

平成 28 年度環境省委託事業

平成 28 年度低炭素型 3 R 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

報告書

平成 29 年 3 月 1 日



太平洋セメント株式会社

目次

1. 実証事業の実施	1
1.1 実証事業の概要.....	1
1.1.1 目的、背景、課題等.....	1
1.1.2 実施体制.....	2
1.1.3 実証事業のシステム.....	3
1.1.4 低温加熱脆化のメカニズム.....	4
1.1.5 実証事業の実施フロー.....	5
1.2 実証事業の結果.....	11
1.2.1 加熱脆化温度の選定.....	11
1.2.2 木くず粒径の選定.....	16
1.2.3 CFRP 混入の影響評価.....	23
1.2.4 破碎方法の選定.....	26
1.2.5 有用金属等と脆化固形物の石炭代替燃料価値の評価.....	30
2. 環境負荷低減効果の検証	49
2.1 CO ₂ 排出量削減効果の検討.....	49
2.1.1 ガス化溶解処理との比較による CO ₂ 削減効果試算.....	50
2.1.2 再選別処理との比較による CO ₂ 削減効果試算.....	55
2.1.3 CO ₂ 排出量削減効果まとめ.....	60
2.2 排ガスによる環境負荷の削減効果の検討.....	62
3. 事業実現可能性等の検証	64
3.1 建設費の算出.....	64
3.2 事業計画の策定.....	66
3.3 事業採算性試算.....	67
3.4 本処理技術の事業展開性.....	69
3.4.1 自社既存施設への横展開.....	69
3.4.2 受入対象廃棄物の横展開.....	70
4. 総括	74
5. 添付資料	78

目次

図 1.1-1	実証事業の目的、背景、課題等	1
図 1.1-2	実施体制図	2
図 1.1-3	本事業のシステム	3
図 1.1-4	低温加熱脆化のメカニズム	4
図 1.1-5	実証事業の全体フロー図	5
図 1.1-6	実証事業にて使用した機器	6
図 1.1-7	広島ガステクノ・サービスでの実証実験処理フロー図	7
図 1.1-8	破碎方法の検討概要	8
図 1.1-9	クロダリサイクルでの実証実験処理フロー図	9
図 1.1-10	ラボでの精選別フロー図（一例）	9
図 1.1-11	太平洋コンサルタントでの実証実験処理フロー図	10
図 1.2-1	本実証事業の実施内容、各実験工程のつながり、検証事項等	11
図 1.2-2	脆化固形物（破碎前）の粒度分布および総発熱量の残存率	14
図 1.2-3	脆化固形物（破碎後）の粒度分布および総発熱量の残存率	15
図 1.2-4	投入物の粒度分布	18
図 1.2-5	脆化固形物（破碎前）の粒度分布および総発熱量の残存率	21
図 1.2-6	脆化固形物（破碎後）の粒度分布および総発熱量の残存率	21
図 1.2-7	脆化固形物の粒度分布および総発熱量の残存率	25
図 1.2-8	脆化固形物選別実験の選別工程	32
図 1.2-9	金属資源回収の測定結果	35
図 1.2-10	重産物の精選別フロー（ECS+ART）	38
図 1.2-11	重産物の精選別フロー（篩い分け+ART）	39
図 1.2-12	中産物の精選別フロー	40
図 1.2-13	軽産物の精選別フロー	40
図 1.2-14	燃焼実験模式図	46
図 1.2-15	微粉炭と脆化固形物の燃焼性	47
図 1.2-16	実証実験結果に基づき設計した好適な処理フローと回収される金属資源の マテリアルバランス	48
図 2.1-1	処理物の加熱脆化处理により発生するCO ₂ 排出量の算出手法（例）	49
図 2.1-2	ベースラインプロセス①（ガス化溶解処理）	50
図 2.1-3	本実証事業のリサイクルプロセス	50
図 2.1-4	ベースラインプロセス②（再選別処理）	55
図 2.1-5	本実証事業のリサイクルプロセス（再掲）	55
図 2.1-6	処理技術別のASR1tあたりのCO ₂ 排出量の比較	60
図 2.1-7	本リサイクルプロセスにおける処理物別のCO ₂ 排出量と削減効果の比較	61
図 2.2-1	低温加熱脆化处理および水洗脱塩処理におけるハロゲンのマテリアルバ ランス	63
図 3.1-1	想定設備フロー	64
図 3.2-1	今後のスケジュール	66
図 3.3-1	ASR1tあたりの収益比較	67

図 3.3-2	資源売却益の内訳	68
図 3.4-1	太平洋セメントのセメント事業国内拠点.....	69
図 3.4-2	建設廃棄物における建築混合廃棄物の占める割合	70
図 3.4-3	風力発電設備の推移（総設置基数、1989-2014年）	71
図 3.4-4	風力発電設備の撤去台数および新規設置基数の推移（1995-2030年）	72
図 3.4-5	世界における風車の大型化.....	73

表目次

表 1.2-1	脆化固形物の易破砕性評価試験の実施条件	12
表 1.2-2	加熱脆化実証試験の日程および実施条件	13
表 1.2-3	脆化固形物の回収量および総発熱量	13
表 1.2-4	脆化固形物の破砕処理前後の粒度分布	14
表 1.2-5	投入した ASR および各処理温度の脆化固形物（破砕前） 写真資料	15
表 1.2-6	投入物のパターン	17
表 1.2-7	木くず 写真資料	17
表 1.2-8	投入物の各種性状	18
表 1.2-9	ASR および各種木くずの粒度分布	18
表 1.2-10	加熱脆化実証試験の日程および実施条件	19
表 1.2-11	脆化固形物の回収量および総発熱量	20
表 1.2-12	脆化固形物の破砕処理前後の粒度分布	20
表 1.2-13	木くずを混合した条件の脆化固形物（破砕前） 写真資料	22
表 1.2-14	投入物のパターン	23
表 1.2-15	CFRP 写真資料	23
表 1.2-16	投入物の各種性状	24
表 1.2-17	ASR および CFRP の粒度分布	24
表 1.2-18	加熱脆化実証試験の日程および実施条件	24
表 1.2-19	脆化固形物の回収量および総発熱量	25
表 1.2-20	脆化固形物の粒度分布	25
表 1.2-21	CFRP を混合した条件の脆化固形物 写真資料	26
表 1.2-22	各破砕方法の特徴	27
表 1.2-23	脆化固形物の粒度分布	27
表 1.2-24	脆化固形物破砕品の粒度分布	28
表 1.2-25	脆化固形物破砕時の破砕機内部残留量	28
表 1.2-26	ハンマータイプ破砕機および脆化固形物破砕品 写真資料	29
表 1.2-27	カッタータイプ破砕機および脆化固形物破砕品 写真資料	29
表 1.2-28	金属選別実証試験用脆化固形物の製造日程、実施条件、試験結果	30
表 1.2-29	金属選別実証試験用脆化固形物の製造日程、実施条件、結果	30
表 1.2-30	脆化固形物の選別実証試験の日程および実施条件	31
表 1.2-31	脆化固形物の選別実験結果	32
表 1.2-32	脆化固形物の選別実験における有用金属の回収量の集計結果	32
表 1.2-33	脆化固形物選別実験に用いた設備および回収産物 写真資料	33
表 1.2-34	ラボでの精選別実験試験の日程および実施条件	36
表 1.2-35	ラボでの精選別実験に用いた設備および実機選別産物 写真資料	37
表 1.2-36	脆化固形物の水洗実証試験の日程および実施条件	41
表 1.2-37	水洗原料の含有成分	41
表 1.2-38	水洗実証試験における設備 写真資料	42
表 1.2-39	水洗残渣の水分、ハロゲン含有量	43
表 1.2-40	水洗廃水のハロゲン濃度、ハロゲン量	43

表 1.2-41	水洗原料中のハロゲンの水溶性塩・不水溶性塩の割合.....	43
表 1.2-42	水洗廃水の各種濃度	44
表 1.2-43	脆化固形物の燃焼実証試験の日程および実施条件	45
表 1.2-44	燃焼実験用試料の性状.....	45
表 1.2-45	燃焼実験における設備 写真資料.....	46
表 1.2-46	所定時間燃焼した際の燃焼率 (%)	47
表 1.2-47	脆化固形物と一般炭の総発熱量比較.....	47
表 2.1-1	ガス化溶融処理との比較における項目別の CO ₂ 排出量 (ASR1t あたり)	51
表 2.1-2	ガス化溶融処理における活動量および CO ₂ 排出量原単位 (ASR1t あたり)	52
表 2.1-3	本リサイクル事業における活動量および CO ₂ 排出量原単位 (ASR1t あたり)	53
表 2.1-4	出典一覧.....	54
表 2.1-5	再選別処理との比較における項目別の CO ₂ 排出量 (ASR1t あたり)	56
表 2.1-6	再選別処理における活動量および CO ₂ 排出量原単位 (ASR1t あたり) ..	57
表 2.1-7	本リサイクル事業における活動量および CO ₂ 排出量原単位 (ASR1t あたり)	58
表 2.1-8	出典一覧.....	59
表 3.1-1	主要設備概要	65
表 3.1-2	本技術パイロットプラントの建設費概算 (百万円)	65
表 3.3-1	処理量 28,800t/年での事業収支試算	67
表 3.4-1	建設混合廃棄物の排出状況 (単位: 万 t)	70
表 3.4-2	風力発電設備のサイズ (プロペラ式)	72
表 3.4-3	風力発電設備のブレードにおける構成重量.....	72

略称の一覧

本報告書では、以下の通り略称の統一を図る。

略称

本報告書での表記	正式名称	意味等
ASR	Automobile Shredder Residue	使用済自動車の処理過程で破砕機にかけて粉砕し、金属などの有価物を回収した後の残渣
SR	Shredder Residue	使用済自動車および廃家電の処理過程で破砕機にかけて粉砕し、金属などの有価物を回収した後の残渣
EFB	Empty Fruit Bunch	パーム椰子空果房
PVC	Polyvinyl chloride	ポリ塩化ビニル
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastic	炭素繊維強化プラスチック
ART	Aeration Table	乾式比重選別機
ECS	Eddy Current Separator	渦電流選別機

(要約)

・目的

ASR 等には有用金属やガラスが含まれているが、ASR の可燃物と複雑に絡み合い、現状の選別工程では、分離回収できないため、未利用となっている。

この課題に対し、ASR 等に含まれる未利用の有用金属等の回収と樹脂分等の石炭代替燃料化を省エネかつ低 CO₂での処理する、高効率な省エネ型高度選別リサイクル技術の構築を目的として、低温加熱脆化技術の適用を検討した。

昨年度は低温加熱脆化処理の後、複数の選別処理を組み合わせることによって、有用金属の回収と石炭代替燃料として活用可能な脆化固形物の生成を検討する実証試験を行った。本年度は、昨年度の課題を解決するため、脆化温度帯の詳細検討、投入する木くずの粒度検討、有用金属の回収率を向上させるための破碎工程の追加検討、選別工程の見直しを行い、好適な処理フローの設計を行った。

・実証事業内容

本実証事業では、ASR 相当の SR を用いて低温加熱脆化処理を行い、有用金属等の回収を最も効率化させる詳細な加熱脆化温度および投入する木くずの粒径レシピの検討を実施した。また、今後軽量の CFRP 素材を多用した次世代自動車の普及により、ASR に混ざってくるのが予想される CFRP を脆化した場合の脆化固形物の性状を検証するため、CFRP 混ざりの ASR サンプルによる脆化処理実験を行った。

得られた脆化固形物については、金属選別処理による有用金属の回収と品位評価、有用金属回収後の脆化固形物における石炭代替燃料としての価値評価等を実施した。

また、本技術全体について、他の処理技術との CO₂ 排出量の比較、有用金属の回収ポテンシャル、ハロゲン元素に関する排ガス削減効果等の環境負荷低減効果を検討した。

これらの実証試験の結果を元に好適な処理フローの設計を行い、本技術の建設費、事業計画の作成を実施、事業実現可能性についても検証を行った。

・実証事業結果

- 1) 脆化温度の実証試験の結果、300℃では脆化が不十分となり、脆化固形物に占める 20mm より粒径の大きな塊の比率が多くなった。350℃では脆化固形物の残存した総発熱量が低くなった。20mm 以上の塊の占める割合の少なさと残存した総発熱量の多さから、325℃が好適な加熱温度帯と判断とした。
- 2) 昨年度の実証事業にて、木くずの投入により脆化固形物の 20mm より大きな塊の割合が減少する効果を確認した。本年度は投入する木くずの粒径について実験を行ったところ、粒径を問わず、木くずの投入効果があったことから、環境負荷、コスト、手間を考慮すると、最も低負荷である「有姿」が望ましいと判断した。
- 3) CFRP を 20%混ぜた ASR の脆化処理実験も行ったところ、生成された脆化固形物の粒度分布に変化が見られなかったことから、CFRP の投入により、脆化固形物の粒度に悪影響を与えることはないと推測される。
- 4) 破碎方法として、ミルタイプ、カッタータイプ、ハンマータイプの 3 種類を比較した。ミルタイプは脆化固形物を過粉碎し、選別が困難に、カッタータイプは刃の磨耗が早く不適、ハンマータイプは破碎に問題がなく、設備内残留も少なかったことから、破碎手

法はハンマータイプが有望であると判断した。

- 5) 選別前に破碎工程を挿入することで、有用金属の回収率が大幅に向上した。風力選別の後、重産物を高磁力選別し、篩い分け、更に ART 処理することにより、有用金属の品質向上が確認された。
- 6) ハロゲン元素については、実験室規模でのテスト処理を行ったところ、脆化固形物内の残存量は水洗による脱塩処理によって除去されたことが確認された。排ガス処理についても効果が見られたが、サンプルが少なかったため、今後サンプル数を増やす等の精査が必要である。
- 7) 処理技術の比較における CO₂ 排出量は、木くず混入を考慮し、処理物を ASR100%に換算して算出した。低温加熱脆化処理システムにおいて、本年度は破碎工程を追加したが、選別工程が減少したことにより、CO₂ 排出量は昨年度よりも少し減少した。ガス化溶融との比較では約 1.3t・CO₂/t・ASR、再選別では約 1.1t・CO₂/t・ASR の削減効果が得られた。本年度の処理フローにおける処理物別の CO₂ 排出量の比較では、木くずを 30%混ぜて脆化した場合が脆化燃料のカロリーが高かったため、最も低 CO₂ となる結果が得られた。
- 8) 木くずまたは CFRP を混合して生成された脆化固形物は、いずれも総発熱量が残り、微粉炭よりも燃焼効率が高いことから、受入想定先での燃料代替価値が見込まれた。
- 9) 破碎、選別、精選別結果を反映し、効率的な全体システム設計を行った。28,800t/年処理する事業モデルの場合、ASR100%処理では、資源（主に有用金属）回収効果もあり、約 164 百万円/年の利益が見込まれる試算となった。木くず 30%を混合した場合、有償木くず利用では▲98 百万円/年の赤字となったが、逆有償木くずを利用することで、14 百万円/年の利益が確保できる試算結果となった。

・課題と今後の展開

水洗処理については、ラボテストで留まっているため、まずはテストプラントを用いて、規模拡大の上、サンプル数も増やし、精査を進める必要がある。

低温加熱脆化処理については、複数種類の投入レンピや、投入物性状の変化等に対応できるか、実験機ではなく商用レベル（10～20t/日）の実用機にスケールアップし、検証を進める必要がある。破碎・選別・精選別処理、水洗処理についても、今後の低温加熱脆化処理試験のスケールアップに合わせた規模で、一貫連続操業を考慮した実証試験を行うことで、設計した全体システムの課題抽出、改善検討を行う必要がある。

事業収益性の改善、および本技術システムの適用対象拡大を検討すべく、バイオマス系難処理物（EFB、林地残材等）や、次世代製品に使用されるであろう複合素材端材（金属・CFRP 複合プラ等）の処理テストを行う必要がある。

低温加熱脆化は、CFRP 素材等の難燃性・硬質な可燃物の処理にも有効なことから、幅広い横展開が期待される。来年度には、上記 3 つの課題に対応できる規模拡大した実証事業の実施、設備詳細設計、事業採算性検証を進め、再来年度以降にて約 3 万 t/年規模の実機実証事業プラント立上げの検討を進める。

Summary

Objective

Valuable metals and glass contained in waste such as ASR (Automotive Shredder Residue) remain an untapped resource as they are intricately intertwined with combustible components, making the separation and recovery of them through conventional processes impossible.

One possible solution is to capitalize on low-temperature embrittlement technology to develop a high-efficiency energy-saving advanced separation and recycling process, where untapped resources in ASR are recovered and resin contents are converted into fuels (coal substitutes) in an energy-efficient and low-carbon manner.

Last year's demonstration involved the recovery of valuable metals and the formation of brittle solids substituting for coal by incorporating multiple separation processes, following low-temperature embrittlement treatment. To solve the problems identified last year, an optimal processing flow was designed this year by reviewing in detail the embrittlement temperature range, the size of the wood waste to be fed, the crushing process to recover more valuable metals and separation processes.

Demonstration project

SR similar to ASR was first heated at low temperature to determine the embrittlement temperature and the size of the wood chips that maximize the recovery of valuable metals. ASR containing CFRP was also tested for properties as CFRP is finding its way into auto parts, with next-generation vehicles consisting of many lightweight CFRP components entering the market.

The resulting brittle solids were subsequently evaluated for recovery and quality of valuable metals as well as for their value as a substitute for coal after the recovery.

In addition, the environmental performance was evaluated for the technology as a whole, such as its CO₂ emissions compared with those of other treatments, potential for recovering valuable metals and its effects in reducing halogen emissions.

Finally, a treatment flow was designed based on the demonstration results, followed by preparation of construction cost estimates and implementation plans, and review of feasibility studies.

Demonstration results

1) Full embrittlement doesn't occur at 300 °C, which results in the production of a relatively large amount of brittle solids with a particle size of over 20 mm, while the total residual calorific value of brittle solids is low at 350 °C. A temperature of 325 °C seems to be optimal in minimizing the amount of particles larger than 20 mm and maximizing the total residual

calorific value.

2) The results of last year's demonstration indicate that the use of wood waste reduces the amount of particles larger than 20 mm while experiments conducted this year prove the effects of wood waste regardless of its particle size. Given the environmental impacts, costs and processes involved, it's recommended to use wood waste "as-is."

3) ASR containing 20% of CFRP was also tested for embrittlement, the results of which show no change in the particle distribution of brittle solids. CFRP, therefore, doesn't affect the embrittlement.

4) Three crushing methods were tested: milling, cutting and hammering. Milling results in excessive crushing, which makes separation difficult. Cutting is not feasible because the blades get worn out quickly. In contrast, hammering looks ideal for crushing, producing fewer residues.

5) Crushing before separation significantly improves the recovery of valuable metals. In addition, their quality can be improved by wind power separation, magnetic separation, sifting and ART treatment.

6) The results of laboratory experiments show that residual halogens in brittle solids can be removed by washing and desalination. Similar effects were observed for exhaust gas treatment, though more samples should be tested for verification.

7) The amount of CO₂ emissions was calculated for each treatment technology, with the use of wood waste taken into account and waste materials converted into 100% ASR. While this year's demonstration involves a crushing process, the absence of a separation process slightly reduces CO₂ emissions from low-temperature embrittlement treatment. Compared with last year's results, a reduction of about 1.3 CO₂-t/ASR-t is possible, compared to gasification melting, and a further reduction of 1.1 CO₂-t/ASR-t is also possible through re-separation. The results of comparison of CO₂ emissions from the treatment flows show that brittle solids (fuels) with the use of 30% wood waste have high calorific values, resulting in the lowest CO₂ emission levels.

8) Brittle solids produced with mixtures of wood waste or CFRP have a high residual calorific value with higher combustion efficiency than pulverized coal, which makes them more attractive as an alternative fuel.

9) An efficient overall system was designed, taking into account the results of crushing and coarse/fine separation. In the case of a 28,800 t/y-treatment, a 100% ASR treatment is effective in recovering resources (mainly valuable metals), with an estimated profit of 164 million yen/year. A treatment with 30% of purchased wood waste, however, results in a loss of 98 million yen/year, while the use of wood waste collected for a fee is expected to make a profit of 14 million yen/year.

Challenges and plans

Washing treatment needs to be scaled up from the laboratory level to large-scale operations

in a pilot plant, with more samples tested to collect more data.

Low-temperature embrittlement should be tested on a commercial scale (10-20 ton/day) to examine its compatibility with multiple inputs and changes in their characteristics. A series of processes from crushing to coarse/fine separation and washing, moreover, should be demonstrated on a larger scale according to larger-scale low-temperature embrittlement tests to be performed taking into account a fully integrated continuous operation, to test the designed system and make improvements as needed.

In addition, treatment systems for biomass waste such as EFB and forest scraps (which are hardly recyclable) and composites made of metals, CFRP, composite plastics, etc. (which will be used in next-generation products) should be tested to improve the profitability and expand the applications of this technology.

Low-temperature embrittlement is expected to find a wide range of applications as it's compatible with hard combustibles and flame retardant materials such as CFRP. The plan for next year, therefore, is to demonstrate a scaled-up system to address the three challenges mentioned above, design the facilities in detail and examine the profitability as a business, aiming to launch a 30,000-t/y demonstration plant in or after FY 2019.

事業実施体制（社名五十音順）

■実施主体		
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 チームリーダー	石田 泰之
	環境事業部 営業企画グループ グループリーダー	生田 考
	環境事業部 営業企画グループ 参事	花田 隆
	環境事業部 営業企画グループ 参事	岡村 聡一郎
	環境事業部 営業企画グループ 主務	鈴木 涼
	中央研究所 第3研究部 分離技術チーム 研究員	田村 典敏
	中央研究所 第3研究部 分離技術チーム 研究員	田中 宜久
	中央研究所 第3研究部 分離技術チーム 研究員	片岡 誠
	中央研究所 第3研究部 分離技術チーム 研究員	竹本 智典
	中央研究所 第3研究部 分離技術チーム 研究員	中村 充志
	中央研究所 第3研究部 分離技術チーム 研究員	瀧澤 洸
■再委託先		
エコメビウス株式会社	代表取締役社長	木原 忠志
株式会社クレコ・ラボ	代表取締役	興津 世禄
	マネージャー	若林 史子

1. 実証事業の実施

1.1 実証事業の概要

1.1.1 目的、背景、課題等

昨年度は低温加熱脆化处理の後、複数の選別処理を組み合わせることによって、有用金属の回収と石炭代替燃料として活用可能な脆化固形物の生成を検討する実証試験を行った。有用金属の回収と石炭代替燃料製造として低温脆化处理の有用性を確認できたが、一方で、詳細な温度帯や投入する木くずの粒径に関する検討、有用金属をより多く回収するための選別工程の改善検討等、課題が残った。

そこで、本年度は昨年度の課題を解決するため、脆化温度帯の詳細検討、投入する木くずの粒度検討、有用金属の回収率を向上させるための破碎工程の追加検討、選別工程の見直しを行い、好適な処理フローの設計を行った。また、今後 ASR に混ざってくることが予想される CFRP を脆化した場合の脆化固形物の性状を検証するため、CFRP 混じりの ASR サンプルによる脆化处理実験を行った。

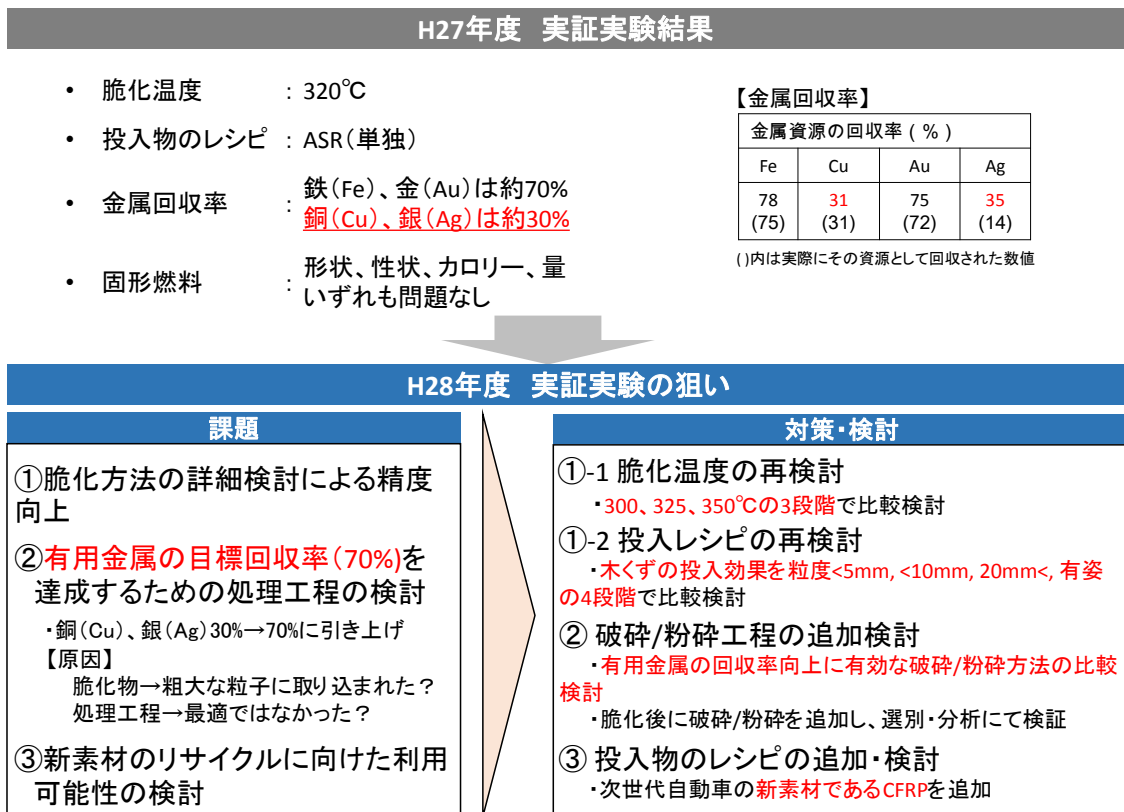


図 1.1-1 実証事業の目的、背景、課題等

1.1.2 実施体制

本事業の実施体制図を図 1.1-2 示す。

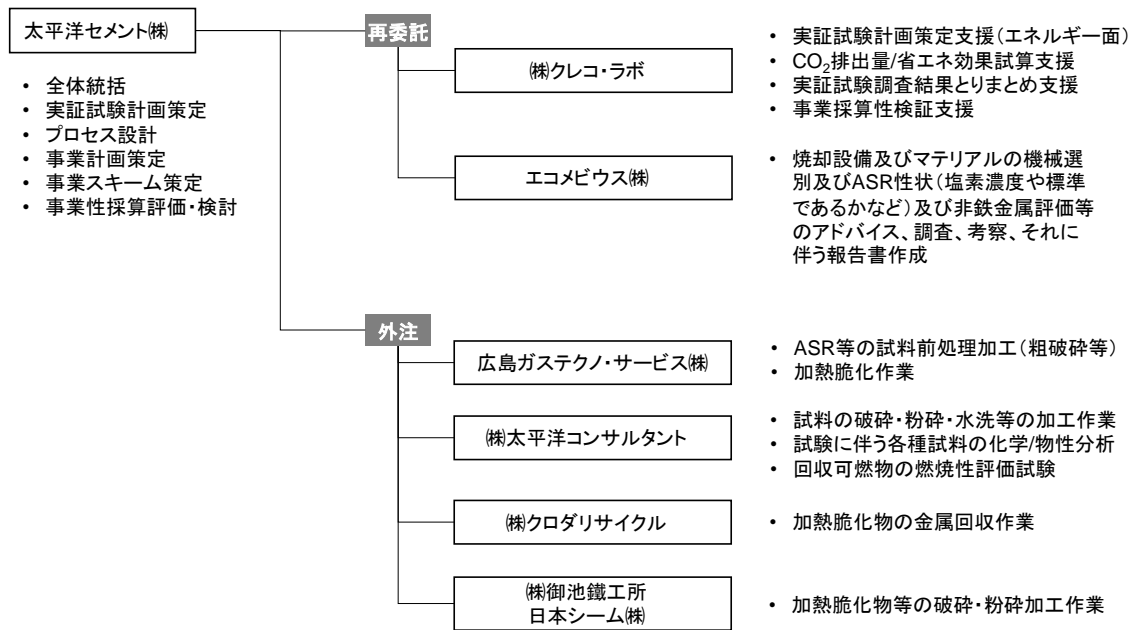


図 1.1-2 実施体制図

1.1.3 実証事業のシステム

本実証事業では、ASR/SRに含まれる廃プラスチック等の可燃分を脆化させ、金属との分離を容易に、金属の回収効率を向上化させることを目的としている。更に、脆化固形物を石炭代替燃料として活用し、ASR/SRの全量有価物化を目指すものである。

