

東京大学大学院

2005 年度修士論文

高圧二酸化炭素溶解水を用いた廃コン小粒径成分  
からの新規細骨材再生プロセスの開発

東京大学大学院 新領域創成科学研究科

環境学専攻 環境システムコース

柳沢研究室

36781 中川政和

指導教官：柳沢幸雄

# 目次

## 第1章 序論

---

|           |                            |    |
|-----------|----------------------------|----|
| 1.1       | 緒言                         | 1  |
| 1.2       | コンクリートについて                 | 1  |
| 1.2.1     | コンクリートの組成                  |    |
| 1.2.1.1   | セメント                       |    |
| 1.2.1.2   | 骨材                         |    |
| 1.2.1.3   | 水                          |    |
| 1.2.1.4   | 混和材                        |    |
| 1.2.2     | コンクリートの微細構造                |    |
| 1.2.2.1   | バルク                        |    |
| 1.2.2.2   | 骨材-バルク境界領域 (ITZ)           |    |
| 1.3       | 社会におけるコンクリート               | 4  |
| 1.3.1     | コンクリートの生産量・蓄積量             |    |
| 1.3.2     | 廃コンの発生量と将来予測               |    |
| 1.3.3     | コンクリートのリサイクル               |    |
| 1.3.3.1   | 骨材資源                       |    |
| 1.3.3.2   | 建設リサイクル法                   |    |
| 1.3.3.3   | 既往のリサイクルとその問題点             |    |
| 1.3.3.4   | 高品質再生骨材について                |    |
| 1.3.3.4.1 | 既存の骨材再生技術とその問題点            |    |
| 1.3.3.4.2 | 廃コン小粒径成分からの細骨材再生           |    |
| 1.4       | 酸処理による骨材とセメント水和物の分離の可能性    | 8  |
| 1.4.1     | 既往の研究                      |    |
| 1.4.2     | 酸としての炭酸水                   |    |
| 1.4.3     | 酸処理によるセメント水和物からのカルシウム抽出まとめ |    |
| 1.5       | 結言                         | 10 |

## 第2章 本研究の目的

---

|     |        |    |
|-----|--------|----|
| 2.1 | 本研究の目的 | 12 |
| 2.2 | 研究の流れ  | 12 |

## 第3章 廃コン小粒径成分のキャラクタリゼーション

---

|       |                             |    |
|-------|-----------------------------|----|
| 3.1   | 緒言                          | 14 |
| 3.2   | 廃コン小粒径成分の品質評価方法             | 14 |
| 3.3   | 廃コン小粒径成分のキャラクタリゼーション        | 14 |
| 3.3.1 | 機械すりもみ式再生細骨材(試料 A)          |    |
| 3.3.2 | 未処理 5 mm アンダー(試料 B)         |    |
| 3.3.3 | 試料の計量方法                     |    |
| 3.4   | 本研究で未使用の 5 mm アンダー中の小粒子について | 17 |
| 3.5   | 結言                          | 17 |

## 第4章 5 mm アンダーからの細骨材再生試験

---

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 4.1 緒言                             | 18 |
| 4.2 機械すりもみ式再生細骨材からの細骨材再生試験         | 18 |
| 4.2.1 炭酸水処理                        |    |
| 4.2.1.1 炭酸水処理装置                    |    |
| 4.2.1.2 炭酸水処理試験条件                  |    |
| 4.2.1.3 炭酸水処理手順                    |    |
| 4.2.1.4 炭酸水処理結果                    |    |
| 4.2.2 まとめ                          |    |
| 4.3 未処理 5 mm アンダーからの細骨材再生試験        | 21 |
| 4.3.1 炭酸水処理                        |    |
| 4.3.1.1 実験装置と試験条件                  |    |
| 4.3.1.2 炭酸水処理条件                    |    |
| 4.3.1.3 炭酸水処理手順                    |    |
| 4.3.1.4 炭酸水処理結果                    |    |
| 4.3.1.5 炭酸水処理まとめ                   |    |
| 4.3.2 ボールミル処理                      |    |
| 4.3.2.1 ボールミル処理条件                  |    |
| 4.3.2.2 ボールミル処理手順                  |    |
| 4.3.2.3 ボールミル処理結果                  |    |
| 4.3.2.3.1 粒径 10 mm の YTZ ボールを用いた場合 |    |
| 4.3.2.3.2 発生する微粉のキャラクタリゼーション       |    |
| 4.3.2.4 ボールミル処理まとめ                 |    |
| 4.3.3 炭酸水およびボールミルの複合処理             |    |
| 4.3.3.1 緒言                         |    |
| 4.3.3.2 検討プロセス①                    |    |
| 4.3.3.2.1 プロセスフロー                  |    |
| 4.3.3.2.2 処理方法および手順                |    |
| 4.3.3.2.3 プロセス①による試験結果と考察          |    |
| 4.3.3.3 検討プロセス②                    |    |
| 4.3.3.3.1 プロセスフロー                  |    |
| 4.3.3.3.2 処理方法および手順                |    |
| 4.3.3.3.3 プロセス②による試験結果と考察          |    |
| 4.3.3.4 複合処理まとめ                    |    |
| 4.4 結言                             | 30 |

