計測を実施した。

つぎに、細粒（<0.3mm）、粗粒（>5mm）、非導電産物及び軽産物1を重量比によって併合し、コークス代替品を調製した。鉄鋼電炉及びセメントキルンに投入する際の忌避元素であるハロゲンを分析した。また、固定炭素分や発熱量が多いことが望ましいため、工業分析及び発熱量の計測を実施した。

また、軽産物2を回収し、セメント向け想定原料とした。セメント向け想定原料としてはガラス分を濃集することを目指し、ケイ素の成分分析を実施した。

最後に、重産物2を回収し、非鉄製錬向け想定原料とした。非鉄製錬向け想定原料では図表中のすべての有用金属の成分分析を実施したほか、ケイ素も分析対象にした。これは、非鉄製錬においてガラス分が増加することによりスラグの

発生量が増加し、原単位が低下してしまう。そこで、軽産物2にガラス分が分配されていることを確認するためにも、ケイ素の成分分析を実施した。

図表 6 非燃焼処理条件

項目	実施条件
実施場所	広島ガステクノ・サービス
実施装置	アントラーキルン（試験機）
非燃焼処理温度	350℃、450℃
原料投入量	各水準につき30kg/h
原料回収量	各水準につき12～17kg/h

図表 7 破碎処理条件

項目	実施条件
実施場所	御池鐵工所
実施装置	スイングハンマー式破碎機
スクリーン径	Φ8mm

図表 8 本実証における選別プロセスと想定される回収物



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 9 各分析試料における分析項目一覧

分析試料名	工業 分析	発熱量	ハロゲン (Cl, F, Br)	成分分析						
				Au	Ag	Pd	Cu	Al	Fe	Si
非燃焼処理後回収物	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
選 別 後 回 収 物	電炉向け 想定原料	○	○	○	○	○	○	○	○	-
	コークス 代替品	○	○	○	○	○	○	○	-	-
	セメント向け 想定原料	-	-	-	○	○	○	○	○	-
	非鉄製錬向け 想定原料	-	-	-	○	○	○	○	○	○

2. 忌避・選好物質のマテリアルバランス及びフロー推計

(1) ASR

本推計はASR処理実体及び未資源化物質の賦存量を把握し、ASR中から再資源化の可能性がある資源を明らかにすることを目的に実施した。まず、ASRの発生量（全国）、ASR処理後の金属製錬原料・セメント原料・最終処分の発生量、ASR由来の製錬スラグの発生量を推計した。次に、これら物質の成分情報を調査し、有用資源量を推計した。本調査で推計の対象とする未利用資源は、金、銀、パラジウム及び銅である。また、本実証で適切に処理することが求められるCFRPについて、将来的にASR処理施設が受け入れうる混入量の推計も行った。未利用資源（金、銀、パラジウム、銅）の推計は2017年度、CFRPの推計は2029年度である。

マクロ的な発生量を推計する際には、文献及び既存の統計調査より情報収集を実施した（経済産業省・環境省、自動車リサイクル法の施行状況等）。また、各処理施設からのASR処理後産物の発生量は、既存の論文やASR処理に関する施設活用率から推計を行った。ASRやASR処理後産物の成分情報に関しても、既往文献より情報収集を実施したほか、一部データが不足するものに関しては前段で実施した成分分析結果を使用した。また、上記で入手が困難な情報に関しては、金属リサイクラー、電炉事業者（普通鋼）及び非鉄製錬業者へのヒアリング／研究会での意見交換を行い、定性的・定量的な情報収集を行うことで按分値等を設定し、推計を行った。

以上の調査によって得られた情報を整理し、我が国のASR処理における未資源化物質の賦存量を推計した。また、未資源化物質賦存量の推計結果を踏まえ、各元素・物質のマテリアルフロー図を作成した。

(2) 鉄スクラップ

本推計は一般廃棄物及び産業廃棄物由来の鉄スクラップの処理実体及びセメントの忌避物質であるクロムの含有量を把握し、鉄スクラップからステンレス鋼を選別することによる特殊鋼電炉へのクロムの供給可能性を明らかにすることが目的である。

まず、一般廃棄物由来のスクラップの発生量、中間処理後の鉄スクラップ発生量、鉄鋼スラグ（転炉、電炉）発生量、製鋼煙灰発生量、非鉄スラグ発生量の推計を実施した。また、これら物質におけるクロムの成分情報を調査し、クロムの混入量を推計した。推計は統計値に基づき、2016年度で行った。

マクロ的な発生量を推計する際には、文献及び既存の統計調査より情報収集を実施した（環境省、一般廃棄物処理実態調査結果等）。また、鉄スクラップや鉄鋼スラグ、製鋼煙灰、非鉄スラグ、焼却灰中のクロムの成分情報に関しても、既往文献より情報を整理した。既往文献で入手が困難な情報に関しては、金属リサ

イクラ、電炉事業者（普通鋼）及び非鉄製錬業者へのヒアリング／研究会での意見交換を行い、定性的・定量的な情報収集を行うことで按分値等を設定し、推計を行った。

以上の調査によって得られた情報を整理し、我が国の鉄スクラップ処理におけるクロム混入量を推計した。また、クロム混入量の推計結果を踏まえ、マテリアルフロー図を作成した。

3. 技術課題に関する検討・分析

前掲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、セメント産業及び鉄鋼電炉産業におけるコークス代替品、非鉄製錬（乾式銅製錬）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の未処理率と処理率を向上させるための温度・処理時間条件の調整等や粒度、固定炭素量、含水率及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及び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物に加え、製鉄電炉向け想定原料及びセメント向け想定原料を回収し、それぞれ製鉄原料、セメント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。

4. 技術実証（脆化試験・脆化物の受入試験）

（1）概要

前掲で得られた忌避物質を含むASR等について、非燃焼処理設備において処理を行って得られる物質を対象として、図表 8に示すフローで処理を行い、各代替原料としての利用可能性等を確認した。分析は並行して実施する前項 1)にて実施した（処理後のサンプリング及び成分分析に相当）。

上記を踏まえ、前項 3 で検討した最適プロセス案の有用性を判断し、今後技術的に改善の必要がある点を明らかにした。

図表 10 本技術実証に用いた試料及び処理条件

項目	内容	備考
試料	①SR100%(ASR相当) ②SR80%+CFRP20% ③SR80%+CFRP10%+木屑10%	<ul style="list-style-type: none"> SR : フェニックスメタルより入手 CFRP: 一般社団法人自動車工業会より入手(排出元情報は不明) 木屑 : ダイイチ企業より入手
非燃焼処理	処理温度: 325℃、450℃	・ 広島ガステクノ・サービスのアントラーキルン(試験機)を用いて実施
破砕処理	スイングハンマー式破砕機にて破砕 (スクリーン径: Φ8mm)	・ 御池鐵工所(MHM-75)にて実施
選別処理	脆化破砕物を以下の方法で選別 (フローの詳細は第5項を参照)	・ 太平洋マテリアル小野田事業所にて実施
	➢ 磁力選別	<ul style="list-style-type: none"> 日本エリーズマグネチックス製 フェライトドラムセパレータ(150mT) 日本エリーズマグネチックス製 レアアースドラムセパレータ(600mT)
	➢ 篩分け	・ 晃栄産業製 佐藤式振動篩機 500D-1S
	➢ 渦電流選別	・ 日本エリーズマグネチックス製 ECS RevX-S 1214
産物評価	➢ 比重差選別	・ 日本エリーズマグネチックス製 ポケットエアータブル
	産物に応じて以下の分析を実施 <ul style="list-style-type: none"> 工業分析(揮発分、固定炭素分、灰分) 発熱量分析 ハロゲン(Cl, F, Br)分析 金属成分分析(Au, Ag, Pd, Cu, Al, Fe, Si) 	<ul style="list-style-type: none"> 選別試験における産物の評価として、回収率及び嵩密度に注目するとともに、以下4水準の分析試料を調製 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 鉄鋼電炉向け想定原料 ✓ セメント向け想定原料 ✓ コークス代替品 ✓ 非鉄精錬向け想定原料

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

（2）非燃焼処理

太平洋セメント株式会社が実施した過去事業²において、脆化物をセメント製造プロセスにコークス代替品として投入する際の残存発熱量と回収マテリアルの単体分離性から、325℃が最適な非燃焼処理温度とされた。

他方、本技術実証ではセメント製造プロセスのみでなく、鉄鋼電炉や非鉄製錬への製錬原料の供給に関しても最適化することを目標にしている。そこで、過去実証にて最適とされた325℃と、金属の単体分離性が向上すると想定される450℃において非燃焼処理を行った。

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」（2017年3月）

(3) 破碎処理

過去実証においては、脆化物の粒度を5mm以下に破碎することによって、後段の選別処理における有用金属の回収率が向上した。また、カッタータイプ及びハンマータイプの破碎機を用いて検証した結果、どちらの方式を用いても脆化物を5mm以下の粒度に破碎が可能であった。その際にはスクリーン径5mm及び8mmで破碎処理を行ったが、スクリーン径5mmでは有用金属が微粉碎され、有用金属の物理選別が困難になる可能性が指摘された。

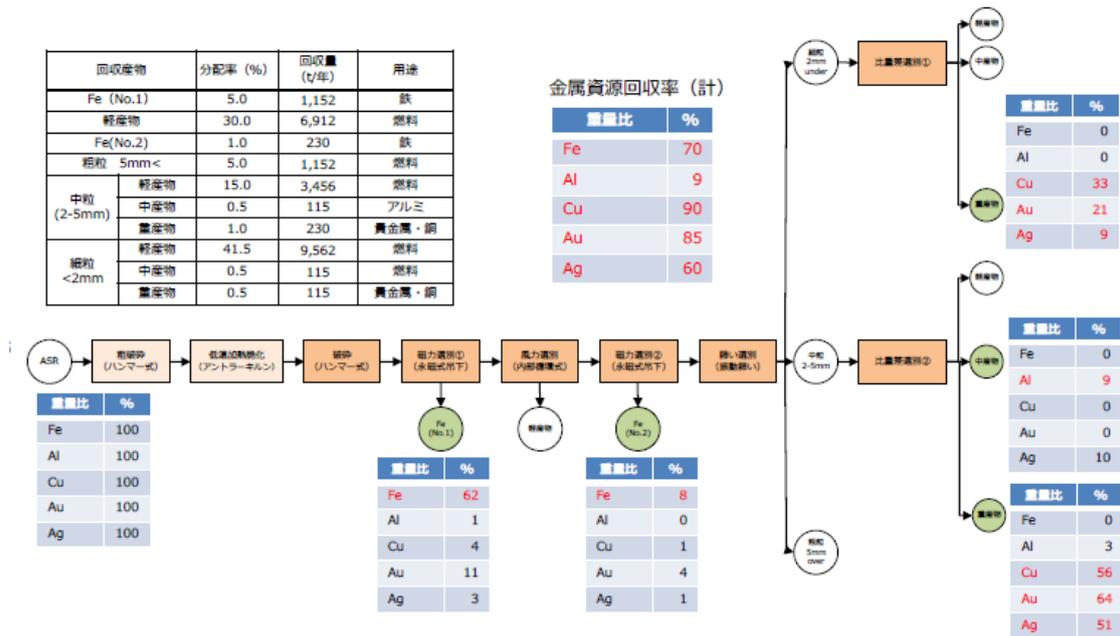
破碎装置に関しては、剪断式であるカッタータイプを使用すると金属片等を破碎する際に刃が摩耗する恐れがある。そこで、本技術実証においては選別後の有用金属の高い回収率を期待できる5mmスクリーン径を用い、耐摩耗性の高いハンマータイプを採用した。

(4) 選別処理

過去実証³では、図表 11に示す選別プロセスが好適な処理フローであると想定された。しかし、本技術実証は過去実証と比較して、実験を実施する水準が多いため1水準あたりの産物の回収量が少なく、風力選別の実施が困難であった。そこで、磁選の後段で篩分けを行い、従来の2～5mmより広い範囲(0.3～5mm)の粒群を回収して、渦電流選別及び比重差選別を実施した。本技術実証にて採用した選別プロセス及び想定される回収物は前述の図表 8に示している。

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」(2017年3月)

図表 11 過去実証においてASRから有用金属とセメント製造用のコークス代替品を回収する際に好適と想定されるフロー



(出所) 環境省「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)」(2017年3月)

5. 報告書とりまとめ・研究会の運営

前掲各項の成果を報告書として取りまとめた。本事業を実施することで見込まれるエネルギー起源二酸化炭素排出量の抑制効果の試算結果、次年度事業に向けた課題についてもとりまとめ、報告書に記載した。

また、前掲の運営を効率的に進めるため、本事業の外注・委託先のほか、有識者を招聘して研究会を1～2か月おきの頻度で開催し、適宜助言、情報提供を受けた。各研究会の概要は以下の通りである。

・第1回会合

日時：平成30年8月10日（金）13:00～14:45

場所：東京大学本郷キャンパス 3号館 441会議室

主な議題：本年度運営体制に関する説明、実証計画についての議論 など

・第2回会合

日時：平成30年10月18日（木）10:00～12:00

場所：早稲田大学西早稲田キャンパス 51号館 3階第二会議室

主な議題：本年度実証事項に関する報告、低温加熱脆化処理実証に関する進捗報告及び今後の方向性に関する討議、高度磁選可能性検証実験に関する進捗報告及び今後の方向性に関する討議 など

・第3回会合

日時：平成30年11月20日（火）10:00～12:00

場所：東京大学本郷キャンパス 工学部3号館 413会議室

主な議題：ASR非燃焼処理実験に関する結果報告（暫定）と今後の方向性に関する討議、高度磁選可能性検証実験に関する結果報告及び今後の方向性に関する討議、マテリアルフローの推計結果（暫定）と今後の方向性に関する討議、中間報告会の対応方針に関する討議

・第4回会合

日時：平成31年1月28日（月）10:00～12:00

場所：早稲田大学西早稲田キャンパス 51号館第4会議室

主な議題：ASR非燃焼処理実験に関する結果及び再利用可能性に関する討議、今年度事業における成果と今後の課題（最終報告会報告事項）に関する討議、成果報告書の構成に関する討議

III. 結果及び考察

III-1. サンプルング及び成分分析

1. 非燃焼処理

非燃焼処理を行った結果、いずれの水準においても脆化物の回収率は50%程度であった。非燃焼処理温度が高い方が、回収率が減少した（図表 12）。また、脆化物の粒群はいずれの水準でも非燃焼処理後に小さくなった（図表 13）。投入物の組成及び非燃焼処理温度によって粒群の変化に傾向があった。非燃焼処理温度が高い方が処理後の粒群が小さくなる傾向にあり、投入物の組成に関しては325℃で処理した際の影響は少ないが、450℃で処理した際にはSR100%の試料が他の試料と比較して粒度が小さくなった（図表 14、図表 15、図表 16）。

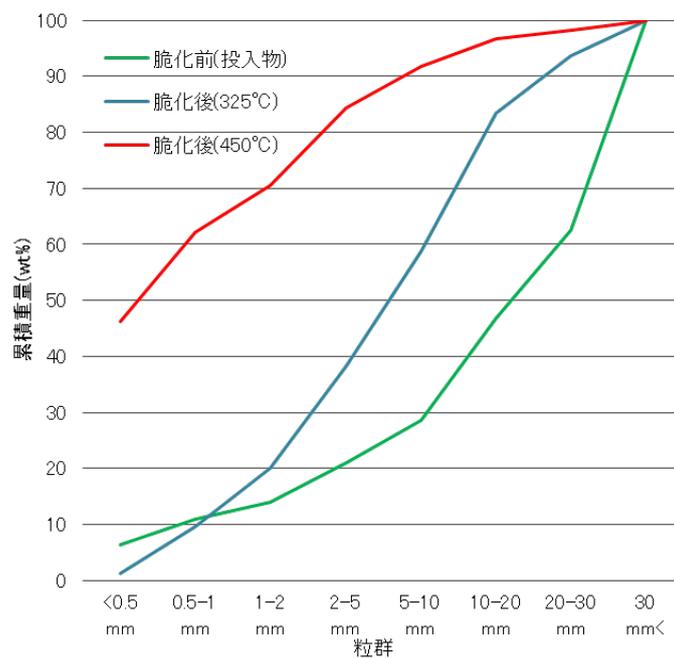
図表 12 非燃焼処理後の産物の回収量及び回収率

試料	処理温度 (°C)	原料	脆化物	
		投入量 (kg/h)	回収量 (kg/h)	回収率 (wt%)
	SR100%	325	30	14.1
	450	30	13.9	46.3
SR80%+CFRP20%	325	30	16.3	54.3
	450	30	15.1	50.2
SR80%+CFRP10%+木屑 10%	325	30	16.8	56.0
	450	30	12.7	42.3

図表 13 非燃焼処理後の回収物の粒度分布

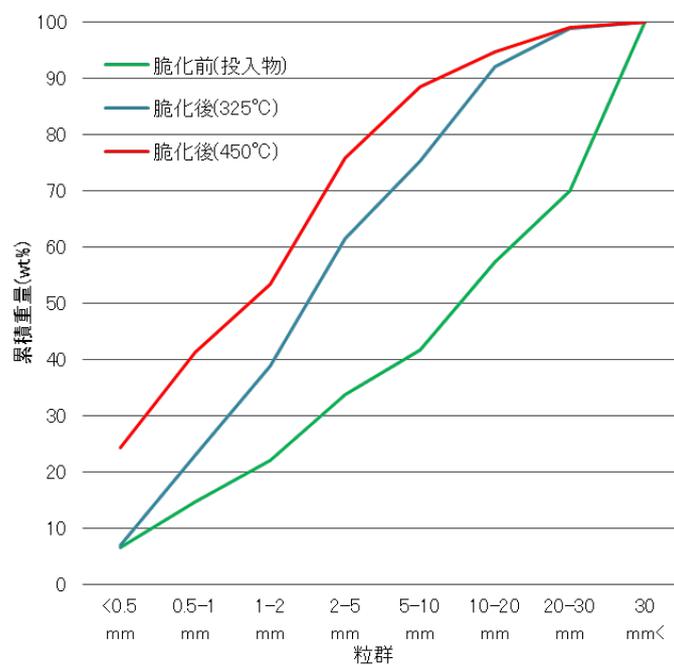
試料	処理温度 (°C)	粒度分布							
		<0.5 mm	0.5-1 mm	1-2 mm	2-5 mm	5-10 mm	10-20 mm	20-30 mm	30 mm<
	(wt%)								
SR100%	325	1.3	8.4	10.4	18.3	20.4	24.7	10.2	6.4
	450	46.3	15.9	8.3	13.8	7.6	4.8	1.5	1.9
SR80% +CFRP20%	325	6.9	16.0	16.0	22.6	13.8	16.7	6.8	1.1
	450	24.4	16.9	12.1	22.4	12.6	6.3	4.4	0.9
SR80% +CFRP10% +木屑 10%	325	2.1	8.7	11.9	19.5	16.8	22.3	9.7	9.0
	450	25.0	17.3	14.3	21.8	11.5	7.7	1.0	1.4