脆化処理は既に確立された技術であるが、本実証事業は、200～300℃程度の低温加熱による脆化であるところが他との違いであり、新規開発ポイントである。

この200～300℃の低温とする理由は、有用金属を回収した後の脆化固形物を有効利用するためのカロリー維持である。高温で脆化すると脆化固形物にカロリーがなくなり、付加価値が低下するために事業採算性が難しくなることから、その改善策として設定した。また、脱塩・粉砕・選別工程を追加し、マテリアル回収を種類別に可能にすることも従来と異なる点である。

また、本事業では昨年度からの改善として、脆化処理後に破砕工程を新たに追加している。破砕により脆化固形物を細かくすることで、後工程の金属選別工程における有用金属の回収効率向上を図った。また、選別工程においても選別手法の順序変更、選別機の見直し等により、有用金属の回収率向上を図った。

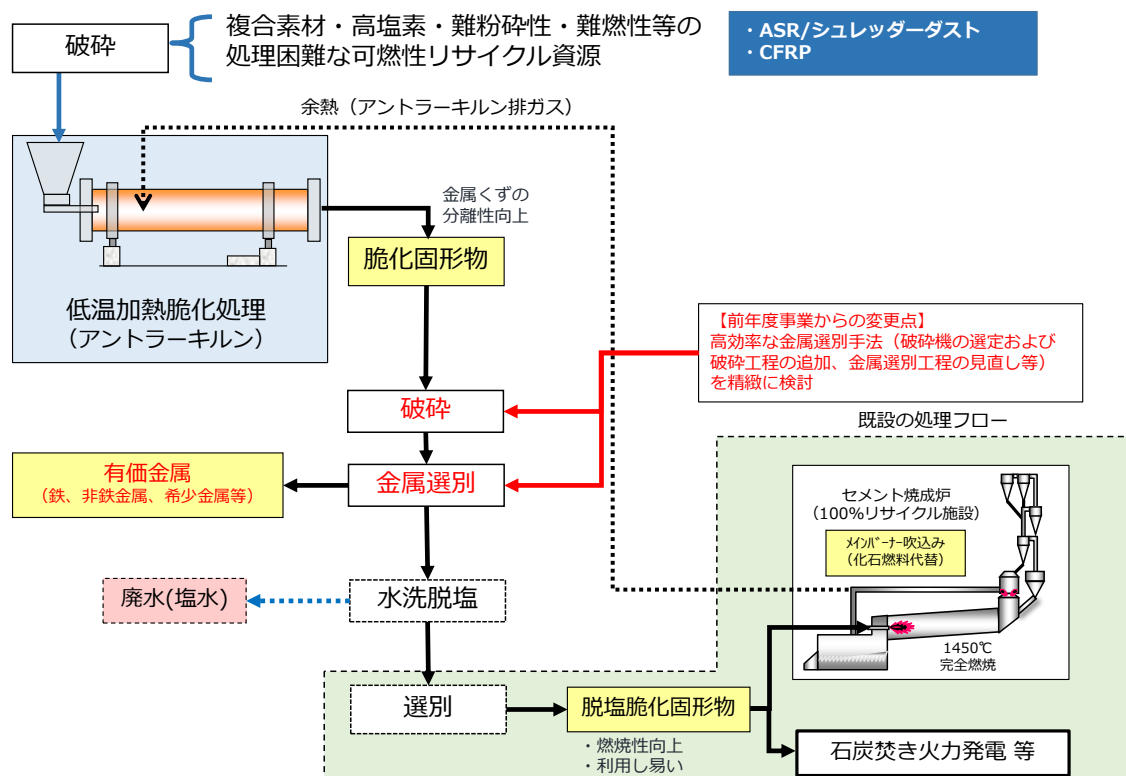


図 1.1-3 本事業のシステム

(備考: EFB とはパーム椰子空果房を指し、バイオマス発電の燃料としても使用されている)

1.1.4 低温加熱脆化のメカニズム

ASR 中の樹脂分（プラスチック、ウレタン、ゴム、合成繊維くず、ハーネス被覆等）は柔らかく（粘弾性が高く）、金属と複雑に絡み合っているため、そのままでは樹脂分の破碎、および金属分離回収が困難である。

樹脂分は、加熱により低分子化、弾性消失、クラック発生等による強度低下（脆化）が起きるため、樹脂分の破碎／粉碎性が向上し、金属分離しやすくなる。



図 1.1-4 低温加熱脆化のメカニズム

1.1.5 実証事業の実施フロー

本実証実験の各工程の実施体制、仕様設備、処理フロー詳細図を図 1.1-5、図 1.1-6 に示す。本実証実験は、4 施設にて行った。SR の破碎から低温加熱脆化までを広島ガステクノ・サービス株の実験機、脆化固形物の破碎実験をプラントメーカーのテスト機、脆化固形物を金属と燃料代替となる脆化固形物に選別する工程を㈱クロダリサイクルの実機、選別された有用金属の精選別と脆化固形物の粉碎、脱塩を㈱太平洋コンサルタントの研究設備にて行った。

なお、今回の実証事業では、実際に ASR を用いることが困難なため、品質面で ASR に相当する SR を使用している。以下の本文ではこの ASR 相当の SR を ASR と記載する。

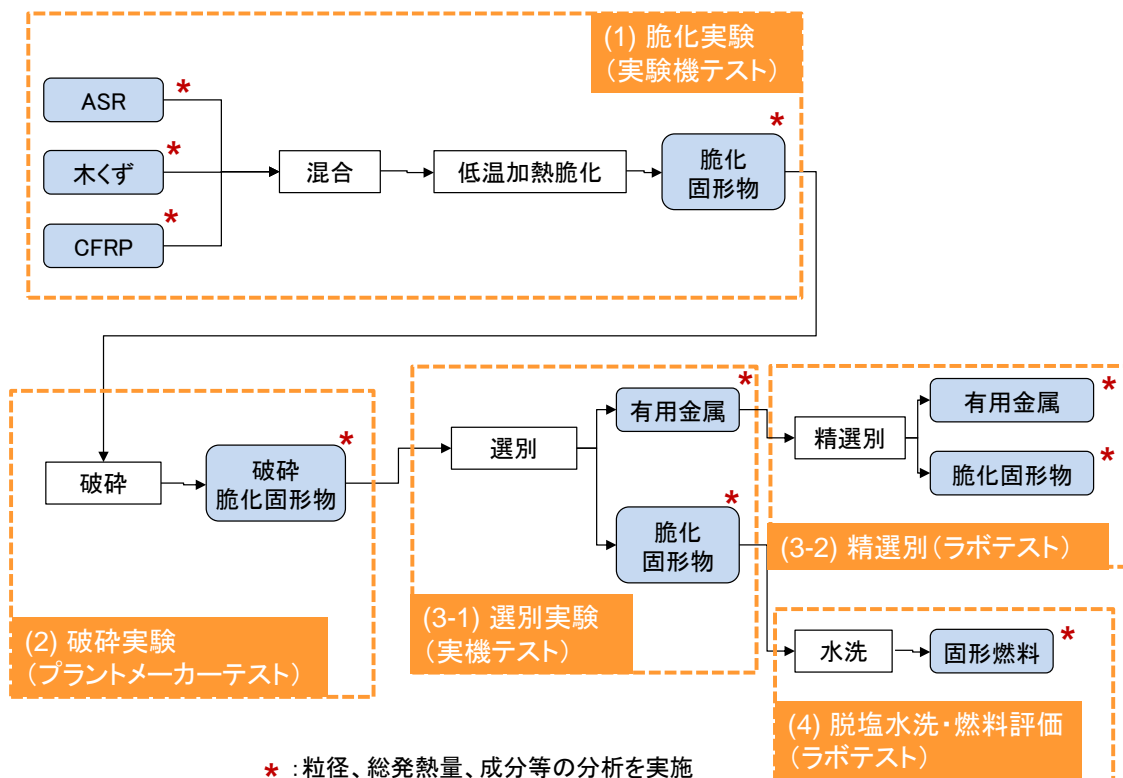


図 1.1-5 実証事業の全体フロー図


実施体制	実施設備		写真
粗破碎 低温 加熱脆化	広島ガステクノ・サービス㈱	キルン 実験機 (30kg/h)	 破碎機  アントラーキルン
破碎	㈱御池鐵工所 日本シーム㈱	テスト機	 カッタータイプ  ハンマータイプ
選別	㈱クロダリサイクル	実機	 風力選別、ART選別
精選別 破碎 水洗	㈱太平洋コンサルタント	テスト機 ラボ設備	 渦電流選別 (ESC)  エアータブル (ART)  高磁力選別  攪拌機及びウォーターバス  吸引ポンプ  ボールミル

図 1.1-6 実証事業にて使用した機器

(1) 広島ガステクノ・サービスによる脆化実験

広島ガステクノ・サービスでは、破碎された ASR を再度破碎し（50mm 程度）、アントラーキルンに投入、低温加熱脆化処理の実験を行った。アントラーキルンは、キルン内部に熱分解ガス用のガス抜きパイプを有した構造であり、パイプから出てきたところで、熱分解ガスを燃焼させ、熱分解の熱源として利用することができる外熱式キルンである。実験に用いたアントラーキルンは、φ500mm、加熱長 3m の実験用の小型機である。このアントラーキルンを用いて、温度別の脆化実験、木くずの粒径別の脆化実験、CFRP 混練の脆化実験等、本実証実験における脆化実験の全てを行った。なお、ASR を再度破碎した理由は、アントラーキルンの投入口が小さいためである。実用機では、ASR の直接投入を想定している。

脆化による排ガス処理については、脱臭炉にて二次焼却し、マルチサイクロンによってばいじんを収集する他、排ガスを冷却し、活性炭や消石灰を用いて中和させ、バグフィルタ、排気ファンを通じ、スクラバーにて苛性ソーダを加え、排水処理を行う。本事業では、この排ガス中に含まれる塩素等のハロゲンガスについても濃度確認を行った。

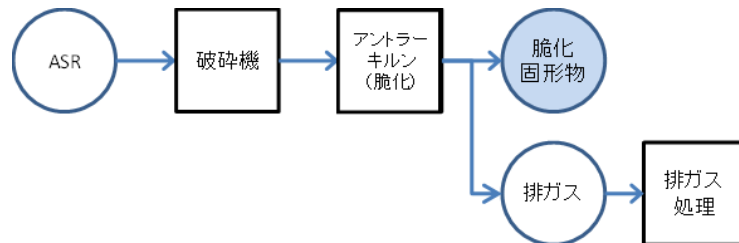




図 1.1-7 広島ガステクノ・サービスでの実証実験処理フロー図

(2) プラントメーカーによる破碎実験

プラントメーカーにて、広島ガステクノ・サービスにて脆化された脆化固形物の破碎実験を行う。この実験の目的は、金属回収率の向上のため、選別工程前に破碎を行い、選別しやすくするためである。検討した破碎方法は、磨り潰し型（ミルタイプ等）、切断型（カッタータイプ等）、打撃・衝撃型（ハンマータイプ等）である。図 1.1-8 に破碎方法の検討概要を示す。

検討の結果、ハンマータイプが有望と判断されたことから、ハンマータイプの破碎設備で破碎処理を行い、クロダリサイクルの実機にて選別実験を行った。

要求性能：①5mm以下に破碎可能(選別工程を鑑み、粒度はそろったほうが良い)
②異物などの混入に対して堅牢である

破碎方法	ヒアリング	本事業の適合性
1. すり潰し(ミルタイプ等)	<ul style="list-style-type: none"> 金属は排石となり、細かくなならない 非金属は逆に細かくなりすぎ、粒度がそろいにくい可能性がある 	本事業ではテストせずとした
2. 切断(カッタータイプ等) 	<ul style="list-style-type: none"> 破碎品の品位面で適当である 一方、異物に対しては、カッターの摩耗等の懸念がある 	2社にてテスト実施
3. 打撃・衝撃(ハンマータイプ等) 	<ul style="list-style-type: none"> 異物に対してはカッタータイプより堅牢 ゴム系の異物の破碎が苦手なため、破碎機内残留物が多くなる懸念がある 内部の掃除頻度が課題 	2社にてテスト実施

昨年度との違い

H27: 脆化後に破碎を行わずに選別を実施したところ、有用金属の回収に課題が生じた。
H28: 選別しやすくするため、新たに脆化後の破碎方法を検討する。

図 1.1-8 破碎方法の検討概要

(3) クロダリサイクルによる選別実験

クロダリサイクルでは、広島ガステクノ・サービスにて脆化され、プラントメーカーで破碎した脆化固形物を用いて選別処理を行う。同社は、既に事業としてASRの再選別を行っており、本実証事業では同社の実機工程を利用して、金属と脆化固形物の選別、回収を行った。

同社の選別工程は、Hライン、Aライン、Mラインの3つに分かれている。今年度は再処理によって脆化固形物の粒径が5mmアンダーになったことから、Hライン(5mmの篩い)やMライン(渦電流選別)は行わず、Aライン(風力選別や乾式比重選別での振動篩い)のみを行った。投入した5mmアンダーの脆化固形物はAラインにて選別され、希少金属を多く含有するミックスメタル(重産物と呼称)等を回収した。図 1.1-9 に本実験にて使用したクロダリサイクルのフロー図を示す。

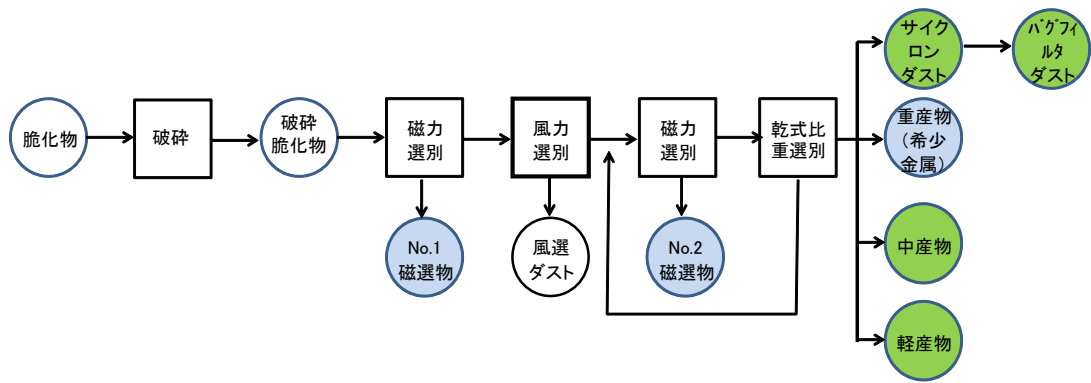


図 1.1-9 クロダリサイクルでの実証実験処理フロー図

(3-2) ラボテストによる精選別実験

クロダリサイクルで選別回収した重産物、中産物、軽産物を対象に、ラボでのテスト機にて精選別を実施し、品質向上効果のある選別ラインの検討を行った。

使用した選別機は、渦電流選別、乾式比重選別、高磁力選別である。検討した精選別の一例を図 1.1-10 に示す。

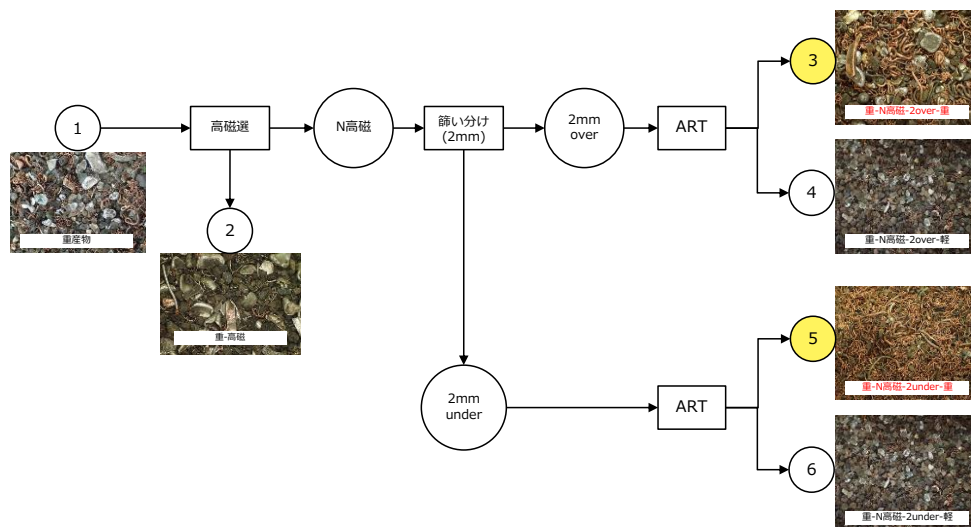


図 1.1-10 ラボでの精選別フロー図（一例）

(4) 太平洋コンサルタントによる脱塩実験

太平洋コンサルタントでは、クロダリサイクルにて回収された脆化固形物の脱塩処理を行った。使用する設備は同社の研究施設保有の小型試験機である。選別試験で回収した4種類の脆化固形物について水洗による脱塩処理を行った。本工程では脆化固形物の燃料価値評価に加え、水洗による塩素等ハロゲンの濃度変化についても分析を行った。図 1.1-11 に太平洋コンサルタントのフロー図を示す。

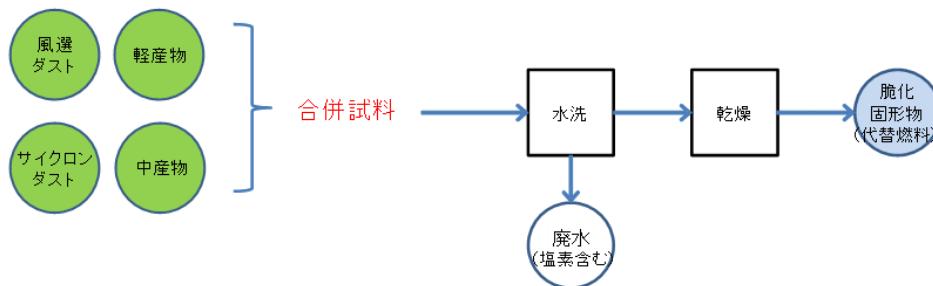


図 1.1-11 太平洋コンサルタントでの実証実験処理フロー図

1.2 実証事業の結果

実証事業の実施内容、各実験工程のつながり、検証事項等を図 1.2-1 に示す。

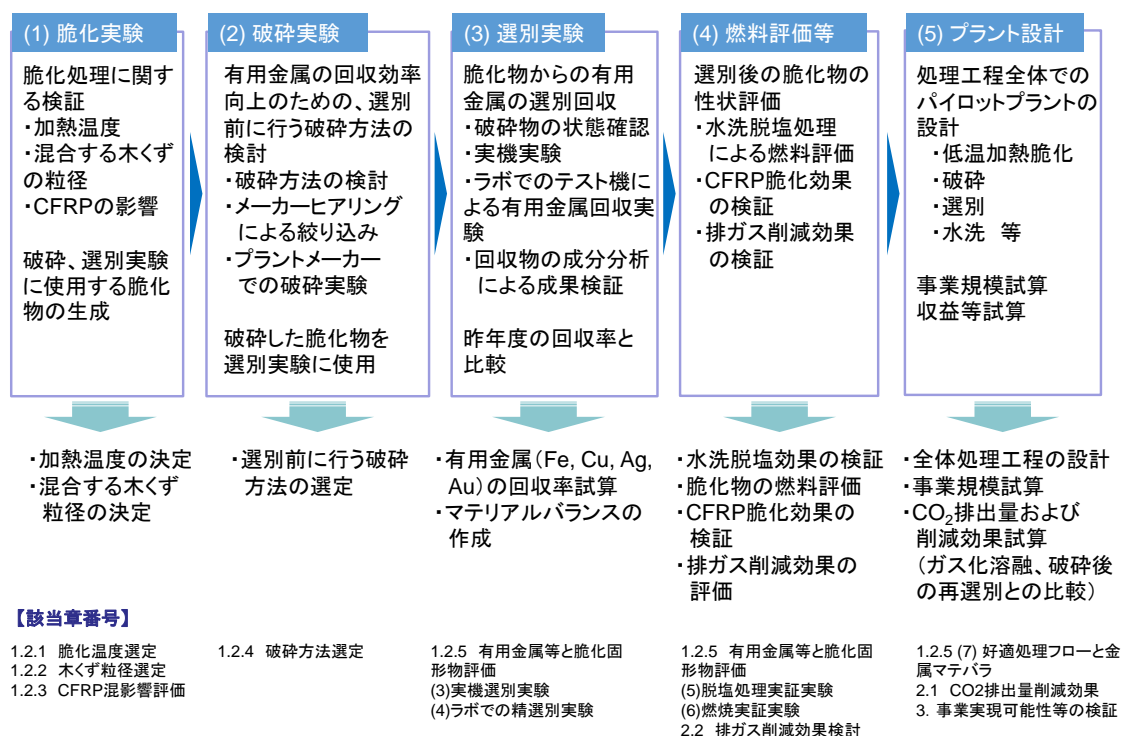


図 1.2-1 本実証事業の実施内容、各実験工程のつながり、検証事項等

1.2.1 加熱脆化温度の選定

(1) 加熱脆化温度の設定

昨年度の実証事業では、総発熱量の残存率と金属分離性の観点から、ASR の加熱脆化温度は、300～350℃が好適と判断した。一方で、ASR は、排出元の処理工程、ロット、保管状況等によって、構成物、粒径、水分等にばらつきがある。

本検討では、当該処理の汎用性を確認するため、改めて好適な加熱脆化温度の確認を行った。なお、昨年度の実証結果を踏まえ、加熱脆化温度は 300～350℃で実施した。

本検討の投入物は、木くずは投入せず、ASR のみで実施した。なお、加熱脆化処理時にプラスチックが分解した際に発生する塩化水素を固形物に残存させるため、ASR に消石灰を混合した。混合比率は ASR (89%) : 消石灰 (11%) である。

また、本検討では、好適な脆化温度の判断基準として、以下の通り残存する総発熱量、脆化固形物の粒径 (参考指標として、易破碎性も評価) を用いた。

① 残存する総発熱量：加熱後の脆化固形物の総発熱量が、4,000kcal/kg 以上 (投入する総発熱量に対して 70%以上残存することが望ましい)

- ・有用金属回収後の脆化固形物は、燃料として利用するため、熱量が多く残っていること

が望ましい。


② 脆化固形物の粒径：20mm 以上が少ない（20%以下が望ましい）

- ・十分に脆化している場合、樹脂の低分子化、弾性消失、クラック発生等による強度低下が起きる。また、これに伴い樹脂同士の絡み合いが解消されやすくなっており（特に繊維くず）、アントラーキルンから排出されるまでの間に衝撃、摩擦、絡み合いの解消等によって、粒子が細かくなっていると考えられる。
- ・一方、十分に脆化していない場合は、強度低下や絡み合い解消効果が得られず、粒径もほとんど変化がない、または熱可塑性樹脂の軟化による粗大化が生じると考えられる。樹脂の軟化によって粗大化した場合、周辺の金属を取り込むことも予想され、有用金属を破碎処理や選別処理に単体分離しにくくなる。

③ 脆化固形物の易破碎性：破碎後の粒径 5mm 未満が多く（50%以上が望ましい）、20mm 以上が少ない（10%以下が望ましい）

- ・脆化の程度としては、易破碎性が重要であり、また本実証事業では破碎機で破碎した後、有用金属回収のための選別処理を行うため、破碎後の粒径は、5mm 未満が多く、20mm 以上が少ないことが望ましい（細かすぎると有用金属の選別回収が困難になる可能性あり）。
- ・脆化固形物のような試料に対する易破碎性に関する公定法はなく、また選別処理前に行う破碎処理の装置によって破碎状況が変わるため、ここではボールミルによる易破碎性を評価する試験を実施し、脆化程度を評価するための参考指標とした。詳しい試験条件は、表 1.2-1 に示す通りである。

表 1.2-1 脆化固形物の易破碎性評価試験の実施条件

項目	概要	写真（破碎機）
実施場所	太平洋コンサルタント	
使用装置	ボールミル (ミル容積 60L)	
装置条件	回転数：46rpm 媒体：鋼製球・円柱 媒体充填量：95kg	
投入物	脆化固形物	
脆化固形物投入量	2.0kg	
試験時間	15 分間	

(2) 脆化実験結果

実施した試験の実施日、試験条件等は、表 1.2-2 の通りである。

表 1.2-2 加熱脆化実証試験の日程および実施条件

項目	試験の日程および実施条件
実施日	2016/7/11-7/12
処理温度	・ 300℃ ・ 325℃ ・ 350℃
試験時間	各水準につき 3~4 時間
原料投入量	各水準につき 90~120kg (30kg/h)

加熱脆化処理した際の脆化固形物の総発熱量、粒径、易破碎性の分析結果および外観の分析結果は、表 1.2-3、表 1.2-4、図 1.2-2、図 1.2-3 の通りである。