## 第5章 細骨材再生プロセスのエネルギー/コスト評価手法の構築

---

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 5.1 緒言                        | 31 |
| 5.2 プロセスのエネルギー評価手法の開発         | 31 |
| 5.2.1 計算の前提                   |    |
| 5.2.1.1 プロセスの範囲               |    |
| 5.2.1.2 プロセスのフロー              |    |
| 5.2.1.2.1 未処理 5 mm アンダー(試料 B) |    |
| 5.2.1.2.2 機械すりもみ式再生細骨材(試料 A)  |    |
| 5.2.2 計算方法                    |    |

|             |                            |    |
|-------------|----------------------------|----|
| 5.2.2.1     | 二酸化炭素回収工程                  |    |
| 5.2.2.2     | 二酸化炭素圧縮工程                  |    |
| 5.2.2.3     | 炭酸水処理工程                    |    |
| 5.2.2.4     | ボールミル処理工程                  |    |
| 5.2.3       | 計算結果                       |    |
| 5.2.4       | 加熱すりもみ処理との比較               |    |
| 5.2.5       | エネルギー評価手法のまとめ              |    |
| 5.3         | 細骨材再生プロセスのコスト評価手法の開発       | 38 |
| 5.3.1       | 計算の前提                      |    |
| 5.3.1.1     | 計算の範囲                      |    |
| 5.3.1.2     | 検討するケース                    |    |
| 5.3.1.3     | プロセスのフロー                   |    |
| 5.3.1.4     | 設備費の共通事項                   |    |
| 5.3.1.5     | 5 mm アンダーの入手               |    |
| 5.3.1.6     | プロセスで発生するセメント残渣の処分         |    |
| 5.3.2       | 計算方法                       |    |
| 5.3.2.1     | 支出                         |    |
| 5.3.2.1.1   | 細骨材再生工程                    |    |
| 5.3.2.1.1.1 | 炭酸水処理                      |    |
| 5.3.2.1.1.2 | ボールミル処理工程                  |    |
| 5.3.2.1.2   | 二酸化炭素回収圧縮工程                |    |
| 5.3.2.1.2.1 | 二酸化炭素回収                    |    |
| 5.3.2.1.2.2 | 二酸化炭素圧縮                    |    |
| 5.3.2.1.3   | 炭酸カルシウム製造工程                |    |
| 5.3.2.1.3.1 | 微粉①からのカルシウム抽出工程            |    |
| 5.3.2.1.3.2 | 抽出溶液からの炭酸カルシウム析出工程         |    |
| 5.3.2.1.3.3 | 炭酸カルシウムの再溶解・再析出工程          |    |
| 5.3.2.1.4   | その他支出                      |    |
| 5.3.2.1.4.1 | 水道費・廃水処理費                  |    |
| 5.3.2.1.4.2 | 重機類                        |    |
| 5.3.2.1.4.3 | サイロ                        |    |
| 5.3.2.1.4.4 | 人件費                        |    |
| 5.3.2.1.4.5 | 輸送費                        |    |
| 5.3.2.2     | 収入                         |    |
| 5.3.2.2.1   | 炭酸カルシウム                    |    |
| 5.3.2.2.2   | 炭素税                        |    |
| 5.3.3       | コスト試算結果                    |    |
| 5.3.4       | 考察                         |    |
| 5.3.4.1     | 機械すりもみ式再生細骨材(試料 A)からの細骨材再生 |    |
| 5.3.4.2     | 未処理 5 mm アンダー(試料 B)からの骨材再生 |    |
| 5.3.5       | コスト評価手法のまとめ                |    |
| 5.4         | 結言                         | 45 |

## 第6章 プロセスの最適化

---

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 6.1 緒言                                | 47 |
| 6.2 処理条件最適化の進め方                       | 47 |
| 6.3 プロセス最適化の前提                        | 47 |
| 6.3.1 基準となる試験条件                       |    |
| 6.3.2 炭酸水処理条件を変更した時のカルシウム抽出量の産出算出について |    |
| 6.3.3 ボールミル処理条件について                   |    |
| 6.4 エネルギー評価の観点からの条件検討                 | 48 |
| 6.4.1 パラメータの検討                        |    |
| 6.4.1.1 炭酸水処理時間の検討                    |    |
| 6.4.1.2 試料/水比の検討                      |    |
| 6.4.1.3 二酸化炭素分圧の検討                    |    |
| 6.4.1.4 攪拌速度の検討                       |    |
| 6.4.2 まとめと処理条件最適化の方向性                 |    |
| 6.5 コストの観点からの炭酸水条件検討                  | 51 |
| 6.5.1 パラメータの検討                        |    |
| 6.5.1.1 炭酸水処理時間の検討                    |    |
| 6.5.1.2 試料/水比の検討                      |    |
| 6.5.1.3 二酸化炭素分圧の検討                    |    |
| 6.5.2 まとめと処理条件最適化の方向性                 |    |
| 6.6 プロセスの処理条件緩和の実験的検討                 | 54 |
| 6.6.1 炭酸水処理時間の検討                      |    |
| 6.6.2 処理条件                            |    |
| 6.6.3 試験結果                            |    |
| 6.6.4 考察                              |    |
| 6.6.5 実験的検証まとめ                        |    |
| 6.7 試験結果のフィードバックによる炭酸水処理条件最適化         | 59 |
| 6.7.1 炭酸水処理条件最適化方法の提案                 |    |
| 6.7.2 炭酸水処理条件の設計例                     |    |
| 6.7.3 炭酸水処理条件の設計まとめ                   |    |
| 6.8 結言                                | 60 |

## 第7章 結言

---

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 7.1 本研究の成果                    | 62 |
| 7.2 検討課題                      | 62 |
| 7.2.1 プロセスの処理条件緩和             |    |
| 7.2.2 炭酸水処理と機械的処理の同時処理プロセスの設計 |    |
| 7.2.3 微粉の有効利用                 |    |
| 謝辞                            | 63 |