図表 14 SR100%の試料における非燃焼処理前後での粒度分布の変化



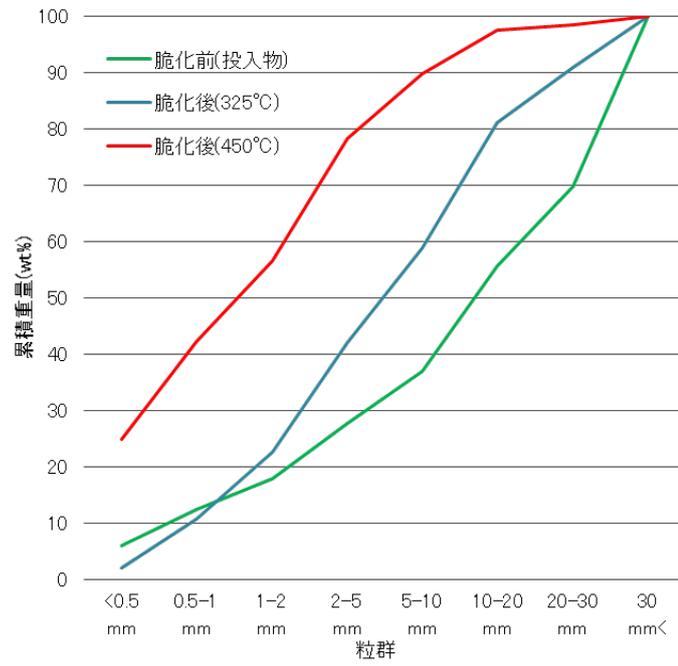
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 15 SR80%+CFRP20%の試料における非燃焼処理前後での粒度分布の変化



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 16 SR80%+CFRP10%+木屑10%の試料における
非燃焼処理前後での粒度分布の変化



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

2. 破碎処理結果

破碎処理後の産物の回収量は多くの水準において回収率90%程度であったが、CFRPを含む試料を450℃で非燃焼処理した破碎品のみ、回収率が60～70%程度に低下した（図表 17）。また、破碎処理後の回収物の粒度分布はいずれの水準でも粒径はおおよそ20mm以下になった（図表 18）。

非燃焼処理温度や投入物の組成によって、破碎処理後の産物にも一定の傾向がみられ、非燃焼処理温度が450℃の方が破碎品の粒子は細かくなり、CFRPや木屑が含まれる試料の方が5mm以上の粗粒の残存が多かった（図表 19、図表 20、図表 21）。

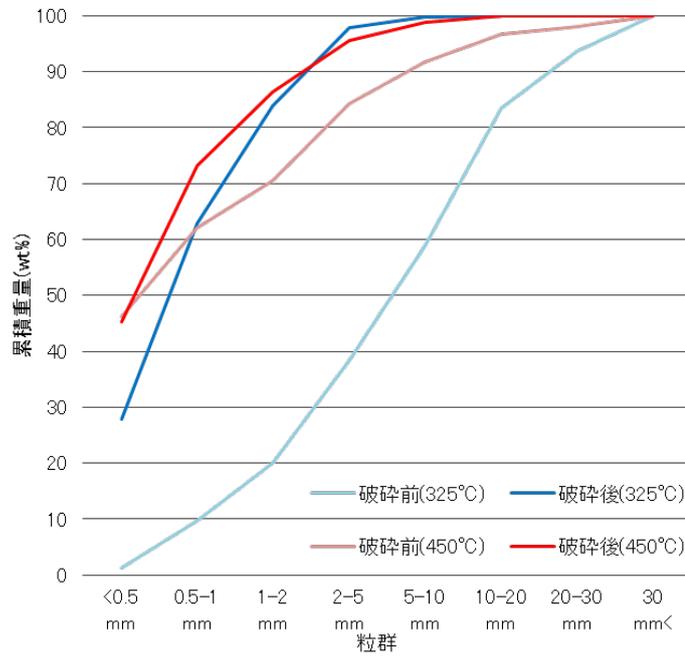
図表 17 破碎処理後の産物の回収量及び回収率

試料	処理温度	投入量	回収量	回収率
	(℃)	(kg)	(kg)	(wt%)
SR100%	325	45.0	42.5	94.4
	450	51.5	47.0	91.3
SR80%+CFRP20%	325	55.0	51.5	93.6
	450	44.0	28.0	63.6
SR80%+CFRP10%+木屑 10%	325	50.6	49.5	97.9
	450	49.0	34.0	69.4

図表 18 破碎処理後の回収物の粒度分布

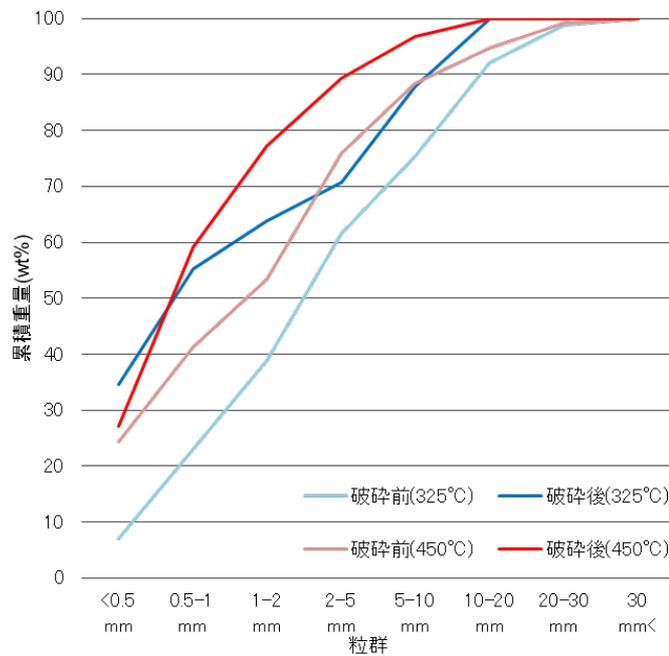
試料	処理温度	粒度分布							
		<0.5 mm	0.5-1 mm	1-2 mm	2-5 mm	5-10 mm	10-20 mm	20-30 mm	30 mm<
	(℃)	(wt%)							
SR100%	325	27.9	35.1	21.0	14.0	1.9	0.1	0.0	0.0
	450	45.2	27.9	13.4	9.2	3.2	1.1	0.0	0.0
SR80%+CFRP20%	325	34.6	20.6	8.6	7.0	17.0	12.2	0.0	0.0
	450	27.2	32.0	18.0	12.1	7.6	3.1	0.1	0.0
SR80%+CFRP10%+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 19 SR100%の試料における破碎処理前後での粒度分布の変化



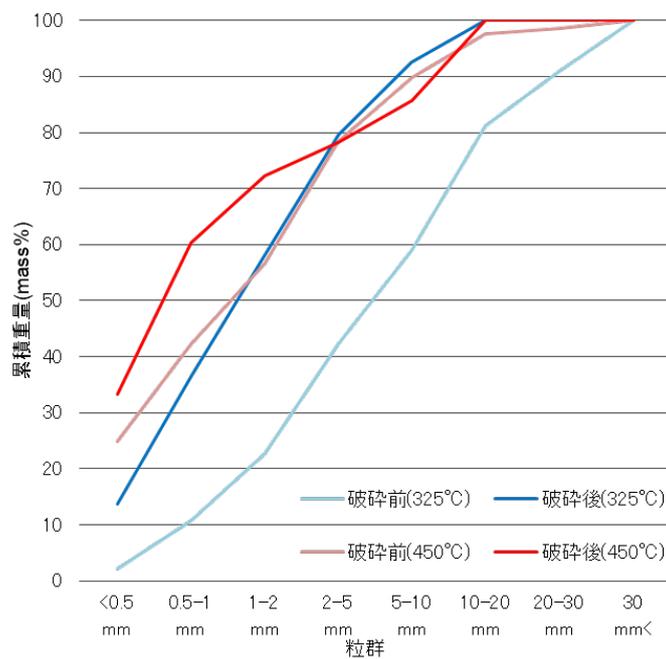
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 20 SR80%+CFRP20%の試料における破碎処理前後での粒度分布の変化



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 21 SR80%+CFRP10%+木屑10%の試料における破碎処理前後での粒度分布の変化



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

3. 選別処理結果

図表 22に各水準での破碎品の嵩密度及び各選別産物の回収量と嵩密度を示す。尚、備考は試験において目視で確認された主たる産物である。

回収重量比に関しては、破碎・選別物において325℃で非燃焼処理した際と比較し、450℃で非燃焼処理すると軽産物2の回収重量比が増加した。また、SR単体の試料では、非燃焼処理の温度による磁着物（磁着物1+磁着物2）の回収重量比への影響は確認されなかったが、CFRPを含む試料では、磁着物の総回収重量比が増加した。特に、磁着物2の回収重量比がSR単体の試料と比較して増加した。他方、非導電産物に関しては、SR単体の試料は非燃焼処理との相関はないが、CFRPを含む試料では高温で処理することで回収重量比が減少した（図表 23、図表 24、図表 25）

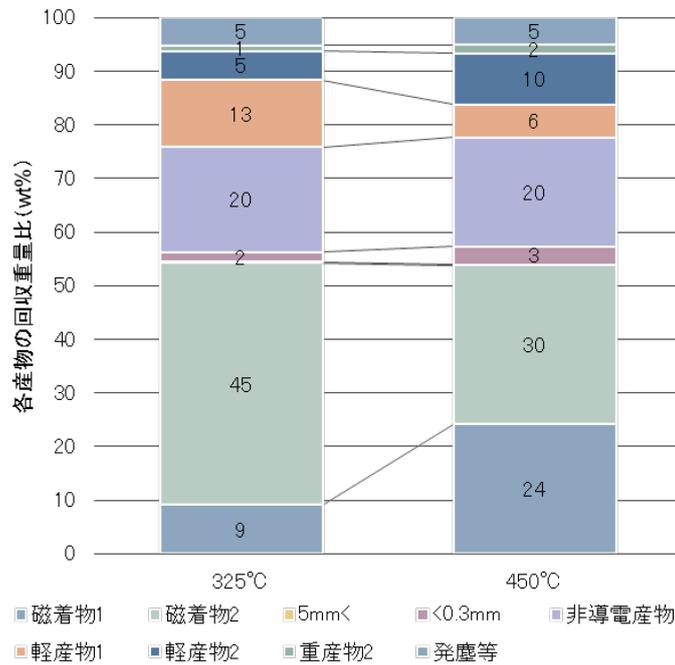
また、嵩密度に関しては、どの試料においても重産物2の嵩密度が2.0を上回った。SR単体の試料では、重産物2と磁着物2を除いて、非燃焼処理温度が高くなると嵩密度は増加した。他方、CFRPを含む試料では、SR単体試料と比較して非燃焼処理温度による嵩密度への影響が小さかった。また、CFRPを含む試料では、磁着物2の嵩密度がSR単体の試料と比較して非常に小さくなった（図表 26、図表 27、図表 28）。

各水準より回収した非鉄製錬向け想定原料には有用金属（金、銀、パラジウム、銅）が含まれており、特に銀や銅が一定程度濃集されていることが確認された。しかし、他の回収物にもこれら有用金属が含まれており、銀や銅についても他の回収物に分配されていた（図表 29、図表 30）。

図表 22 破碎品及び選別後の産物の回収量と嵩密度

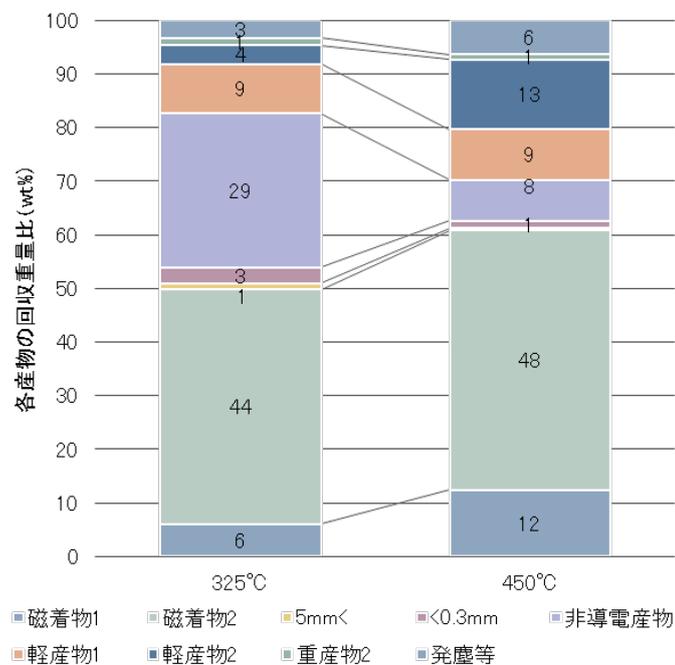
試料	選別処理	産物	325°C					450°C				
			原料投入量 (kg)	回収量		嵩密度 (t/m ³)	備考	原料投入量 (kg)	回収量		嵩密度 (t/m ³)	備考
				(kg)	(%)				(kg)	(%)		
SR100%	-	破碎品	42.5	-	-	0.67		47.0	-	-	0.81	
	磁力選別	磁着物1	-	3.88	9.1	0.72		-	11.35	24.1	0.78	
		磁着物2	-	19.16	45.1	0.61		-	13.97	29.7	0.52	
		(非磁着物)	-	17.88	42.1	-	次工程で使用	-	19.64	41.8	-	次工程で使用
	篩い分け	5mm<	-	0.09	0.2	0.33		-	0.05	0.1	0.28	
		(0.3-5mm)	-	16.92	39.8	0.83	次工程で使用	-	17.98	38.3	1.13	次工程で使用
		<0.3mm	-	0.78	1.8	0.60		-	1.57	3.3	0.76	
	渦電流選別	非導電産物	-	8.31	19.6	0.70		-	9.55	20.3	1.00	
		(導電産物)	-	8.11	19.1	0.89	次工程で使用	-	8.37	17.8	1.25	次工程で使用
	比重選別1	軽産物1	-	5.32	12.5	0.70	樹脂主体	-	2.87	6.1	0.84	樹脂主体
		(重産物1)	-	2.79	6.6	1.30	次工程で使用	-	5.33	11.3	1.43	次工程で使用
	比重選別2	軽産物2	-	2.29	5.4	1.35	ガラスと銅線	-	4.49	9.5	1.60	ガラスと銅線
重産物2		-	0.47	1.1	2.31	銅片、銅線主体	-	0.73	1.6	2.08	銅片、銅線主体	
SR80% +CFRP20%	-	破碎品	51.5	-	-	0.15		28.0	-	-	0.35	
	磁力選別	磁着物1	-	3.12	6.1	0.61		-	3.47	12.4	0.52	
		磁着物2	-	22.51	43.7	0.20		-	13.57	48.5	0.15	
		(非磁着物)	-	24.78	48.1	-	次工程で使用	-	9.35	33.4	-	次工程で使用
	篩い分け	5mm<	-	0.62	1.2	0.11		-	0.11	0.4	0.06	
		(0.3-5mm)	-	22.50	43.7	0.49	次工程で使用	-	8.80	31.4	0.86	次工程で使用
		<0.3mm	-	1.53	3.0	0.51		-	0.38	1.4	0.68	
	渦電流選別	非導電産物	-	14.79	28.7	0.49		-	2.14	7.6	0.82	
		(導電産物)	-	7.38	14.3	0.63	次工程で使用	-	6.69	23.9	0.92	次工程で使用
	比重選別1	軽産物1	-	4.71	9.1	0.43	CFRP主体。金属、ガラスもあり	-	2.65	9.5	0.59	CFRP主体。金属、ガラスもあり
		(重産物1)	-	2.60	5.1	1.36	次工程で使用	-	3.92	14.0	1.40	次工程で使用
	比重選別2	軽産物2	-	1.80	3.5	1.37	ガラスと銅線	-	3.63	13.0	1.34	ガラスと銅線
重産物2		-	0.74	1.4	2.10	銅片、銅線主体	-	0.27	1.0	2.14	銅片、銅線主体	
SR80% +CFRP10% +木屑10%	-	破碎品	49.5	-	-	0.34		34.0	-	-	0.23	
	磁力選別	磁着物1	-	2.38	4.8	0.80		-	5.22	15.4	0.50	
		磁着物2	-	25.25	51.0	0.14		-	15.56	45.8	0.17	
		(非磁着物)	-	19.76	39.9	-	次工程で使用	-	11.61	34.1	-	次工程で使用
	篩い分け	5mm<	-	1.23	2.5	0.10		-	0.04	0.1	0.03	
		(0.3-5mm)	-	18.15	36.7	0.68	次工程で使用	-	10.83	31.9		次工程で使用
		<0.3mm	-	0.33	0.7	0.56		-	0.67	2.0	0.66	
	渦電流選別	非導電産物	-	7.47	15.1	0.52		-	3.42	10.1	0.66	
		(導電産物)	-	10.45	21.1	0.65	次工程で使用	-	7.29	21.4	0.87	次工程で使用
	比重選別1	軽産物1	-	8.05	16.3	0.55	CFRP主体	-	3.02	8.9	0.52	CFRP主体
		(重産物1)	-	2.37	4.8	1.30	次工程で使用	-	4.25	12.5	1.50	次工程で使用
	比重選別2	軽産物2	-	1.94	3.9	1.33	ガラスと銅線	-	3.82	11.2	1.24	ガラスと銅線
重産物2		-	0.45	0.9	2.07	銅片、銅線主体	-	0.42	1.2	2.05	銅片、銅線主体	

図表 23 SR100%の試料における非燃烧破碎選別後の各産物の回収重量比



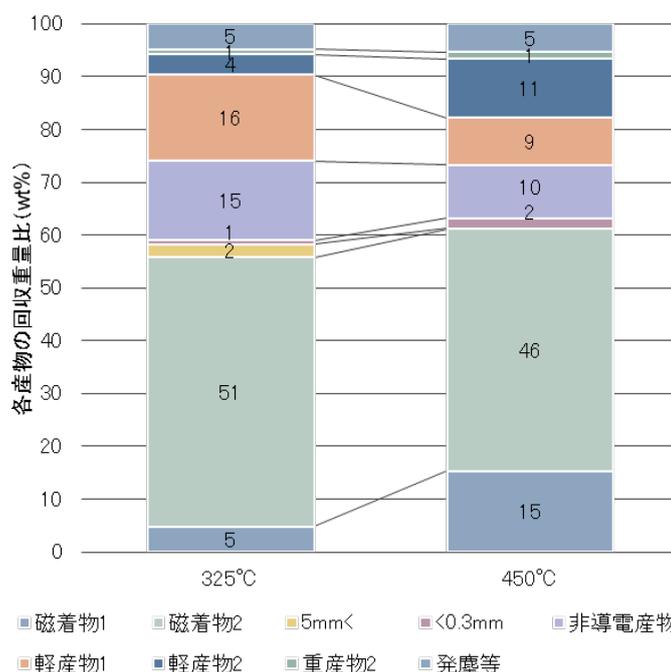
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 24 SR80%+CFRP20%の試料における非燃烧破碎選別後の各産物の回収重量比