いずれの温度で処理した場合も、総発熱量は目標品位である 4,000kcal/kg 以上であった。総発熱量の残存率については、350℃のみ総発熱量の残存率は目標品位である 70%以下となり、300℃、325℃では総発熱量の残存率が 70%以上であった。

脆化固形物の粒径は、350℃で処理した場合、20mm 以上が目標品位である 20%以下を満たしたが、300℃、325℃で処理した場合、20mm 以上が 20%以上となった。特に、300℃では、20mm 以上が 40%を超えており、樹脂が脆化に至らず、軟化に留まることで、周囲の樹脂、金属、木くず等を取り込み塊状物になったと考えられる。

このように、十分に脆化されていない樹脂や、樹脂に取り込まれた金属が増加すると、破碎処理時に破碎しにくい樹脂が装置内に残存する、また破碎・選別処理時に有用金属を樹脂と分離させ、単体で回収することが困難になる可能性が懸念される。

脆化固形物の破碎後の粒径（易破碎性）は、350℃で処理した場合、5mm 未満の割合が 80%以上と、目標品位である 50%以上を満たしており、十分に脆化され、破碎されやすかった。325℃で処理した場合、20mm 以上は 10%程度であったが、5mm 未満は 70%以上であり、目標品位である 50%以上を満たしており、比較的破碎されやすかった。一方、300℃で処理した場合、5mm 未満は目標品位である 50%に到達したものの、20mm 以上が 30%であり、目標品位を満たしておらず、粗大物が多く残っていることが確認された。

以上の結果から、総発熱量の残存率、脆化固形物の粒径、易破碎性の観点から、ASR 単体の場合、325℃で加熱脆化処理を行うことで、目標の品位の脆化固形物を得ることができると判断された。

表 1.2-3 脆化固形物の回収量および総発熱量

脆化温度 (°C)	投入物		脆化固形物		残存重量率 (%)	総発熱量の残存率 (%)	評価
	投入量 (kg/h)	総発熱量 (kcal/kg)	回収量 (kg/h)	総発熱量 (kcal/kg)			
300	26	4,280	23	4,430	88.3	91.4	◎
325	26	4,280	21	4,030	79.6	74.9	○

脆化温度 (°C)	投入物		脆化固形物		残存重量率 (%)	総発熱量の残存率 (%)	評価
	投入量 (kg/h)	総発熱量 (kcal/kg)	回収量 (kg/h)	総発熱量 (kcal/kg)			
350	26	4,280	18	4,010	69.5	65.2	△
脆化固形物 目標品位	—	—	—	4,000 以上	—	70 以上	—

※無水ベースの表記

※総発熱量の残存率は、回収量と総発熱量で乗じた値を、投入量と総発熱量で乗じた値で除したものを百分率で示した

表 1.2-4 脆化固形物の破碎処理前後の粒度分布

脆化温度 (°C)	破碎処理	粒度分布 (%)						評価
		<2mm	2-5mm	5-10mm	10-20mm	20-40mm	40mm<	
300	処理前	20	10	13	16	20	22	△
	処理後	44	6	6	14	15	15	
325	処理前	25	15	15	20	21	4	○
	処理後	68	6	7	7	8	3	
350	処理前	39	23	16	15	8	0	◎
	処理後	78	7	6	5	4	0	
処理前 目標品位	—	—		—	—	20 以下		—
処理後 目標品位	—	50 以上		—	—	10 以下		—

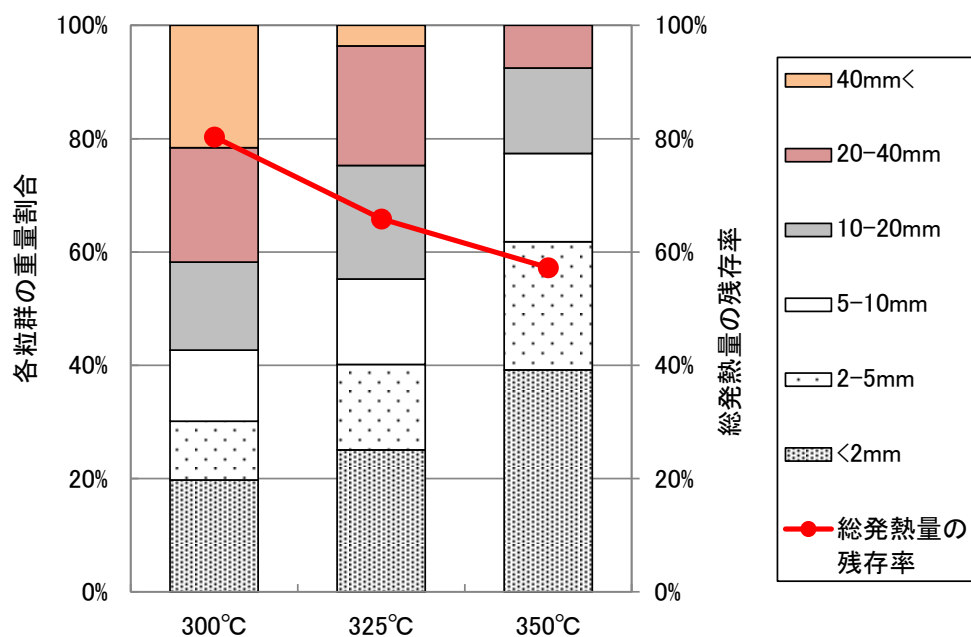


図 1.2-2 脆化固形物（破碎前）の粒度分布および総発熱量の残存率

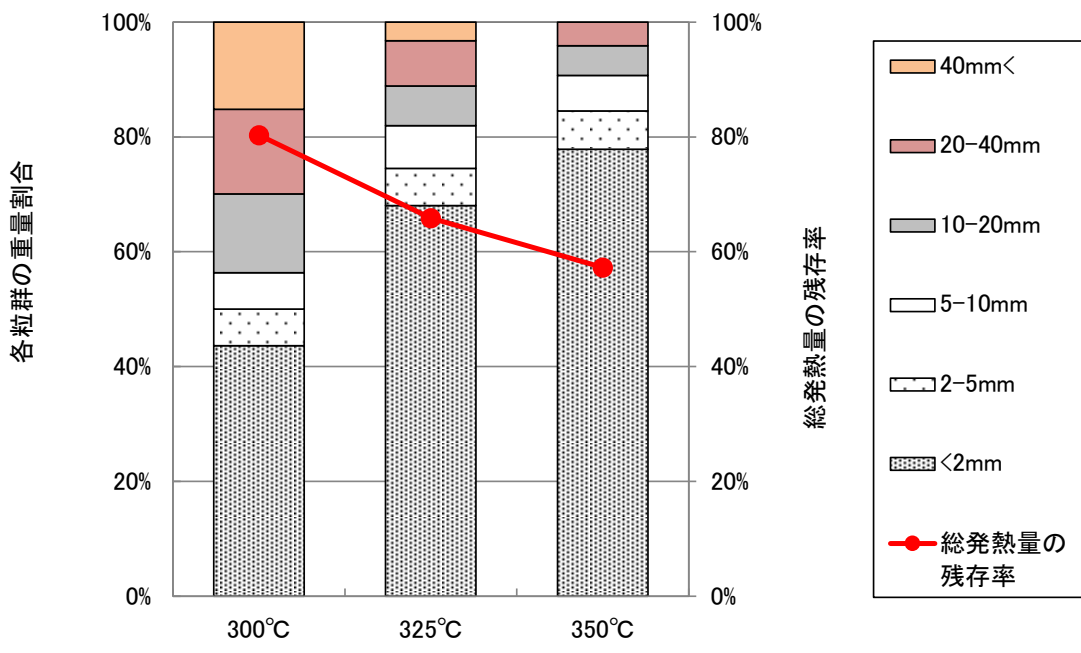






図 1.2-3 脆化固形物（破碎後）の粒度分布および総発熱量の残存率

表 1.2-5 投入した ASR および各処理温度の脆化固形物（破碎前） 写真資料

	
ASR	脆化固形物 300°C
	
脆化固形物 325°C	脆化固形物 350°C

1.2.2 木くず粒径の選定

(1) 木くず粒径の設定

昨年度の実証事業では、加熱脆化時の投入レシピを検討した結果、木くずを混合することで、総発熱量を多く残存させ、更に粗大物の生成を抑制する効果があると判断し、その混合割合は 30%程度が好適であると判断した。木くずについては、排出元から入手したままの有姿で検討を行ったが、木くずの粒径を調整することで、粗大物の生成抑制を促進する効果が得られる可能性がある。

そこで、粗大物の生成抑制効果向上を目的として、木くずの好適な粒径の検討を行った。また、本検討では、脆化温度設定の検討と同様に、好適な木くず粒径の判断基準として、以下の通り残存した総発熱量、脆化固形物の粒径、易破碎性を用いた。

実験用の木くずとして、建設廃棄物として発生した木くずを国内の大手建設廃棄物処理会社にて 50mm アンダーに破碎し、燃料チップとして有価販売しているものを用いた。

1) 投入パターン

木くずの好適な粒径を検討するため、木くずの粒径について、複数のパターンでの検証を行った。粒径による影響を明確にするため、粒径は、比較的大きいものみの「20mm<」、比較的小さい「<10mm」、更に細かい「<5mm」を準備した。使用する木くずの粒径調整方法は以下の通りである。なお、2mm 以下等の極めて細かい木くずを準備することも可能だが、事業化する際に、環境負荷、経済性の点において実施の可能性は低いと判断して、使用しなかった。

ASR 比率は、ASR と木くずを混ぜたものの中の ASR 割合を示し、以下の式で表される。

$$\text{ASR 比率} = \text{ASR} / (\text{ASR} + \text{混合物}) \times 100$$

ASR と木くずを混ぜたものについては、加熱脆化処理時にプラスチックが分解した際に発生する塩化水素を固形物に残存させるため、ASR と木くず (89%) : 消石灰 (11%) の混合比率で消石灰を混合した。消石灰には、粉状である工業用消石灰 (塩焼き) を使用した。

粒径調整方法





- ・有姿：入手した木くずをそのまま使用
- ・20mm<：木くず有姿を、公称目開き 19mm の JIS 試験用篩いで篩い、篩い上に残ったもの
- ・<10mm：木くず有姿を、レッチェ製カッティングミル SM2000 (径 10mm のスクリーンを装着したもの) で破碎した後、公称目開き 9.5mm の JIS 試験用篩いで篩い、篩いを通過したもの
- ・<5mm：木くず有姿を、レッチェ製カッティングミル SM2000 (径 10mm のスクリーンを装着したもの) で破碎した後、公称目開き 4.75mm の JIS 試験用篩いで篩い、篩いを通過したもの

表 1.2-6 投入物のパターン

水準	投入物	木くず粒径	ASR 比率
1	ASR	-	100%
2	ASR+木くず	有姿	70%
3		20mm<	
4		<10mm	
5		<5mm	

備考) ASR+混合物：消石灰=89：11

表 1.2-7 木くず 写真資料

	
有姿	20mm<
	
<10mm	<5mm

2) 投入物の性状

ASR、木くずの各種性状（かさ比重、水分、工業分析、総発熱量）を表 1.2-8、粒度分布を表 1.2-9 に示す。

水分は、木くずが ASR より高く、17.4%であった。

総発熱量は、木くずが ASR よりやや低く、4,520kcal/kg であった。

木くずの粒度分布は、40mm<の割合が ASR より少なく、5~40mm の割合が ASR より多かった。木くずの粒径調整品については、いずれも概ね目標どおりの粒径であることが確認された。

表 1.2-8 投入物の各種性状

	かさ比重 (-)	水分 (%)	工業分析 (%)			総発熱量 (kcal/kg)
			揮発分	固定炭素	灰分	
ASR	0.23	14.3	66.9	4.1	28.9	4,840
木くず有姿	0.18	17.4	80.1	16.8	3.1	4,520
木くず 20mm<	-	10.7	-	-	-	-
木くず<10mm	-	9.7	-	-	-	-
木くず<5mm	-	8.8	-	-	-	-

備考) 水分のみ有姿ベースの分析値。その他は無水ベースの分析値

表 1.2-9 ASR および各種木くずの粒度分布

	粒度分布 (%)					
	<2mm	2-5mm	5-10mm	10-20mm	20-40mm	40mm<
ASR	8	12	10	24	30	16
木くず有姿	5	8	17	31	35	4
木くず 20mm<	0	0	0	0	93	7
木くず<10mm	19	37	44	0	0	0
木くず<5mm	75	25	0	0	0	0

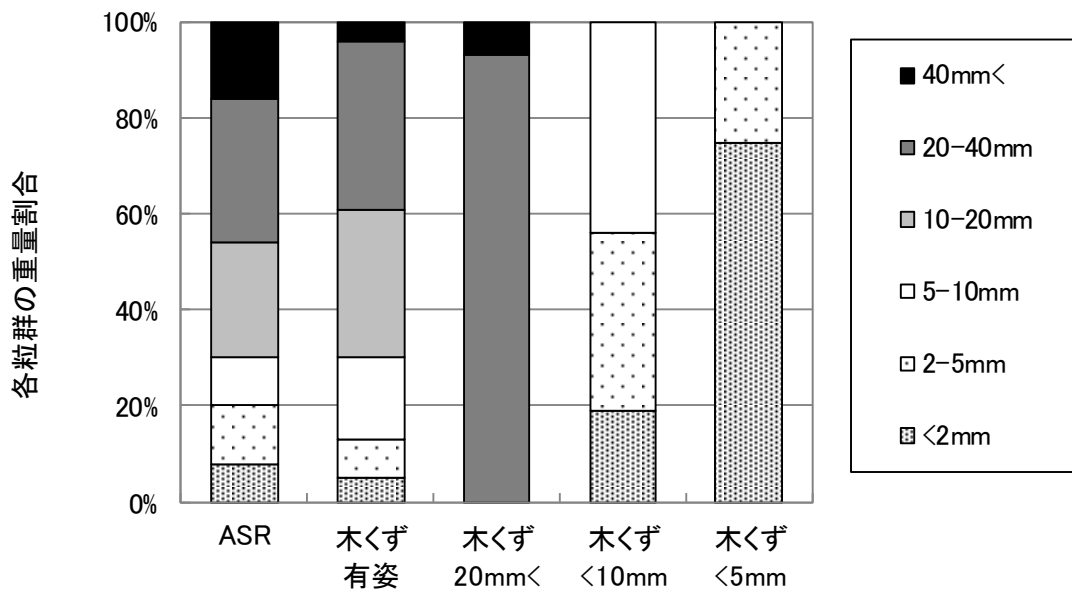


図 1.2-4 投入物の粒度分布

(2) 脆化実験結果

実施した試験の実施日、試験条件等は、表 1.2-10 に示す通りである。

表 1.2-10 加熱脆化実証試験の日程および実施条件

項目	試験の日程および実施条件
実施日	2016/7/11-7/14
処理温度	325°C
試験時間	各水準につき 3~4 時間
原料投入量	各水準につき 90~120kg (30kg/h)

加熱脆化処理した際の脆化固形物の総発熱量、粒径、易破碎性の分析結果および外観は、表 1.2-11、表 1.2-12 の通りである。

木くずを混合した場合、総発熱量は 4,400~4,700kcal/kg、総発熱量の残存率は 84~90% であり、ASR 単独より高い総発熱量、総発熱量の残存率であり、目標品位を満たしていた。総発熱量、総発熱量の残存率については、木くず粒径の違いによる影響は確認できなかった。

また、脆化固形物の粒径は、木くずを混合した場合、ASR 単独より 5mm 未満が多くなり、20mm 以上が少なくなる傾向であり、木くず 20mm<を混合した場合を除いて、目標品位を満たしていた。木くず 20mm<を混合した場合は、20mm 以上の脆化固形物が ASR 単独の場合より多くなったが、木くず混合率が 30%であることを考慮すると、木くず自身が 20mm 以上であるため、20mm 以上が増えたと考えられる。

脆化固形物の易破碎性は、木くずを混合した場合、5mm 未満は 80%程度であり、目標品位を満たしていた。また、木くず 20mm<を混合した場合、20mm 以上の脆化固形物が ASR 単独の場合より多く確認されたが、破碎後は 5mm 未満の割合が木くずを混合した他の水準と同等となっており、ASR 単独の場合より破碎されやすい性状であると判断された。これは、脆化した ASR の粒子に木くずが混じることによって破碎されやすくなったこと、脆化した木くずが ASR の粒子よりも破碎されやすいこと等が原因と考えられる。

以上の結果から、残存した総発熱量、脆化固形物の粒径、易破碎性の観点から、木くずを混合することで、残存する総発熱量、粒径、易破碎性を向上でき、目標の品位の脆化固形物を得ることができると判断された。

また、上記効果は、粒径による違いが認められなかったことから、木くずを破碎または篩い分ける等の環境負荷と経済性を考慮すると、混合するのは木くず有姿が好適であると判断された

表 1.2-11 脆化固形物の回収量および総発熱量

投入物	投入物		脆化固形物		残存重量率 (%)	総発熱量の残存率 (%)	評価
	投入量 (kg/h)	総発熱量 (kcal/kg)	回収量 (kg/h)	総発熱量 (kcal/kg)			
ASR 単独	26	4,280	21	4,030	79.6	74.9	○
木くず有姿混合	26	4,190	21	4,460	80.5	85.6	◎
木くず 20mm<混合	26	4,190	20	4,500	78.5	84.3	◎
木くず<10mm 混合	26	4,190	21	4,670	80.5	89.7	◎
木くず<5mm 混合	26	4,190	21	4,650	80.5	89.3	◎
脆化固形物 目標品位	—	—	—	4,000 以上	—	70 以上	—

※無水ベースの表記

※総発熱量の残存率は、回収量と総発熱量で乗じた値を、投入量と総発熱量で乗じた値で除したものを百分率で示した

表 1.2-12 脆化固形物の破碎処理前後の粒度分布

投入物	破碎処理	粒度分布 (%)						評価
		<2mm	2-5mm	5-10mm	10-20mm	20-40mm	40mm<	
ASR 単独	処理前	25	15	15	20	21	4	○
	処理後	68	6	7	7	8	3	
木くず 有姿混合	処理前	30	18	15	18	16	3	◎
	処理後	74	5	6	6	8	1	
木くず 20mm<混合	処理前	25	15	12	16	29	3	◎
	処理後	74	5	5	6	10	0	
木くず <10mm 混合	処理前	32	17	14	19	15	3	◎
	処理後	76	4	6	8	5	1	
木くず <5mm 混合	処理前	32	21	12	15	17	3	◎
	処理後	77	4	6	7	6	0	
処理前 目標品位	—	—	—	—	—	20 以下		—
処理前 目標品位	—	50 以上		—	—	10 以下		—

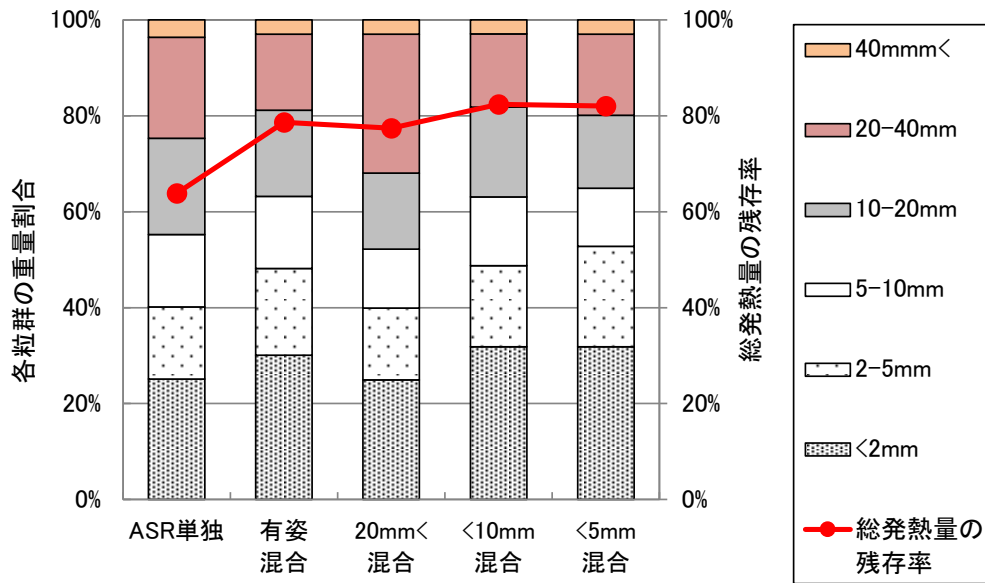


図 1.2-5 脆化固形物（破碎前）の粒度分布および総発熱量の残存率

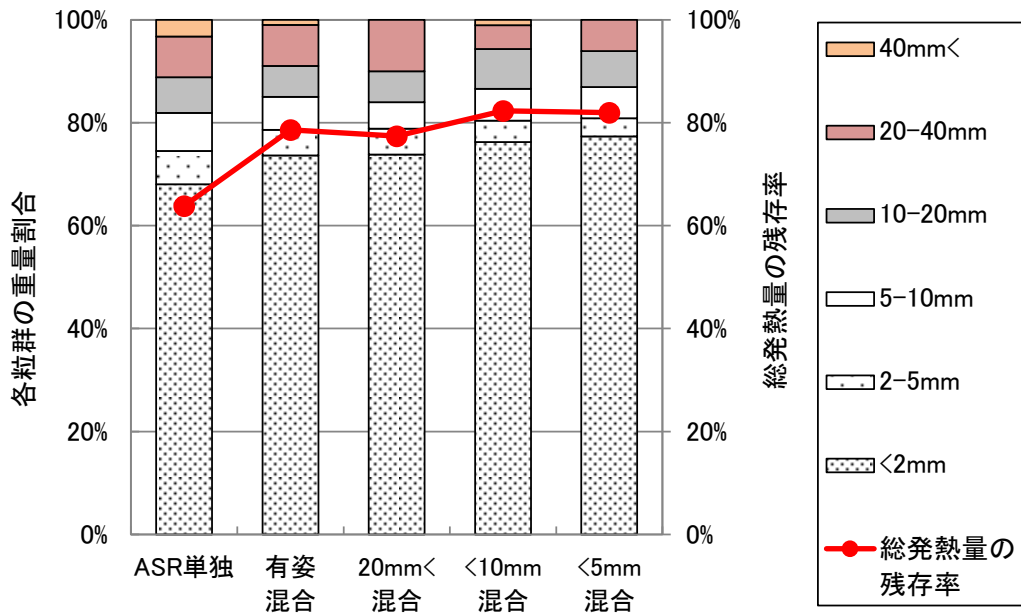






図 1.2-6 脆化固形物（破碎後）の粒度分布および総発熱量の残存率

表 1.2-13 木くずを混合した条件の脆化固形物（破碎前） 写真資料

	
木くず有姿混合	木くず 20mm<混合
	
木くず<10mm 混合	木くず<5mm 混合

1.2.3 CFRP 混入の影響評価

(1) CFRP 粒径の設定

現在、ASR 中には、CFRP は含まれていないまたは極微量であるが、今後 CFRP が自動車の様々な部品、更にはボディーに使用されるため、ASR に混入する量が増加すると予想される。

ASR に硬く、難燃焼性の CFRP が多く混入することで、ASR 脆化固形物の残存する総発熱量、粒径、易破砕性、燃焼性に影響を与えることが想定される。

そこで、ASR に CFRP を混合して、残存する総発熱量、粒径に影響を与えるか検討を行った。なお、燃焼性は後述の 1.2.5(5) に記載する燃焼試験において検討を行う。また、易破砕性は、評価手法を決定することが困難であるため、本実証事業では実施しなかった。

1) 投入パターン

弊社の独自の調査にて、現時点で ASR 中に混入していることが確認された CFRP は数 mm～数十 mm のものが多いことが判明している。

混入 CFRP の形状は、厚さ、長さ等が多様であることから、上記調査結果を踏まえて、10mm 未満に破砕したものを混合した。CFRP の破砕には、木くずの破砕で使用したレッチェ製カッティングミル SM2000（径 10mm のスクリーンを装着したもの）を用いた。

また、混合量については、今後混入しうる量を自動車業界にヒアリングした結果や独自の検討結果から、ASR 中に 20%混入する可能性があるとして想定した。

本実験では、ASR と CFRP を混ぜたものについて、消石灰を混合した。消石灰は、10.2.2 の実験と同様に、ASR と CFRP（89%）：消石灰（11%）の混合比率で混合し、混合粉状である工業用消石灰（塩焼き）を使用した。

表 1.2-14 投入物のパターン

水準	投入物	CFRP 粒径	ASR 比率
1	ASR	-	100%
2	ASR+CFRP	<10mm	80%

備考) ASR+混合物：消石灰=89：11

表 1.2-15 CFRP 写真資料



2) 投入物の性状

ASR、CFRP の各種性状（工業分析、総発熱量）を表 1.2-16 に、粒度分布を表 1.2-17 に示す。総発熱量は、CFRP が ASR より高く、6,950kcal/kg であった。CFRP の粒度分布は、概ね目標である 10mm アンダーの粒径であることが確認された。

表 1.2-16 投入物の各種性状

	工業分析 (%)			総発熱量 (kcal/kg)
	揮発分	固定炭素	灰分	
ASR	66.9	4.1	28.9	4,840
CFRP	28.9	62.8	8.3	6,950

備考) 無水ベースの分析値

表 1.2-17 ASR および CFRP の粒度分布

	粒度分布 (%)					
	<2mm	2-5mm	5-10mm	10-20mm	20-40mm	40mm<
ASR	8	12	10	24	30	16
CFRP	49	29	22	0	0	0

(2) 脆化実験結果

実施した試験の実施日、試験条件等を表 1.2-18 に示す。

表 1.2-18 加熱脆化実証試験の日程および実施条件

項目	試験の日程および実施条件
実施日	2016/11/10
処理温度	325°C
試験時間	4 時間
原料投入量	120kg (30kg/h)

加熱脆化処理した際の脆化固形物の総発熱量、粒径の分析結果および外観は、表 1.2-19、表 1.2-20 の通りである。

CFRP を混合した場合、総発熱量は 4,280kcal/kg、総発熱量の残存率は 73%であり、目標品位を満たしており、ASR 単独の場合とほぼ同等の総発熱量、総発熱量の残存率となった。

脆化固形物の粒径は、CFRP を混合した場合、20mm 以上は 20%以下であり、目標品位を満たしており、また 5mm 未満の割合が多かった。CRRP 混合率が 20%であることを考慮すると、CFRP は 5mm 未満の割合が 80%程度であるため、5mm 未満の割合が増加したと考えられる。

また、ASR 単独に対して、40mm 以上が増加していたが、10-20mm や 20-40mm は減少していることから、粒度分布を評価したロットに粗大物が多く含まれていた可能性が考えら