## Appendix

### Appendix A 5 mm アンダーの炭酸水処理・ボールミル処理条件検討

---

|           |                           |     |
|-----------|---------------------------|-----|
| A-1       | 緒言                        | A-1 |
| A-2       | 炭酸水処理条件の検討                | A-1 |
| A-2-1     | 実験装置                      |     |
| A-2-2     | 炭酸水処理手順                   |     |
| A-2-3     | カルシウム抽出挙動の温度依存性           |     |
| A-2-4     | カルシウム抽出挙動の攪拌速度依存性         |     |
| A-2-5     | カルシウム抽出挙動の5 mm アンダー/水比依存性 |     |
| A-2-6     | カルシウム抽出挙動の二酸化炭素分圧依存性      |     |
| A-2-7     | 炭酸水処理のバッチ処理時間             |     |
| A-2-8     | 炭酸水処理条件検討のまとめ             |     |
| A-2-9     | 窒素下攪拌試験                   |     |
| A-3       | ボールミル処理条件の検討              | A-7 |
| A-3-1     | ボールミル処理条件                 |     |
| A-3-2     | ボールミル処理手順                 |     |
| A-3-3     | ボールの検討                    |     |
| A-3-3-1   | 粒径 10 mm の YTZ ボールを用いた場合  |     |
| A-3-3-2   | 粒径 5 mm の YTZ ボールを用いた場合   |     |
| A-3-3-3   | 粒径 3 mm の HD ボールを用いた場合    |     |
| A-3-3-4   | 粒径 1 mm の HD ボールを用いた場合    |     |
| A-3-4     | 微粉末のキャラクタリゼーション           |     |
| A-3-4-1   | 30 分のボールミル処理で発生する微粉の元素分析  |     |
| A-3-4-2   | ボールミル処理で発生する含有元素の時間変化     |     |
| A-3-5     | 炭酸水およびボールミルの複合処理          |     |
| A-3-5-1   | 緒言                        |     |
| A-3-5-2   | 検討プロセス①                   |     |
| A-3-5-2-1 | 処理方法および手順                 |     |
| A-3-5-2-2 | 処理結果                      |     |
| A-3-5-3   | 検討プロセス②                   |     |
| A-3-5-3-1 | 処理方法および手順                 |     |
| A-3-5-3-2 | 処理結果                      |     |
| A-3-6     | 炭酸水およびボールミルの複合処理のまとめ      |     |
| A-4       | 結言                        |     |
|           | A-13                      |     |

### Appendix B 吸水率測定方法について

---

|         |                  |     |
|---------|------------------|-----|
| B-1     | 骨材の品質評価手法としての吸水率 | B-1 |
| B-2     | 簡易吸水率測定法の検討      | B-1 |
| B-2-1   | 乾燥加速度法           |     |
| B-2-1-1 | 原理               |     |
| B-2-1-2 | 手順               |     |

|         |        |     |
|---------|--------|-----|
| B-2-1-3 | 結果     |     |
| B-2-2   | 水蒸気吸着法 |     |
| B-2-2-1 | 原理     |     |
| B-2-2-2 | 測定手順   |     |
| B-2-2-3 | 結果     |     |
| B-2-2-4 | 測定精度   |     |
| B-2-2-5 | 検討課題   |     |
| B-3     | まとめ    | B-7 |

#### Appendix C 未処理 5 mm アンダーからのカルシウム抽出速度式の構築

---

|       |                    |     |
|-------|--------------------|-----|
| C-1   | 緒言                 | C-1 |
| C-2   | カルシウム抽出モデル         | C-2 |
| C-3   | 計算式                | C-3 |
| C-4   | 実験データとのフィッティング     |     |
| C-4-1 | 未知数の設定             |     |
| C-4-2 | 処理繰り返しによるカルシウム抽出実験 |     |
| C-4-3 | 試料仕込み量を変えた場合の抽出実験  |     |
| C-4-4 | フィッティングまとめ         |     |
| C-5   | 結言                 | C-5 |

# 第1章 序論

## 1.1 緒言

古くから人類が使用してきたコンクリートは、近代社会において最も多く使用されている建築材料の一つである。その一方で、建造物等の解体に伴うコンクリート廃材(廃コン)の発生量も膨大であるが、近年はそのほぼ全量が路盤材へ再利用されている。しかし、21世紀初頭には廃コン発生量の増大によってその需給バランスが崩れる可能性が指摘されており、新たな廃コンの再資源化方法として再びコンクリート原料として使用可能な高品質骨材の再生技術の開発が進められている。

本章では、コンクリートの組成や構造、廃コンの再資源化の状況、既存の高品質骨材再生技術の問題点などについて触れ、本研究の動機付けおよび問題解決のための手法の提案を行う。

## 1.2 コンクリートについて

コンクリートは安価で強度が大きいという優れた特性をもつことから、橋やビルディングなどのあらゆる建造物で用いられており、現代社会に欠かすことのできない建設材料となっている。コンクリートは圧縮強度に優れる反面、引張強度に弱いという性質があることから、鉄筋を内部に通した鉄筋コンクリートとして使用される場合がほとんどである。コンクリート使用の歴史は古く、イスラエルのガラリヤ地方の住居跡から BC9000 年頃のコンクリートが発見された例などが知られている。

### 1.2.1 コンクリートの組成

一般的にコンクリートは、セメント、粗骨材(粒径 5 mm 以上の砂利)、細骨材(粒径 5 mm 以下の砂)、水を主原料として、その他に混和剤などが添加される。これらの混合割合は一定ではないが、体積比でおよそセメント 20%、骨材 70%、水 10% である(Figure 1-1)<sup>[1]</sup>。

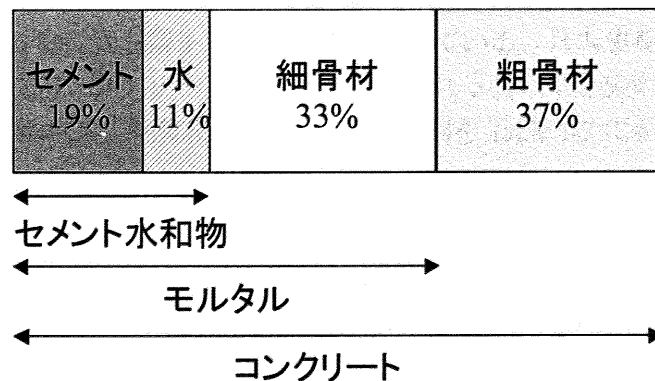


Figure 1-1 コンクリートの組成例(数字は体積比)