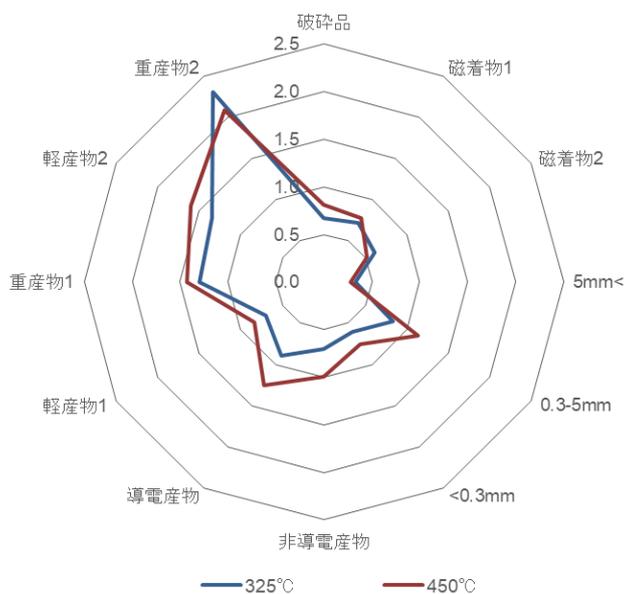
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 25 SR80%+CFRP10%+木屑10%の試料における
非燃烧破碎選別後の各産物の回収重量比



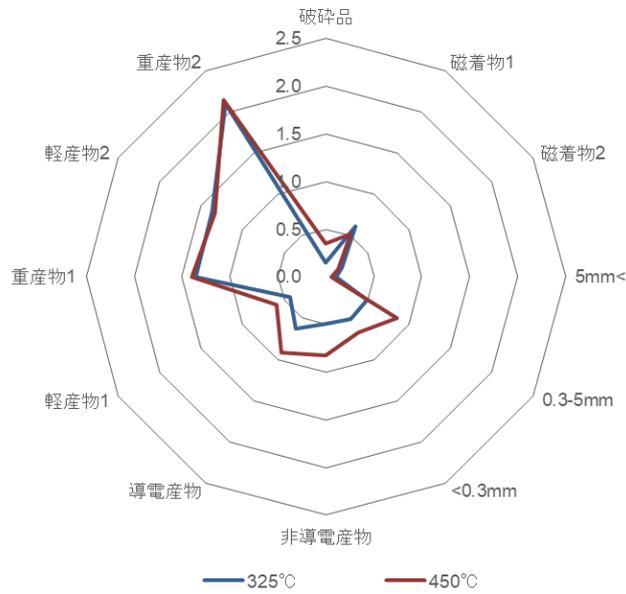
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 26 SR100%の試料における非燃烧破碎選別後の各産物の嵩密度



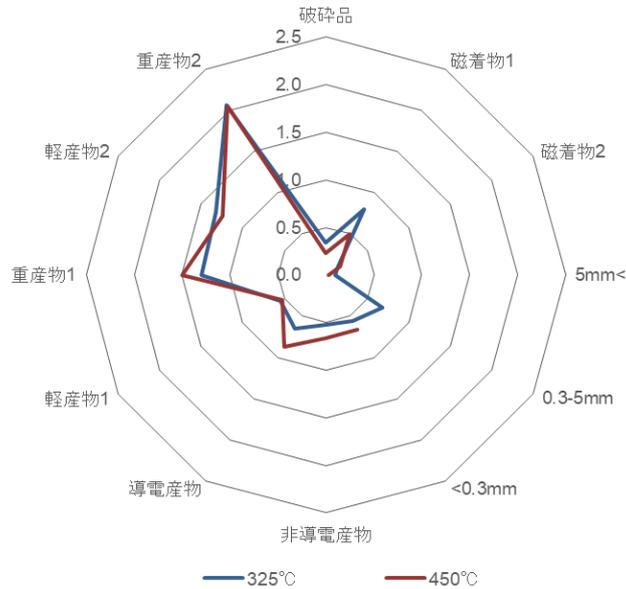
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 27 SR80%+CFRP20%の試料における非燃烧破碎選別後の各産物の嵩密度



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 28 SR80%+CFRP10%+木屑10%の試料における非燃烧破碎選別後の各産物の嵩密度



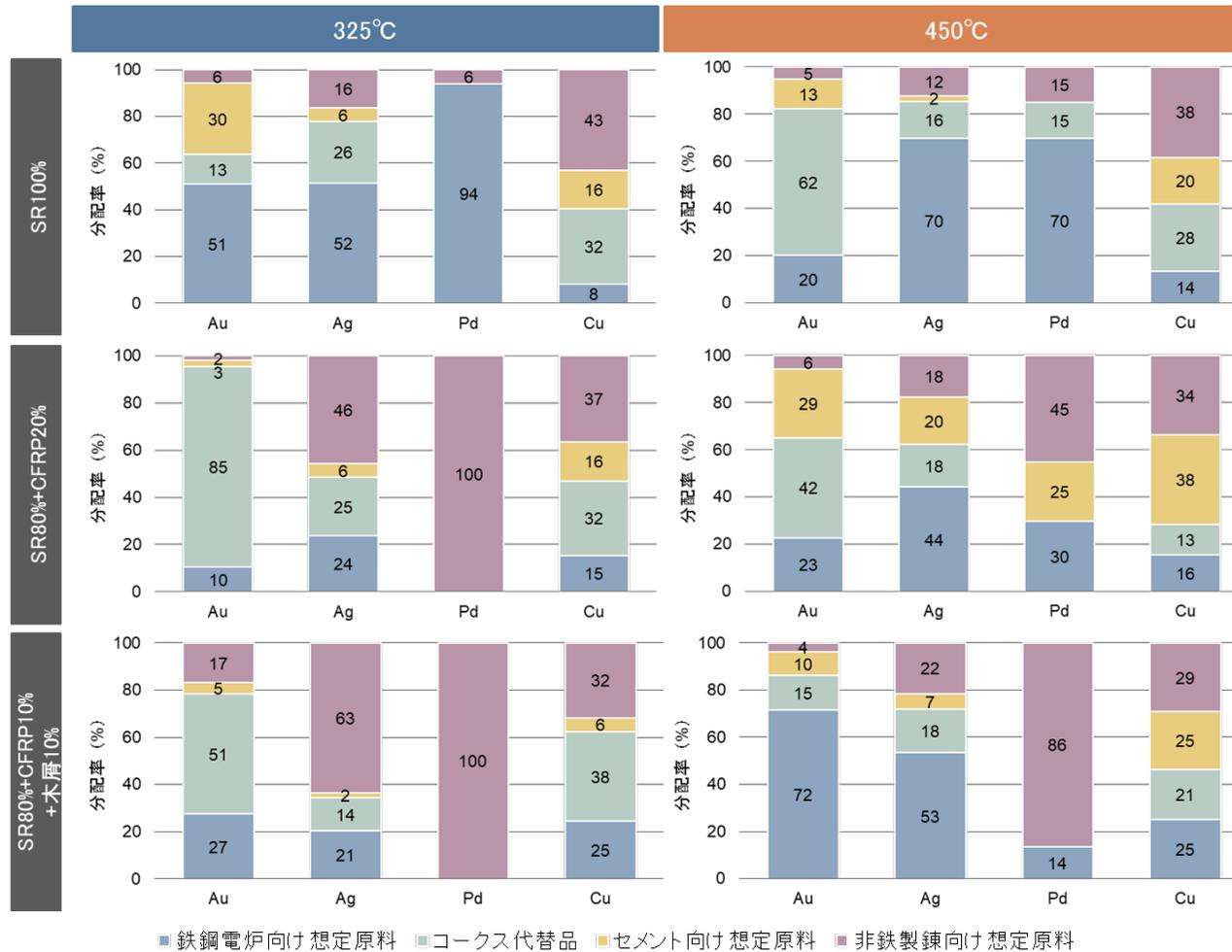
※450°Cで非燃烧処理した際の中粒(0.3~5mm)に関してデータ欠陥

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 29 各分析対象物における有用金属の品位

試料	分析対象物 (破砕品及び回収物)	325℃				450℃			
		Au	Ag	Pd	Cu	Au	Ag	Pd	Cu
		(g/t)	(g/t)	(g/t)	(wt%)	(g/t)	(g/t)	(g/t)	(wt%)
SR100%	脆化物 (破砕済み)	1.5	19	0.3	2.5	0.8	50	0.2	9.4
	鉄鋼電炉向け想定原料	0.5	16	0.5	0.33	0.4	100	0.5	0.85
	コークス代替品代替品	0.2	13	<0.1	2.1	2.2	40	0.2	3.2
	セメント向け想定原料	3.0	18	<0.1	6.7	1.4	20	<0.1	7.0
	非鉄製錬向け想定原料	2.8	250	1.6	86	3.6	600	3.7	83
SR80% +CFRP20%	脆化物 (破砕済み)	1.8	29	1.0	2.8	<0.1	12	<0.1	2.1
	鉄鋼電炉向け想定原料	0.4	13	<0.1	0.98	0.3	16	0.1	0.56
	コークス代替品代替品	3.9	16	<0.1	2.4	1.8	21	<0.1	1.5
	セメント向け想定原料	1.4	45	<0.1	15	1.8	34	0.4	6.4
	非鉄製錬向け想定原料	2.8	870	2.1	81	5.0	410	9.7	77
SR80% +CFRP10% +木屑 10%	脆化物 (破砕済み)	<0.1	9.4	0.1	1.9	0.4	33	0.2	3.7
	鉄鋼電炉向け想定原料	0.2	12	<0.1	1.0	2.0	28	0.2	1.4
	コークス代替品代替品	0.6	13	<0.1	2.5	1.2	28	<0.1	3.4
	セメント向け想定原料	0.5	19	<0.1	3.5	1.5	19	<0.1	7.4
	非鉄製錬向け想定原料	7.6	2300	7.3	80	5.3	560	63	80

図表 30 有用金属（金、銀、パラジウム及び銅）の分配率



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

4. 回収物の製錬原料及びコークス代替品としての評価

(1) 鉄鋼電炉向け想定原料

回収した鉄鋼電炉向け想定原料は高温で非燃焼処理を行うことで灰分が増加し、発熱量が減少する傾向にあった。また、CFRPや木屑を含有する試料の方が、固定炭素分が多く残存し、発熱量が大きくなった(図表 31、図表 33、図表 34)。

また、ハロゲン分析の結果より、今回分析したハロゲン(F、Cl、Br)のうち、塩素の含有量が大きく、非燃焼処理温度が低い方がハロゲンの含有量が少ない傾向にあった(図表 35)。

金属成分の分析を行った結果、水準によって鉄は6~20%程度含まれていたが、忌避元素である銅が1%近く含まれているものもあった(図表 32)。

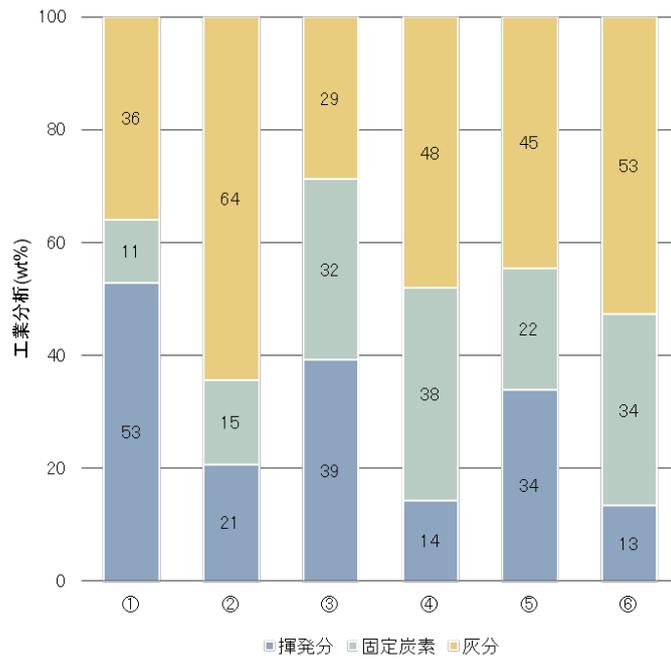
図表 31 鉄鋼電炉向け想定原料の性状分析結果

処理条件	工業分析			総発熱量	ハロゲン分析		
	揮発分	固定炭素	灰分		F	Br	Cl
	(wt%)			(kcal/kg)	(wt%)		
①SR100% 325℃	52.8	11.3	35.9	5,380	0.042	0.064	1.23
②SR100% 450℃	20.7	14.9	64.4	2,350	0.028	0.100	1.73
③SR80%+CFRP20% 325℃	39.2	32.0	28.8	5,650	0.019	0.060	1.00
④SR80%+CFRP20% 450℃	14.3	37.6	48.1	3,480	0.028	0.064	1.47
⑤SR80%+CFRP10% +木屑 10% 325℃	33.9	21.6	44.5	4,680	0.024	0.046	0.91
⑥SR80%+CFRP10% +木屑 10% 450℃	13.3	34.0	52.7	3,190	0.018	0.075	1.48

図表 32 鉄鋼電炉向け想定原料の金属成分分析結果

処理条件	Au	Ag	Pd	Cu	Al	Fe	Si
	(g/t)	(g/t)	(g/t)	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)
①SR100% 325℃	0.5	16	0.5	0.33	0.82	6.4	-
②SR100% 450℃	0.4	100	0.5	0.85	1.6	14	-
③SR80% +CFRP20% 325℃	0.4	13	<0.1	0.98	0.9	6.4	-
④SR80% +CFRP20% 450℃	0.3	16	0.1	0.56	1.3	6.1	-
⑤SR80%+CFRP10% +木屑 10% 325℃	0.2	12	<0.1	1.0	0.76	23	-
⑥SR80%+CFRP10% +木屑 10% 450℃	2.0	28	0.2	1.4	1.4	7.2	-

図表 33 鉄鋼電炉向け想定原料の工業分析結果

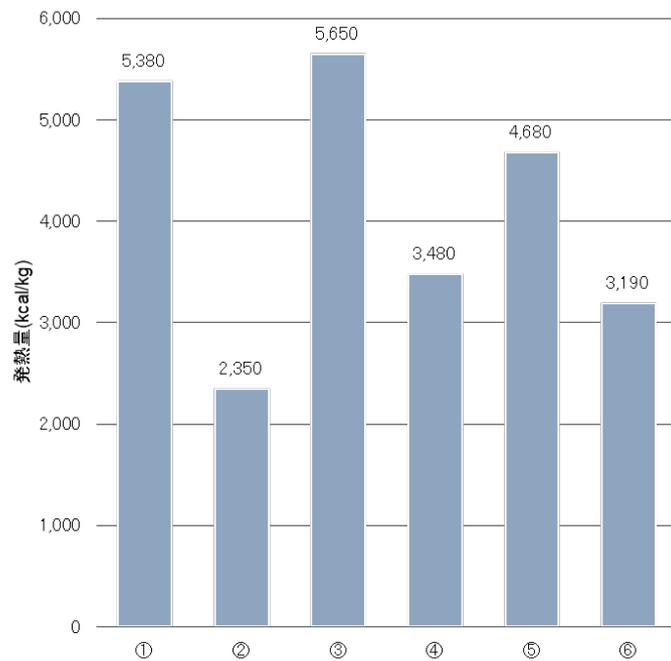


①SR100%, 325°C、②SR100%, 450°C、③SR80%+CFRP20%, 325°C、④SR80%+CFRP20%, 450°C、

⑤SR80%+CFRP10%+木屑10%, 325°C、⑥SR80%+CFRP10%+木屑10%, 450°C

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 34 鉄鋼電炉向け想定原料の発熱量分析結果

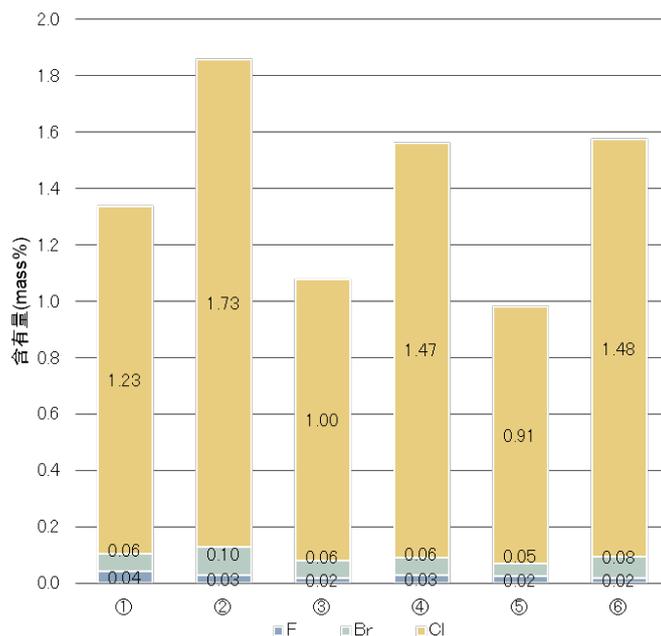


①SR100%, 325°C、②SR100%, 450°C、③SR80%+CFRP20%, 325°C、④SR80%+CFRP20%, 450°C、

⑤SR80%+CFRP10%+木屑10%, 325°C、⑥SR80%+CFRP10%+木屑10%, 450°C

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 35 鉄鋼電炉向け想定原料のハロゲン含有量



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

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(2) コークス代替品

コークス代替品においても、鉄鋼電炉向け想定原料と同様に高温で非燃焼処理すると灰分が増加した。また、どの水準においても鉄鋼電炉向け想定原料より灰分の含有量が多い。固定炭素分の割合は、CFRPや木屑を含む試料の方が大きくなった(図表 36、図表 38)。また、発熱量に関しても電炉向け想定原料と同様の傾向がみられ、高温で非燃焼処理すると産物の発熱量は小さくなり、CFRPや木屑を含む試料の方が産物の発熱量は大きくなった(図表 36、図表 39)。

ハロゲン含有量はおおよそ0.8wt%にとどまっており、非燃焼処理温度や投入物組成による傾向はみられなかった。重量比では非鉄製錬向け想定原料と同様に、3元素のなかでは塩素の含有量が最も多かった(図表 40)。