れる。

以上の結果から、残存した総発熱量、脆化固形物の粒径の観点から、今回混合した CFRP については、残存する総発熱量、粒径に特に悪影響はないと判断された。

表 1.2-19 脆化固形物の回収量および総発熱量

投入物	投入物		脆化固形物		残存重量率 (%)	総発熱量の残存率 (%)	評価
	投入量 (kg/h)	総発熱量 (kcal/kg)	回収量 (kg/h)	総発熱量 (kcal/kg)			
ASR 単独	26	4,280	21	4,030	79.6	74.9	○
CFRP 混合	27	4,670	22	4,280	79.8	73.1	○
脆化固形物 目標品位	—	—	—	4,000 以上	—	70 以上	—

※無水ベースの表記

※総発熱量の残存率は、回収量と総発熱量で乗じた値を、投入量と総発熱量で乗じた値で除したものを百分率で示した

表 1.2-20 脆化固形物の粒度分布

投入物	粒度分布 (%)						評価
	<2mm	2-5mm	5-10mm	10-20mm	20-40mm	40mm<	
ASR 単独	25	15	15	20	21	4	○
CFRP 混合	39	18	12	11	10	10	○
目標品位	—	—	—	—	20 以下		—

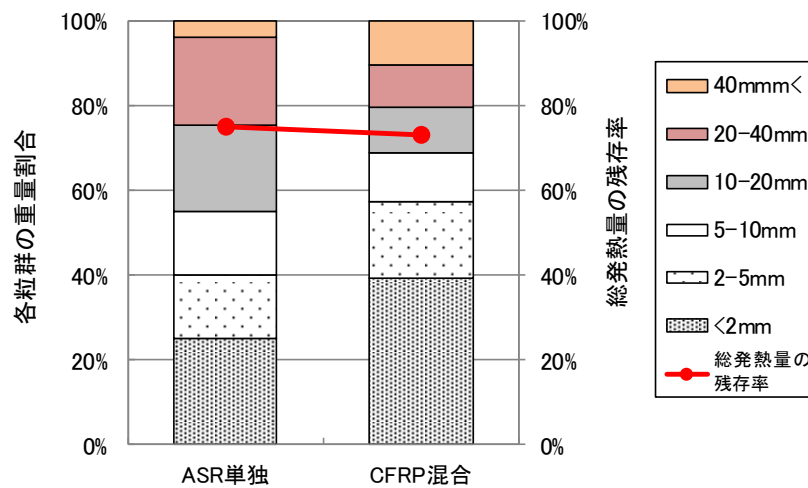


図 1.2-7 脆化固形物の粒度分布および総発熱量の残存率

表 1.2-21 CFRP を混合した条件の脆化固形物 写真資料



1.2.4 破碎方法の選定

(1) 破碎方法の設定

昨年度の実証事業では、選別試験の結果、金属資源として回収できなかった 5mm 以上の比較的大きい脆化固形物に、銀、銅が分配していた。

本実証事業では、脆化固形物の選別処理の前処理として、破碎処理を導入することで、金属資源をより多く選別回収することが可能か検証するため、脆化固形物に好適な破碎方法について検討を行った。

好適な破碎方法の判断基準として、以下の通り破碎品の粒度分布、破碎機の堅牢性を利用した。

- ① 破碎品の粒度分布：5mm 程度に破碎可能
後段の選別工程において、高い選別効率を得るには、粒径が整っていることが望ましい。
- ② 破碎機の堅牢性：破碎しにくいもの(金属やゴム)に対して破碎機の刃の磨耗が少ない。
金属や樹脂の装置内残留量が少なければ、刃の磨耗は少なくなると期待される。

1) 破碎方法

脆化固形物の破碎方法としては、表 1.2-22 に示すものが候補として考えられ、各破碎方法について、破碎機メーカーに脆化固形物の破碎に使用した場合のメリット、デメリットをヒアリングした。

ヒアリングの結果、磨り潰しについては、過粉碎されることで、微粉の割合が多くなる、また金、銀等が、微粉側に含まれ、選別が困難になる可能性があると考え、金属資源を効率的に回収することを目的とした脆化固形物の破碎方法には適していないと判断された。

そこで、せん断・切断、打撃・衝撃の 2 つの方法について破碎実験を行うこととした。

破碎品の粒度は、破碎機内部のスクリーンを選択することで調整することができる。本実験では、スクリーン径 5mm および 8mm で破碎実験を行い、5mm 程度に破碎することが

できるか検証した。

表 1.2-22 各破碎方法の特徴

破碎方法		メーカー ヒアリング結果
磨り潰し	ローラーミルタイプ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属は排石として排出される。 ・ 非金属は微粉碎され、粒度が揃いにくい可能性がある
せん断・切断	カッタータイプ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 適切な粒度の破碎品が得られる。 ・ 金属に対しては、刃の磨耗等の懸念がある。
打撃・衝撃	ハンマータイプ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属に対しては、カッタータイプより堅牢性がある。 ・ ゴムの破碎には適していないため、破碎機内部の残留量が多くなる、内部清掃の頻度が多くなる懸念がある。

2) 投入物の性状

前述の加熱脆化处理の選定において、残存した総発熱量、脆化固形物の粒径、易破碎性の観点から、木くず有姿を 30%混合することで、残存する総発熱量、粒径、易破碎性を向上できると判断された。

本検討結果を踏まえ、破碎実験には、木くず有姿を 30%混合して、325℃で加熱脆化处理を行った脆化固形物を使用した。

脆化固形物の粒度分布を表 1.2-23 に示す。

表 1.2-23 脆化固形物の粒度分布

粒度分布 (%)					
<2mm	2-5mm	5-10mm	10-20mm	20-40mm	40mm<
30	18	15	18	16	3

(2) 破碎実験結果

破碎機メーカーで破碎実験を行った際の脆化固形物の粒径の分析結果、破碎機内部残留量、破碎機および破碎品の外観は、表 1.2-24、表 1.2-25、表 1.2-26、表 1.2-27 の通りである。

カッタータイプ、ハンマータイプともに、スクリーン 5mm および 8mm で破碎することで、ほぼ全量を 5mm 程度とすることが可能であった。

昨年度の実験結果より、5mm 程度の粒度に揃えることにより、後工程の選別工程にて効果的な回収が期待される。このため、5mm 程度を目標粒度とした。スクリーンの 5mm と 8mm で破碎した破碎品の粒度分布を比較したところ、5mm スクリーンでは、2mm 未満が 90%以上であり、金、銀等を含む粒子が細くなりすぎ、物理選別で回収することが困難に

なるリスク、破砕機の刃の磨耗が早くなるリスクが考えられた。一方、8mmのスクリーンでは、概ね5mm程度に粒度が揃っていたこと、5mmスクリーンに比べて過度に破砕しないため破砕機の刃の磨耗を低減できると期待されることから、本実験では8mmスクリーンを採用した。

いずれの破砕機も破砕機内部にゴム等の樹脂や金属の残留物が残っていることを確認した。破砕機内部の残留量については、カッタータイプに比べてハンマータイプの残留量が少なかった。ハンマータイプについては、ゴムの破砕機内部への残留が懸念されたが、十分に脆化されていたため、問題なく破砕されたと考えられる。

破砕機内部の残留物については、破砕方法によって残留物の形状が異なっており、カッタータイプは、スクリーンを通過するまで、せん断・切断されるため、薄片状のものが多く確認されたが、ハンマータイプは、スクリーンを通過するまで、打撃・衝撃されるため、球状のものが多く確認された。

以上の結果から、カッタータイプ、ハンマータイプともに目標の粒径以下に破砕することが可能であったが、金属板や金属線等の異物混入の可能性を考慮すると、ASRを原料とした脆化固形物の破砕には、ハンマータイプが好適であると判断された。

なお、破砕機の刃の磨耗や破砕機内部の残留量は、投入する脆化固形物のばらつき、運転条件（破砕刃の回転数やスクリーン径）等の影響を受けるため、長時間の連続運転を実施して、評価する必要がある。

表 1.2-24 脆化固形物破砕品の粒度分布

破砕方法	スクリーン径	粒度分布 (%)					
		<2mm	2-5mm	5-10mm	10-20mm	20-40mm	40mm<
カッタータイプ	5mm	90	10	0	0	0	0
	8mm	84	15	1	0	0	0
ハンマータイプ	5mm	95	5	0	0	0	0
	8mm	78	19	3	0	0	0

表 1.2-25 脆化固形物破砕時の破砕機内部残留量

破砕方法	スクリーンサイズ	破砕機内部残留量 (%)
カッタータイプ	5mm	0.0 未満 ¹⁾
	8mm	0.0 未満 ¹⁾
ハンマータイプ	5mm	1.8
	8mm	0.9

1)残留ゼロではなく、極少量の残留を確認。

表 1.2-26 ハンマータイプ破碎機および脆化固形物破碎品 写真資料








	
<p>破碎機外観</p>	<p>破碎機内部</p>
	
<p>脆化固形物破碎品</p>	<p>破碎機内部残留物</p>

表 1.2-27 カッタータイプ破碎機および脆化固形物破碎品 写真資料

	
<p>破碎機外観</p>	<p>破碎機内部</p>
	
<p>脆化固形物破碎品</p>	<p>破碎機内部残留物</p>

1.2.5 有用金属等と脆化固形物の石炭代替燃料価値の評価

(1) 金属選別実証試験用の脆化固形物の製造

前述の加熱脆化処理の選定において、残存した総発熱量、脆化固形物の粒径、易破碎性の観点から、木くず有姿を 30%混合することで、残存する総発熱量、粒径、易破碎性を向上できると判断された。

この検討結果を踏まえ、選別実証試験には、木くず有姿を 30%混合して、325℃で加熱脆化処理を行った脆化固形物を使用した。

選別実証試験は、後述の通り、2 水準実施しており、1 水準につき約 500kg の脆化固形物が必要であった。

そこで、表 1.2-28 に示す通り、脆化固形物の製造を行い、約 1,300kg を製造できた。

表 1.2-28 金属選別実証試験用脆化固形物の製造日程、実施条件、試験結果

項目	製造日程、実施条件、結果
実施日	2016/8/24-8/26 2016/9/6-9/8 2016/9/20-9/21
実施場所	広島ガステクノ・サービス
処理温度	325℃
試験時間	約 80 時間
投入物	ASR:70% 木くず:30% (消石灰添加)
原料投入量	1,610kg (26kg/h) ※無水ベース(水分 13.6%)
脆化固形物回収量	1,300kg (21kg/h) ※無水ベース(水分 0.3%)
残存比率	81%残存 (19%減少)

(2) 金属選別実証試験用の脆化固形物破碎品の製造

前述の破碎方法の選定において、ASR を原料とした脆化固形物の破碎には、ハンマータイプが好適であると判断された。

選別実証試験には、5mm 以下に破碎した脆化固形物破碎品約 1,000kg (2 水準用) が必要であるため、表 1.2-29 に示す通り、脆化固形物破碎品の製造を行い、約 1,050kg を製造できた。

表 1.2-29 金属選別実証試験用脆化固形物の製造日程、実施条件、結果

項目	製造日程、実施条件、結果
実施日	2016/10/14-10/15
破碎機方式	ハンマー式

項目	製造日程、実施条件、結果
	(8mm スクリーンを使用)
試験時間	約 30 分
投入物	前述の金属選別実証試験用の脆化固形物 ※原料：ASR70%、木くず：30% (消石灰添加) ※加熱脆化温度：325℃
原料投入量	1,070kg
破砕品回収量	1,047kg

(3) クロダリサイクルにおける金属選別実証実験結果

クロダリサイクルが保有する既存のダストリサイクル設備を利用して、脆化固形物約 1,050kg (2 水準分) の選別実証試験を実施した。

クロダリサイクルのダストリサイクル設備は、磁力選別装置 (2 機)、風力選別装置、乾式比重選別 (ART) で構成される設備を利用した。本設備で、燃料として利用可能な低比重のダスト (風力選別ダスト、サイクロンダスト、バグフィルタダスト、軽産物、中産物) と、金属品位が高いと思われる高比重の重産物に選別した。

本選別実証試験では、以下の 2 点について、検証を行った。

- ① 金属資源の効率的回収に風力選別が必要か
- ② 破砕処理を導入することで、5mm 以上の脆化固形物に分配した銀、銅を、金属資源として回収できるか (昨年度判明した課題)。

まず、①について検証した結果、風力選別処理を行わなかった場合、乾式比重選別において重・中・軽産物が適切に選別できず、運転不可となった。これは、表に示す通り、微粒分によって乾式比重選別のテーブルが目詰まりを起こしたことが原因と考えられる。この結果から、乾式比重選別による効率的な選別処理のためには、風力選別処理を事前に実施する必要があると判断された。

上記結果を踏まえ、本報告では、乾式比重選別の前段に、風力選別処理を実施し、②について検証を行った。

表 1.2-30 脆化固形物の選別実証試験の日程および実施条件

項目	試験の日程および実施条件
実施日	2016/11/16
実施場所	クロダリサイクル
投入物	前述の脆化固形物破砕品
投入量	1,046kg

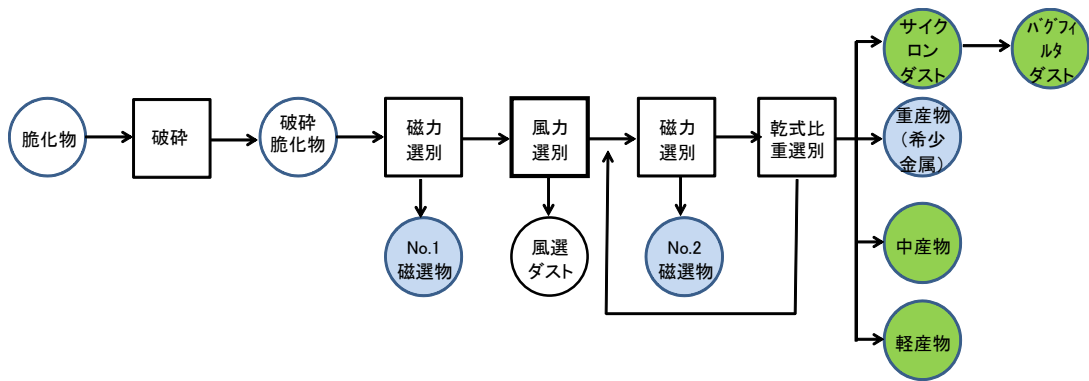


図 1.2-8 脆化固形物選別実験の選別工程










表 1.2-31 脆化固形物の選別実験結果

INPUT		OUTPUT		用途	備考
投入物	kg	回収物	kg		
脆化固形物 破碎品	505.4	No. 1 磁選物	20.0	金属評価 (鉄スクラップ)	
		風選ダスト	150.0	固形燃料評価	
		No. 2 磁選物	2.0	金属評価 (鉄スクラップ)	
		軽産物	231.0	固形燃料と金属評価	更に精選別を実施し、評価
		中産物	19.0	固形燃料と金属評価	更に精選別を実施し、評価
		重産物	13.8	固形燃料と金属評価 (貴金属、銅が期待)	更に精選別を実施し、評価
		サイクロンダスト	39.0	固形燃料評価	
		バグフィルタダスト	0.0		発生せず
		合計	474.8		工程内ロスによる 30.6kg 減

表 1.2-32 脆化固形物の選別実験における有用金属の回収量の集計結果

項目	詳細	数量 (kg)
鉄スクラップ(磁選物)	No. 1 磁選物	20.00
	No. 2 磁選物	2.00
	合計	22.00
貴金属・銅	重産物	13.8
	合計	13.8

表 1.2-33 脆化固形物選別実験に用いた設備および回収産物 写真資料

	
<p>ダストリサイクル設備外観</p>	<p>乾式比重選別目詰まり</p>
	
<p>No. 1 磁選物</p>	<p>風選ダスト</p>
	
<p>No. 2 磁選物</p>	<p>軽産物</p>
	
<p>中産物</p>	<p>重産物</p>
	
<p>サイクロンダスト</p>	

1) 金属資源のマテリアルバランス

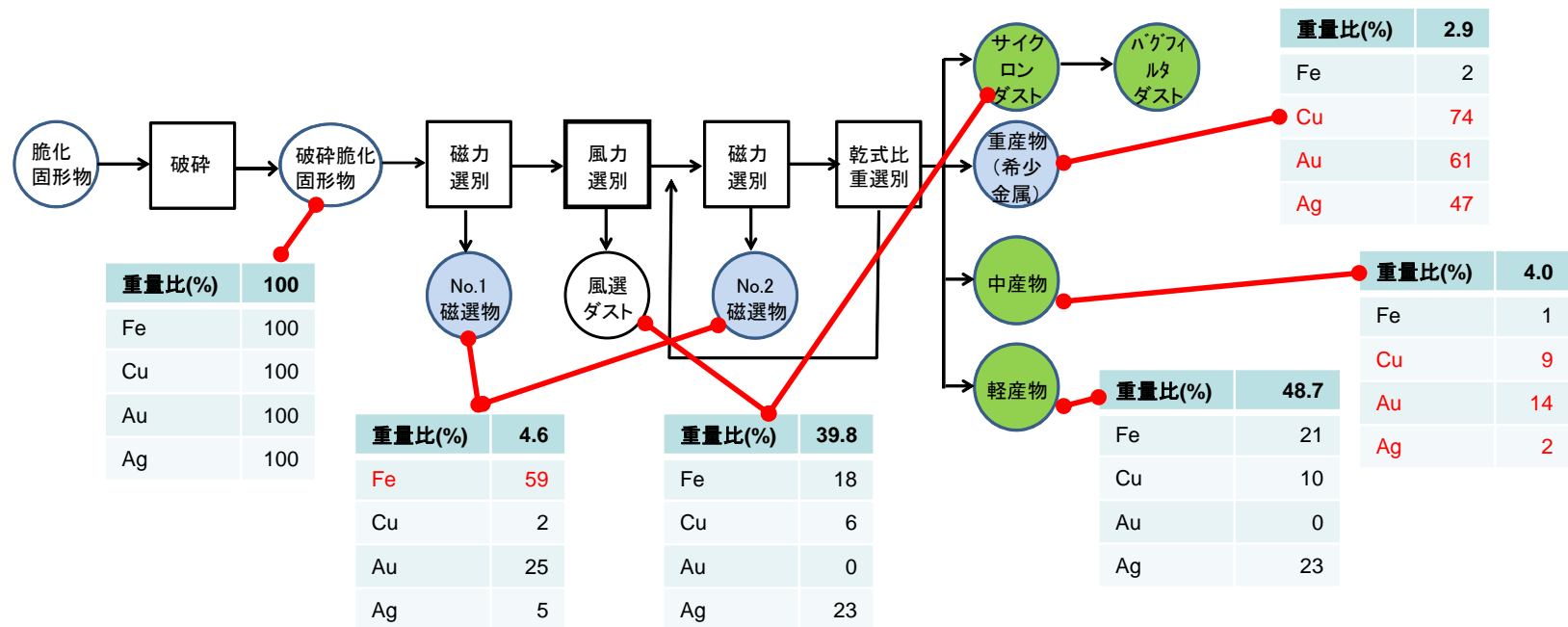
回収資源のマテリアルバランスを図 1.2-9 に示す。なお、算出にあたっては、合計が 100% となるよう、実際に回収された各資源からの積み上げにて行った。


金属資源別に見ると、銀、銅は、昨年度の回収率より向上していた。金と銅は実質回収された割合が目標である 70%以上となったが、鉄は 59%、銀は 49%であった。

風選ダストや軽産物といった低比重の脆化固形物に鉄が 35%、銀 43%分配されていることから、回収方法の工夫が求められる。

金、銀、銅の挙動については、昨年度と同様に、金と銅は連動していたが、銀は異なる挙動を示していた。この理由として、金と銅の回収が連動したのは、元の状態において、銅と金は電子部品の接点端子等、脆化固形物に比べて高比重の材料に利用されており、高比重の産物で主に回収されたと考えられる。一方で、銀の回収が金や銅と異なっていた理由は、電子部品のような高比重の材料以外に、プラスチックのように比較的 low 比重の材料に利用されており、低比重の産物においても回収されたと考えられる。

鉄および銀については、回収方法の工夫の余地が残っているものの、50%前後回収できており、金および銅は 70%以上回収できていることから、低温加熱脆化处理、破碎処理、選別処理を組み合わせた本処理技術は、金属資源の回収に効果的であると思われる。




H27:
 嵩比重2.5の重産物を0.3%回収

H28:
 比重1.6の重産物を2.9%回収

金属資源回収率(%)	H28	H27
Fe	59 (16↓)	75
Cu	82 (51↑)	31
Au	75 (3↑)	72
Ag	49 (35↑)	14

※H27とH28は選別工程の内容が異なるため、フロー全体で回収された率(選別成果の合計)で比較した。

図 1.2-9 金属資源回収の測定結果

(4) ラボ精選別実証実験結果

クロダリサイクルにおける選別実験の結果、金、銀、銅、鉄を効率的に回収できることが確認できたが、より効果的に金属資源を回収するには、クロダリサイクルで使用した装置以外の装置も利用して、選別工程を設計する必要がある。

そこで、クロダリサイクルの選別実験で回収した重産物、中産物、軽産物を対象に、表の選別装置を用いて、追加選別を行い、金属資源をより効果的に回収できる選別工程の検討を行った。

重産物、中産物、軽産物は、それぞれ比重、金属・脆化固形物の含有量が異なるため、産物に応じた選別方法を用いた。

重産物は、外観から銅、アルミ、ガラスが多く含まれていたことから、乾式比重選別で銅を重産物として回収し、アルミ、ガラスを軽産物として回収し、銅を回収できないか検討した。また、その前処理として、篩い分け、渦電流選別のいずれが有効か検討した。

中産物は、脆化固形物が主体であるものの、数 mm 大の銅やアルミも確認されたことから、渦電流選別で銅、アルミのみを回収できないか検討した。また、前述の非導電産物には、比較的細かい銅線が多く確認されたことから、乾式比重選別によって、銅線を重産物として回収できないか検討した。数 mm 大の脆化固形物も多く確認されたことから、乾式比重選別を行う際に、篩い分けを行い、脆化固形物を除去し、乾式比重選別の選別効率を向上させた。

軽産物は、外観から金属はほとんど確認できなかったが、回収できる可能性もあるため、渦電流選別を行い、金属を回収可能か検討した。

なお、各産物には、Fe を主成分とする磁性物が残存している可能性があり、磁性物が多く含まれたまま、渦電流選別処理を行った場合、発熱してベルトやローターを損傷させることが懸念される。また、磁性物は比較的比重が大きいため、乾式比重選別で処理した場合、重産物側に移行し、重産物の貴金属品位を低下させる。これらの点を考慮して、いずれの選別工程においても、まず磁力選別を実施してから、その他の選別処理を実施した。

実施した試験の実施日、試験条件等は、表 1.2-34 に示す通りである。装置単独での処理は効果が小さいと考え、複数の装置を組み合わせた。渦電流選別については、ハンマータイプでの破碎処理によって球状になった脆化固形物・金属が確認され、金属を選別回収しにくい現象が確認されたため、回収した非導電産物を再度渦電流選別で処理する等して、効果の最大化を図った（渦電流選別はいずれの検討においても 5 回実施した）。また、篩い分けについては、装置は使用せずに JIS 試験用篩いによる手篩いで実施した。

表 1.2-34 ラボでの精選別実験試験の日程および実施条件

項目	試験の日程および実施条件
実施日	2016/11/16-12/15
装置	<ul style="list-style-type: none"> ・ 渦電流選別機（ローター回転数 2,500rpm。略称を ECS とする） ・ 乾式比重選別機（略称を ART とする） ・ 磁力選別機（ドラム型。600mT。略称を磁選とする）
試料	クロダリサイクルの選別実験で回収した軽産物、中産物、重産物

表 1.2-35 ラボでの精選別実験に用いた設備および実機選別産物 写真資料

	
<p>渦電流選別機 (ECS)</p>	<p>乾式比重選別機 (ART)</p>
	
<p>磁力選別機 (磁選)</p>	<p>軽産物</p>
	
<p>中産物</p>	<p>重産物</p>

ラボでの精選別実験の結果は、図 1.2-10、図 1.2-11、図 1.2-12、図 1.2-13 の通りである。

① 重産物 (図 1.2-10、図 1.2-11)

- ECS と ART を組み合わせた場合、ECS 導電産物については、ART により重産物に銀、銅 (Ag710g/t、Cu85%)、軽産物にアルミ (Al55%) を回収することができ、ECS 非導電産物については、ART により重産物に銀、銅 (350g/t、Cu85%)、軽産物にガラス (目視評価) を回収することができた。ECS によって、導電産物に銅を移行させることを目標としたが、細かい銅線等は今回使用した ECS (ローター回転数 2,500rpm) では反発力が弱く、導電産物として回収できなかったと推測された。
- 篩い分けと ART を組み合わせた場合、2mm over 品については、ART により重産物に銀、銅 (Ag1,100g/t、Cu69%)、軽産物にアルミ (Al35%) を回収することができ、2mm under

品については、ART により重産物に銀、銅 (390g/t、Cu82%)、軽産物にガラス (目視評価) を回収することができた。

- ECS と ART、篩い分けと ART とともに、同様の回収結果となったが、ECS は選別効果最大化のため、5 回反復して処理を行っていることを考慮すると、重産物の有用金属の品位を向上させるには、篩い分けと ART の組み合わせが良いと判断された。

② 中産物 (図 1.2-12)

- ECS 導電産物については、金、銀、銅 (Au14g/t、Ag22g/t、Cu4.5%) を回収でき、ECS の効果が確認された。

他の回収物については詳細な分析を行っていないが、2-5mm の重産物では銅線を多く回収できており、ART も効果があると判断された。

③ 軽産物 (図 1.2-13)

- ECS 導電産物の回収量はわずかであり、軽産物から金属資源を回収するのは困難または効率的ではないと判断された。

以上の結果から、篩い分けを行い、粒群毎に、乾式比重選別で処理することで、金、銀、銅、ガラス、アルミを効率的に選別可能であると期待される。

渦電流選別については、選別効果は確認できたが、ハンマータイプの破砕機を使用した場合、球状になった脆化固形物・金属が確認され、金属を選別回収しにくい現象が確認された。今回使用した渦電流選別装置は、ローター回転数が 2,500rpm であったが、現在 5,000～6,000rpm レベルのものも開発されているため、今回のような小さい、細い金属も回収できると期待される。