#### 1.2.1.1 セメント<sup>[2]</sup>

セメントは水硬反応により骨材と物理・化学的結合を形成することで骨材同士を接着する化合物である。セメントには多くの種類があるが、現在最も多く使用されている普通ポルトランドセメントは、1824年にレンガ職人であるイギリスのレンガ職人 Joseph Aspdin が石灰岩の粉末と粘土を混ぜたものを高温で焼くことでセメントを作発することを発明し、「人造石の製造方法の改良」というタイトルで特許を取得したことが起源である。日本では東京の深川に建設された官営撰綿篤工場で 1875 年にセメントの製造を開始した<sup>[3]</sup>。このほかに水硬時の発熱量が小さい中庸熱ポルトランドセメントや、初期の発現強度の大きい早強ポルトランドセメントなどがある。



セメントの主原料は石灰石、粘土、ケイ石、鉄原料である。これらを粉砕、混合して 1600 度近くで焼成すると直径 1 cm くらいの球状クリンカーとなり、これに少量のセッコウを混ぜ共に粉砕することでポルトランドセメントが得られる。ポルトランドセメントは、酸化カルシウム(CaO)、二酸化珪素 (SiO<sub>2</sub>)、酸化アルミニウム(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、酸化第二鉄(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (それぞれ C、S、A、F と略記) からなる強度発現や水和熱の異なる 4 種類の水硬性化合物 C<sub>3</sub>S、C<sub>2</sub>S、C<sub>3</sub>A、C<sub>4</sub>AF を主体として構成されており、これらの組成の差がその性質を決める重要な要因の一つである。

Table 1-1 ポルトランドセメントの種類とそれぞれの化学組成・化合物組成

| ポルトランド<br>セメント種類 | 化学組成 [%]         |                                |                                |      |     |                 | 化合物組成 [%]        |                  |                  |                   |                   |
|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|                  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO | SO <sub>3</sub> | C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF | CaSO <sub>4</sub> |
| 普通               | 21.9             | 5.3                            | 3.2                            | 65.0 | 1.2 | 1.9             | 52               | 23               | 9                | 10                | 3                 |
| 早強               | 21.0             | 4.9                            | 2.9                            | 65.6 | 1.2 | 2.7             | 63               | 13               | 8                | 9                 | 5                 |
| 中庸熱              | 23.8             | 3.8                            | 4.0                            | 64.8 | 1.0 | 1.6             | 46               | 33               | 4                | 12                | 3                 |
| 低熱               | 26.0             | 3.0                            | 3.1                            | 62.2 | 0.9 | 2.3             | 24               | 56               | 3                | 9                 | 4                 |

### 1.2.1.2 骨材

コンクリート体積の約 7 割をしめる骨材は、川や山から産出する安山岩や玄武岩、石灰石などの天然骨材、岩石を砕くことで製造する砕石、鉱石の精錬副産物を利用したスラグなどの人工骨材などがある。基本的に天然の産物である骨材の物性は、その採取地によって千差万別であり、全く同一のものというものは存在しない。しかし粒度分布、吸水率、密度などの定量的な指標により品質の規定がなされ、コンクリートへの使用の可否が決定される。骨材はその粒径によって細骨材と粗骨材に分類され、前者は 10 mm の篩を全量が通過しかつ 5 ミリの篩を 85% (重量比) 以上通過するもの、後者はこれに 85% 以上留まるものと規定されている。日本建築学会建築工事標準仕様書 (JASS) が定める鉄筋コンクリート用骨材に要求される吸水率と絶対乾燥密度(100-110℃で完全に乾燥させたときの密度。絶対密度と略す)品質の例を Table 1-2 に示す。

Table 1-2 コンクリート用骨材に要求される吸水率および絶対乾燥密度

| 骨材種類 | 吸水率 [%] | 絶対乾燥密度<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | 試験方法       |
|------|---------|--------------------------------|------------|
| 粗骨材  | 3.0 以下  | 2.5 以上                         | JIS A 1109 |
| 細骨材  | 3.5 以下  | 2.5 以上                         | JIS A 1110 |

### 1.2.1.3 水

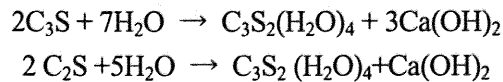
コンクリートに使用される水は「ねり混ぜ水」と呼ばれ、上水道などの飲料水、一般河川水や湖沼水などが使用される。

### 1.2.1.4 混和剤

ワーカビリティ(施工軟度)を高める空気連行剤や、水量を増やさずに流動性を保つ減水剤などの化学混和剤などが適時添加される。

## コンクリートの微細構造

セメントは水と混合した直後より発熱を伴う水和反応を開始する。セメントの主成分である  $C_3S$  と  $C_2S$  の水和反応は次のように記述できると考えられている。



ここで  $C_3S_2(H_2O)_4$  は計算カルシウム水和物(C-S-H ゲル)と呼ばれる非晶質であり、セメント水和物の主要成分である。セメント水和物は C-S-H の他に  $Ca(OH)_2$  を多く含み、他に六角針状の ettringite, 六角板状 monosulfate などのマイナーな水和物など多くの成分が複雑に絡み合った構造となっている。水硬後のセメント水和物は、骨材との接触面である ITZ (Interfacial Transition Zone) とその他の部分 (バルク) においてその構造が大きく異なることが知られており、特に ITZ はコンクリートの強度に大きく影響を与える部位としてその構造について数多くの研究がなされている。しかしながら、これらの微細構造は、セメント水和物が多くの成分から構成される上、これらが水和反応を経て非晶質な化合物を形成するなどの理由から、その構造については未だに十分な理解が得られていない<sup>[4]</sup>。

微細構造の解析には SEM(走査電子顕微鏡)、XRD(X 線回折装置)のほかに、SAM(Scanning Acoustic Microscopy)などが用いられる。測定用の試料は、表面にエポキシ樹脂を浸透させたのち研磨したもの<sup>[5]</sup>や、表面を研磨した骨材とセメント水和物を接着・硬化した後に、これを分離しその接触面を分析するもの<sup>[6]</sup>などがある。