コークス代替品においても金属成分が一部含まれており、金や銀のほか銅が2～3%程度含まれていた(図表 37)。

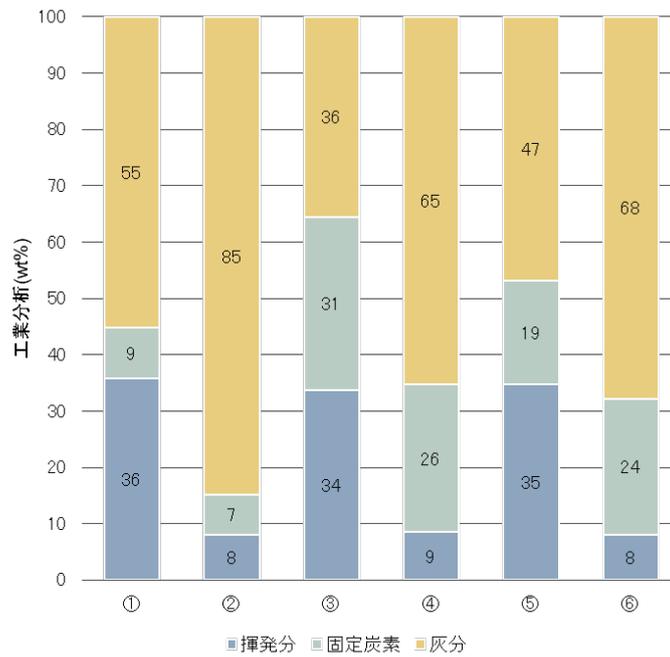
図表 36 コークス代替品の性状分析結果

処理条件	工業分析			総発熱量	ハロゲン分析		
	揮発分	固定炭素	灰分		F	Br	Cl
	(wt%)			(kcal/kg)	(wt%)		
①SR100% 325℃	35.8	9.1	55.1	3,640	0.021	0.032	0.73
②SR100% 450℃	8.1	7.0	84.9	870	<0.001	0.023	0.72
③SR80%+CFRP20% 325℃	33.8	30.7	35.5	5,290	0.016	0.035	0.63
④SR80%+CFRP20% 450℃	8.5	26.2	65.3	2,310	0.005	0.026	0.73
⑤SR80%+CFRP10%+木屑 10% 325℃	34.7	18.5	46.8	4,180	0.012	0.05	0.54
⑥SR80%+CFRP10%+木屑 10% 450℃	8.1	24.1	67.8	2,240	0.003	0.027	0.83

図表 37 コークス代替品の金属成分分析結果

処理条件	Au	Ag	Pd	Cu	Al	Fe	Si
	(g/t)	(g/t)	(g/t)	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)
①SR100% 325℃	0.2	13	<0.1	2.1	1.8	-	-
②SR100% 450℃	2.2	40	0.2	3.2	2.5	-	-
③SR80%+CFRP20% 325℃	3.9	16	<0.1	2.4	1.7	-	-
④SR80%+CFRP20% 450℃	1.8	21	<0.1	1.5	1.8	-	-
⑤SR80%+CFRP10%+木屑 10% 325℃	0.6	13	<0.1	2.5	1.6	-	-
⑥SR80%+CFRP10%+木屑 10% 450℃	1.2	28	<0.1	3.4	2.5	-	-

図表 38 コークス代替品の工業分析結果

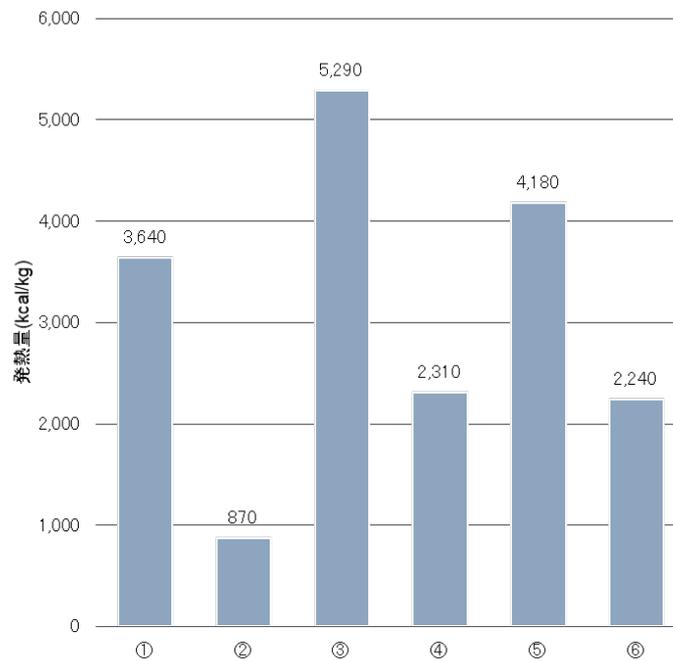


①SR100%, 325°C、②SR100%, 450°C、③SR80%+CFRP20%, 325°C、④SR80%+CFRP20%, 450°C、

⑤SR80%+CFRP10%+木屑10%, 325°C、⑥SR80%+CFRP10%+木屑10%, 450°C

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 39 コークス代替品の発熱量分析結果

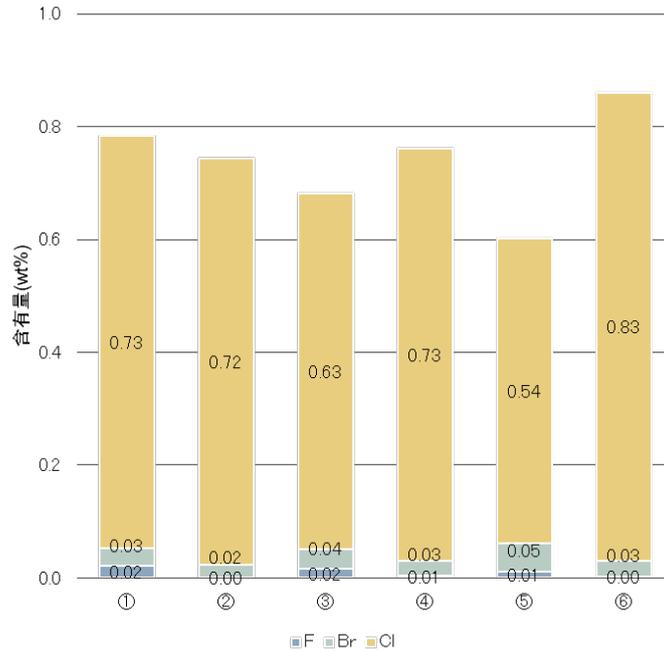


①SR100%, 325°C、②SR100%, 450°C、③SR80%+CFRP20%, 325°C、④SR80%+CFRP20%, 450°C、

⑤SR80%+CFRP10%+木屑10%, 325°C、⑥SR80%+CFRP10%+木屑10%, 450°C

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 40 コークス代替品のハロゲン含有量



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

(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(3) セメント向け想定原料

セメント向け想定原料には微量ではあったが、金や銅などの有用金属が含まれていた。また、ケイ素が20wt%含まれていた(図表 41)。

図表 41 セメント向け想定原料の金属成分分析

処理条件	Au	Ag	Pd	Cu	Al	Fe	Si
	(g/t)	(g/t)	(g/t)	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)
①SR100% 325℃	3.0	18	<0.1	6.7	2.2	-	27
②SR100% 450℃	1.4	20	<0.1	7	3.7	-	28
③SR80% +CFRP20% 325℃	1.4	45	<0.1	15	7.1	-	24
④SR80% +CFRP20% 450℃	1.8	34	0.4	6.4	1.7	-	29
⑤SR80%+CFRP10% +木屑 10% 325℃	0.5	19	<0.1	3.5	1.9	-	30
⑥SR80%+CFRP10% +木屑 10% 450℃	1.5	19	<0.1	7.4	2.7	-	29

(4) 非鉄製錬向け想定原料

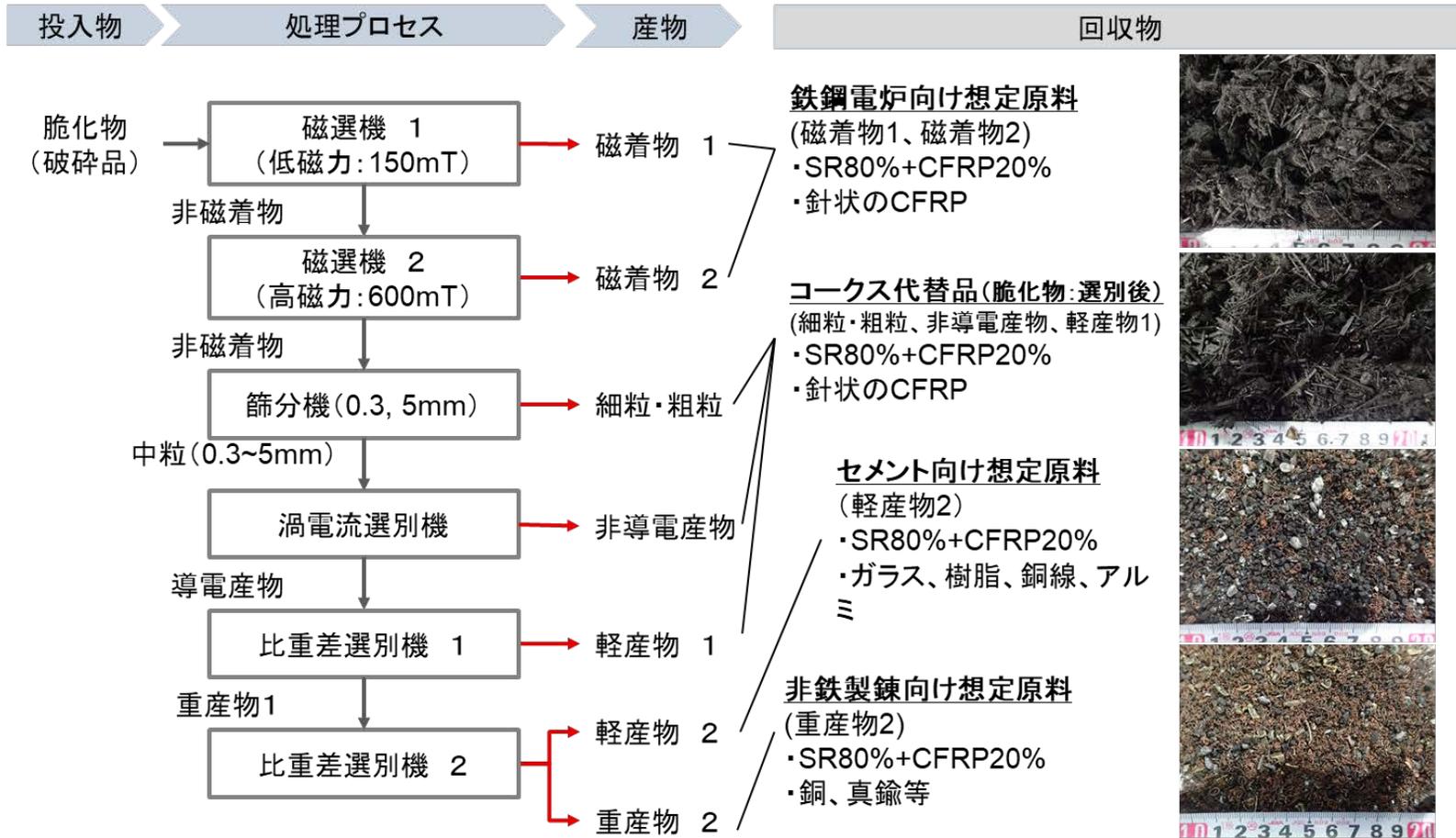
非鉄製錬向け想定原料における金属成分分析の結果、いずれの水準においても、銅が80wt%含有されているほか、金や銀、パラジウムといった貴金属も含まれていた。また、鉄の含有量はおよそ0.1wt%以下であった(図表 42)。

図表 42 非鉄製錬向け想定原料の金属成分分析

処理条件	Au	Ag	Pd	Cu	Al	Fe	Si
	(g/t)	(g/t)	(g/t)	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)
①SR100% 325℃	2.8	250	1.6	86	0.64	0.08	1.8
②SR100% 450℃	3.6	600	3.7	83	1.1	0.07	2.4
③SR80% +CFRP20% 325℃	2.8	870	2.1	81	3.0	0.11	3.9
④SR80% +CFRP20% 450℃	5.0	410	9.7	77	0.84	0.04	2.8
⑤SR80%+CFRP10% +木屑 10% 325℃	7.6	2,300	7.3	80	0.71	0.04	3.0
⑥SR80%+CFRP10% +木屑 10% 450℃	5.3	560	63	80	0.18	0.03	3.8

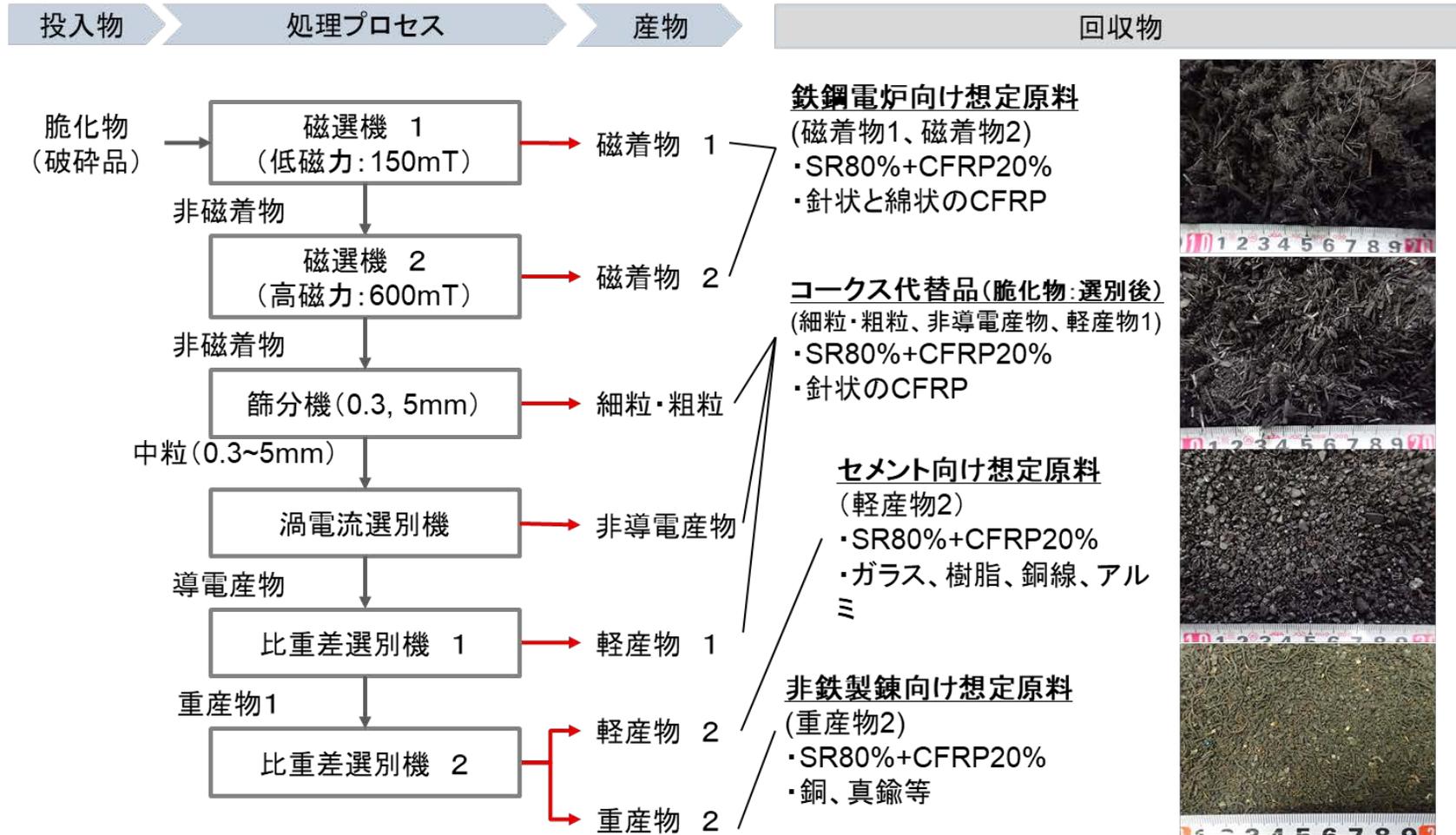
また、上記4つの回収物に関して、SR80%+CFRP20%の試料を325℃と450℃でそれぞれ非燃焼処理した際の写真を図表 43、図表 44に示す。

図表 43 試料③ (SR80%+CFRP20%、325℃) の選別後回収物の概要



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 44 試料④ (SR80%+CFRP20%、450°C) の選別後回収物の概要



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

5. 課題と考察

(1) 非燃焼処理温度による影響

非燃焼処理温度が高くなることで、樹脂分の分解が進み、揮発成分が減少するため、脆化物の回収率は低下したと考えられる。また、これによって相対的に灰分が増加したことで、ガラスの単体分離性が向上し軽産物2の回収重量が増加し、非鉄製錬想定原料やコークス代替品における発熱量も減少したと考えられる。

(2) 投入物組成による影響

450℃で非燃焼処理を行った際、CRRP由来と想定される綿状の炭素繊維が確認された。そのため、粒度分布の測定の際に粗粒群が増加し、SR100%の脆化物と比較して粒度が大きくなったと考えられる。このようにCFRPが炭素繊維状となったことで発塵性が高くなり、破砕品を回収する際にダクトに吸引されてしまったため、破砕品の回収率が低下したと考えられる。他方、破砕品においてCFRPを含む試料の粒群は大きくなっており、これはアスペクト比の長いCFRPがハンマー式破砕機のスクリーンを通過したことや、綿状の炭素繊維によって粗粒群が増加したためだと考えられる。選別後の産物において、CFRPを含む試料を高温で非燃焼処理した際の磁着物の回収重量比が増加した原因は、CFRP由来の綿状の炭素繊維が発生したことにより、鉄やその他金属等を巻き込む形で磁着物として回収されたためであると考えられる。実際に、低温で非燃焼処理した場合と比較して、高温で非燃焼処理した場合の方が磁着物2の嵩密度が高くなっている。また、同様の条件において非導電産物の回収重量が低くなっているが、これは渦電流選別機において綿状の炭素繊維がモーターの回転によって浮遊し、導電産物側に回収されたためだと考えられる。

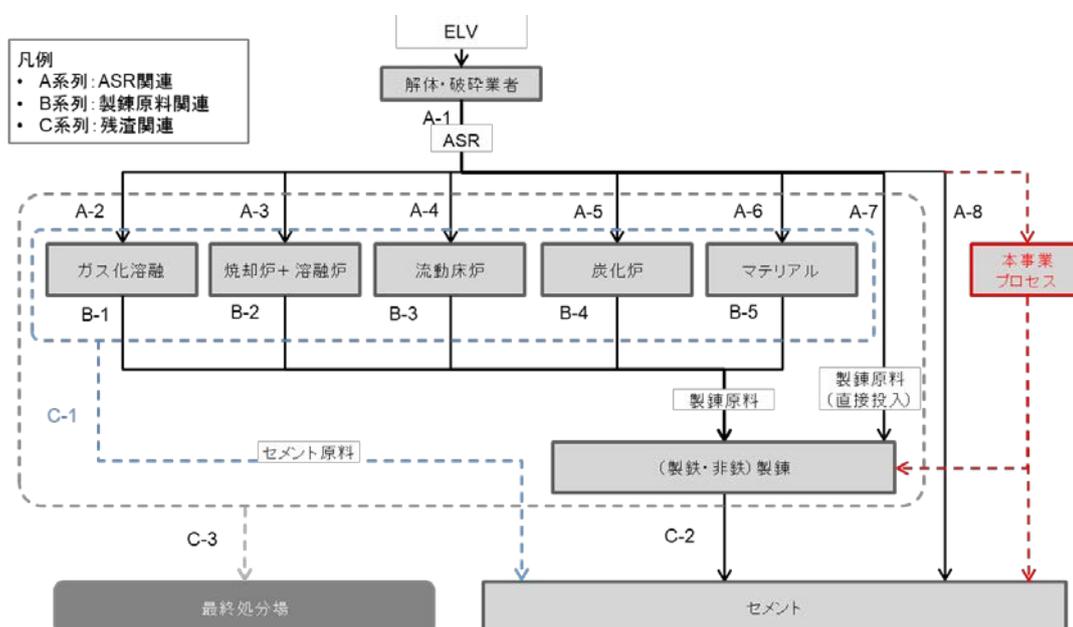
III-2. 忌避・選好物質のマテリアルバランス及びフロー推計

1. 処理フローの構築

(1) ASR

本調査では経済産業省及び環境省の公開資料及び研究会における意見交換に基づき、国内におけるASR処理フローを構築した（本事業プロセスは今後導入予定のため、破線で示している）（図表 45）。