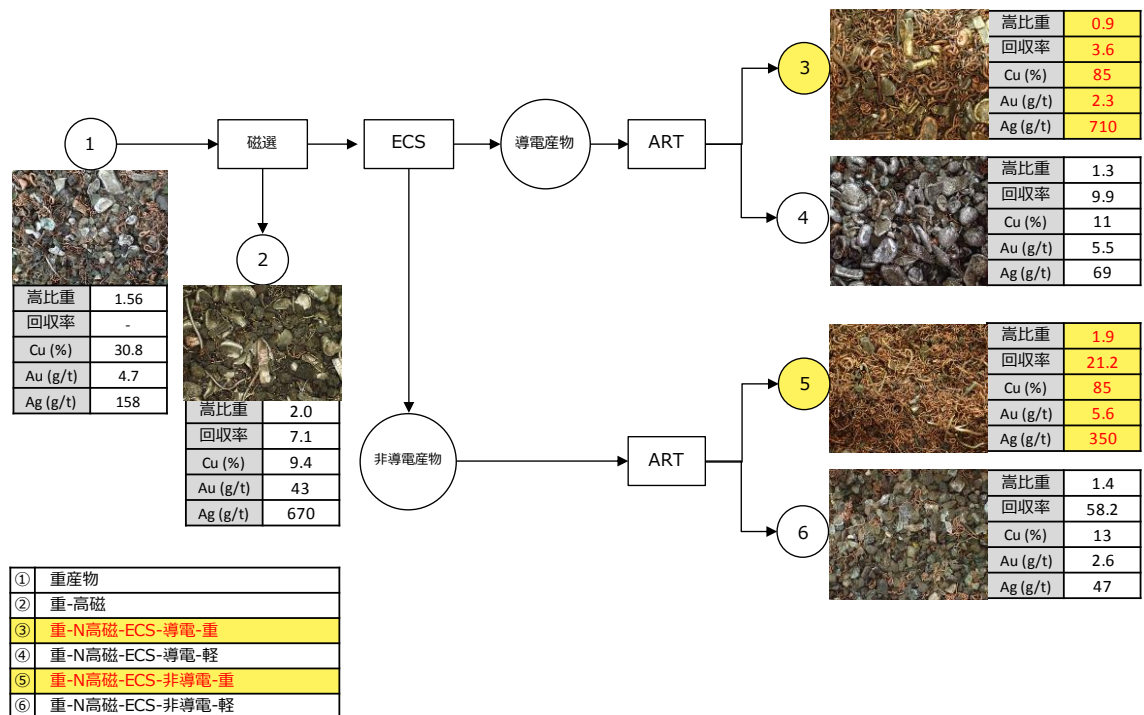


図 1.2-10 重産物の精選別フロー (ECS+ART)

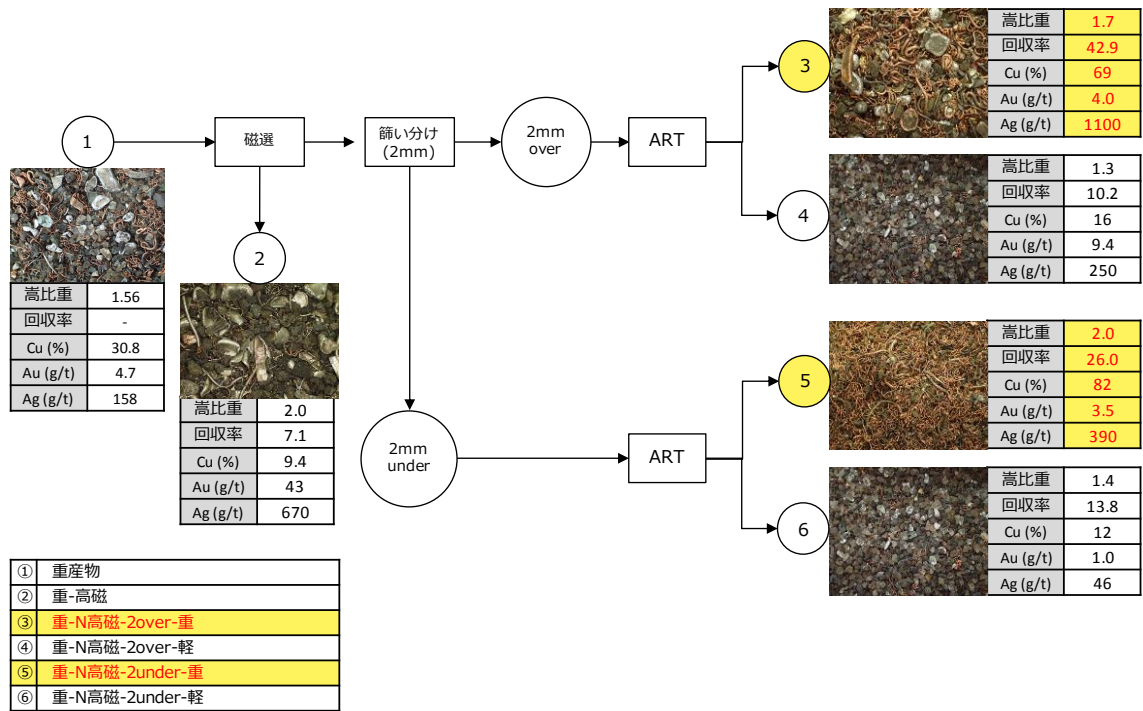


図 1.2-11 重産物の精選別フロー（篩い分け+ART）

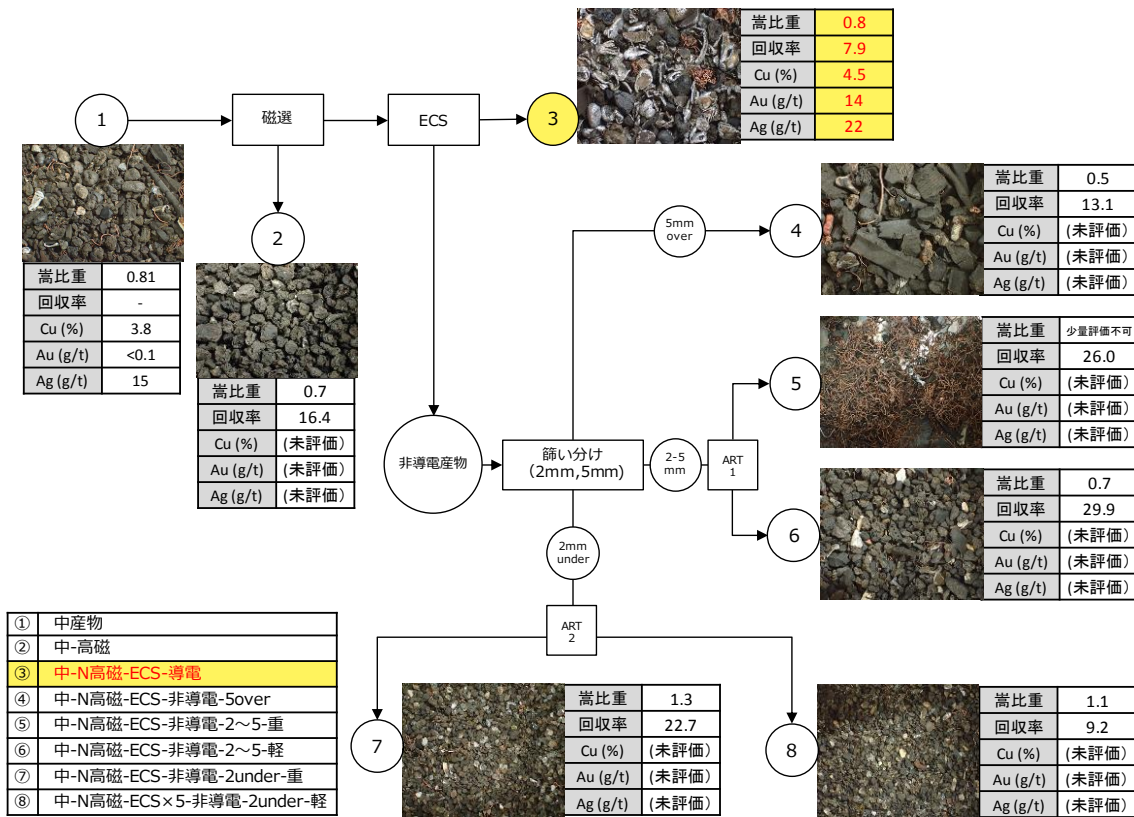


図 1.2-12 中産物の精選別フロー

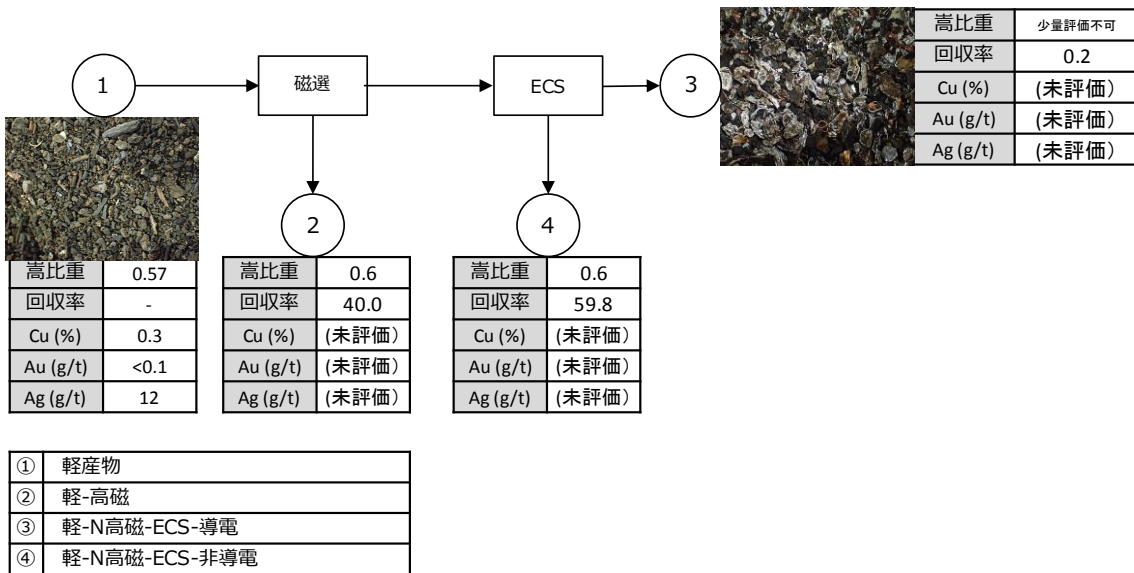


図 1.2-13 軽産物の精選別フロー

(5) 脱塩処理実証実験結果

1) 水洗実証実験結果

選別試験で回収した脆化固形物は、大半が 2mm 未満まで破碎されたものであるため、粒径の観点からは、そのまま石炭代替燃料として利用することも可能であるが、ハロゲン等の含有成分について留意する必要がある。

特に、Cl 含有量については、例えばセメントの石炭代替として利用する場合、セメントの製造工程や製品への負荷や影響を考慮すると、0.5%以下であることが望ましい。

ハロゲンの含有量の低減には、水洗処理を適用することを想定しているが、水洗処理を行うことで、Cl 以外の成分が廃水に溶出するため、これらの排水処理も必要となるため、廃水の溶出成分を把握する必要がある。

そこで、水洗実証実験を実施して、水洗によるハロゲンの低減効果 (Cl 含有量を 0.5%以下に低減可能か)、廃水成分の確認を行った。実施した試験の実施日、試験条件等は、表 1.2-36 の通りである。

石炭代替燃料として利用可能な脆化固形物は、風選ダスト、軽産物、中産物、サイクロンダストの 4 種類であり、これらは混合した状態で燃料として使用することが想定されるため、クロダリサイクルでの選別実験の回収割合を加味して、合併試料を作成した。水洗実証実験では、原料として上記合併試料を用いた (試料名を水洗原料とする)。これらについて、含有成分を分析した結果は、表 1.2-37 の通りである。

表 1.2-36 脆化固形物の水洗実証試験の日程および実施条件

項目	試験の日程および実施条件
実施日	2016/12/5
実施場所	太平洋コンサルタント
使用装置	攪拌羽根式攪拌機 ウォーターバス 吸引ポンプ
装置条件	攪拌羽根回転数：400rpm 水温：30°C保持
固液比	固体 1000g：水 3000g
試験時間	水洗：30 分間 吸引脱水：5 分間

表 1.2-37 水洗原料の含有成分

試料	混合割合 (%)	含有量 (%)		
		Cl	F	Br
風選ダスト	34	1.45	0.002	0.040
軽産物	53	0.90	0.004	0.036
中産物	4	0.34	0.011	0.019

試料	混合割合 (%)	含有量 (%)		
		Cl	F	Br
サイクロンダスト	9	1.42	0.005	0.032
水洗実験原料	-	1.22	0.005	0.034

表 1.2-38 水洗実証試験における設備 写真資料



攪拌機およびウォーターバス

水洗試験後の脆化固形物（水洗残渣）の水分、ハロゲン含有成分を表 1.2-39、水洗廃水のハロゲン濃度を表 1.2-40 に示す。

また、水洗廃水のハロゲン濃度および水洗原料のハロゲン含有量から、水洗処理によって脆化固形物から溶出して廃水に移行したハロゲン量を算出した結果を表 1.2-40 に示す（水洗原料、水洗残渣のハロゲン含有量を比較して評価する方法もあるが、水洗廃水の方がより均一な試料であり、ばらつきが小さいと判断し、廃水の濃度を用いて算出した）。

更に、水洗廃水のハロゲン濃度から、廃水に移行したハロゲンを水溶性塩、廃水に移行しなかったハロゲンを不水溶性塩と仮定し、水溶性塩と不水溶性塩の含有量を算出した結果を表 1.2-41 に示す。

水洗廃水については、水質汚濁防止法で定められた排水基準を中心に 45 項目の分析を行った結果を表 1.2-42 に示す。

水洗実験の結果、Cl 含有量は 1.22% から 0.38% まで低減でき、0.5% 以下となることを確認した。一方、F、Br は、水洗廃水にほとんど溶出しておらず、不水溶性塩であると推測された。

水洗廃水の各種濃度については、排水基準を超過した成分は、「鉛およびその化合物、pH、BOD、COD、フェノール類含有量、亜鉛含有量」の 6 項目であった。これらの処理を対象とした排水処理を実施する必要があるが、鉛、亜鉛は、水酸化物法で比較的容易に処理できるため、COD、フェノール類といった難分解性有機化合物の処理が重要になる。

以上の結果から、水洗処理によって、低 Cl の良好な石炭代替燃料を製造することが可能であることが確認された。一方で、水洗廃水に難分解性有機化合物が排水基準を超過するレベルで溶出しているため、排水基準を遵守すべく、難分解性有機化合物の排水処理が重要となることが確認された。

表 1.2-39 水洗残渣の水分、ハロゲン含有量

試料	水分 (%)	含有量 (%)		
		Cl	F	Br
水洗残渣	38.3	0.38	0.004	0.024

備考) 水分のみ有姿ベースの分析値。その他は無水ベースの分析値

表 1.2-40 水洗廃水のハロゲン濃度、ハロゲン量

試料	濃度 (mg/L)	廃水に移行したハロゲン量 (%)
Cl	2,900	71.3
F	0.3	1.8
Br	0.2	0.2

表 1.2-41 水洗原料中のハロゲンの水溶性塩・不水溶性塩の割合

成分	含有量 (%)		
	水溶性	不水溶性	合計
Cl	0.87 (0.26)	0.35 (0.43)	1.22 (0.69)
F	0.0001	0.0049	0.0005
Br	0.0001	0.0339	0.0340

備考) 表中()内の数値は昨年度の実績値である。

表 1.2-42 水洗廃水の各種濃度

成分	水洗廃水 (mg/L)	排水基準 (mg/L)
カドミウム及びその化合物	<0.003	0.1
シアン化合物	<0.1	1
有機燐化合物	<0.1	1
鉛及びその化合物	1.1	0.1
六価クロム化合物	<0.02	0.5
砒素及びその化合物	<0.01	0.1
総水銀	<0.0005	0.005
アルキル水銀化合物	<0.0005	検出されないこと
ポリ塩化ビフェニル	<0.001	0.003
トリクロロエチレン	<0.001	0.3
テトラクロロエチレン	<0.001	0.1
ジクロロメタン	<0.001	0.2
四塩化炭素	<0.001	0.02
1,2-ジクロロエタン	<0.001	0.04
1,2-ジクロロエチレン	<0.001	1
シス-1,2-ジクロロエチレン	<0.001	0.4
1,1,1-トリクロロエタン	<0.001	3
1,1,2-トリクロロエタン	<0.001	0.06
1,3-ジクロロプロペン	<0.001	0.02
チウラム	<0.004	0.06
シマジン	<0.002	0.03
チオベンカルプ	<0.002	0.2
ベンゼン	0.002	0.1
セレン及びその化合物	<0.01	0.1
ホウ素及びその化合物	0.2	10
フッ素及びその化合物	0.3	8
アンモニア,アンモニウム化合物, 亜硝酸及び硝酸化合物	1.8	100
1,4-ジオキサン	0.1	0.5
水素イオン濃度(pH)	12.2	5.8~8.6
BOD	4200	160
CODMn	2000	160
CODCr	6300	-
n-ヘキサン抽出物質含有量 (鉱物油)	<1.0	5
n-ヘキサン抽出物質含有量 (動植物油脂類)	18	30
フェノール類含有量	16	5
銅含有量	0.94	3
亜鉛含有量	5.1	2
溶解性鉄含有量	<0.1	10
溶解性マンガン含有量	<0.01	10
クロム含有量	<0.05	2
大腸菌群数	0	3000
窒素含有量	65	120
燐含有量	0.29	160
有機体炭素(TOC)	3600	-
塩化物イオン	2900	-

(6) 燃焼実証実験結果

水洗実証試験で得られた脆化固形物、CFRP を 20%混合し、325℃で処理した脆化固形物について、セメントキルンの主要燃料である微粉炭に対する燃焼性（所定時間燃焼した際の燃焼率）を評価するため、管状電気炉を用いて、燃焼試験を実施した。

実施した試験の実施日、試験条件、使用した試料性状等は、表 1.2-43 の通りである。

表 1.2-43 脆化固形物の燃焼実証試験の日程および実施条件

項目	試験の日程および実施条件
実施日	2016/12/8~12/9
実施場所	太平洋コンサルタント
投入物	<ul style="list-style-type: none"> ・ 微粉炭 ・ 脆化固形物（前述の水洗残渣。加熱脆化時の条件は、木くずを 30%混合し、325℃処理したもの） ・ 脆化固形物（CFRP を 20%混合し、325℃で処理したもの） ・ CFRP
使用装置	管状電気炉
装置条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 温度：1450℃、 ・ 雰囲気：大気（標準ガス使用。N₂ 79%、O₂ 21%） ・ ガス流量 1L/min
試験時間	0.5、1、2、3、4、6、8分

表 1.2-44 燃焼実験用試料の性状

試料	粒径	総発熱量 (kcal/kg)	工業分析 (%)		
			揮発分	固定炭素	灰分
微粉炭	D ₅₀ =29 μm	6,740	20.4	61.8	17.8
脆化固形物 (木くず混合品)	4mm 以下 ¹⁾	4,000	49.0	6.7	44.3
脆化固形物 (CFRP 混合品)	4mm 以下 ¹⁾	4,280	41.2	20.6	38.2
CFRP	4mm 以下 ¹⁾	6,950	28.9	62.8	8.3

1) レッチェ製カッティングミル SM2000（径 4mm のスクリーンを装着したもの）で破碎したもの。

表 1.2-45 燃焼実験における設備 写真資料

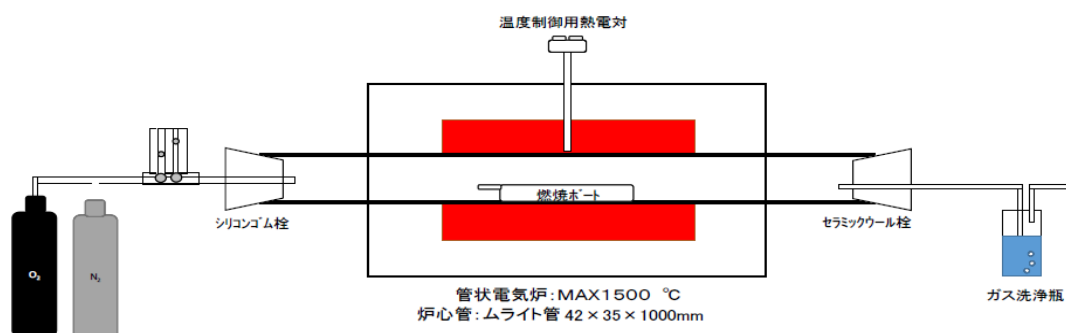
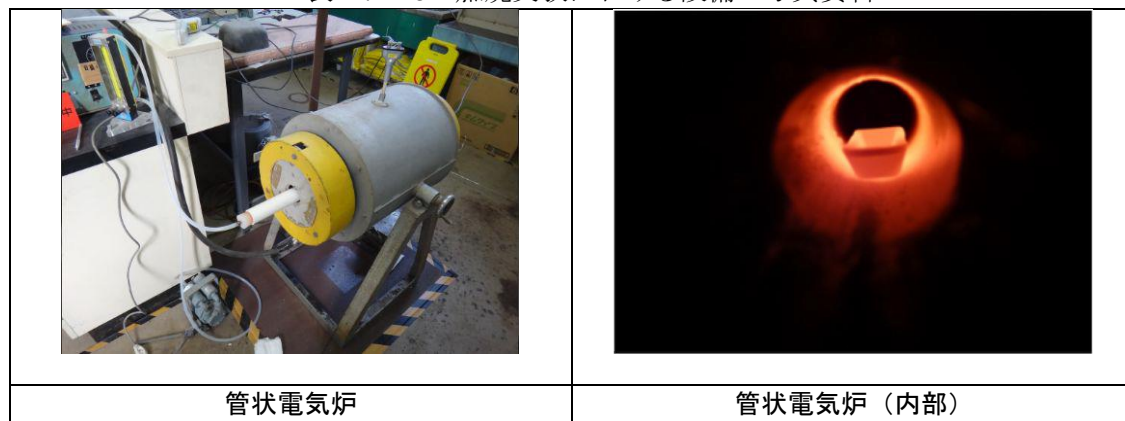


図 1.2-14 燃焼実験模式図

燃焼試験の燃焼率は、表 1.2-46 の通りである。燃焼率は以下の式で算出した。燃焼率は、試料の可燃分（＝揮発分＋固定炭素）に対する、重量減少率の割合とした。脆化固形物の場合、燃焼率が 100%を超えるケースが確認されたが、金属を多く含むため、燃焼により可燃分が灰化した後、金属が酸化することで、重量が増加したと推測される。従って、本実験では、燃焼率が 100%を超えた場合、便宜上 100%とした。

- ・ 重量減少率＝（所定時間燃焼した際に残存している試料量）／（投入した試料量）×100
- ・ 燃焼率＝（重量減少率）／（投入した試料の揮発分と固定炭素の合計割合）×100

微粉炭は完全燃焼に 4 分要している一方、木くずを混合した脆化固形物は 0.5 分で完全燃焼しており、微粉炭に比べて良好な燃焼性を示した。

CFRP は、単独では完全燃焼に 8 分要しており、難燃焼性であることが確認された。一方で、CFRP を ASR に 20%混合して加熱脆化して得られた脆化固形物の場合、2 分で完全燃焼しており、CFRP 単独より燃焼性が良いことが判明した。

以上の結果から、本燃焼評価方法では、木くずや CFRP を混合した脆化固形物は、微粉炭に対して、燃焼性が良いことが確認できたため、石炭代替燃料として利用できると期待される。

表 1.2-46 所定時間燃焼した際の燃焼率 (%)

試料	燃焼時間 (分)						
	0.5	1	2	3	4	6	8
微粉炭	62	67	81	95	100	100	100
脆化固形物 (木くず混合品)	100	100	100	100	100	-	-
脆化固形物 (CFRP 混合品)	68	86	100	100	100	-	-
CFRP	39	46	56	70	81	95	100

表 1.2-47 脆化固形物と一般炭の総発熱量比較

	総発熱量	⇒一般炭の67%を代替
脆化固形物 (木くず混合品)	17.17GJ/t	
一般炭	25.7GJ/t	

出所) 環境省「算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 (別表 1 燃料種別の総発熱量)」

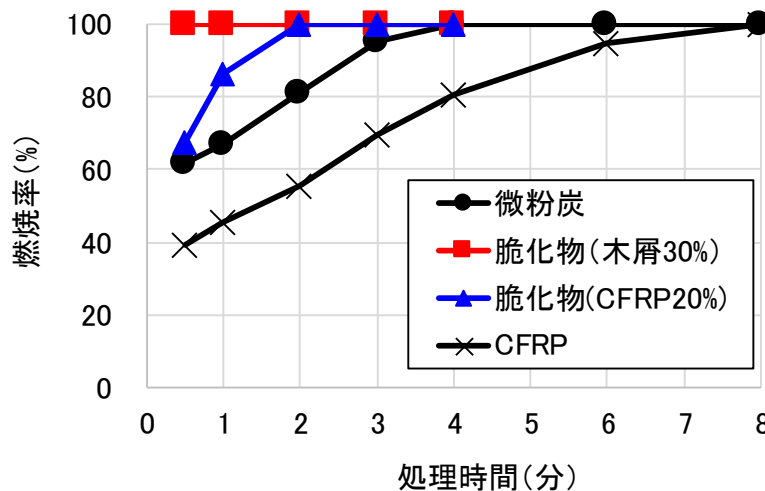


図 1.2-15 微粉炭と脆化固形物の燃焼性

(7) 好適な処理フローおよび回収される金属資源のマテリアルバランス

実証試験結果に基づき、好適と思われる処理フローの設計を行った。図 1.2-16 にフローおよび金属資源のマテリアルバランスを示す。

この処理フローにより、投入した ASR に含まれる金属資源の内、鉄 70%、アルミ 9%、銅 90%、金 85%、銀 80%が回収される見込みである。

回収産物	分配率 (%)	回収量 (t/年)	用途	
Fe (No.1)	5.0	1,152	鉄	
軽産物	30.0	6,912	燃料	
Fe(No.2)	1.0	230	鉄	
粗粒 5mm<	5.0	1,152	燃料	
中粒 (2-5mm)	軽産物	15.0	3,456	燃料
	中産物	0.5	115	アルミ
	重産物	1.0	230	貴金属・銅
細粒 <2mm	軽産物	41.5	9,562	燃料
	中産物	0.5	115	燃料
	重産物	0.5	115	貴金属・銅

金属資源回収率 (計)