### 1.2.2.1 バルク

セメント水和物の正確な内部構造を知ることは困難であるが、水和期間 1 年程度のポルトランドセメントペースト内部の各相の容積率を計算した例として、未反応セメントが 10%、C-S-H が 40%、水酸化カルシウムが 10%、モノサルフェートが 10%、残りが細孔容積で 30%との報告がある<sup>[4]</sup>。またセメント水和物の主成分である C-S-H は非常に多孔質であり、セメント水和物の比表面積は  $191 \text{ m}^2/\text{g}$ (水蒸気吸着による)<sup>[7]</sup>に達すると報告されている。

### 1.2.2.2 骨材-バルク境界領域 (ITZ)

骨材とセメント水和物の接着は、骨材-バルク境界領域(ITZ)における①骨材表面の凹凸と硬化したセメント水和物による機械的作用、②エピタキシー(結晶成長)、③骨材とセメント水和物の化学的結合、によるよって起こっていると考えられている<sup>[8]</sup>。

ITZ ではバルクより空隙率が大きいいため結晶が析出しやすく<sup>[9]</sup>、骨材表面には  $Ca(OH)_2$  が  $0.4-5 \mu\text{m}$  程度<sup>[8],[10],[11]</sup>の厚さで広範囲(骨材表面の約 30%<sup>[8],[10]</sup>)に渡って存在することが SEM(Figure 1-2)、XRD<sup>[11]</sup>の測定により確認されている。また、硬化前のセメント水溶液中において骨材は種々のイオンを吸収放出する。例えば玄武岩は  $OH^-$ 、

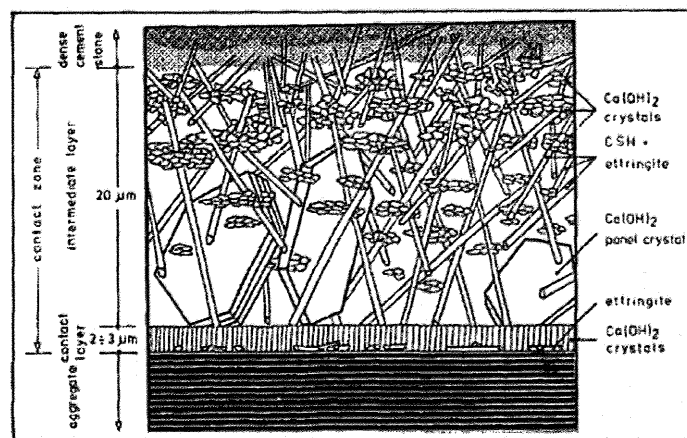


Figure. 1-2 ITZ の概念図<sup>[8]</sup>

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>を吸収し Si<sup>4+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> を放出するが<sup>[12]</sup>、これは骨材の種類によって様々であり、それぞれ異なる影響を ITZ に与える。玄武岩、石灰石、石英を用いてコンクリートを製造した場合、引張強度はこの順に大きくなるが、これは石灰石ではアルミニウム炭酸塩 (Carboaluminate)、石英ではケイ素と Ca(OH)<sub>2</sub> との化学反応であるポラゾン反応による生成物が ITZ に生じそれぞれの結合強度を向上させているためである<sup>[6]</sup>。ポラゾン反応は、シリカフェーム、フライアッシュなどのケイ素原料をコンクリートに混合することでも発生することから、これによりセメント水和物強度低下の原因である Ca(OH)<sub>2</sub> の結晶を消費し、コンクリート強度を増加させることが可能である<sup>[13]</sup>。

### 1.3 社会におけるコンクリート

コンクリートは現代社会に必要な不可欠な建設材料であり、その資源・エネルギー消費量や廃棄物処分の点から社会に与えるインパクトも大きい。この節ではコンクリートの生産量やリサイクル状況について述べ、社会におけるコンクリートの存在を位置付ける。

#### 1.3.1 コンクリートの生産量・蓄積量

日本においては古来より木材が建築材料の主体であったが、太平洋戦争後の急速な西洋化に伴って世界に類を見ないコンクリート社会を形成した。各国のセメント備蓄量(1913-1998 年)を人口 1 人あたりで見ると、日本 569 kg/人、米国 383 kg/人、ドイツ 436 kg/人などとなっており<sup>[14]</sup>、日本は欧米諸国と比較しても都市のコンクリート化が進んでいることが分かる。

現在の日本におけるコンクリート生産量は、生コン(工場生産されミキサー車で現場に運ばれるレディミックスコンクリート)に限っても年間 1 億 5000 万トン<sup>[15]</sup>、セメント生産量の年間約 72000 万トン<sup>[1]</sup>から Figure 1-1 の比率を使って計算すると年間約 3 億トンであり、国内における建造物等の形で蓄積されているコンクリートの量は 130 億トンに達するという報告がある<sup>[16]</sup>。コンクリートの生産量(Table 1-3)は戦後から高度経済成長期にかけ増加を続けたが近年はやや減少傾向にある。しかし日本の建造物の更新サイクルが欧米諸国と比較して短く、およそ 30-40 年が平均的な寿命であると言われている。そのためコンクリートの生産量は、建造物の更新に伴う需要が発生し続けることから現在のレベルを維持するものと予測される。

Table 1-3 生コンクリートの全国年度別出荷実績量 (全国生コンクリート工業組合連合調べ)

| 年度(平成)                    | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   |
|---------------------------|------|------|------|------|------|
| 生コン出荷量(億 m <sup>3</sup> ) | 1.49 | 1.40 | 1.31 | 1.24 | 1.19 |

#### 1.3.2 廃コンの発生量と将来予測

現在日本では年間約 4 億 5800 万トンの一般・産業廃棄物が発生し、うち産業廃棄物が 4 億 600 万トンを含んでいる(2000 年度)。この産業廃棄物の 20%を建設廃棄物が占めており、廃コンはその中の 42%である年間 3500 万トンが排出されている(Figure 1-3)<sup>[17]</sup>。