図表 45 ASRの処理フロー

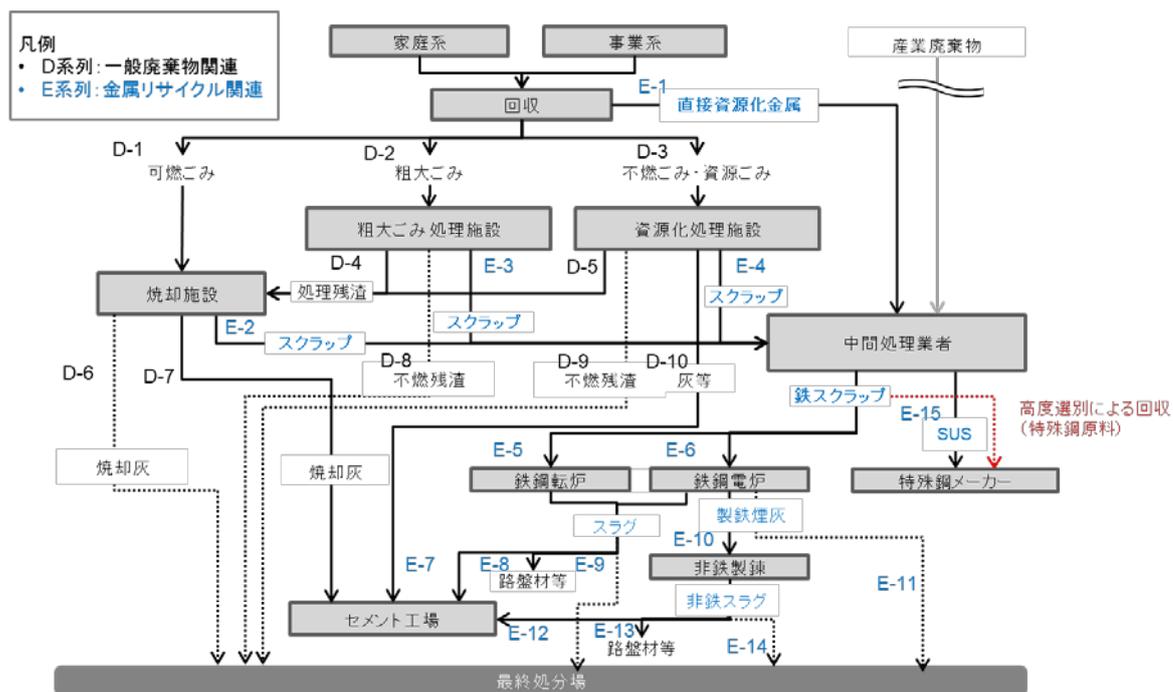


(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(2) 鉄スクラップ

本調査では、過去当社実績⁴や本年度のヒアリング／研究会を通じて、一般廃棄物および産業廃棄物からの鉄スクラップに関する処理フローを構築した（図表 46）。

図表 46 鉄スクラップの処理フロー



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

⁴ 三菱UFJリサーチ&コンサルティング「平成29年度低炭素型廃棄物処理支援事業補助金（東京都・埼玉県における「資源コンビナート」構想実現に向けたFS事業）」（2018年1月）

2. 処理後産物・廃棄物発生量の推計

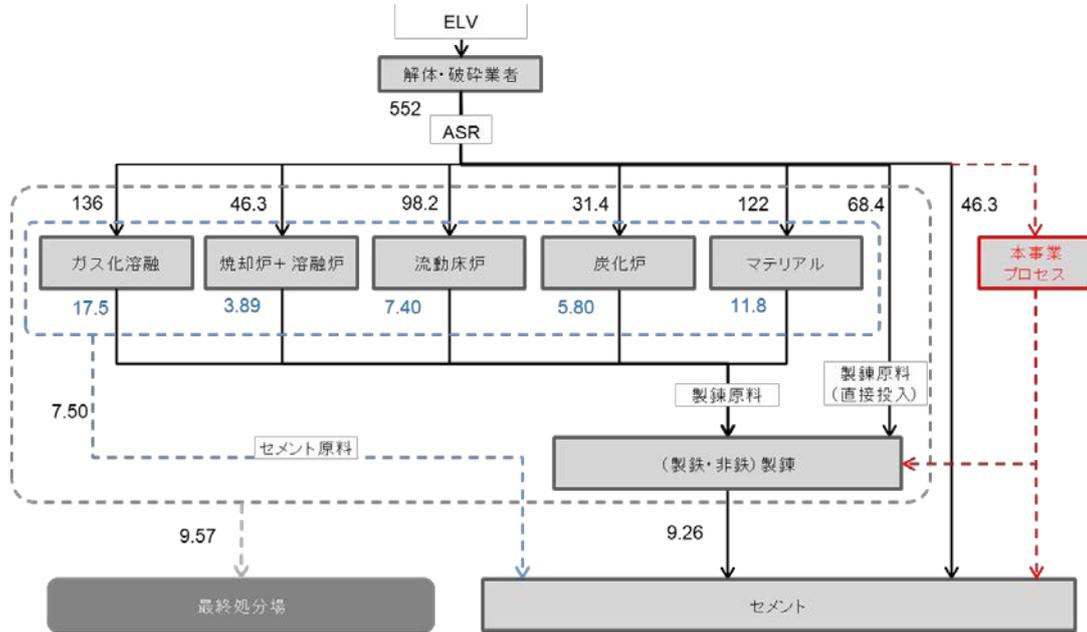
(1) ASR

ASR中に賦存されている未資源化処理物質の推計を実施するため、ASR処理施設から供給される原料および廃棄物の発生量を推計した。各処理物の推計方法及び推計結果を以下に示す。各項目に付与されているコード（A-1など）は「処理フローの構築」にて記載したフロー図と対応している（図表 47、図表 48）。

図表 47 ASRを処理後産物の主な情報源、推計方法

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処理量	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」（2018年9月）	「ASR引き取り重量」
A-2	ガス化溶融によるASR処理量	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」（2018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」（2015年9月）	（ASR引き取り重量） ×（ガス化溶融への投入率）
A-3	焼却炉及び溶融炉によるASR処理量	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」（2018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」（2015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	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」（2018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」（2015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	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」（2018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」（2015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	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」（2018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」（2015年9月）	（ASR引き取り重量） ×（マテリアルへの投入率）
A-7	製錬（非鉄）による直接ASR処理量	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」（2018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」（2015年9月）	（ASR引き取り重量） ×（製錬（非鉄）への直接投入率）
A-8	セメントによる直接ASR処理量	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」（2018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」（2015年9月）	（ASR引き取り重量） ×（セメントへの直接投入率）
B-1	ガス化溶融から製錬への原料供給	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」（2018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」（2015年9月） 長田ほか、「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」（2012年）	（ASR引き取り重量） ×（ガス化溶融への投入率） ×（金属回収率）
B-2	焼却炉及び溶融炉から製錬への原料供給	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」（2018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」（2015年9月） ASR施設活用率	（ASR引き取り重量） ×（焼却炉・溶融炉への投入率） ×（金属回収率）
B-3	流動床炉から製錬への原料供給	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」（2018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」（2015年9月） ASR施設活用率	（ASR引き取り重量） ×（流動床炉への投入率） ×（金属回収率）
B-4	炭化炉から製錬への原料供給	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」（2018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」（2015年9月） ASR施設活用率	（ASR引き取り重量） ×（炭化炉への投入率） ×（金属回収率）
B-5	マテリアルから製錬への原料供給	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」（2018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」（2015年9月） ASR施設活用率	（ASR引き取り重量） ×（マテリアルへの投入率） ×（金属回収率）
C-1	リサイクル設備からセメントへの原料供給（マテリアルリサイクル）	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」（2018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」（2015年9月） 環境省「平成28年度自動車リサイクル制度の高度化・安定化方策等に係る調査の結果について」	（ASR引き取り重量） × {（ASRセメント再資源化率） - （セメントへの直接投入率） × （ASRマテリアルリサイクル率） } （ASR引き取り重量）
C-2	ASR由来の製錬からセメントへの原料供給（マテリアルリサイクル）	環境省「平成28年度自動車リサイクル制度の高度化・安定化方策等に係る調査の結果について」 「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」（2015年9月） 鉄鋼スラグ協会「平成28年度鉄鋼スラグ需給の概要」 ASR施設活用率	× {（ASR中の鉄の再資源化率） × （粗鋼生産における鉄鋼スラグ発生率） + （ASR中の銅の再資源化率） × （粗鋼生産における銅スラグ発生率） } 「ASR最終処分量」
C-3	最終処分量	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」（2018年9月）	

図表 48 我が国におけるASR発生量の推計結果（単位：kt、2017年度）



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

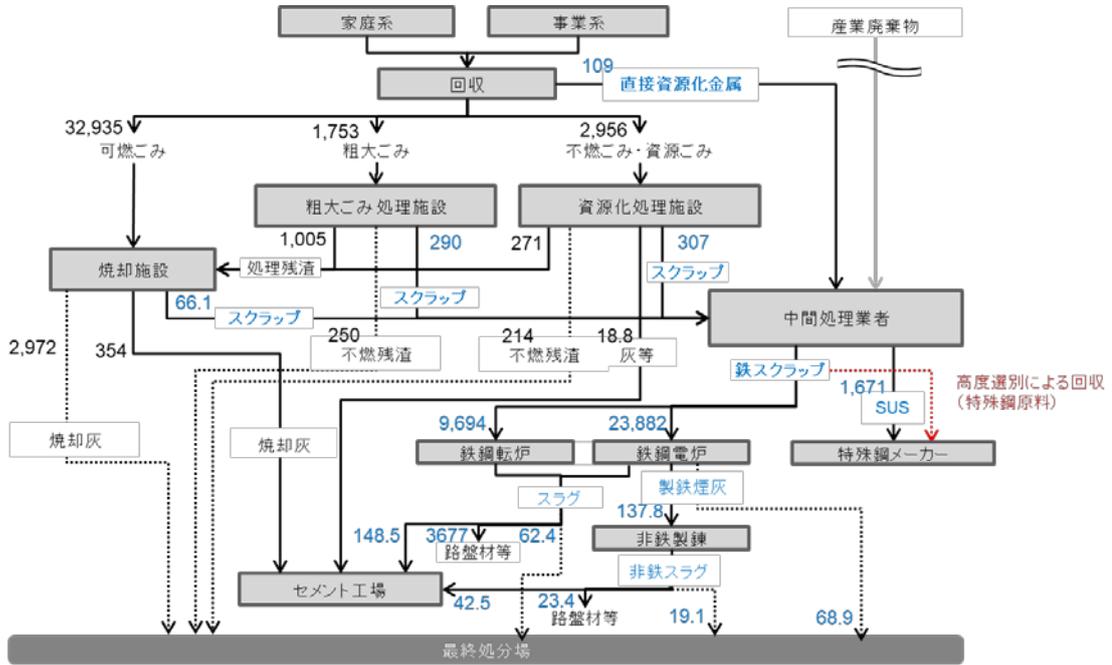
(2) 鉄スクラップ

ASRと同様に、鉄スクラップについても発生量を推計した(図表 49、図表 50)。

図表 49 一般廃棄物・産業廃棄物由来の鉄スクラップ等の排出量に関する
主な情報源、推計方法

No	項目	主な情報源	備考（データの使用方法、推計方法等）
D-1	可燃ごみ処理量	環境省「平成28年度廃棄物一般統計」	「直接焼却」量
D-2	粗大ごみ処理量	環境省「平成28年度廃棄物一般統計」	「粗大ごみ処理施設」処理量
D-3	不燃ごみ・資源ごみ処理量	環境省「平成28年度廃棄物一般統計」	「資源化等を行う施設」処理量
D-4	粗大ごみ処理残渣の焼却量	環境省「平成28年度廃棄物一般統計」	「粗大ごみ処理施設（処理残渣の焼却）」量
D-5	資源化処理残渣の焼却量	環境省「平成28年度廃棄物一般統計」	「資源化等を行う施設（処理残渣の焼却）」量
D-6	焼却施設からの焼却灰埋め立て量	環境省「平成28年度廃棄物一般統計」	「焼却施設（焼却残渣の埋立）」量
D-7	焼却施設からの焼却灰セメント原料供給量	環境省「平成28年度廃棄物一般統計」	「焼却施設処理に伴う資源化量（焼却灰・飛灰のセメント原料化）」量
D-8	粗大ごみ処理残渣の埋め立て量	環境省「平成28年度廃棄物一般統計」	「粗大ごみ処理施設（処理残渣の埋立）」量
D-9	資源化処理残渣の埋め立て量	環境省「平成28年度廃棄物一般統計」	「資源化等を行う施設（処理残渣の埋立）」量
D-10	資源化処理施設からのセメント原料供給量	環境省「平成28年度廃棄物一般統計」	「資源化等を行う施設（焼却灰・飛灰のセメント原料化）、（セメント等への直接投入量）」量
E-1	金属スクラップ処理量（直接資源化分）	環境省「平成28年度廃棄物一般統計」	「直接資源化量（金属類）」
E-2	焼却施設からの金属資源化量	環境省「平成28年度廃棄物一般統計」	「焼却施設処理に伴う資源化量（金属類）」
E-3	粗大ごみ処理施設からの金属資源化量	環境省「平成28年度廃棄物一般統計」	「粗大ごみ処理施設処理に伴う資源化量（金属類）」
E-4	資源化処理施設からの金属資源化量	環境省「平成28年度廃棄物一般統計」	「資源化等を行う施設処理に伴う資源化量（金属類）」量
E-5	中間処理事業者から転炉への鉄スクラップ供給量	鉄源協会「鉄源流通量調査結果」	「転炉（スクラップ消費量）」
E-6	中間処理事業者から電炉への鉄スクラップ供給量	鉄源協会「鉄源流通量調査結果」	「電炉（スクラップ消費量）」
E-7	普通鋼（転炉、電炉）スラグのセメント原料化量	鉄源協会「鉄源流通量調査結果」 鉄鋼スラグ協会、「平成28年度鉄鋼スラグ需給の概要」	（転炉・電炉スラグのセメント原料化量）×（スクラップ由来の転炉・電炉スラグ発生量）／（転炉・電炉スラグ発生量）
E-8	普通鋼（転炉、電炉）スラグの埋め立て量	鉄源協会「鉄源流通量調査結果」 鉄鋼スラグ協会、「平成28年度鉄鋼スラグ需給の概要」	（転炉・電炉スラグの埋め立て量）×（スクラップ由来の転炉・電炉スラグ発生量）／（転炉・電炉スラグ発生量）
E-9	普通鋼（転炉、電炉）スラグのその他資源化量	鉄源協会「鉄源流通量調査結果」 鉄鋼スラグ協会、「平成28年度鉄鋼スラグ需給の概要」	（転炉・電炉スラグのその他資源化量）×（スクラップ由来の転炉・電炉スラグ発生量）／（転炉・電炉スラグ発生量）
E-10	製鋼煙灰の非鉄製錬原料化	鉄源協会「鉄源流通量調査結果」 鉄鋼スラグ協会、「平成28年度鉄鋼スラグ需給の概要」 NEDO「省エネルギー型金属ダスト回生技術の開発」	（電炉における粗鋼生産量）×（粗鋼生産における製鋼煙灰発生率）×（電炉におけるスクラップ使用率）×（製鋼煙灰の非鉄製錬での再資源化率）
E-11	製鋼煙灰の埋め立て量	鉄源協会「鉄源流通量調査結果」 鉄鋼スラグ協会、「平成28年度鉄鋼スラグ需給の概要」 NEDO「省エネルギー型金属ダスト回生技術の開発」	（電炉における粗鋼生産量）×（粗鋼生産における製鋼煙灰発生率）×（電炉におけるスクラップ使用率）×（埋め立て率）
E-12	製鋼煙灰由来の非鉄スラグのセメント原料化量	鉄源協会「鉄源流通量調査結果」 鉄鋼スラグ協会「平成28年度鉄鋼スラグ需給の概要」 日本鉱業協会「建設資材としての非鉄スラグの有効利用方法について」	（製鋼煙灰の非鉄製錬原料化量）×（製鋼煙灰を用いた非鉄製錬でのスラグ発生率）×（製鋼煙灰のセメント資源化率）
E-13	製鋼煙灰由来の非鉄スラグのその他原料化量	鉄源協会「鉄源流通量調査結果」 鉄鋼スラグ協会「平成28年度鉄鋼スラグ需給の概要」 日本鉱業協会「建設資材としての非鉄スラグの有効利用方法について」	（製鋼煙灰の非鉄製錬原料化量）×（製鋼煙灰を用いた非鉄製錬でのスラグ発生量）×（製鋼煙灰のその他原料化率）
E-14	製鋼煙灰由来の非鉄スラグの最終処分量	鉄源協会「鉄源流通量調査結果」 鉄鋼スラグ協会「平成28年度鉄鋼スラグ需給の概要」 日本鉱業協会「建設資材としての非鉄スラグの有効利用方法について」	（製鋼煙灰の非鉄製錬原料化量）×（製鋼煙灰を用いた非鉄製錬でのスラグ発生量）×（製鋼煙灰の最終処分率）
E-15	中間処理事業者からのSUSスクラップ供給量	ステンレス協会「ステンレス鋼生産量」 ステンレス協会「リサイクルが容易なステンレス鉄鋼」	（SUS鋼材生産量）×（SUSリサイクル率）