重量比	%
Fe	70
Al	9
Cu	90
Au	85
Ag	60

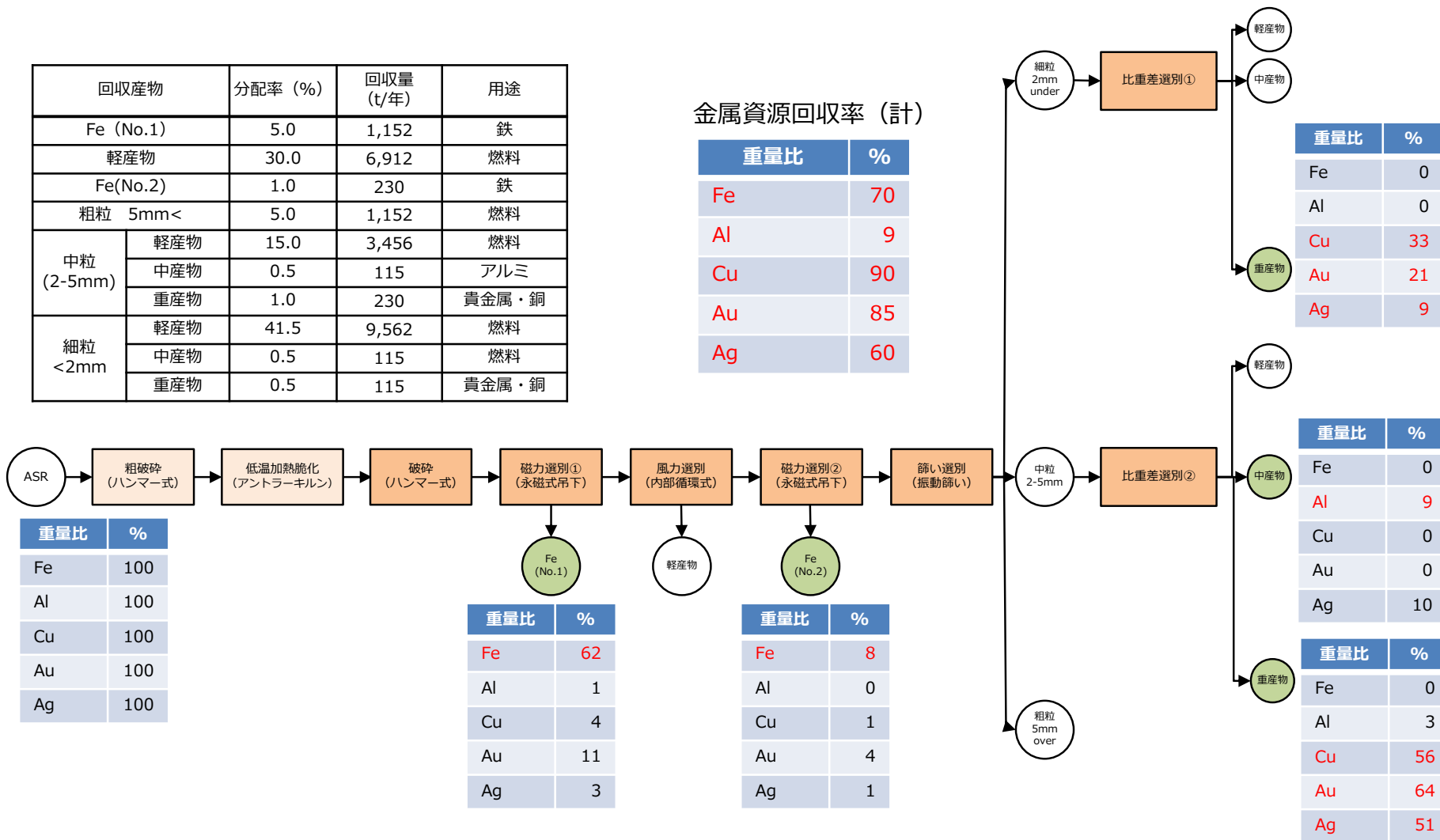


図 1.2-16 実証実験結果に基づき設計した好適な処理フローと回収される金属資源のマテリアルバランス

2. 環境負荷低減効果の検証

2.1 CO₂ 排出量削減効果の検討

加熱脆化処理における CO₂ 排出量について、他の処理技術との比較検討を行った。比較検討処理技術としては、ガス化溶融処理と再選別処理とした。

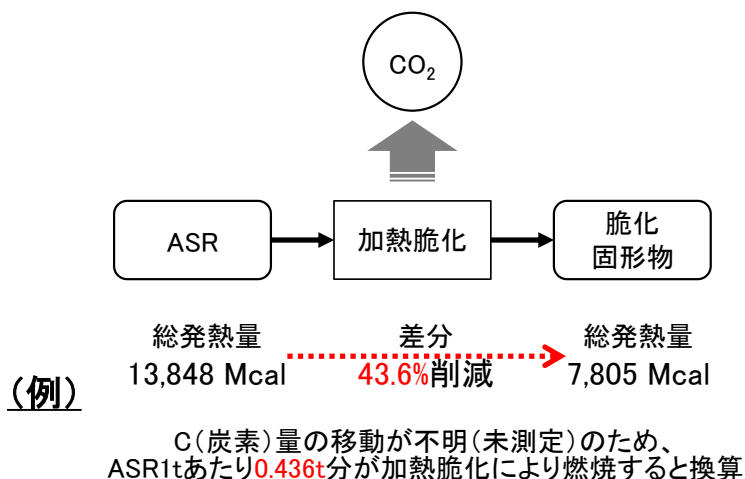
バウンダリについては、いずれも運搬を除いた全プロセスを対象とし、処理工程およびリサイクルによる効果の全てについて、評価試算を行った。

処理技術との比較にあたり、処理物を ASR100%に揃えた。これは、ガス化溶融処理と再選別処理に木くずを処理した場合の LCA データがないためである。

低温加熱脆化処理における CO₂ 排出量の算出には、設計した好適処理フローの実用プラント規模の設計データを用いた。脆化工程における処理物の燃焼による CO₂ 排出量については、炭素移動量が不明のため、実験データより処理前の総発熱量と処理後の総発熱量の差分を用いて、処理物 1t あたりの脆化工程における処理物の燃焼による CO₂ 排出量を算出した。

本事業では、低温加熱脆化の実験にあたり、ASR100%、ASR70%+木くず 30%、ASR80%+CFRP20%の 3 種類の処理物にて脆化処理を行った。一方、脆化後の破碎、選別実験は ASR70%+木くず 30%のみで行っている。このため、ASR100%での処理における CO₂ 排出量の算出にあたり、脆化工程における処理物の燃焼による CO₂ 排出量は、ASR 単体で脆化した際の総発熱量のデータを用いた。選別による金属回収効果については、ASR70%を 100%に換算、脆化固形物の総発熱量は、ASR100%での脆化実験データを用いて算出した。

比較対象技術については、昨年度と同様にガス化溶融処理は文献データを、再選別処理はクロダリサイクルの実機データを用いた。



「廃棄物の焼却及び製品の製造の用途への使用(その他の廃プラスチック類)」の燃焼のCO₂排出係数にてCO₂量算出

※排出係数は環境省「算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧(参考1)」を使用

図 2.1-1 処理物の加熱脆化処理により発生する CO₂ 排出量の算出手法 (例)

備考) 図中の数値は算出事例であり、本実証実験データとは一致しない。

2.1.1 ガス化溶融処理との比較による CO₂ 削減効果試算

ガス化溶融処理のベースラインプロセスと本事業のリサイクルプロセス、各プロセスの CO₂ 排出量を図 2.1-2 に示す。ガス化溶融処理と比較した場合、低温加熱脆化処理の CO₂ 削減効果は 1.3075t-CO₂/t-ASR となった。

なお、処理プロセスにおける CO₂ 発生量のみで比較すると、ガス化溶融では 1.9018 t-CO₂/t-ASR、低温加熱脆化では 1.1060 t-CO₂/t-ASR であった。処理プロセスのみの比較でも低温加熱脆化処理の CO₂ 削減効果が見られ、0.7958t-CO₂/t-ASR の削減効果と算出された。

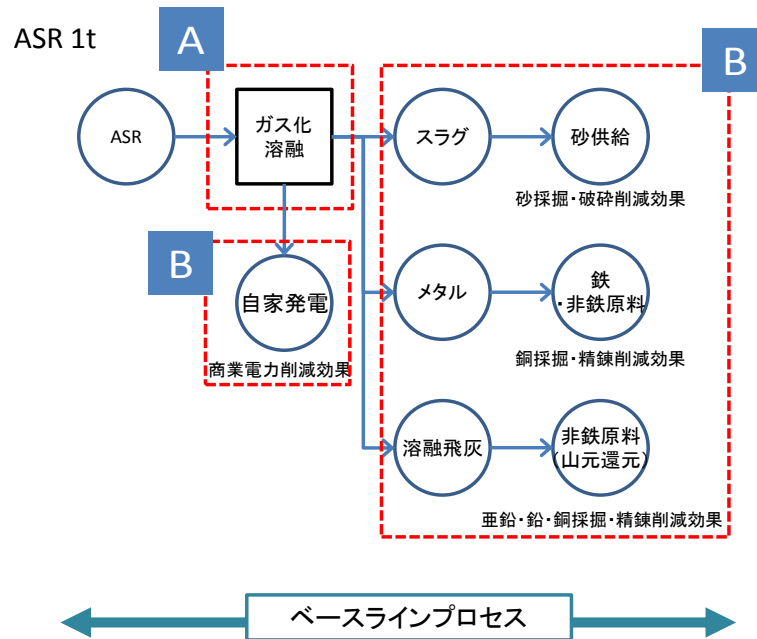


図 2.1-2 ベースラインプロセス① (ガス化溶融処理)

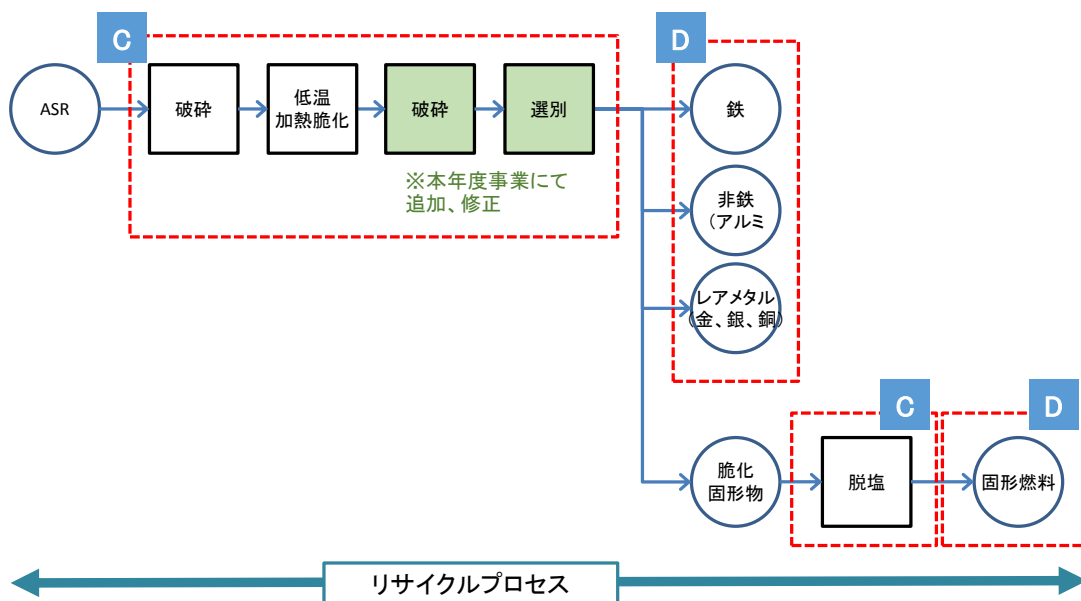


図 2.1-3 本実証事業のリサイクルプロセス

表 2.1-1 ガス化溶融処理との比較における項目別の CO₂排出量 (ASR1t あたり)

プロセス	カテゴリー	項目	内容	排出量 t-CO ₂ /t-ASR	
ベースライン プロセス	A	処理プロセス	ガス化溶融(運転、燃焼)	1.9018	
	B	リサイクル効果	発電	0.4910	0.5059
			スラグ、銅、亜鉛、鉛回収	0.0149	
本事業の リサイクルプロセス (ASR100%として算出)	C	処理プロセス	破碎、低温加熱脆化(運転、燃焼)、破碎、選別、脱塩	1.1060	
	D	リサイクル効果	鉄、アルミ、銅、金、銀、回収	0.0001	1.0177
			石炭代替	1.0176	
CO ₂ 削減効果(A-B)-(C-D)				1.3075	

備考) 数値は各値を四捨五入している。

表 2.1-2 ガス化溶融処理における活動量および CO₂ 排出量原単位 (ASR1t あたり)

ベースラインプロセスの処理プロセス(ASRのガス化溶融)									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t-CO ₂ /t-ASR)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
A	1	焼却・溶融				ASR1tあたりのASR焼却溶融におけるCO2排出量	1.24	t-CO ₂ /t-ASR	1.240
						ASR1tあたりの重油利用におけるCO2排出量	0	t-CO ₂ /t-ASR	0.000
						ASR1tあたりのコークス利用におけるCO2排出量	0.529	t-CO ₂ /t-ASR	0.529
						ASR1tあたりの石灰石利用におけるCO2排出量	0.033	t-CO ₂ /t-ASR	0.033
						ASR1tあたりのLPG・軽油利用におけるCO2排出量	0.0221	t-CO ₂ /t-ASR	0.022
						ASR1tあたりのコークス製造におけるCO2排出量	0.0775	t-CO ₂ /t-ASR	0.078
						ASR1tあたりの石灰石製造におけるCO2排出量	0.000163	t-CO ₂ /t-ASR	0.000
	合計							1.9018	

ベースラインプロセスのリサイクル効果									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t-CO ₂ /t-ASR)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
B	1	自家発電				ASR1tあたりの売電におけるCO2排出量	4.91E-01	t-CO ₂ /t-ASR	0.491000
	2	山元還元				ASR1tあたりの焙焼炉におけるCO2排出量	0.011	t-CO ₂ /t-ASR	0.011000
						ASR1tあたりの塩化発揮におけるCO2排出量	0	t-CO ₂ /t-ASR	0.000000
						ASR1tあたりの電力利用におけるCO2排出量	0.00616	t-CO ₂ /t-ASR	0.006160
						ASR1tあたりの塩酸製造におけるCO2排出量	8.44E-08	t-CO ₂ /t-ASR	0.000000
						ASR1tあたりの転炉ガス製造におけるCO2排出量	0.00017	t-CO ₂ /t-ASR	0.000170
						ASR1tあたりのZn再資源化におけるCO2排出量	-0.00199	t-CO ₂ /t-ASR	-0.001990
						ASR1tあたりのPb再資源化におけるCO2排出量	-0.0003	t-CO ₂ /t-ASR	-0.000300
	3	スラグによる砂代替	ASR1tあたりの砂採掘代替量	0.257	t/t-ASR	砂採掘1tあたりのCO2排出量	0.00000694	t-CO ₂ /t	0.000002
	4	メタルに含まれる銅の代替	ASR1tから回されるメタルに含まれる銅量	0.032912	t/t-ASR	電気銅製造1tあたりのCO2排出量	0.00367	t-CO ₂ /t	0.000121
	合計							0.5059	

表 2.1-3 本リサイクル事業における活動量および CO₂ 排出量原単位 (ASR1t あたり)

本事業のリサイクルプロセスの処理プロセス									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t-CO ₂ /t-ASR)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
C	1	粗破砕(ハンマー)	ASR1tあたりの電気使用量	87.50	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.051
	2	低温加熱脆化	ASR1tあたりの電気使用量	106.40	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.062
	2	低温加熱脆化	ASR1tあたりの都市ガス使用量	0.04	1,000Nm ³ /t-ASR	都市ガスの使用におけるCO2排出係数	2.23	t-CO ₂ /1,000Nm ³	0.084
	2	低温加熱脆化	ASR1tあたりの脆化により燃焼するASR量	0.32608696	t/t-ASR	ASR(その他廃プラスチック類)の燃焼におけるCO2排出係数	2.77	t-CO ₂ /t	0.903
	3	磁力選別①	ASR1tあたりの電気使用量	0.2625	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000154
	4	風力選別	ASR1tあたりの電気使用量	1.23375	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000724
	5	磁力選別②	ASR1tあたりの電気使用量	0.2625	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000154
	6	篩い選別	ASR1tあたりの電気使用量	1.61	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000945
	7	乾式比重選別(ART)①	ASR1tあたりの電気使用量	0.80737864	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000474
	8	乾式比重選別(ART)②	ASR1tあたりの電気使用量	2.07961165	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.001221
	9	脱塩	ASR1tあたりの電気使用量	2.84875294	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.001672
	合計								1.1060

本事業のリサイクルプロセスのリサイクル効果									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t-CO ₂ /t-ASR)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
D	1	固形脆化物	ASR1tあたりの固形脆化物燃料の石炭代替分	0.43674429	t/t-ASR	石炭(一般炭)におけるCO2排出係数	2.33	t-CO ₂ /t	1.0176
	2	鉄回収(粗鋼代替)	ASR1tあたりの鉄回収量	0.05382857	t/t-ASR	粗鋼製造1tあたりのCO2排出量	0.00119	t-CO ₂ /t	0.000064
	3	銅回収(電気銅代替)	ASR1tから回収される銅量	0.01257143	t/t-ASR	電気銅製造1tあたりのCO2排出量	0.00367	t-CO ₂ /t	0.000046
	4	金回収(金地金代替)	ASR1tから回収される金量	4.5714E-07	t/t-ASR	金地金製造1tあたりのCO2排出量	0.028	t-CO ₂ /t	0.00000013
	5	銀回収(電気銀代替)	ASR1tから回収される銀量	3.0857E-05	t/t-ASR	電気銀製造1tあたりのCO2排出量	0.0268	t-CO ₂ /t	0.000000827
	6	アルミ回収(アルミニウム再生金地金代替)	ASR1tから回収されるアルミ量	0.002	t/t-ASR	アルミニウム再生金地金製造1tあたりのCO2排出量	0.00313	t-CO ₂ /t	0.000006260
	合計								1.0177

表 2.1-4 出典一覧

No.	出典
1	廃棄物資源循環学会論文誌, Vol. 23 No. 6, pp. 264-278, 2012、長田守弘・真名子一隆・平井康宏・酒井伸一「自動車破碎残渣 (ASR) の資源化・処理に関するライフサイクルアセスメント」※電気の排出係数は該当年次の更新分を反映するとし、論文記載の 0.469t-CO ₂ /t-ASR を 0.491t-CO ₂ /t-ASR に差替
2	経済産業省経済産業政策局調査統計部編「平成 12 年鉄鋼統計年報」
3	日本鉱業協会「環境自主行動計画報告書 (経産省向け)」
4	(独) 産業技術総合研究所 (2005) 阿島俊一「直島製錬所における貴金属製錬」, 資源と素材, Vol. 109 (1993), p. 1048 銅製錬スライムからの一般的な製造法について」聞き取り、文献情報、モデルを元に算出
5	環境省「算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 (参考 1)」
6	「電気事業者別排出係数一覧 (平成 29 年提出用 代替値)」
7	通商産業大臣官房調査統計部編: “本邦鉱業の趨勢”, (1999) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部: “産業廃棄物排出・処理状況調査報告書/平成 12 年度実績”, (2003) 統計表より大理石採石、かんらん岩採石の各鉱業のデータを合算して平均値を算出

2.1.2 再選別処理との比較によるCO₂削減効果試算

再選別処理のベースラインプロセスと本事業のリサイクルプロセス、各プロセスのCO₂排出量を図2.1-4に示す。再選別処理と比較した場合、低温加熱脆化処理のCO₂削減効果は1.0570 t-CO₂/t-ASRとなった。

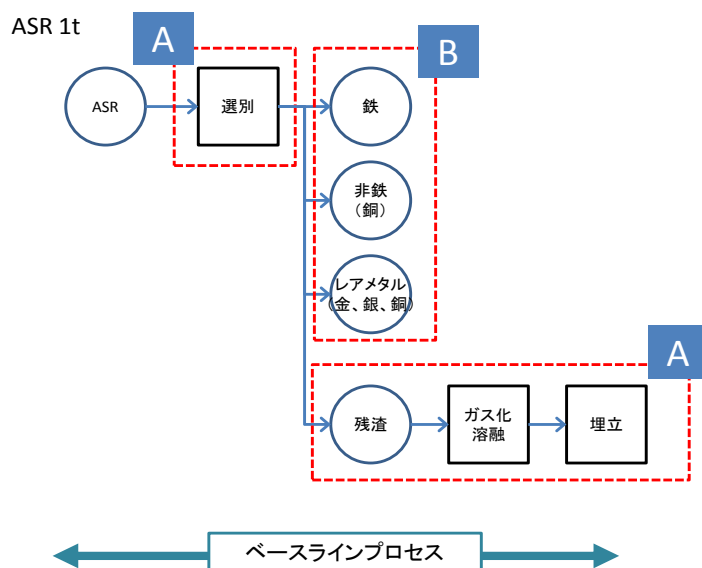


図 2.1-4 ベースラインプロセス②（再選別処理）

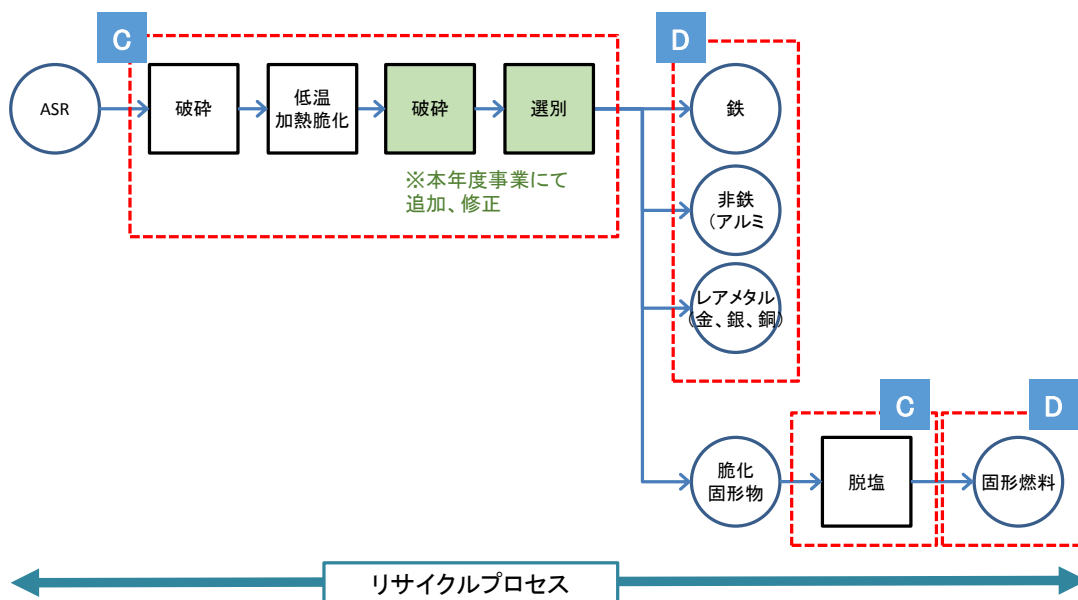


図 2.1-5 本実証事業のリサイクルプロセス（再掲）

表 2.1-5 再選別処理との比較における項目別の CO₂排出量 (ASR1t あたり)

プロセス	カテゴリー	項目	内容	排出量 t-CO ₂ /t-ASR	
ベースライン プロセス	A	処理プロセス	選別	0.0135	1.5391
			ガス化溶融(運転、燃焼)、埋立	1.5256	
	B	リサイクル効果	鉄、銅、金、銀回収	0.0002	0.3938
			発電	0.3937	
本事業の リサイクルプロセス (ASR100%として算出)	C	処理プロセス	破碎、低温加熱脆化(運転、燃焼)、破碎、選別、脱塩		1.1060
			鉄、銅、金、銀回収	0.0001	
	D	リサイクル効果	石炭代替	1.0176	1.0177
CO ₂ 削減効果(A-B)-(C-D)					1.0570

備考) 数値は各値を四捨五入している。

表 2.1-6 再選別処理における活動量および CO₂ 排出量原単位 (ASR1t あたり)

ベースラインプロセスの処理プロセス(ASRの再選別)									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t-CO ₂ /t-ASR)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
A	1	Hライン磁力選別	ASR1tあたりの電気使用量	0.58333333	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000342417
		Hラインふるい(5mm)	ASR1tあたりの電気使用量	7.04442761	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.004135079
		ART磁力選別No. 1	ASR1tあたりの電気使用量	0.30975589	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000181827
		ART風力選別	ASR1tあたりの電気使用量	0.35900808	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000210738
		ART磁力選別No. 2	ASR1tあたりの電気使用量	4.45109848	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.002612795
		ARTエアテーブル	ASR1tあたりの電気使用量	3.24070833	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.001902296
		Mライン磁力選別	ASR1tあたりの電気使用量	0.48200758	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000282938
		Mラインふるい(30mm)	ASR1tあたりの電気使用量	0.57722012	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000338828
		Mライン渦電流選別(30mmオーバー)	ASR1tあたりの電気使用量	3.05587121	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.001793796
		Mラインファインダー	ASR1tあたりの電気使用量	1.80671296	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.001060541
	Mライン渦電流選別	ASR1tあたりの電気使用量	1.12048611	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO2排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000657725	
	2	残さの焼却・熔融	ASR1tあたりの焼却量	0.80176768	t/t-ASR	ASR1tあたりのASR焼却熔融におけるCO2排出量	1.24	t-CO ₂ /t-ASR	0.994
			ASR1tあたりの重油利用におけるCO2排出量			0	t-CO ₂ /t-ASR	0.000	
			ASR1tあたりのコークス利用におけるCO2排出量			0.529	t-CO ₂ /t-ASR	0.424	
ASR1tあたりの石灰石利用におけるCO2排出量					0.033	t-CO ₂ /t-ASR	0.026		
ASR1tあたりのLPG・軽油利用におけるCO2排出量					0.0221	t-CO ₂ /t-ASR	0.018		
ASR1tあたりのコークス製造におけるCO2排出量					0.0775	t-CO ₂ /t-ASR	0.062		
3	埋立	ASR1tあたりの埋立量	0.24213384	t/t-ASR	埋立(電気)	0.00328	t/t-ASR	0.001	
		埋立(軽油)			0.0000785	t/t-ASR	0.00002		
合計								1.5391	

ベースラインプロセスのリサイクル効果									
カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t-CO ₂ /t-ASR)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
B	1	自家発電	ASR1tあたりの焼却量	0.80176768	t/t-ASR	ASR1tあたりの売電におけるCO2排出量	4.91E-01	t-CO ₂ /t-ASR	0.393668
	2	鉄回収(粗鋼代替)	ASR1tあたりの鉄回収量	0.11892691	t/t-ASR	粗鋼製造1tあたりのCO2排出量	0.00119	t-CO ₂ /t	0.000142
		銅回収(電気銅代替)	ASR1tから回収される銅量	0.00552519	t/t-ASR	電気銅製造1tあたりのCO2排出量	0.00367	t-CO ₂ /t	0.000020
		金回収(金地金代替)	ASR1tから回収される金量	3.5439E-08	t/t-ASR	金地金製造1tあたりのCO2排出量	0.028	t-CO ₂ /t	0.000000
		銀回収(電気銀代替)	ASR1tから回収される銀量	1.0401E-06	t/t-ASR	電気銀製造1tあたりのCO2排出量	0.0268	t-CO ₂ /t	0.000000
合計								0.3938	