今後、高度経済成長期に建設された大量の建造物が 21 世紀初頭に更新時期を迎えることに伴って廃コン発生量は増大することが見込まれ、国土交通省の将来予測中位推計では平成 22 年で 4600 万トン、平成 32

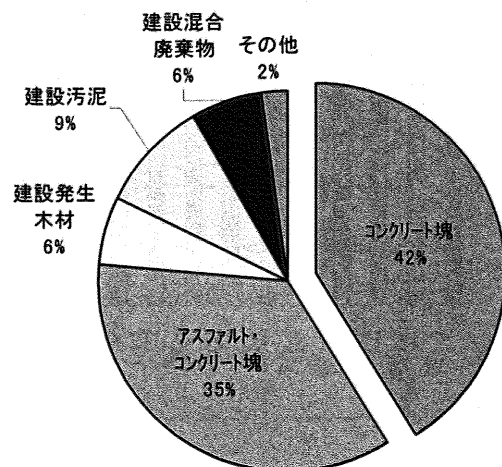


Figure1-3 建設廃棄物 7900 万トンの内訳(2000 年度)

年には現在の約 1.5 倍の 5000 万トンに達すると予想されている<sup>[17]</sup>。

### 1.3.3 コンクリートのリサイクル

循環型社会の構築を目的として 90 年代に多くのリサイクル関連の法案が施工された。その中の一つである建設リサイクル法(1.3.3.2 参照)やその関連法案の成立を受け、廃コンの再資源化率は近年急速に上昇し、そのリサイクル率は 1990 年の 50%から、1995 年に 65%、2002 年には 98%と急激に高まった<sup>[18]</sup>。これらの法律が制定された背景には、産業廃棄物処分場の残存容量の逼迫や、骨材資源の枯渇などの問題がある。以下にこれらの諸問題について述べる。

#### 1.3.3.1 骨材資源<sup>[7]</sup>

コンクリートを始め、アスファルトなど多くの用途に用いられる骨材の需要は戦後急激に伸びた。Figure 1-4<sup>[19]</sup> をみると国内の骨材生産量は 90 年代がピークで 8 億 t に到達しており、近年ではやや減少の傾向にある。60 年代半ばまでは良質な川砂利が用いられてきたがその後枯渇が急速に進み、その後の需要の増加は山砂利、海砂利、砕石によってまかなわれていることが分かる。なお、骨材のうちコンクリートに用いられるのは全体のおよそ 6 割程度である。

細骨材の供給量について見ると 1968 年から 1973 年にかけて 1 億トンから 2 億 5 千万トンに伸び、その後も 1990 年代末まで 2 億トン以上で推移している<sup>[20]</sup>。細骨材は当初全国の河川から採取されていたが、資源の枯渇が進み 1955 年頃から河川砂利採取に対する規制が強化されると、東日本では陸、山に供給源が移行し、陸山砂資源に乏しい西日本では海砂に依存するようになった。しかし山砂では泥分、海砂については塩分の混入によるコンクリートの品質低下の懸念があり、また昨今の環境面への配慮から近畿・中国地方の各県は海砂採取の採取規制強化ないし全面禁止に踏み切っていることから、代替骨材として輸入砂、砕砂や高炉スラグなどの人工骨材の利用率が高まっている。また東日本でも天然骨材に替わって砕砂の占める割合が増

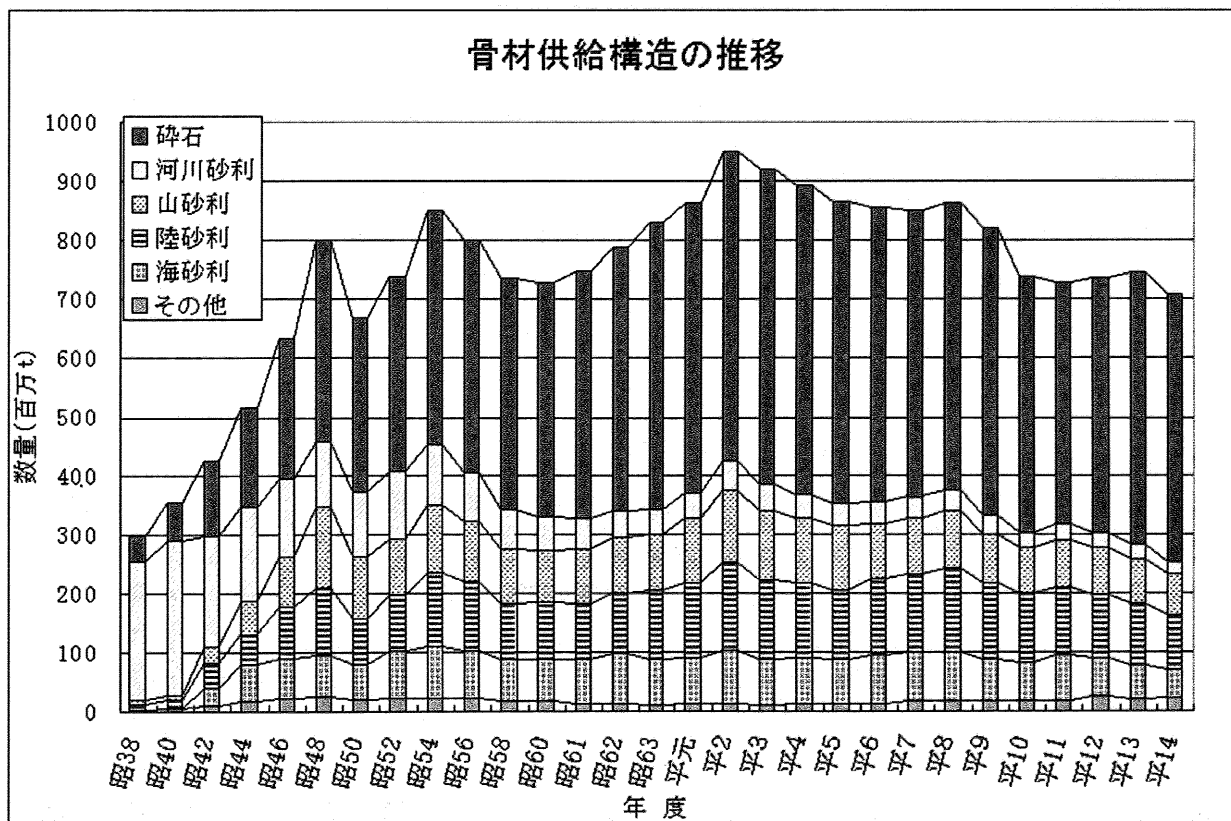


Figure 1-4 日本の骨材生産量の推移 (1963-2002年)