図表 50 我が国における廃棄物発生量の推計結果（単位：kt、2016年度）



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

3. 未資源化物資賦存量の推計

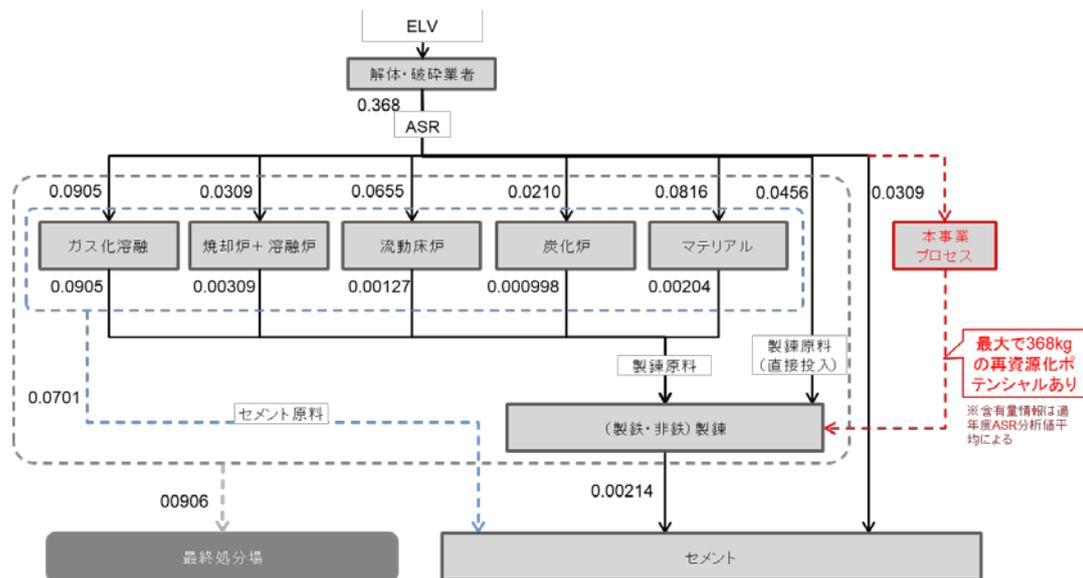
(1) ASR

ASR処理物の発生量推計を踏まえ、既存文献等における成分情報の整理を行った。CFRPは自動車用CFRPの国内需要を推計し、炭素繊維の平均使用年数からASR中の含有量を推計した。また、600～700℃程度で分解するため、マテリアル施設で処理された樹脂中にのみ残存すると仮定した（図表 51）。これに基づき、各元素及び物質に関してフロー推計を実施した（図表 52、図表 53、図表 54、図表 55、図表 56）。

図表 51 ASR中の各成分の成分情報

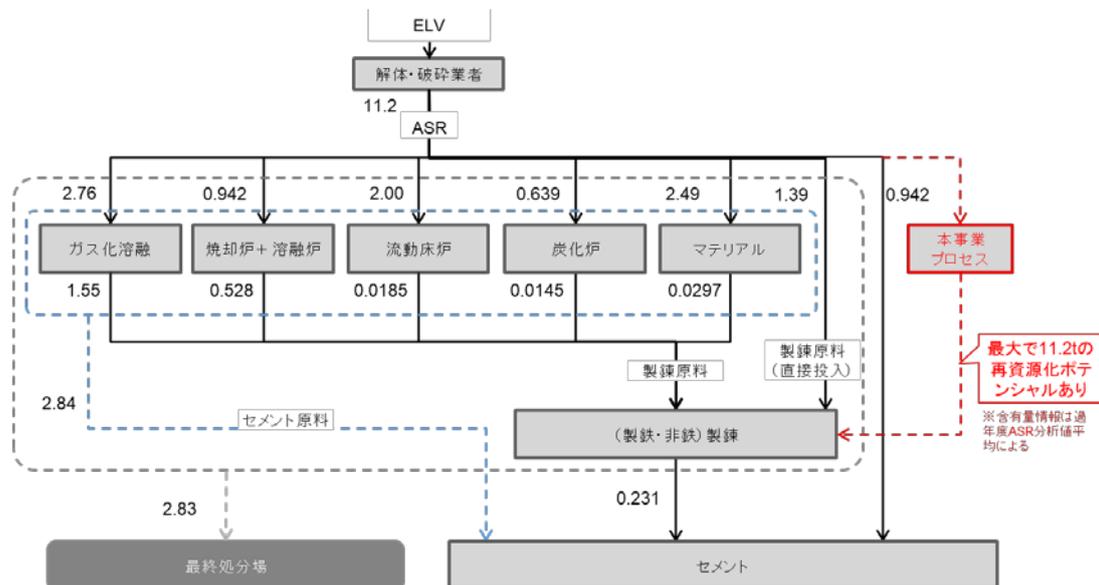
No	項目	主な情報源	主な推計方法
A-1 ～ A-8	ASR中の各元素賦存量	三菱UFJリサーチ&コンサルティング「平成28年度自動車リサイクル制度の安定的な運用及び、環境配慮設計の推進に向けた検討・調査」報告書（2017年） 本年度における実測値（Pd）	(Au, Ag, Cu)過去3年分のASR分析値の平均値 (Pd)本実証におけるSRの測定値 (CFRP)当社推計値
B-1 ～ B-2	溶融炉から製錬への原料供給	長田ほか、「自動車破砕残渣(ASR)の資源化・処理に関するライフサイクルアセスメント」(2012年) JOGNEC「都市ごみ等の溶融処理により得られる溶融メタル・溶融ダスト中の有価金属の挙動解析に関する共同スタディ」(2009年) ASR施設活用率	(Au, Ag, Cu, Pd) (ASR1t当たり各元素含有量) × (都市ごみ溶融時の各元素の溶融メタルへの分配率) ÷ (ASR1t当たりの溶融メタル発生量) (CFRP)想定値
B-3 ～ B-5	その他の施設から製錬への原料供給	山末ほか、「使用済み自動車から得られる鉄スクラップの開与物質総量」(2014年) 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年) ASR施設活用率	(Au, Ag, Cu, Pd) { (鉄スクラップ中の各元素含有量) + (鋼スクラップ中の各元素含有量) } × (ASR1t当たりアロケーション係数) (CFRP)想定値
C-1	リサイクル設備からセメントへの原料供給 (マテリアルリサイクル)	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」、 「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」(2014年)	(Au, Ag, Cu, Pd) { (中間処理施設への投入元素量) - (製錬投入元素量) } × (アロケーション係数) (CFRP) (セメントダスト中のCFRP混入量) × (セメント製造におけるダスト発生原単位)
C-2	ASR由来の製錬からセメントへの原料供給 (マテリアルリサイクル)	経済産業省・環境省「自動車リサイクル精度の施行状況の評価・検討に関する報告書」(2014年) 鉄鋼スラグ協会「平成28年度鉄鋼スラグ需給の概要」 ASR施設活用率	(Au, Ag, Cu) (鉄鋼スラグ発生率) × (鉄鋼スラグ各元素含有量) + (電炉スラグ発生率) × (電炉スラグ中各元素含有量) (Pd) (SR100%サンプルの破砕品におけるパラジウム含有量) × (金のスラグへの分配率) (CFRP)想定値
C-3	最終処分量	経済産業省・環境省「自動車リサイクル法の施行状況」	(Au, Ag, Cu, Pd) { (中間処理施設への投入元素量) - (製錬投入元素量) } × (アロケーション係数) (CFRP) (ASR中の樹脂含有量) × (樹脂中のCFRP含有量)

図表 52 ASR中の金 (Au) のフロー (単位: 純分t/年)



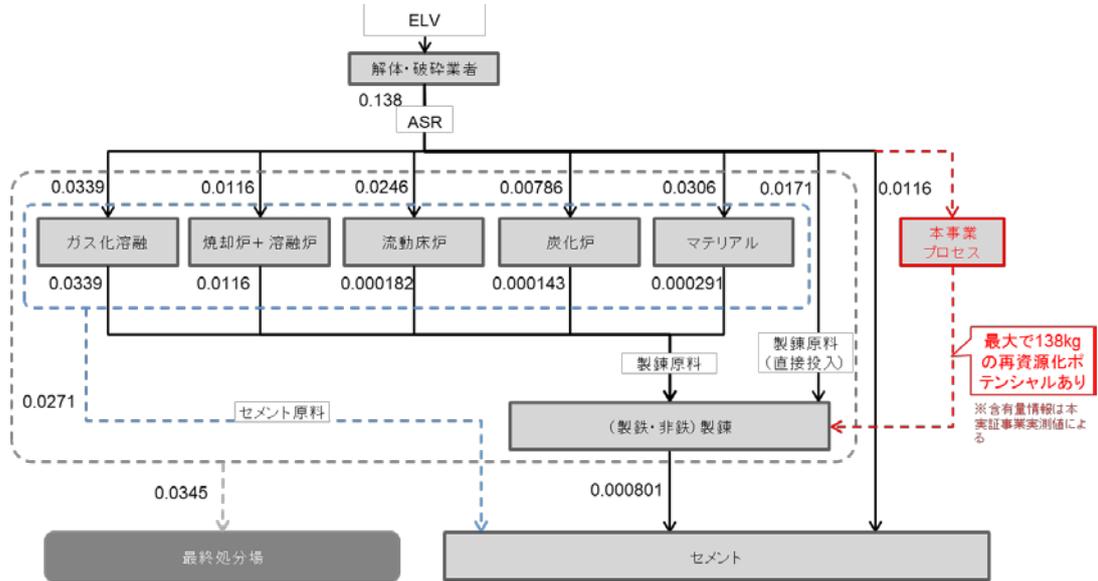
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 53 ASR中の銀 (Ag) のフロー (単位: 純分t/年)



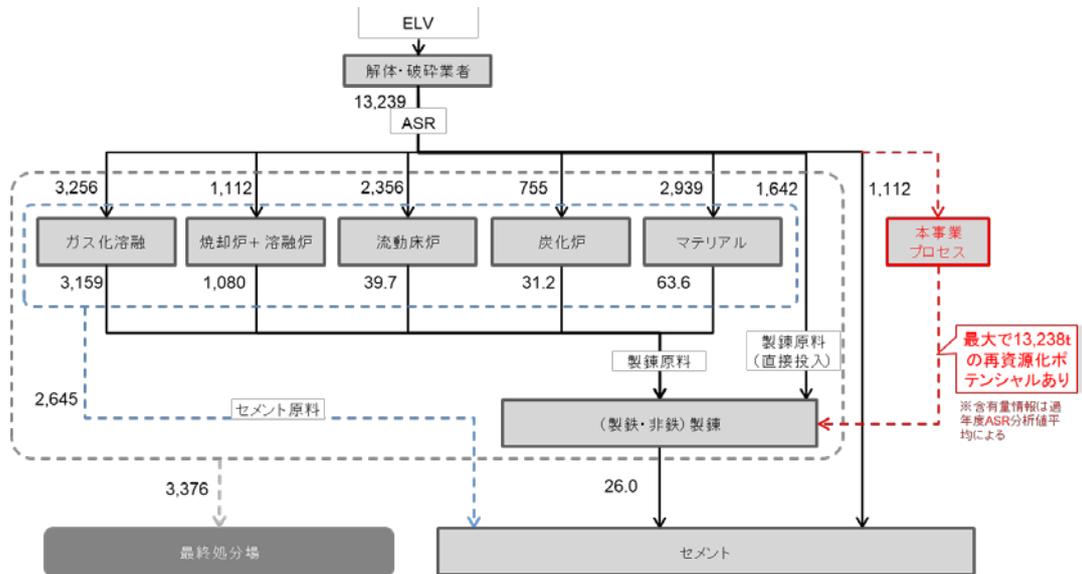
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 54 ASR中のパラジウム (Pd) のフロー (単位: 純分t/年)



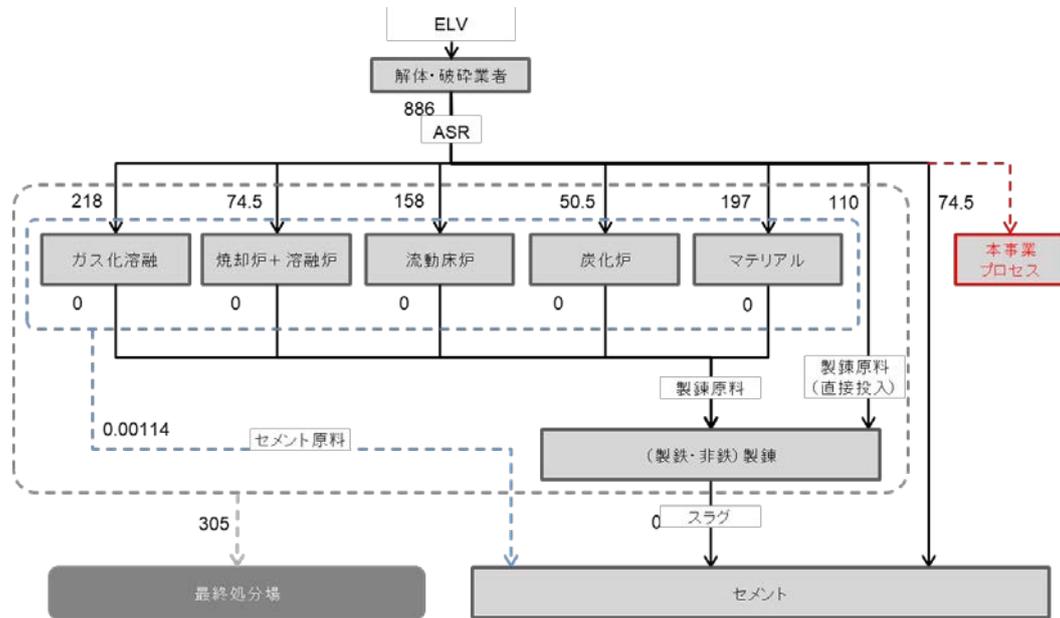
(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 55 ASR中の銅 (Cu) のフロー (単位: 純分t/年)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 56 ASR中のCFRPのフロー（単位：純分t/年, 2029年度）