表 2.1-7 本リサイクル事業における活動量および CO₂ 排出量原単位 (ASR1t あたり)

本事業のリサイクルプロセスの処理プロセス

カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t-CO ₂ /t-ASR)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
C	1	粗破碎(ハンマー)	ASR1tあたりの電気使用量	87.50	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO ₂ 排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.051
	2	低温加熱脆化	ASR1tあたりの電気使用量	106.40	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO ₂ 排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.062
	2	低温加熱脆化	ASR1tあたりの都市ガス使用量	0.04	1,000Nm ³ /t-ASR	都市ガスの使用におけるCO ₂ 排出係数	2.23	t-CO ₂ /1,000Nm ³	0.084
	2	低温加熱脆化	ASR1tあたりの脆化により燃焼するASR量	0.32608696	t/t-ASR	ASR(その他廃プラスチック類)の燃焼におけるCO ₂ 排出係数	2.77	t-CO ₂ /t	0.903
	3	磁力選別①	ASR1tあたりの電気使用量	0.2625	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO ₂ 排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000154
	4	風力選別	ASR1tあたりの電気使用量	1.23375	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO ₂ 排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000724
	5	磁力選別②	ASR1tあたりの電気使用量	0.2625	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO ₂ 排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000154
	6	篩い選別	ASR1tあたりの電気使用量	1.61	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO ₂ 排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000945
	7	比重差選別(ART)①	ASR1tあたりの電気使用量	0.80737864	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO ₂ 排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.000474
	8	比重差選別(ART)②	ASR1tあたりの電気使用量	2.07961165	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO ₂ 排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.001221
	9	脱塩	ASR1tあたりの電気使用量	2.83327059	kwh/t-ASR	電気の使用におけるCO ₂ 排出係数	0.000587	t-CO ₂ /kWh	0.001663
	合計								1.1060

本事業のリサイクルプロセスのリサイクル効果

カテゴリ	NO	プロセス	活動量			排出原単位			排出量 (t-CO ₂ /t-ASR)
			項目名	数値	単位	原単位名	数値	単位	
D	1	固形脆化物	ASR1tあたりの固形脆化物燃料の石炭代替分	0.43674429	t/t-ASR	石炭(一般炭)におけるCO ₂ 排出係数	2.33	t-CO ₂ /t-ASR	1.017614
	2	鉄回収(粗鋼代替)	ASR1tあたりの鉄回収量	0.05382857	t/t-ASR	粗鋼製造1tあたりのCO ₂ 排出量	0.00119	t-CO ₂ /t	0.000064
	3	銅回収(電気銅代替)	ASR1tから回収される銅量	0.01257143	t/t-ASR	電気銅製造1tあたりのCO ₂ 排出量	0.00367	t-CO ₂ /t	0.000046
	4	金回収(金地金代替)	ASR1tから回収される金量	4.5714E-07	t/t-ASR	金地金製造1tあたりのCO ₂ 排出量	0.028	t-CO ₂ /t	0.00000013
	5	銀回収(電気銀代替)	ASR1tから回収される銀量	3.0857E-05	t/t-ASR	電気銀製造1tあたりのCO ₂ 排出量	0.0268	t-CO ₂ /t	0.00000827
	6	アルミ回収(アルミニウム再生地金代替)	ASR1tから回収されるアルミ量	0.002	t/t-ASR	アルミニウム再生地金製造1tあたりのCO ₂ 排出量	0.00313	t-CO ₂ /t	0.000006260
	合計								1.0177

(備考：出典は表 2.1-8 を参照)

表 2.1-8 出典一覧

No.	出典
1	廃棄物資源循環学会論文誌, Vol. 23 No. 6, pp. 264-278, 2012、長田守弘・真名子一隆・平井康宏・酒井伸一「自動車破碎残渣 (ASR) の資源化・処理に関するライフサイクルアセスメント」 ※電気の排出係数は該当年次の更新分を反映するとし、論文記載の 0.469t-CO ₂ /t-ASR を 0.491t-CO ₂ /t-ASR に差替
2	経済産業省経済産業政策局調査統計部編「平成 12 年鉄鋼統計年報」
3	日本鉱業協会「環境自主行動計画報告書 (経産省向け)」
4	(独) 産業技術総合研究所 (2005) 阿島俊一「直島製錬所における貴金属製錬」, 資源と素材, Vol. 109 (1993), p. 1048 銅製錬スライムからの一般的な製造法について」聞き取り、文献情報、モデルを元に算出
5	環境省「算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 (参考 1)」
6	「電気事業者別排出係数一覧 (平成 29 年提出用 代替値)」
7	通商産業大臣官房調査統計部編: “本邦鉱業の趨勢”, (1999) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部: “産業廃棄物排出・処理状況調査報告書/平成 12 年度実績”, (2003) 統計表より大理石採石、かんらん岩採石の各鉱業のデータを合算して平均値を算出

2.1.3 CO₂排出量削減効果まとめ

処理物を ASR100%とし、処理技術にて比較した場合、本年度に設計した低温加熱脆化処理等の好適フローの処理における処理プロセスおよびリサイクル効果による CO₂排出量は、0.0883 t-CO₂/t-ASR となり、ガス化溶融、再選別と比較して低く、昨年度の低温加熱脆化処理フローと比較しても少ない結果が得られた（図 2.1-6 参照）。なお、昨年度の CO₂排出量の算定では、実験結果データそのものを用いて算出していたことから、今年度と比較するために、実証試験結果を元に、昨年度の処理フローにおいて実処理した場合の理論値を算出し、改めて CO₂排出量を算出している。

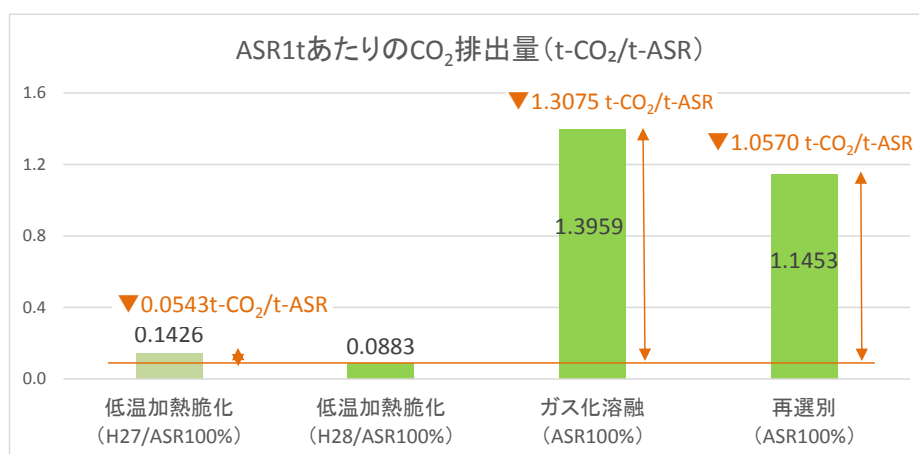


図 2.1-6 処理技術別の ASR1t あたりの CO₂排出量の比較
備考) 図中の各▼数値は、H28 の低温加熱脆化と比較した CO₂ 排出量の差分を示す。

(参考)

本年度の低温加熱脆化処理フローにおける処理物別の CO₂排出量の比較を図 2.1-7 に示す。なお、バウンダリは図 2.1-3 と同様である(「ASR」を「処理物」とする)。

算出にあたり、脆化工程の燃焼による処理物の CO₂ 排出量は、ASR100%、ASR70%+木くず 30%、ASR80%+CFRP20%それぞれの脆化実験での総発熱量データを用いた。

選別実験は ASR70%+木くず 30%でのみ行ったことから、選別による金属回収量について、ASR70%+木くず 30%の場合は、実験結果に基づき設計された好適処理フローでの回収期待値を、ASR100%の場合はこの期待値に対し ASR を 70%から 100%に換算して金属回収量を算出、ASR80%+CFRP20%の場合は ASR100%の場合と同等とした。

算出の結果、最も CO₂排出量が少なかったのは、ASR に木くず 30%を混合して処理するケースであった。脆化固形物による代替効果が最も大きかったためと考えられる。

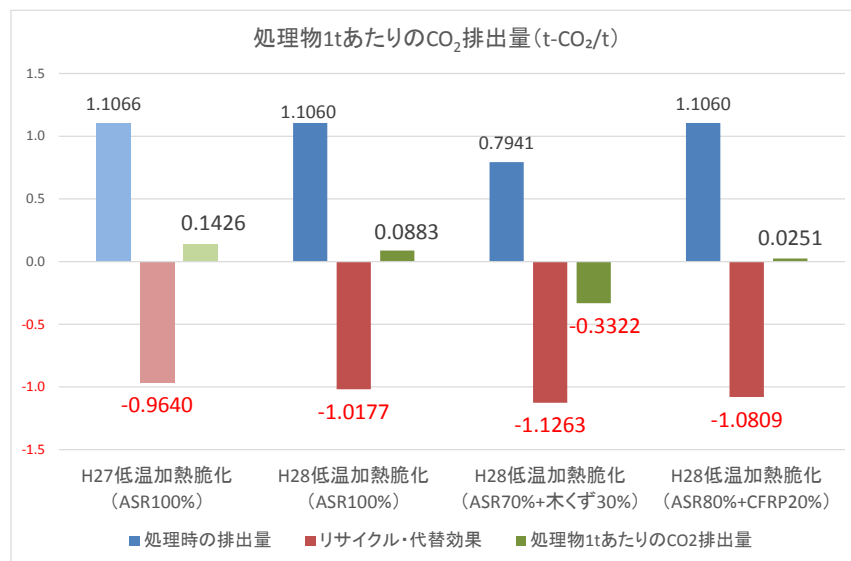


図 2.1-7 本リサイクルプロセスにおける処理物別の CO₂排出量と削減効果の比較

2.2 排ガスによる環境負荷の削減効果の検討

ASR の低温加熱脆化処理、脆化固形物の金属選別処理および水洗脱塩処理の結果から、ハロゲン元素 (Cl、Br、F) のマテリアルバランスを評価し、排ガスの環境負荷を低減したシステムの構築が可能か検討した (破碎処理におけるハロゲン元素のロスはないと仮定)。

本評価では、ASR 由来のインプット量を 100 として、金属資源へのハロゲンの移行はゼロとして、マテリアルバランスの評価を実施した。

また、排ガスへのハロゲンについては、シュレッターダストや脆化固形物等の固体試料に含まれるハロゲン量の差異から算出した。廃水へのハロゲン移行量についても、同様の考え方で算出した。排ガスについては、排ガスの成分分析も実施しており、固体試料を用いたハロゲンの挙動の評価に活用した (ガス測定時間は 10 時間)。

Cl については、加熱脆化処理によって、21%が排ガスへ移行することが確認されており、昨年度の移行量 40%から半減した。これは過去の太平洋セメントの技術検討結果を考慮して、昨年度より消石灰の混合量を増量することで、加熱時に発生する HCl を CaCl₂等の形として捕捉する量を増加させることができたためと考えられる (今年度は ASR : 消石灰 = 89% : 11%、昨年度は ASR : 消石灰 = 94% : 6%で消石灰を混合)。

また、Cl は、水洗脱塩処理によって 56%が廃水へ移行しており、固形燃料として利用する脆化固形物中の Cl をインプットに対して 23%まで大幅に低減することが可能であった。

Br については、加熱脆化処理によって 33%が排ガスへ移行したが、水洗脱塩処理による廃水への移行は確認されなかった。昨年度は、排ガスへの移行が確認されず、消石灰の混合によって、加熱脆化処理時に CaBr₂等の水溶性塩となったため、廃水に 37%移行したと推測したが、これは今年度の挙動とは異なる。

水洗脱塩処理後の脆化固形物には、今年度も昨年度も 65%前後の Br が残存していることから、ASR に含まれていた Br 化合物の種類が異なっている可能性が考えられる。

主な Br 源としては、電子基板や樹脂製品等に使用されている有機臭素系難燃剤が考えられる。その特性は、難燃剤の種類によって異なるため、①加熱脆化処理によって熱分解し、排ガス側に揮発したもの、②熱分解時に臭化物として固体側に捕捉されたもの (CaBr₂に限らない)、③熱分解せず有機化合物として残存したものに分けられる。Cl に比べて、脆化固形物への残存量が多いことから、残存した Br は、② (難水溶性の臭化物)、③の可能性が高いと推測される。

F については、加熱脆化処理によって 85%が排ガスへ移行しており、水洗脱塩処理による廃水への移行は確認されなかった (昨年度は ASR 中の F 含有量が、定量下限値 (0.001%) 未満であったため、マテリアルバランス評価が困難であった)。

排ガスのふっ化物およびふっ化水素濃度は、いずれも <0.8mg/Nm³ 未満であり、マテリアルバランスの評価結果とは異なっていた。これは、ASR 中の F 含有量が少なく、採取した固体試料のロットのばらつきによる影響等で、マテリアルバランスを精度良く評価できなかった可能性も考えられるが、排ガス側に移行した F が、ふっ化物またはふっ化水素以外の形、例えばウレタン中に含まれる代替フロンであった可能性も考えられる。

以上の結果から、Cl については、消石灰の混合によって、脆化固形物中に CaCl_2 等の形で残存させ、排ガスの環境負荷を低減するとともに、水洗で容易に除去が可能な状態にすることが可能であることが確認された。従来技術では、排ガス側にも廃水側にも Cl が移行してしまい、両者の処理システムの構築が必要であったが、本技術を用いることで、排ガスの環境負荷を低減して、主に廃水側で Cl の処理を行う効率的なシステムの構築が可能になると期待される。

Br、F については、加熱脆化处理や水洗脱塩処理で脆化固形物中の含有量を低減することができる可能性を確認できたが、昨年度と今年度で挙動が大きく異なることから、効率的な処理システムの構築を図るには、マテリアルバランスをより正しく評価する必要がある。今後、Br、F を高精度に評価し、含有状態に関わらず、効率的に処理できるシステムを検討するには、固体試料・排ガス試料の採取点数を増やし、ばらつきを十分に考慮した含有量の評価を行うこと、ASR 中の Br 源および F 源を特定すること等が重要である。

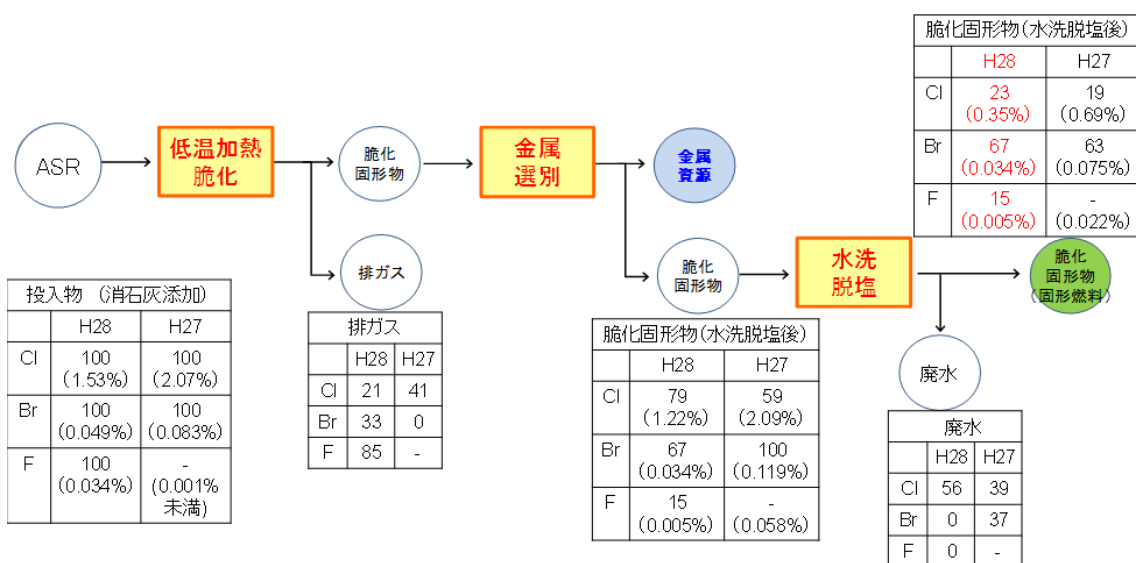


図 2.2-1 低温加熱脆化处理および水洗脱塩処理におけるハロゲンのマテリアルバランス (備考) 図内の()内の数値は、含有量の実測値を示す。

3. 事業実現可能性等の検証

3.1 建設費の算出

本技術の事業実現可能性を検討するにあたって、どの程度の投資額となるのか建設費を試算した。なお、建設費の検討にあたっては、以下の2点に留意してその規模を決定した。

- ①プロセス的に規模が大きくなるに従ってスケールメリットが出てくること
- ②現在の ASR 等の事業を実施している経験から現実的な収集量であること

(試算条件)

- ・ 処理規模：ASR4.0t/h 処理（300日運転で28,800t/年処理）を想定
- ・ 処理フロー：想定設備フローを図 3.1-1 に示す。
- ・ セメント工場への付設とし、加熱脆化処理装置から発生する燃焼排ガスはセメントキルンを活用した排ガス処理とする。

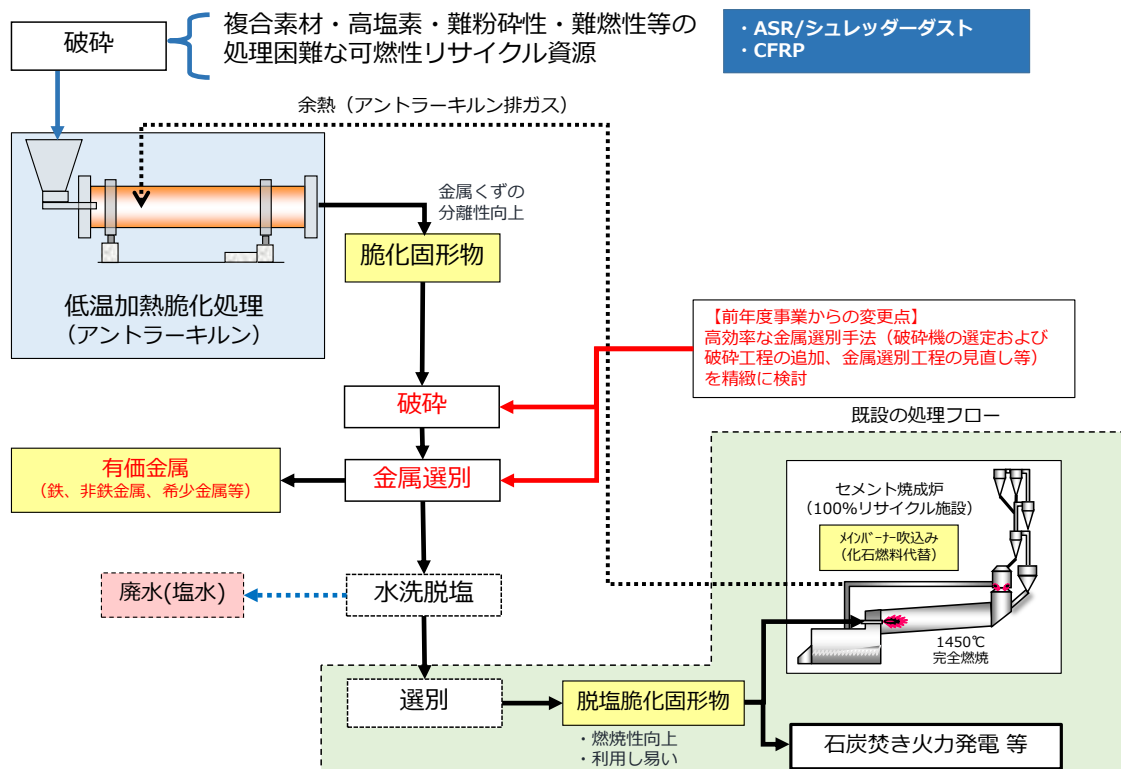


図 3.1-1 想定設備フロー

主要設備概要を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 主要設備概要

設備	詳細
前処理設備	原料供給機、破碎機、分別機
加熱脆化設備	加熱脆化炉
排ガス処理設備	セメントプロセスへの接続（排ガスダクト）
金属回収設備	破碎機、分別機
水洗脱塩設備	水洗・固液分離装置
廃水処理設備	廃水ピット、反応槽、固液分離装置、放流水槽

ここで、排ガス処理工程はセメント工場への付設を前提とした場合、排ガスデータから特別な設備は不要と判断し、セメントキルン工程への接続するに必要な設備費を計上した。

（概算の建設費の結果）

上記条件で試算した設備費は表 3.1-2 の通りであり、土建、機械、電気工事を合わせ全工程で約 21 億円となった。

表 3.1-2 本技術パイロットプラントの建設費概算（百万円）

	土工工事	機械工事	電気工事	合計
前処理設備	152	522	123	1,563
加熱脆化設備	65	596		
排ガス処理設備	12	93		
金属回収設備	42	173	53	268
水洗脱塩設備	22	146	50	216
廃水処理設備	11	33	9	44
合計				2,091

本建築費試算では、昨年度の設備概算設計も参考に、今年度の各工程における実証試験結果に基づき、新たに金属回収も加えた設備フローで設備費概算を算出しているが、水洗脱塩・廃水処理工程については実証試験規模が小さく、建設費精度を高めるためには設計条件の更なる精査が必要である。今後、実証試験規模を拡大することで、システム全体および各工程の設備設計条件の妥当性について精査を進めたい。

3.2 事業計画の策定

事業展開を念頭に置いた今後のスケジュールを図 3.2-1 に示す。

- ・平成 29 年度は、実機事業に類する処理数量スケールに拡大した実証試験を行うことで、事業性の評価を行うことを検討している。
- ・平成 30 年度までには、実機実証を行うことができる実施場所の選定を進め、29 年度の規模拡大による実証事業結果に基づいた詳細設計を進める。
- ・平成 30 年度が建設フェーズ、平成 31 年度から大型実証による検証を兼ねた事業化運転を目指す。

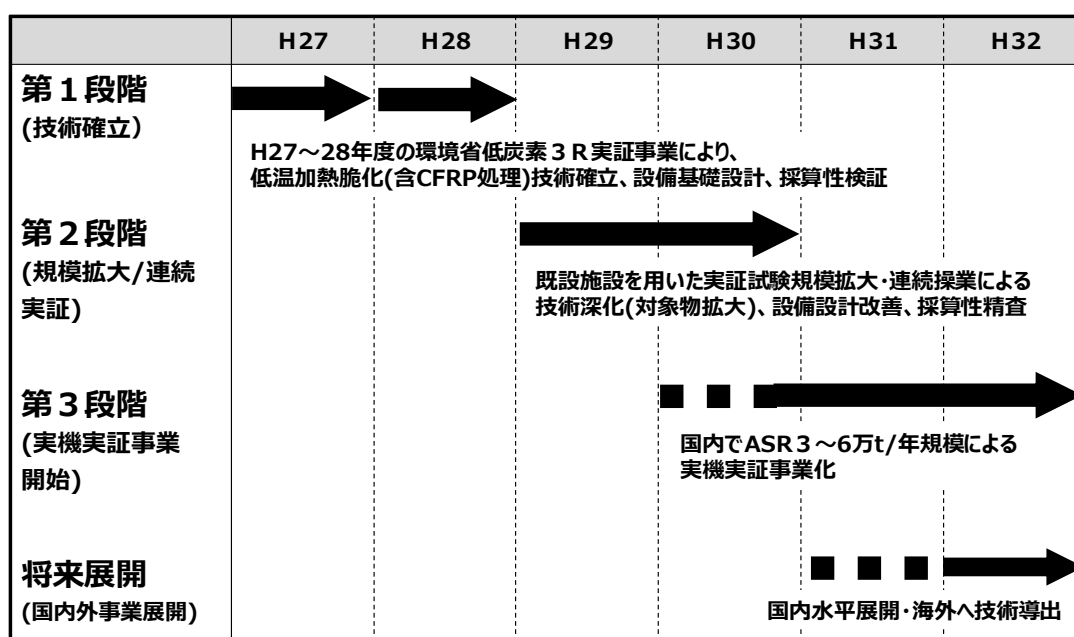


図 3.2-1 今後のスケジュール

3.3 事業採算性試算

脆化固形物をセメント工場内に併設し、セメント製造（焼成）用の石炭燃料代替として活用すると仮定した場合として、別に設計検討しているパイロットプラントレベル（ASR；4.0t/h、年間28,800t）で事業採算性の試算を行った結果を表3.3-1に示す。ASR100%処理においては、資源（主に有用金属）回収効果もあり、約164百万円/年の利益が見込まれる試算となった。木くず30%を混合した場合においては、有償木くず利用では▲98百万円/年の赤字となったが、逆有償木くずを利用することで、14百万円/年の利益が確保できる試算結果となった。

表 3.3-1 処理量28,800t/年での事業収支試算

		ASR 70% 木くず 30% (有償木くず)	ASR 70% 木くず 30% (逆有償木くず)	ASR 100%
収入 (百万円)	処理益(木くず集荷費を含む)	478	590	720
	資源売却益	134	134	191
	小計	612	724	911
支出 (百万円)	変動費(電力/燃料費、排水処理費、横持費、分析費等)	273	273	308
	固定費(人件費、修繕費、減価償却費等)	437	437	438
	小計	710	710	746
事業収支 (百万円)		▲98	14	164

備考) ASR 処理費 25 円/kg、木くず購入価格 3 円/kg、木くず処理費 10 円/kg にて試算。

図 3.3-1 に ASRt 処理あたりにおける収益性の比較を示す。本技術による処理事業においては、ASR 処理費用(想定@25,000 円/t)によって得られる収入が最も大きい、回収物の売却益も高く、事業採算性に大きく影響を与えていることが判った。また、脆化固形物については、受入利用先となるセメント工場や発電ボイラー等において、十分に燃料代替効果が得られると想定された。