加しつあり、全国的に細骨材供給源のシフトが起こっている。岩石を粉砕することで生産される砕砂は、形状や微粉割合などの品質に問題があり、一般的には単独ではなく天然骨材と混合して使用される。輸入砂は2003年において380万トンであり、中国産がその9割以上を占めている<sup>[21]</sup>。品質に関しての問題はないが、中国国内での需要増による価格上昇の可能性など安定供給に関しての不安がある。コンクリート構造物の大型化から骨材に対してより高い性能を求めるようになってきている<sup>[22]</sup>。

### 1.3.3.2 建設リサイクル法<sup>[17]</sup>

国内の産業廃棄物最終処分場の残存容量は1億7600万 $m^3$ で、これは現在のペースで行くと約13年程度の容量しかない。またエネルギー消費量の抑制や環境保全などの観点からも、大量消費社会を見直し循環型社会の形成を目指した法制度を導入する動きが近年活発化している。1993年に施工された環境基本法は持続可能な社会の実現を目指した環境保全の理念を示した。さらにこの理念をより具体化する各種法律、例えば、特定家庭用機器再商品化法(家電リサイクル法)、容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律(容器包装リサイクル法)など、品目の特性に応じて再利用を義務付ける法律が相次いで制定された。

建設廃材のリサイクルについては1993年の建設副産物適正処理推進要綱、1997年の建設リサイクル推進計画<sup>97</sup>などを経て、2000年に施工された「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律(建設リサイクル法)」により、平成17年までにコンクリート塊について96%以上、建設汚泥については60%以上など、物品ごとに再資源化率の目標値が設定された。この建設リサイクル法は、建造物の分別解体、違反した場合の罰則規定の適用、各種リサイクル資材の再資源化方法など、再資源化を効率的に行うための諸事項についても具体的に定めている。再生骨材については発生現場より40km以内に再資源化施設があれば、経済性に関わらず原則的に利用すると定めている。

### 1.3.3.3 既往のリサイクルとその問題点

建設リサイクル法によりコンクリートの再資源化が促進された結果、現在、廃コン塊の大部分は、機械的に粉砕されたのち道路の下地である路盤材として再利用されている。しかしながら、大量の赤字国債を抱える日本の財政状況から、道路建設を含めた公共事業の見直しが進められており将来的な道路建設需要の伸びは期待できないのに対し、廃コン発生量は近い将来大幅な増加が見込まれている。そのため新規な再資源化ルートを開発しなければ、将来、発生した廃コンが行き場を失う事態になりかねない。

### 1.3.3.4 高品質再生骨材について

このような背景から、近年、廃コンから再びコンクリートの原料として使用可能な高品質再生骨材の製造プロセスの研究開発が進められている。このような再生骨材により、路盤材のような資源のカスケード利用ではない真の意味でのコンクリートリサイクルの実現が可能になる。一般に、廃コンから取り出した骨材は、表面にセメント水和物が付着しているため吸水率が大きく、そのままでは構造用コンクリート原料として使用することはできない。これは、付着セメント水和物が水分を多く含むことに起因して、コンクリートの凍結融解抵抗性が低下するなど品質の低下をもたらすことによる。そのため高品質再生骨材を得るためには、何らかの手法により骨材とセメント水和物を分離する必要がある。すでに複数の高品質骨材再生技術の開発が進められており、以下簡単に紹介する。

#### 1.3.3.4.1 既存の骨材再生技術とその問題点

高品質骨材再生技術について公開特許の調査を行った。使用技術の種類によって、以下の 4 種類に分類した。

#### ①機械的処理による骨材再生処理(機械すりもみ処理)

インパクトクラッシャー、ジョークラッシャー、ボールミル等を用いて廃コンに衝撃、圧縮、播潰などの機械的な作用を加えることでセメント水和物を粉砕・除去し骨材を再生する手法。本方法の特徴としては、処理速度が大きく効率的に骨材再生を行うことができるが、一般に粒径の小さな細骨材を再生することが困難<sup>[23]</sup>で、骨材成分とセメント水和物からなる小粒径成分を大量に発生する。これは小粒子に対するすりもみの効果が弱いことが原因であると考えられる。廃コン小粒径成分は、付加価値が低く、埋め戻し材等に再利用されているに過ぎない<sup>[24]</sup>。

#### ②加熱処理を伴う機械的処理による骨材再生処理(加熱すりもみ処理)

加熱時の骨材との膨張率の差を利用することで、セメント水和物に亀裂を生じさせ脆弱化し、続く機械的処理でこれを効率的に除去する手法。化石燃料の燃焼熱で廃コン全量を、あるいはマイクロ波によりセメント水和物のみを 300 度程度に加熱することで、十分な強度低下が認められる。この手法では、細骨材の再生が可能であるほか微粉末の発生量を抑えることができるが、一方で加熱に要するエネルギー消費量が大きく、処理速度の小さい点が問題とされている<sup>[24]</sup>。