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

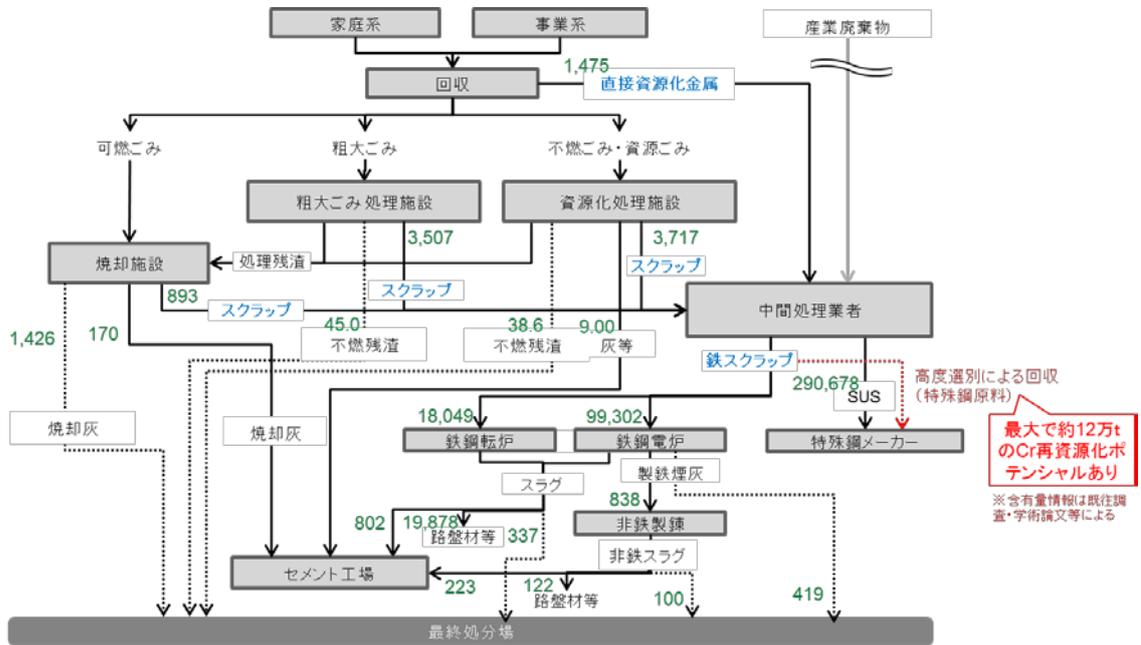
(2) 鉄スクラップ

鉄スクラップの廃棄量を踏まえ、既存文献における成分情報の整理を行った（図表57）。また、バルク量と成分情報よりクロムのマテリアルフローを作成した（図表58）。

図表 57 一般廃棄物及び産業廃棄物由来の鉄スクラップにおけるクロムの成分情報

No	項目	主な情報源	備考（データの使用方法、推計方法等）
D-1	可燃ごみ処理量	-	-
D-2	粗大ごみ処理量	-	-
D-3	不燃ごみ・資源ごみ処理量	-	-
D-4	粗大ごみ処理残渣の焼却量	-	-
D-5	資源化処理残渣の焼却量	-	-
D-6	焼却施設からの焼却灰埋め立て量	辰市ほか「東京都内の焼却処理・溶融処理における希少金属の挙動」（2012年）	$(\text{飛灰中のCr含有量}) \times (\text{焼却炉における飛灰発生量}) / (\text{焼却炉における焼却灰発生量}) + (\text{主灰中のCr含有量}) \times (\text{焼却炉における主灰発生率}) / (\text{焼却炉における焼却灰発生量})$
D-7	焼却施設からの焼却灰セメント原料供給量	矢島ほか「一般廃棄物の焼却残さの発生量評価」（2016年）	$(\text{飛灰中のCr含有量}) \times (\text{焼却炉における飛灰発生量}) / (\text{焼却炉における焼却灰発生量}) + (\text{主灰中のCr含有量}) \times (\text{焼却炉における主灰発生率}) / (\text{焼却炉における焼却灰発生量})$
D-8	粗大ごみ処理残渣の埋め立て量	門木ほか「不燃ごみ破砕残渣中の希少金属濃度と鳥取県内排出量の推計」	文献値
D-9	資源化処理残渣の埋め立て量		
D-10	資源化処理施設からのセメント原料供給量	辰市ほか「東京都内の焼却処理・溶融処理における希少金属の挙動」（2012年） 矢島ほか「一般廃棄物の焼却残さの発生量評価」（2016年）	$(\text{飛灰中のCr含有量}) \times (\text{焼却炉における飛灰発生量}) / (\text{焼却炉における焼却灰発生量}) + (\text{主灰中のCr含有量}) \times (\text{焼却炉における主灰発生率}) / (\text{焼却炉における焼却灰発生量})$
E-1	金属スクラップ処理量（直接資源化分）	当社本年度実測値（スクラップヤードにて測定）	実測値
E-2	焼却施設からの金属資源化量	当社本年度実測値（スクラップヤードにて測定した値で代用）	実測値（想定値）
E-3	粗大ごみ処理施設からの金属資源化量	環境省「平成29年度低炭素型廃棄物処理支援事業補助金（地域循環圏・エコタウン低炭素化促進事業）」（2018年1月） 当社本年度実測値（スクラップヤードにて測定）	$(\text{鉄スクラップ中のCr含有量}) \times (\text{スクラップ中の鉄スクラップ発生量}) / (\text{スクラップ中の鉄・アルミスクラップ発生量}) + (\text{アルミスクラップ中のCr含有量}) \times (\text{スクラップ中のアルミスクラップ発生量}) / (\text{スクラップ中の鉄・アルミスクラップ発生量})$
E-4	資源化処理施設からの金属資源化量		$(\text{鉄スクラップ中のCr含有量}) \times (\text{スクラップ中の鉄スクラップ発生量}) / (\text{スクラップ中の鉄・アルミスクラップ発生量}) + (\text{アルミスクラップ中のCr含有量}) \times (\text{スクラップ中のアルミスクラップ発生量}) / (\text{スクラップ中の鉄・アルミスクラップ発生量})$
E-5	中間処理事業者から転炉への鉄スクラップ供給量	産鋼ほか「鉄鋼材における不純物元素濃度の日中間比較」（2014年）	$(\text{転炉におけるスクラップ由来の粗鋼生産量}) \times (\text{粗鋼中のCr含有量}) + (\text{転炉におけるスクラップ由来のスラグ発生量}) \times (\text{転炉スラグ中のCr含有量})$
E-6	中間処理事業者から電炉への鉄スクラップ供給量	環境省「平成29年度低炭素型廃棄物処理支援事業補助金（地域循環圏・エコタウン低炭素化促進事業）」（2018年1月）における実測値	$(\text{電炉におけるスクラップ由来の粗鋼生産量}) \times (\text{粗鋼中のCr含有量}) + (\text{電炉におけるスクラップ由来のスラグ発生量}) \times (\text{電炉スラグ中のCr含有量}) + (\text{電炉におけるスクラップ由来の製鋼煙灰発生量}) \times (\text{製鋼煙灰中のCr含有量})$
E-7	普通鋼（転炉、電炉）スラグのセメント原料化量	鉄鋼スラグ協会、「平成28年度鉄鋼スラグ需給の概要」	$(\text{転炉スラグ中のCr含有量}) \times (\text{転炉スラグ発生量}) / (\text{転炉・電炉スラグ発生量}) + (\text{電炉スラグ中のCr含有量}) \times (\text{電炉スラグ発生量}) / (\text{転炉・電炉スラグ発生量})$
E-8	普通鋼（転炉、電炉）スラグの埋め立て量	環境省「平成29年度低炭素型廃棄物処理支援事業補助金（地域循環圏・エコタウン低炭素化促進事業）」（2018年1月）における実測値	
E-9	普通鋼（転炉、電炉）スラグのその他資源化量		
E-10	製鋼煙灰の非鉄製鉄原料化		
E-11	製鋼煙灰の埋め立て量	環境省「平成29年度低炭素型廃棄物処理支援事業補助金（地域循環圏・エコタウン低炭素化促進事業）」（2018年1月）における実測値	実測値
E-12	製鋼煙灰由来の非鉄スラグのセメント原料化量		
E-13	製鋼煙灰由来の非鉄スラグのその他原料化量		
E-14	製鋼煙灰由来の非鉄スラグの最終処分量		
E-15	中間処理業者からのSUSスクラップ供給量	五十嵐ほか「日本国内におけるステンレス鋼のマテリアルフロー解析及び循環利用促進によるCO2削減効果の評価」（2005）	$(\text{SUS鋼材中Cr含有量}) \times (\text{SUS鋼材生産比率})$

図表 58 鉄スクラップ中のクロム (Cr) のフロー (単位: 純分t/年)



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

III-3. 技術実証及び技術課題に関する検討・分析

技術実証の結果、本技術によって、CFRP含有ASRを適正処理したうえで、再資源化できる可能性がみられた。

前掲の実証結果の分析（燃焼処理・破碎後の産物の粒度分布、破碎品の工業分析（揮発分、固定炭素分、灰分）、発熱量分析、ハロゲン及び金属成分の分析）をもとに、セメント産業及び鉄鋼電炉産業におけるコークス代替品、非鉄製錬（乾式銅製錬）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。各回収物について、検討結果及び新たな技術課題は以下の通りである。

1. コークス代替品：セメント産業向け

CFRP中の樹脂を必要以上に消失させないため、またガラスや金属成分等の分離性を高めるためには、325℃程度の低温で脆化处理することが効果的であることがわかった。得られたコークス代替品は、熱量や含有ハロゲンの面では代替燃料として利用可能な品位となり、本技術によってCFRP含有ASRを適正処理し、また少なくともセメント産業向けのコークス代替品として再資源化できる可能性があることがわかった。ただし、以下の点については未検証であるため、実用化に向けて更なる検証が必要となる。

- ・ 微粉燃料化した後、キルンバーナー側から燃焼することで完全燃焼をはかれるが、未燃分が発生した場合は、排ガス処理系統の電気集塵機、バグフィルタの運転に支障を及ぼす可能性がある
- ・ 微粉燃料化したものがキルン内部で着地燃焼した場合、クリンカの品質に影響を及ぼす可能性がある
- ・ 微粉燃料化をするためには、選別後の脆化物の粉碎が必要となり、粉碎機の磨耗（ランニングコスト）の検証が必要となる

また、本実証ではハンマーミル等の破碎が原因で炭素繊維が綿状になってしまい、不純物混入の可能性、また実機投入時の障害等が懸念された。これに対しては、脆化处理後の脆化物を炭素繊維とそれ以外に選別（風力選別）した後、各々を最適な破碎機で処理することで、綿状化の防止、効率的な選別を実現する可能性がみえている。

2. コークス代替品：鉄鋼電炉向け

鉄鋼電炉向けのコークス代替品（加炭材代替物や微粉炭代替物）として利用するためには、鉄鋼電炉における忌避成分（主に銅）の分離性を向上させ、また加炭材や微粉炭に準じた粒度、嵩比重にする必要がある。非鉄成分の分離性を向上させるため（脆化処理を施すASRの元来成分にも左右されるが）、破碎条件等を見直していく必要がある。なお現時点では、塩素分の含有は許容量であると見込まれる。

本実証では、耐摩耗性の観点からハンマーミルを使用していたが、細粒分の割合を増加させるためには破碎条件（破碎手法、スクリーン径など）の再検討が必要となる。

また、鉄鋼電炉向けとするためには、ガラス分を取り除くための選別技術、選別条件、また条件設定を判断するための粒度分布や成分分布（分配状況）を確認する必要がある。

3. 非鉄製錬向け想定原料

選別後に得られた重産物には、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、シリカ、アルミの含有は許容量であると見込まれる。

重産物には、当初回収を想定していた金、銀、銅に加えて、白金族等が含有しており、ASR等に白金族等が未資源化物質として賦存していることが明らかになった。本技術を用いることによって、ASR等に希釈、拡散されている白金族等を新たに回収できる可能性がみられた。白金族の回収が可能となった場合、採算性の向上にも寄与するものと見込まれる。

今後、脆化物を破碎・選別後に、貴金属（金、銀、白金族等）を濃縮して回収する可能性、またその後のセメント・クリンカー生産プロセスに投入し、そこで回収する可能性について検討を進めていく必要がある。

上記を踏まえ、各回収物を各産業に原料として供給できる可能性について整理した（図表 59）。ここでは、本提案技術における各回収物を付加価値の高い原料として供給することを想定しており、各産業における原料の要求水準と比較して各回収物の評価を行った。

図表 59 本提案技術における回収物の供給可能性と今後の検討事項・課題

本事業における回収物	鉄鋼電炉	セメント	銅製錬 (自溶炉)	銅製錬 (転炉)	その他の用途 (タイル、テトラポット等)
鉄鋼電炉向け 想定原料 (Fe主体)	△ 【課題】 ・忌避成分(主にCu)の分離	○ 【検討事項】 ・燃烧性の確認 ・破碎等に係るランニングコストの検証	—	—	—
コークス代替品 (C主体)	△ 【課題】 ・忌避成分(主にCu等)の分離 ・投入に適した品質の確保(粒度、嵩密度、形状)	○ 【検討事項】 ・燃烧性の確認 ・破碎等に係るランニングコスト検証	—	—	—
セメント向け 想定原料 (ガラス等)	—	○ 【検討事項】 ・アルカリ成分量の確認	—	—	○ 【検討事項】 ・実現性の確認
非鉄製錬(乾式 銅製錬)向け 想定原料	—	—	○ 【検討事項】 ・銅品位の向上	△ 【課題】 ・排気系への混入	—

○：現段階で利用可能、△：課題を解決することで利用可能

IV. まとめ

IV-1. 今年度の成果

1. CFRP含有ASR等の適正処理・再資源化の評価

本実証事業では、ASR相当のSRを用いて、非燃焼処理及び破碎・選別処理を行い、各産物における粒度、固定炭素量、含水率、金属含有量の分析を踏まえて、セメント・鉄鋼電炉両産業向けに適したコークス代替品及び製錬原料として適正に加工処理するための最適なプロセスを検討した。

実証の結果、325℃程度の非燃焼処理を施すことで、CFRP含有ASRの適正処理、また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ことがわかった。一方で、実際に微粉燃料として使用した場合、未燃焼分によるバグフィルタの運転への悪影響の可能性、キルン内部での着地燃焼がクリンカの品質に影響を及ぼす可能性が指摘されており、今後の検証すべき課題となっている。また、鉄鋼電炉向けコークス代替品（加炭材代替物）として利用するためには、忌避成分（主に銅）の分離性の向上、用途に応じた粒度、嵩比重の調整が必要であり、破碎・選別条件等の見直しが必要となっている。具体的には、非鉄金属やガラス等の分離性を向上させるための破碎条件（ハンマーミル以外の使用、スクリーン径等）の見直しや、炭素繊維が綿状になることを防ぐための破碎（炭素繊維とそれ以外を選別した後、それぞれをせん断式破碎（炭素繊維）、衝撃式破碎（炭素繊維以外）等の最適な破碎方法で破碎）が検討される。

実証の結果、今回のフローで回収した非鉄製錬向け想定原料は、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。一方で、金、銀の濃縮は必ずしも十分とは言えず、破碎条件の見直しによる分離性の向上、比重差選別の滞留時間の調整による高度な選別の実現が課題となっている。同原料には当初回収を想定していた金、銀、銅に加えて、白金族等が含まれていることがわかった。また、忌避・選好物質のマテリアルバランス及びフロー推計でも、日本全国におけるPdの再資源化ポテンシャルが138kgであることが確認された。本技術の高度化によって、ASR等に希釈されている白金族を回収できる可能性が明らかになった。

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

セメント産業が受け入れている廃棄物中の忌避物質には、CFRP以外に電炉スラグや電炉ダスト等に由来するCrがあるが、これは中間処理における磁選プロセスでマルテンサイト系ステンレス鋼スクラップの混入がその主要因と見られている。普通鋼とマルテンサイト系ステンレス鋼の透磁率の違いに着目した高度な磁選プロセスを導入し、またそこで分離されたマルテンサイト系ステンレス鋼をCrリッチなスクラップとして販売できれば、セメント産業へのクロム流入量を減らせる可能性があることがわかった。

ASRやSRには、使用済み製品等に由来する貴金属類（金、銀、白金族等）が希薄ではあるが、一定度含まれていることがわかっており、これを非燃焼処理後の選別処理で濃縮したり、またセメント・クリンカー生産プロセスを通じて濃縮させたりすることであれば、廃棄物中に希釈、拡散されていたこうした希少資源を回収できる可能性があることがわかった。

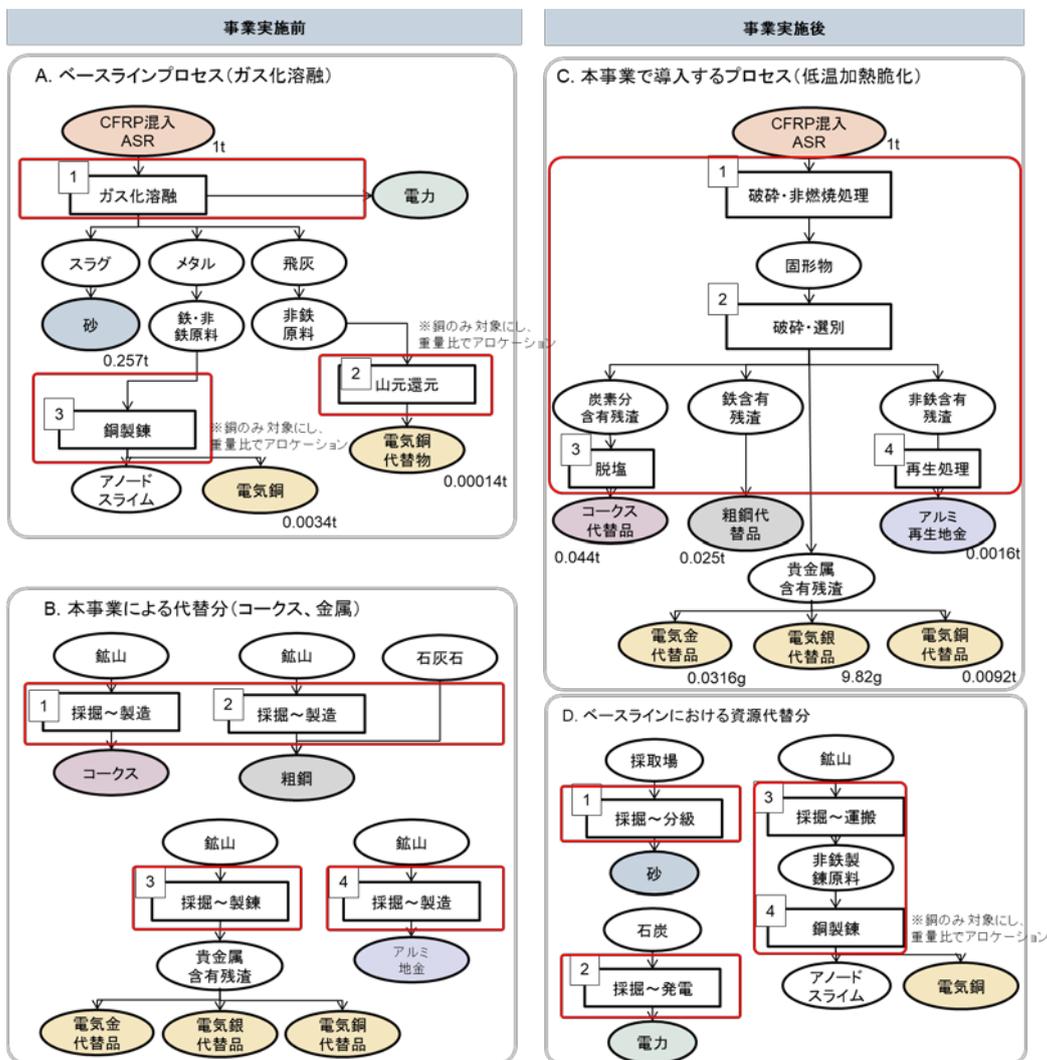
3. 環境影響及び事業性評価

(1) LCA

① バウンダリーの設定

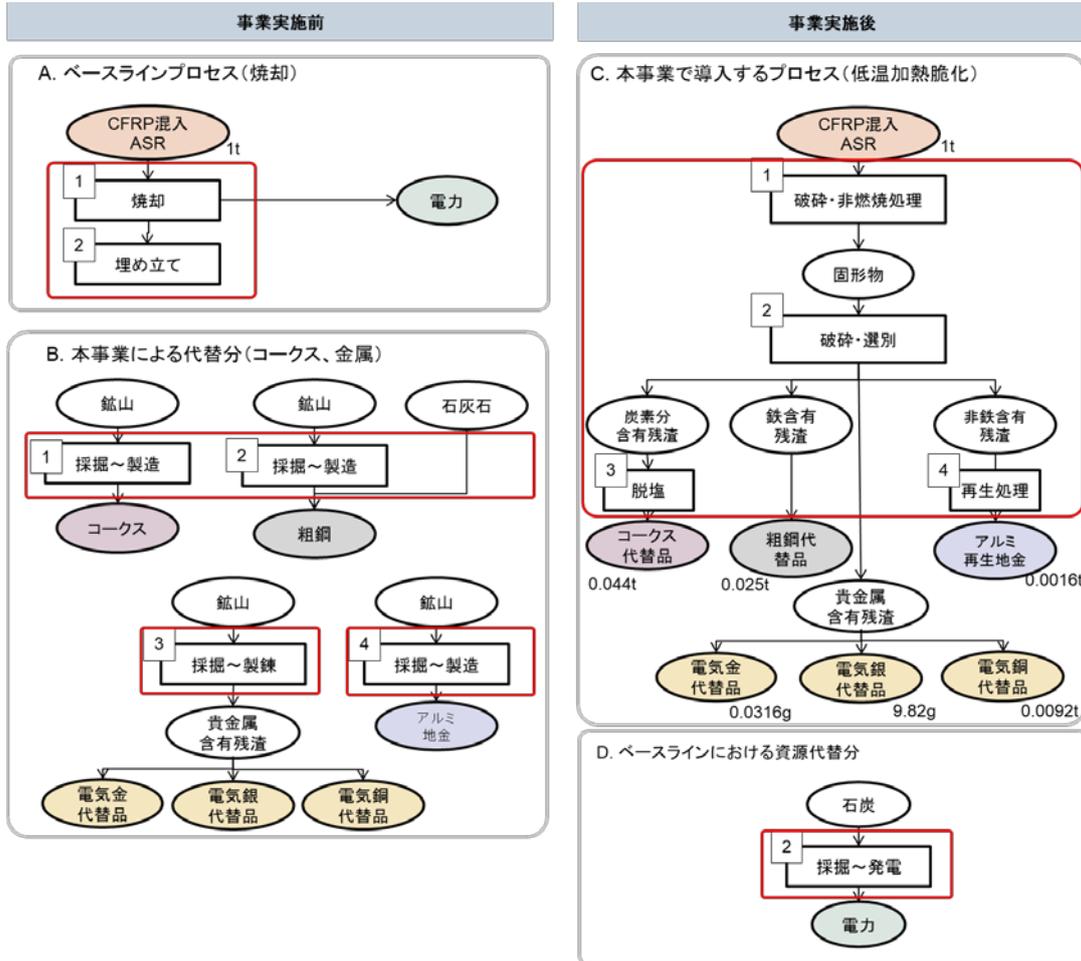
本実証では、従来のASR処理プロセスで主流であるガス化溶融及び焼却と比較し、二酸化炭素の低減効果を算出した。機能単位は「CFRP20%混入ASRを1t処理し、その際に回収する再生原料（コークス代替品、非鉄製錬原料、製鉄原料等）を生産する際の二酸化炭素排出量」と設定した。ガス化溶融との比較のためのバウンダリーを図表 60、焼却処理との比較のためのバウンダリーを図表 61に示す。

図表 60 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 61 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

それぞれ設定したバウンダリーにおいて、図表 62、図表 63、図表 64及び図表 65に示すデータを基に、二酸化炭素排出量を試算した。

図表 62 従来プロセス 1（ガス化溶融＋原料生産）と新規プロセスの二酸化炭素排出量削減効果における結果の詳細（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	原単位数名	数値	単位	
A	1	ガス化溶融	A001	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kwh	163.8
			A003	CFRP混入ASR1t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ASR1t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ASR1t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ASR1t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	0.512	kg-CO2/kwh	0.3
			A010	CFRP混入ASR1t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	0.512	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)	0.007	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)	0.164	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	0.5
	合計										1943.7