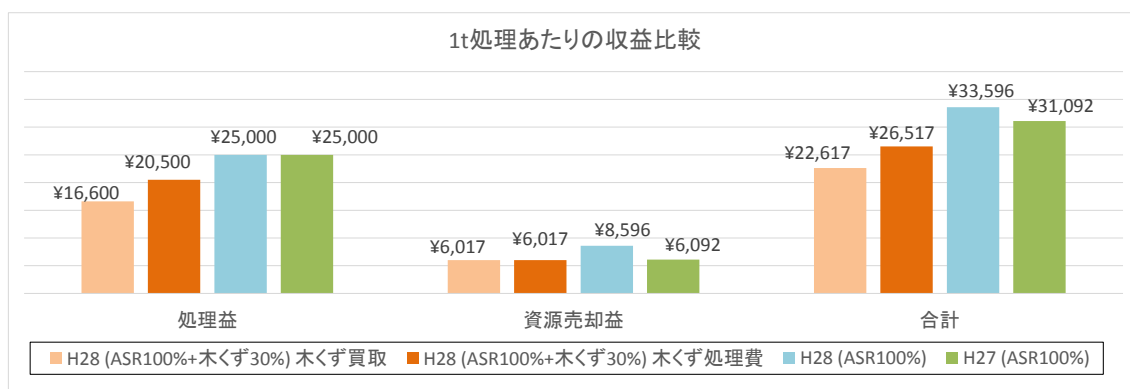


図 3.3-1 ASR1t あたりの収益比較

備考) 脆化固形物の燃料代替効果は含めず、処理益と回収した資源売却益のみを示した。

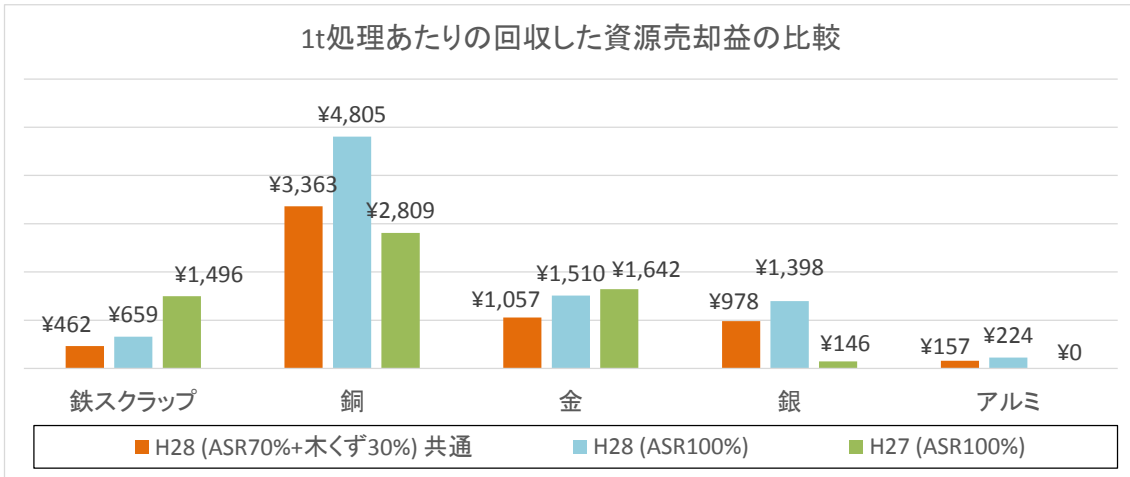


図 3.3-2 資源売却益の内訳

(備考：各金属資源買取価格根拠：2017年1月12日時点)

鉄（鉄スクラップ（H2/東京））<http://www.japanmetal.com/iron-steel-price>

アルミ <http://www.japanmetal.com/nonf-metal-price>

銅（上銅（新切れ）/東京）<http://www.japanmetal.com/nonf-metal-price>

金 <http://gold.tanaka.co.jp/commodity/souba/d-gold.php>

銀 <http://gold.tanaka.co.jp/commodity/souba/d-silver.php>

3.4 本処理技術の事業展開性

3.4.1 自社既存施設への横展開

本実証事業にて確立した低温加熱脆化処理技術を用いて、自社およびグループ会社のセメント工場（国内 9 工場、海外 9 工場）への横展開を検討している。対象廃棄物は、ASR、シュレッターダストの他、建廃系のプラスチックや木くずの混合廃棄物、高含水・難破碎のバイオマス廃棄物である。自社およびグループ会社のセメント工場は全国的に分布していることから、各地域の廃棄物を網羅的に受け入れる体制ができると考えている。

回収した有価金属については、電炉や非鉄製錬に有価売却、脆化固形物は石炭代替燃料として自社およびグループ会社のセメントキルン燃料として利用する他、石炭燃料を使用しているボイラー事業者に売却することを想定している。なお、自社での年間石炭消費量は約 239 万 t で生成した脆化固形物は全量自社消費が可能であり、用途確保は既になされている。

本処理技術はオンサイト式の処理も可能である。自社グループ会社のセメント工場への導入だけでなく、国内大手シュレッター会社、建設現場等、難破碎の処理困難物が大量かつ継続的に発生する場所に、本処理技術をパッケージとして導入する等、普及展開が見込まれる。



図 3.4-1 太平洋セメントのセメント事業国内拠点

(出所：太平洋セメント(株)HP <http://www.taiheiyo-cement.co.jp/company/busi/world/japan-2.html>)

3.4.2 受入対象廃棄物の横展開

低温加熱脆化により、様々な可燃性処理困難廃棄物の処理が可能となる。事例として、建設混合廃棄物や CFRP 等が挙げられる。

建設混合廃棄物は 2012 年度に年間 280 万 t 排出されており、リサイクル率は 57.4% に留まっており、29% は埋立処理されている。リサイクル率が伸び悩む要因として、分別処理やコストが課題となっているが、低温加熱脆化処理を行うことで、分別処理が容易となると考えられる。建設混合廃棄物は 2016 年には 159 万 t、2020 年には 144 万 t まで排出量は減少すると見込まれているものの、本処理技術はこれらのリサイクル率の向上に寄与することが期待できる。

表 3.4-1 建設混合廃棄物の排出状況 (単位: 万 t)

年度	1995	2000	2002	2005	2008	2012	2016	2020
アスファルト・コンクリート塊	3,565	3,009	2,975	2,606	1,992	2,577	1,990	1,838
コンクリート塊	3,647	3,527	3,512	3,215	3,127	3,092	2,916	2,768
建築汚泥	978	825	846	752	451	657	481	419
建設混合廃棄物	952	485	337	293	267	280	159	144
建設発生木材	632	477	464	471	410	500	407	419
その他	140	153	139	363	134	164	195	192
合計	9,914	8,476	8,273	7,700	6,381	7,270	6,149	5,780

備考) 「その他」とは「廃プラスチック、紙くず、金属くず」を含む

備考) 2016 年度および 2020 年度の数值は GROWTH 関数を用いて算出した

出所) 経済産業省「平成 24 年度建設副産物実態調査結果【参考資料】」

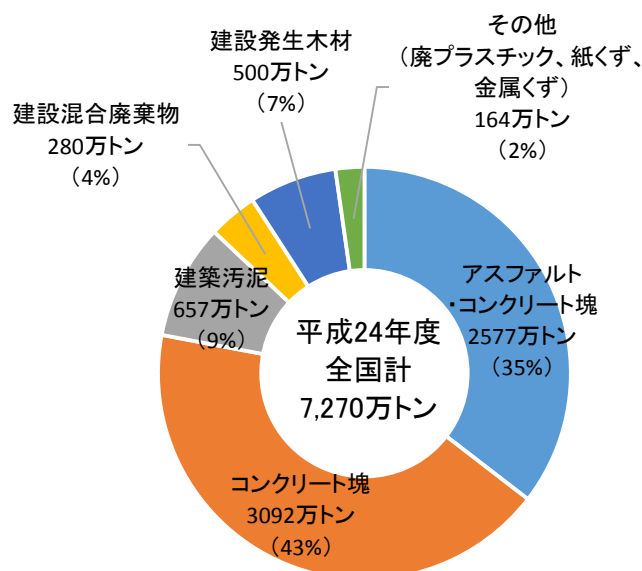


図 3.4-2 建設廃棄物における建築混合廃棄物の占める割合

備考) 経済産業省「平成 24 年度建設副産物実態調査結果【参考資料】」より作成

また、我が国は2030年度までの長期エネルギー需給見通しを策定しており、その中で再生可能エネルギーの拡大を図っている。日本は海に囲まれており、今後、海洋エネルギーとして洋上風力発電の普及が見込まれている。風力発電の普及拡大に伴い、設備に利用される炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP）等が大量に廃棄される可能性が高い。

CFRPは高い強度と軽さを併せ持つ材料となっているが、難破碎・難燃性のため、多くの既存処理施設では破碎・焼却が困難となっている。本処理技術を用いて脆化することにより、その後の処理が可能となる。2014年時点で国内における風力発電の設置基数は2,000基を上回っており、2030年には撤去が必要となる風車が150台を超えると予測されている。リサイクルを円滑に進める上で、本技術の横展開が期待される。

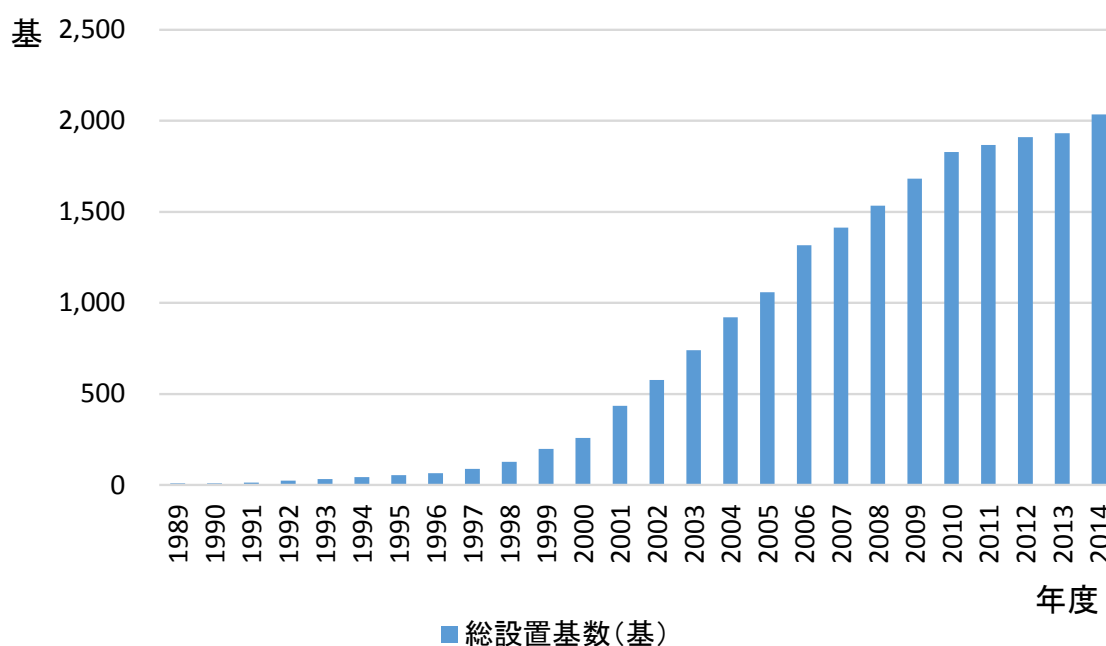


図 3.4-3 風力発電設備の推移（総設置基数、1989-2014年）

出所) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発事業「日本における風力発電設備・導入実績2015年」より作成

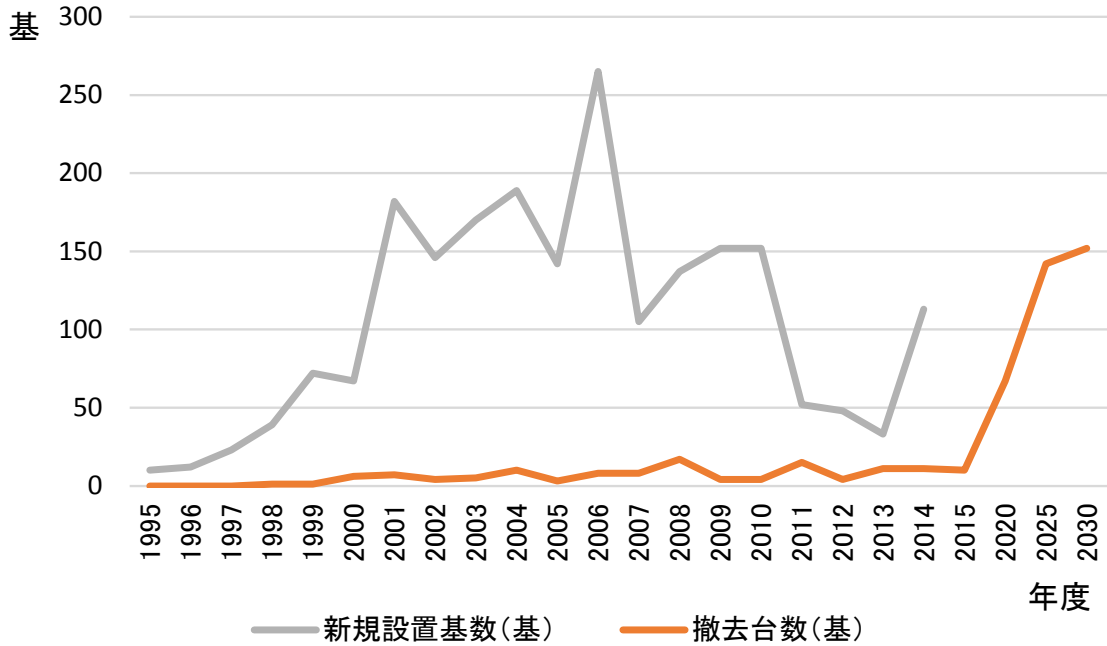


図 3.4-4 風力発電設備の撤去台数および新規設置基数の推移 (1995-2030年)
備考) 2015-2030年の撤去台数は、設置年次から20年後に廃棄されるものとして算出した。
出所) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発事業「日本における風力発電設備・導入実績 2015年」より作成

表 3.4-2 風力発電設備のサイズ (プロペラ式)

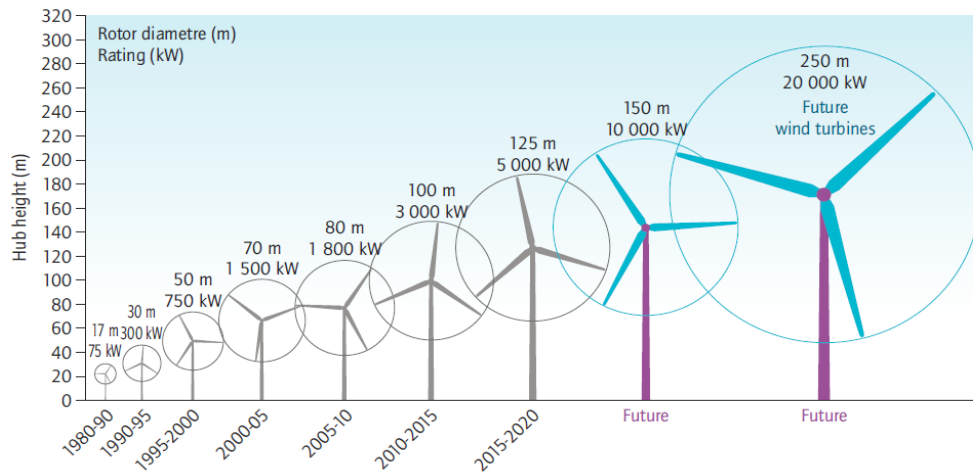
定格出力	タワー高さ	羽根直径
600kW	40~50m	45~45m
1000kW~2000kW	60~80m	60~90m

出所) NEDO 再生可能エネルギー白書「風力発電の技術の現状とロードマップ (2009)」より作成

表 3.4-3 風力発電設備のブレードにおける構成重量

定格出力	300kW	600kW	1000kW	2000kW	2500kW
ローター直径	30m	48m	54m	80m	80m
一般鋼材	0.540	2.345	2.731	4.690	7.172
エポキシ樹脂	1.125	4.885	5.690	9.770	14.943
グラスファイバー	2.250	9.770	11.379	19.540	29.885
合計	3.915	17.000	19.800	34.000	52.000

Figure 14: Growth in size of wind turbines since 1980 and prospects



Source: adapted from EWEA, 2009.

図 3.4-5 世界における風車の大型化

(出所 : INTERNATIONAL ENERGY AGENCY 「Technology Roadmap Wind energy 2013 edition」)

4. 総括

本実証事業では、ASR 相当の SR を用いて低温加熱脆化処理を行い、有用金属等の回収を最も効率化させる詳細な加熱脆化温度および投入する木くずの粒径レシピの検討を実施した。また、今後 ASR に混ざってくることが予想される CFRP を脆化した場合の脆化固形物の性状を検証するため、CFRP 混ざりの ASR サンプルによる脆化処理実験を行った。

得られた脆化固形物については、金属選別処理による有用金属の回収と品位評価、有用金属回収後の脆化固形物における石炭代替燃料としての価値評価等を実施した。

また、本技術全体について、他の処理技術との CO₂ 排出量の比較、有用金属の回収ポテンシャル、ハロゲン元素に関する排ガス削減効果等の環境負荷低減効果を検討した。

これらの実証試験の結果を元に好適な処理フローの設計を行い、本技術の建設費、事業計画の作成を実施、事業実現可能性についても検証を行った。

脆化温度の実証試験の結果、300℃では脆化が不十分となり、脆化固形物に占める 20mm より粒径の大きな塊の比率が多くなった。350℃では脆化固形物の残存した総発熱量が低くなった。20mm 以上の塊の占める割合の少なさと残存した総発熱量の多さから、325℃が好適な加熱温度帯と判断とした。昨年度の実証事業にて、木くずの投入により脆化固形物の 20mm より大きな塊の割合が減少する効果を確認した。本年度は投入する木くずの粒径について実験を行ったところ、粒径を問わず、木くずの投入効果があったことから、環境負荷、コスト、手間を考慮すると、最も低負荷である「有姿」が望ましいと判断した。CFRP を 20%混ぜた ASR の脆化処理実験も行ったところ、生成された脆化固形物の粒度分布に変化が見られなかったことから、CFRP の投入により、脆化固形物の粒度に悪影響を与えることはないと推測される。

有用金属の回収率を向上させるための破碎方法として、ミルタイプ、カッタータイプ、ハンマータイプの 3 種類を比較した。ミルタイプは脆化固形物を過粉碎し、選別が困難に、カッタータイプは刃の磨耗が早く不適、ハンマータイプは破碎に問題がなく、設備内残留も少なかったことから、破碎手法はハンマータイプが有望であると判断した。選別前に破碎工程を挿入することで、有用金属の回収率が大幅に向上した。風力選別の後、重産物を高磁力選別し、篩い分け、更に ART 処理することにより、有用金属の品質向上が確認された。

ハロゲン元素については、実験室規模でのテスト処理を行ったところ、脆化固形物内の残存量は水洗による脱塩処理によって除去されたことが確認された。排ガス処理についても効果が見られたが、サンプルが少なかったため、今後サンプル数を増やす等の精査が必要である。

処理技術の比較における CO₂ 排出量は、木くず混入を考慮し、処理物を ASR100%に換算して算出した。低温加熱脆化処理システムにおいて、本年度は破碎工程を追加したが、選別工程が減少したことにより、CO₂ 排出量は昨年度よりも少し減少した。ガス化熔融との比較では約 1.3t-CO₂/t-ASR、再選別では約 1.1t-CO₂/t-ASR の削減効果が得られた。本年度の処理フローにおける処理物別の CO₂ 排出量の比較では、木くずを 30%混ぜて脆化した場合が脆化燃料のカロリーが高かったため、最も低 CO₂ となる結果が得られた。

破碎、選別、精選別結果を反映し、効率的な全体システム設計を行った。低温加熱脆化処理を実用化するにあたり、これまでの検討結果より、低温加熱脆化の処理能力は 4.0t/h を想定している。28,800t/年処理する事業モデルの場合、ASR100%処理では、資源（主に有用金属）回収効果もあり、約 164 百万円/年の利益が見込まれる試算となった。木くず 30% を混合した場合、有償木くず利用では▲98 百万円/年の赤字となったが、逆有償木くずを利用することで、14 百万円/年の利益が確保できる試算結果となった。引続き更に事業規模を拡大した場合、およびセメント工場等の既存インフラを活用した事業モデルにおける事業採算性についての検証を進めていく必要がある。

本実証事業により、低温加熱脆化処理後に破碎工程を追加することにより有用金属の回収が効率化されたが、水洗処理については、ラボテストで留まっているため、まずはテストプラントを用いて、規模拡大の上、サンプル数も増やし、精査を進める必要がある。

今後、低温加熱脆化処理については、複数種類の投入レシピや、投入物性状の変化等に対応できるか、実験機ではなく商用レベル（10～20t/日）の実用機にスケールアップし、検証を進める必要がある。破碎・選別・精選別処理、水洗処理についても、今後の低温加熱脆化処理試験のスケールアップに合わせた規模で、一貫連続操業を考慮した実証試験を行うことで、設計した全体システムの課題抽出、改善検討を行う必要がある。

また、事業収益性の改善、および本技術システムの適用対象拡大を検討すべく、バイオマス系難処理物（EFB、林地残材等）や、次世代製品に使用されるであろう複合素材端材（金属・CFRP 複合プラ等）の処理テストを行う必要がある。CFRP については、今年度実証のように ASR に破碎・混入される事例以外に、今後の社会ニーズも勘案し、大型・長尺状の CFRP 端材をそのまま受入処理することができるシステムフロー設計、並びにその場合での事業収益性も検討していく必要がある。

当社では、本実証事業にて確立した低温加熱脆化処理技術を用いて、自社およびグループ会社のセメント工場（国内 9 工場、海外 9 工場）への横展開を検討している。対象廃棄物は、ASR、シュレッターダストの他、建廃系のプラスチックや木くずの混合廃棄物、高含水・難破碎のバイオマス廃棄物である。自社およびグループ会社のセメント工場は全国的に分布していることから、各地域の廃棄物を網羅的に受け入れる体制ができると考えている。

回収した有価金属については、電炉や非鉄製錬に有価売却、脆化固形物は石炭代替燃料として自社グループ会社のセメントキルンの燃料として利用する他、石炭燃料を使用しているボイラー事業者に売却することを想定している。なお、自社での年間石炭消費量は 200 万 t 以上あることから、生成した脆化固形物は全量自社消費が可能であり、用途確保は既になされている。

低温加熱脆化は、CFRP 素材等の難燃性・硬質な可燃物の処理にも有効なことから、幅広い横展開が期待される。来年度には、上記 3 つの課題に対応できる規模拡大した実証事業の実施、設備詳細設計、事業採算性検証を進め、再来年度以降にて約 3 万 t/年規模の実機実証事業プラント立上げの検討を進める。

【総括のポイント】

- 1) 脆化温度の実証試験の結果、300℃では脆化が不十分となり、脆化固形物に占める20mmより粒径の大きな塊の比率が多くなった。350℃では脆化固形物の残存した総発熱量が低くなった。20mm以上の塊の占める割合の少なさと残存した総発熱量の多さから、325℃が好適な加熱温度帯と判断とした。
- 2) 昨年度の実証事業にて、木くずの投入により脆化固形物の20mmより大きな塊の割合が減少する効果を確認した。本年度は投入する木くずの粒径について実験を行ったところ、粒径を問わず、木くずの投入効果があったことから、環境負荷、コスト、手間を考慮すると、最も低負荷である「有姿」が望ましいと判断した。
- 3) CFRPを20%混ぜたASRの脆化处理実験も行ったところ、生成された脆化固形物の粒度分布に変化が見られなかったことから、CFRPの投入により、脆化固形物の粒度に悪影響を与えることはないと推測される。
- 4) 破碎方法として、ミルタイプ、カッタータイプ、ハンマータイプの3種類を比較した。ミルタイプは脆化固形物を過粉碎し、選別が困難に、カッタータイプは刃の磨耗が早く不適、ハンマータイプは破碎に問題がなく、設備内残留も少なかったことから、破碎手法はハンマータイプが有望であると判断した。
- 5) 選別前に破碎工程を挿入することで、有用金属の回収率が大幅に向上した。風力選別の後、重産物を高磁力選別し、篩い分け、更にART処理することにより、有用金属の品質向上が確認された。
- 6) ハロゲン元素については、実験室規模でのテスト処理を行ったところ、脆化固形物内の残存量は水洗による脱塩処理によって除去されたことが確認された。排ガス処理についても効果が見られたが、サンプルが少なかったため、今後サンプル数を増やす等の精査が必要である。
- 7) 処理技術の比較におけるCO₂排出量は、木くず混入を考慮し、処理物をASR100%に換算して算出した。低温加熱脆化处理システムにおいて、本年度は破碎工程を追加したが、選別工程が減少したことにより、CO₂排出量は昨年度よりも少し減少した。ガス化溶融との比較では約1.3t-CO₂/t-ASR、再選別では約1.1t-CO₂/t-ASRの削減効果が得られた。本年度の処理フローにおける処理物別のCO₂排出量の比較では、木くずを30%混ぜて脆化した場合が脆化燃料のカロリーが高かったため、最も低CO₂となる結果が得られた。
- 8) 木くずまたはCFRPを混合して生成された脆化固形物は、いずれも総発熱量が残り、微粉炭よりも燃焼効率が高いことから、受入想定先での燃料代替価値が見込まれた。この結果より、次世代自動車等で使用比率が高くなっていくことが予想されており、処理困難物と称されているCFRP処理を容易にすると推測される。
- 9) 破碎、選別、精選別結果を反映し、効率的な全体システム設計を行った。28,800t/年処理する事業モデルの場合、ASR100%処理では、資源（主に有用金属）回収効果もあり、約164百万円/年の利益が見込まれる試算となった。木くず30%を混合した場合、

有償木くず利用では▲98百万円/年の赤字となったが、逆有償木くずを利用することで、14百万円/年の利益が確保できる試算結果となった。

5. 添付資料

表 写真資料 広島ガステクノ・サービス加熱脆化実験

 A close-up photograph showing a pile of dark, irregularly shaped fragments, likely ASR (Autogeneous Self-Healing Resin) material, with some lighter-colored debris mixed in.	 A photograph showing several large, tan-colored bulk bags filled with material, stacked in a dark industrial setting. A wooden pallet is visible in the background.
<p>ASR</p>	<p>ASR 保管状況</p>
 A photograph of an industrial crusher machine in a dark environment. A person is visible on a platform above the machine, and bright lights illuminate the scene.	 A photograph of an industrial facility, likely a kiln, with a complex structure of red metal beams and pipes. A large, white, cylindrical object is visible in the center.
<p>破碎機</p>	<p>アントラーキルン（実験用）</p>





表 写真資料 破碎機メーカー破碎実験

	
<p>ハンマータイプ外観</p>	<p>ハンマータイプ破碎品回収</p>
	
<p>カッタータイプ外観</p>	<p>カッタータイプ残留物</p>

表 写真資料 クロダリサイクル実機選別実験

	
<p>投入ホッパー</p>	<p>磁選物回収箇所</p>
	
<p>風選ダスト回収箇所</p>	<p>サイクロンダスト回収箇所</p>
	
<p>中産物・重産物回収状況</p>	<p>中産物・軽産物回収状況</p>

表 写真資料 太平洋コンサルタントラボ精選別実験

	
<p>磁力選別での機処理状況</p>	<p>渦電流選別での処理状況</p>
	
<p>乾式比重選別での処理状況</p>	<p>乾式比重選別での重産物回収状況</p>

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 報告書

平成29年3月1日

太平洋セメント株式会社
環境事業部

TEL 03-5531-7417