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	原単位数名	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	0.4367443	t/t-機能単位	B002	石炭におけるCO2排出係数	2330	kg-CO2/t	1017.614
	2	鉄回収(粗鋼代替)	B003	CFRP混入ASR1t当たりの鉄回収量	0.0250100	t/t-機能単位	B004	粗鋼製造1t当たりのCO2排出量	1.19	kg-CO2/t	0.030
	3	銅回収(電気銅代替)	B005	CFRP混入ASR1t当たりの銅回収量	0.0091400	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	0.034
	4	金回収(電気金代替)	B007	CFRP混入ASR1t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ASR1t当たりの銀回収量	0.0000098	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ASR1t当たりのアルミニウム回収量	0.0019490	t/t-機能単位	B012	アルミニウム生産1t当たりのCO2排出量	9200	kg-CO2/t	17.931
	合計										1035.609

図表 63 従来プロセス1（ガス化溶融＋原料生産）と新規プロセスの二酸化炭素排出量削減効果における結果の詳細（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	粗破砕	C001	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kWh	44.800
			C003	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kWh	54.477
		低温加熱脆化	C005	CFRP混入ASR1t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ASR1t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	0.512	kg-CO2/kWh	0.134
			C011	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kWh	0.134
		篩い選別	C013	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kWh	0.824
			C015	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kWh	0.574
		乾式比重選別①	C017	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kWh	0.413
			C019	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kWh	1.065
	3	脱塩	C021	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kWh	1.459
	4	アルミ再生処理	C023	CFRP混入ASR1t当たりのアルミ回収量	0.0019	t/t-機能単位	C024	アルミニウム生産1t当たりのCO2排出量	310.0	kg-CO2/t	0.604
	合計										1096.945

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	
D	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に必要な電気使用量	1.151	kWh/t-機能単位	D002	1kWh当たりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	0.589
			D003	従来プロセスで代替される砂を得るために必要な軽油使用量	0.181	L/t-機能単位	D004	1L当たりのCO2排出量	2.580	kg-CO2/L	0.467
	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	0.512	kg-CO2/kWh	394.954
	3	鋼探掘～運搬	D007	従来プロセスで得られる銅を得るために必要な電気使用量	8.011	kWh/t-機能単位	D008	1kWh当たりのCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	4.102
			D009	従来プロセスで得られる銅を得るために必要なガソリン使用量	0.015647	L/t-機能単位	D010	1L当たりのCO2排出量	0.016	kg-CO2/L	0.000
			D011	従来プロセスで得られる銅を得るために必要な軽油使用量	0.580067	L/t-機能単位	D012	1L当たりのCO2排出量	2.580	kg-CO2/L	1.497
			D013	従来プロセスで得られる銅を得るために必要なA重油使用量	0.001590	L/t-機能単位	D014	1L当たりのCO2排出量	2.710	kg-CO2/L	0.004
			D015	従来プロセスで得られる銅を得るために必要なC重油使用量	0.428848	L/t-機能単位	D016	1L当たりのCO2排出量	3.000	kg-CO2/L	1.287
	4	鋼製錬	D017	従来プロセスで得られる銅を得るために必要な電力使用量(アロケーション後)	0.003422	kWh/t-機能単位	D018	1kWh電力当たりCO2排出量	0.512	kg-CO2/kWh	0.002
			D019	従来プロセスで得られる銅を得るために必要な石炭使用量(アロケーション後)	0.007136	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	0.017
			D021	従来プロセスで得られる銅を得るために必要なC重油使用量(アロケーション後)	0.158065	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	0.474
合計										403.393	

図表 64 従来プロセス2（焼却処理+原料生産）と新規プロセスの二酸化炭素排出量削減効果における結果の詳細（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ASR1t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	0.512	kg-CO2/kwh	105.0
			A003	CFRP混入ASR1t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ASR1t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										1359.1	

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	0.4367443	t/t-機能単位	B002	石炭におけるCO2排出係数	2330	kg-CO2/t	1017.614
	2	鉄回収(粗鋼代替)	B003	CFRP混入ASR1t当たりの鉄回収量	0.0250100	t/t-機能単位	B004	粗鋼製造1t当たりのCO2排出量	1.19	kg-CO2/t	0.030
	3	銅回収(電気銅代替)	B005	CFRP混入ASR1t当たりの銅回収量	0.0091400	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	0.034
	4	金回収(電気金代替)	B007	CFRP混入ASR1t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ASR1t当たりの銀回収量	0.0000098	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ASR1t当たりのアルミニウム回収量	0.0019490	t/t-機能単位	B012	アルミニウム生産1t当たりのCO2排出量	9200	kg-CO2/t	17.931
	合計										1035.609

図表 65 従来プロセス2（焼却処理+原料生産）と新規プロセスの二酸化炭素排出量削減効果における結果の詳細（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ASR1t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	0.512	kg-CO2/kwh	44.800
			C003	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kwh	54.477
		低温加熱脆化	C005	CFRP混入ASR1t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ASR1t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	0.512	kg-CO2/kwh	0.134
			C011	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kwh	0.134
		篩い選別	C013	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kwh	0.824
			C015	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kwh	0.574
		乾式比重選別①	C017	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kwh	0.413
			C019	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kwh	1.065
	3	脱塩	C021	CFRP混入ASR1t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	0.512	kg-CO2/kwh	1.459
	4	アルミ再生処理	C023	CFRP混入ASR1t当たりのアルミ回収量	0.0019	t/t-機能単位	C024	アルミニウム生産1t当たりのCO2排出量	310.0	kg-CO2/t	0.604
		合計									1096.945

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	
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	0.512	kg-CO2/kwh	394.954
		合計									394.954

③ 計算結果

①及び②を踏まえて算出したLCAの結果を図表 66、図表 67にそれぞれ示す。

図表 66 従来プロセス（ガス化溶融＋原料生産）と新規プロセスにおける二酸化炭素削減効果算出結果

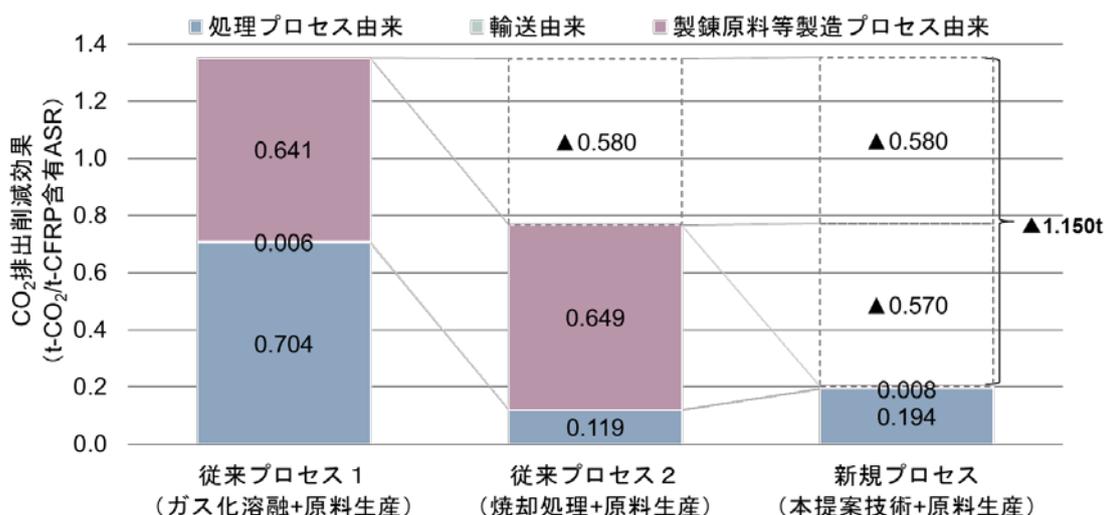
カテゴリ	項目	排出量 (CO ₂ e-kg/t)
A	現状(ベースライン)の排出量	1,943.6863
B	事業実施時の代替分	1,035.6086
C	事業実施時の排出量	1,096.9454
D	現状(ベースライン)の代替分	403.3925
	CO2 削減効果 (A+B)-(C+D)	1,478.9569

図表 67 従来プロセス（焼却＋原料生産）と新規プロセスにおける二酸化炭素削減効果算出結果

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	1,359.1422
B	事業実施時の代替分	1,035.6086
C	事業実施時の排出量	1,096.9454
D	現状(ベースライン)の代替分	394.9544
	CO2 削減効果 (A+B)-(C+D)	902.8510

また、従来プロセスと新規プロセスと同時に比較するため、副生物や輸送分を加味して二酸化炭素排出量の比較を行ったところ、新規プロセスは従来プロセス1（ガス化溶解+原料生産）と比較して1.5t、従来プロセス2（焼却処理+原料生産）と比較して0.57tの二酸化炭素排出量を削減できると試算された（図表68）。

図表 68 本提案技術による二酸化炭素排出量削減効果



（出所）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

（注）従来プロセス1, 2及び新規プロセスを同時に比較するため、従来プロセス2の「原料生産」において砂生産も含めて二酸化炭素排出削減効果を算出、また発電により削減できる二酸化炭素は原料生産分にてアロケーションしている。

（2）事業性評価

本提案技術の事業実現可能性を検討するにあたり、投資額を試算した。試算の条件としては、過去実証⁵をもとに処理規模をASR4.0t/h（年間28,800t）を想定し、セメント工場に付設することを前提に排ガスはセメントキルンで処理できるものとした。新たに投資が必要な設備として、前処理設備や非燃焼処理設備、金属回収設備等を想定した。

本事業で処理をする対象はCFRPを20%含むASRとした。その際、収入としてはASRの処理益（1kgあたり25円と仮定）及び製錬原料（金、銀、パラジウム、銅、鉄）、コークスの資源売却益を想定した。これらの売却価格を他方、支出は変動費（電力・燃料費、維持費、分析費等）と固定費（人件費、修繕費、減価償却費

⁵（出所）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）

等)を想定した。これらそれぞれ試算した結果、年間187百万円の利益が期待できる結果となった(図表 70、図表 71)。

図表 69 資源単価一覧

資源項目	価格	単位	備考	参考
金	4,524	(円/g)	2018年12月産業用相場平均価格	田中貴金属ウェブサイト ⁶
銀	54.10	(円/g)	2018年12月産業用相場平均価格	
パラジウム	4,533	(円/g)	2018年12月産業用相場平均価格	
銅	621,000	(円/t)	2019年2月12日時点、上銅、東京	産業新聞 ⁷
鉄	20,500	(円/t)	2019年2月12日時点、H2、東京	産業新聞 ⁸
コークス	14,010	(円/t)	2018年11月、一般炭、CIF価格	新電力ネット ⁹

図表 70 事象収支試算結果

		ASR80%+CFRP20% (325℃) (百万円)
収入	処理益	720
	資源売却益	213
	小計	933
支出	変動費	308
	固定費	438
	小計	746
事業収支		187

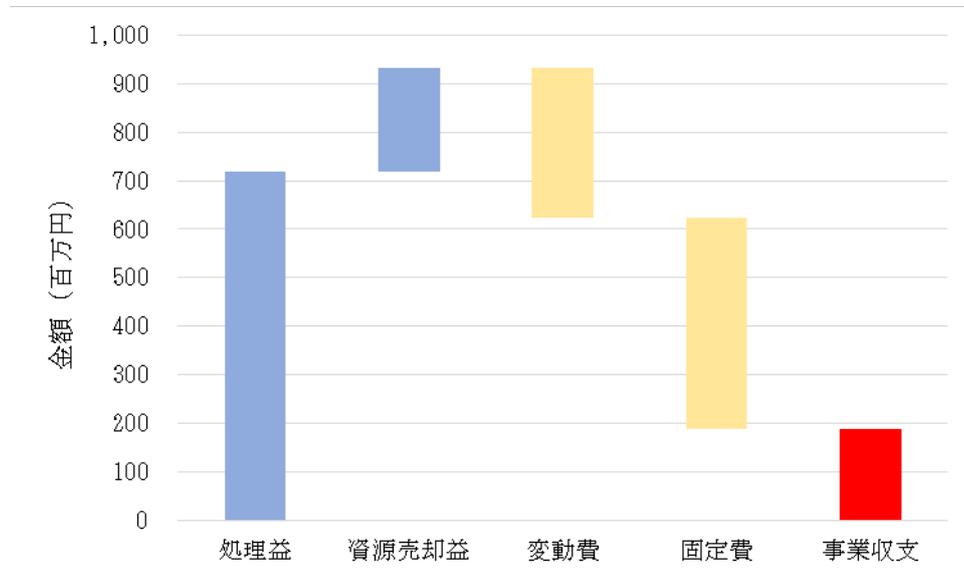
⁶ 田中貴金属ウェブサイト「産業用相場情報」<<https://pro.tanaka.co.jp/library/rate/>> (2019年2月15日アクセス)

⁷ 産業新聞ウェブサイト「非鉄金属市場価格」<<https://www.japanmetal.com/nonf-metal-price>> (2019年2月15日アクセス)

⁸ 産業新聞ウェブサイト「鉄鋼市場価格」<<https://www.japanmetal.com/iron-steel-price>> (2019年2月15日アクセス)

⁹ 新電力ネットウェブサイト「石炭単価の推移」<<https://pps-net.org/statistics/coal3>> (2019年2月15日アクセス)

図表 71 事業収支構造図



(出所) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(注) 本試算における支出において、本年度実証で実施していない水洗設備や廃水処理設備を含んでいるものであるが、将来的に実用化する際にはこれらも必要になるとしてこれらの設備投資を含めて行っている。

IV-2. 今後の課題

1. 今後の事業化への見通し

(1) 全体の事業構想（ロードマップ）と其中での現在の位置付けの検討

処理困難廃棄物とされているCFRP含有ASR等を適正の処理しつつ、セメント産業および鉄鋼電炉産業でコークス代替品として再資源化できる可能性が見えてきた。今後は、用途に応じて忌避物質の分離性を高め、また採算性を改善できる可能性がある貴金属等の回収・再資源化を進めていく必要がある。

次年度以降は、用途別仕様を意識した破碎・選別条件の見直し、また必要に応じて別途工程での新たな濃縮、回収可能性等も検討していくことが想定される。

(2) 事業化に向けて、更に解決すべき課題

本実証事業において、一部の回収物については再資源化できる可能性が見えているものの、事業化に向けてはいくつかの課題が残されている。最終的な事業化に向けて検討すべき課題を以下に示す。

- 破碎条件に関する検討（塊状の産物が残存、発塵性を踏まえた労働環境面での対応）
- 磁着物中へのCFRP混入に関する検討（風選ダストの回収、磁選方式の変更）
- 渦電流選別機の高度化に関する検討（より細粒成分の回収に適した装置の導入）
- 比重差選別機の高度化に関する検討（より滞留時間の長い装置の導入）
- 非鉄製錬向け想定原料（重産物）中に含まれる各種非鉄金属（銅、金、白金族等）の濃縮可能性に関する検討
- 非鉄製錬向け想定原料（重産物）中に含まれるガラス成分の除去及び再資源化可能性に関する検討
- コークス代替品中に含まれるガラス成分の除去及び再資源化可能性に関する検討
- ASR・SR以外の選好・忌避物質流入源に関する情報収集及び分離可能性の検討
- コークス代替品のセメント産業での利用を想定したハンドリング性の向上（破碎条件の見直し等）
- コークス代替品の鉄鋼電炉での利用を可能にするためのプロセス改善（破碎条件の見直し、磁選・渦電流選別・比重差選別条件の見直し）

- クリンカ生産プロセスを活用した有用金属の濃縮可能性の検討

2. 二年目での実証予定

(1) 二年間で最終的に到達するゴール

二年間で最終的に到達するゴールとして以下を想定している。

- A) セメント産業におけるCFRP含有ASR等の適正処理と（少なくとも）セメント原料代替物として利用するための非燃焼処理温度及び破碎・選別プロセス仕様の特定
- B) 鉄鋼電炉向けのコークス代替品として利用する際の技術課題の特定
- C) ASR等に有用金属が含まれる場合の最適な濃縮方法に関する具体化

(2) 検証すべき課題

(1) で定めたゴールに到達するために以下の課題を検証する必要がある。

- A) セメント産業向け微粉炭代替物を最大限得ようとする場合（固定炭素量をできるだけ残しつつ（温度は低く）、忌避物質を最大限分離）の処理温度、破碎・選別条件を特定する。
- B) 鉄鋼電炉向け微粉炭・加炭材代替物を最大限得ようとする場合（固定炭素量をできるだけ残しつつ、忌避物質を最大限分離。ただし、粗粒の加炭材代替物を一定量残す）の破碎・選別プロセスにおける課題を特定する。
- C) セメント産業で受け入れている各種廃棄物に由来する選好物質（ベースメタル、貴金属等）の濃縮方法や忌避物質（Cr等）の分離・活用方法に関する具体化を行う。

(3) 具体的な実証内容

(2) で設定した課題を検証し、最終的なゴールに到達するために、2年目は以下の①～⑤の実証内容に沿って事業を行う予定である。

- 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
 - 初年度実証事業の技術実証及び成分分析結果をもとに、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やその解決方法を検討する。
- ② （同様温度条件・成分等で処理したサンプルを対象とした）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

- 整理した技術課題、解決方法をもとに（必要であれば非燃焼処理）・破碎・選別条件を設定し、技術実証を行う。
 - 具体的には、非鉄金属やガラス等の分離性を向上させる破碎条件の見直や、炭素繊維が綿状になることを防ぐための破碎、より細粒成分の回収を向上させるための渦電流選別機の高度化、非鉄金属とガラス・樹脂等を高度に選別し、有用金属（金、銀、銅、白金族）等をさらに濃縮するための比重差選別機の高度化を想定している。
- ③ （廃棄物中に微量含まれる貴金属等の）濃縮及び回収可能性に関する検討
- 日本全国の廃棄物（主にASR）中に微量含まれる貴金属（金、銀、白金族）等の賦存量を推計結果、実証で得られた非鉄製錬向け想定原料の原料としての評価結果を踏まえ、想定する貴金属の回収可能性及び採算性に与える効果を検討する。
- ④ （非燃焼処理・破碎・選別処理では対応の難しい）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
- 使用済み製品の解体プロセスの高度化、投入前のASR等の事前選別の可能性等を検討する。
- ⑤ 定例会合の開催（セメント産業、鉄鋼電炉、非鉄製錬（銅、鉛・亜鉛）、中間処理事業者等）
- 上述の項目を実施するにあたり、有識者を招聘して研究会を1～2か月おきの頻度で開催し、助言や情報提供を受ける。研究会では、忌避・選好物質のマテリアルフローを改善し（事業者間で融通）、社会全体で資源効率を高めていくことについても検討する。

（以上）

環境省平成30年度省CO2型リサイクル設備技術実証事業
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

平成31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)

※無許可の転載・掲載を禁じます。