#### ③表面のコーティング・改質処理による骨材再生処理

骨材表面のセメント水和物を除去せずに、これを樹脂でコーティングあるいは化学反応によって表面改質することで、強度向上や吸水率低下を実現する手法。骨材をメタクリル酸エステル<sup>[25]</sup>やアクリル樹脂<sup>[26]</sup>などに浸漬、または無機質結晶性防水材の粉末と混合して水を噴霧し所定期間養成するなどして行う。しかしながら本手法では比重について JIS を満足できない場合がある。

#### ④酸処理による骨材再生処理

酸を用いて廃コン中のセメント分からカルシウムに代表されるアルカリ成分を抽出してこれを脆弱化することで骨材再生を行う手法。実施例としては、廃コンを硝酸・塩酸・酢酸の 0.1~0.5 mol/L 水溶液中で 10~30 分間攪拌し、続いて破砕媒体を用いずにボールミル処理を行ったところ JIS を満足する細骨材を得ることができるという特許がある<sup>[27]</sup>。本手法の問題点としては、酸処理後の廃水処理や酸・攪拌装置を用いたプロセスの経済性などが考えられる。

### 1.3.3.4.2 廃コン小粒径成分からの細骨材再生

前節の中で技術的に実用化されているのは①の機械すりもみ処理と②の加熱すりもみ処理である。実際にこれらの手法を用いて解体現場で廃コンを処理し、得られた再生骨材を同じ敷地の新規建造物の建材に使用の実証試験が国内で数例行われている<sup>[28]</sup>。しかし、機械すりもみ処理は処理速度が大きく消費エネルギーが小さいものの、再生可能なのは粗骨材のみで副産物として付加価値の低い大量の廃コン小粒径成分が生成する一方(Figure 1-5 発生経路 A)、加熱すりもみ法は粗骨材・細骨材が共に再生可能で微粉発生量も少ないものの加熱に伴うエネルギー消費量が大きいという問題点がある。また、これらの処理で骨材再生を行う場合は、コンクリートをこぶし大程度に粉砕する前処理が必要であるが、その際に全体の約 20%が小粒径成分として発生する(Figure 1-5 発生経路 B)。

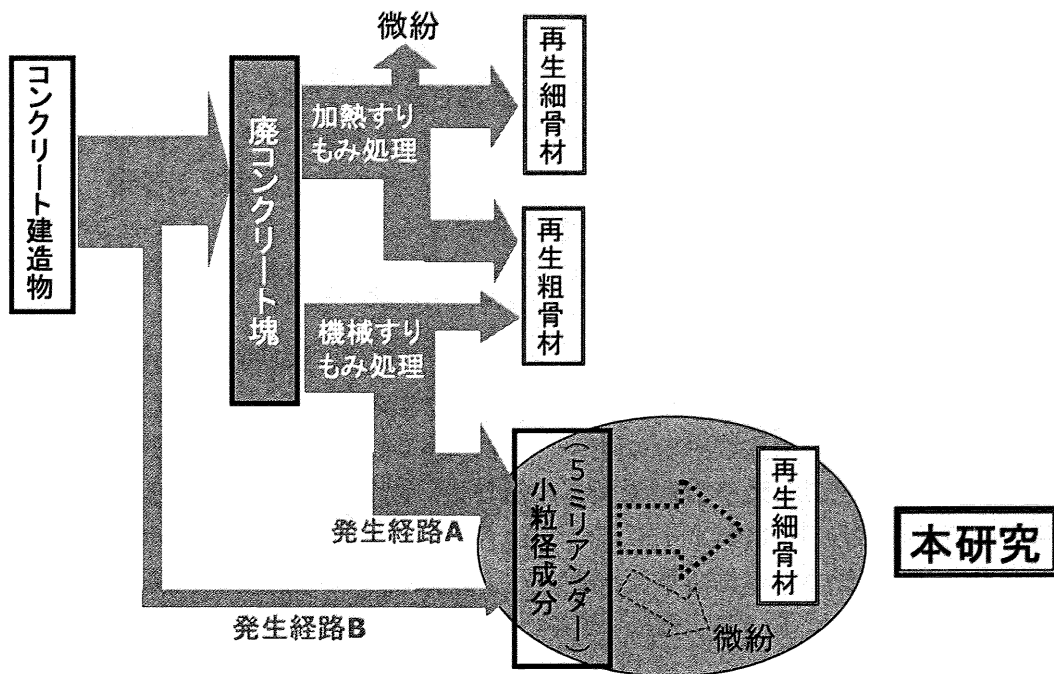


Figure 1-5 既存の高品質骨材再生技術のマテリアルフロー図

これらの小粒径成分を原料とした細骨材再生技術開発はこれまでに報告されていないが、将来的に、廃コンのリサイクル率を維持するためには、このプロセスが必要であると考えられる。また、消費エネルギーの少ない方法で小粒径成分からの細骨材再生を行うことができれば、機械すりもみ処理と組み合わせることで、加熱すりもみ処理よりも省エネルギーな骨材再生プロセスが実現できる。

高品質骨材の製造コストについてみると現在の骨材価格(1500-2000円)に対して、加熱すりもみ処理によって得られる骨材の再生コストは1トンあたり約4000円と割高である。これは、天然骨材と比較して多くの処理を必要とするためある程度は止むを得ないと考えられる。今後骨材資源の逼迫や、廃コンの供給過剰および路盤材需要の減少により骨材価格は上昇していくと考えられるため、多少割高な再生骨材でも将来的には骨材再生技術が商業的に成立する可能性はあるものと考えられる。

#### 1.4 酸処理による骨材とセメント水和物の分離の可能性

廃コン小粒径成分からの細骨材再生は機械的処理のみでは達成が困難<sup>[29]</sup>であり、他の何らかの処理を組み合わせる必要がある。機械的処理に組み合わせる手法としてセメント水和物を脆弱化させる加熱処理が考えられるが、消費エネルギーが大きくなる可能性が高いと考えられる。

そこで本研究では、セメント水和物がカルシウムを主成分としたアルカリ性化合物であることに着目した。骨材とセメント水和物の接触面には水酸化カルシウムの析出が多く見られることはすでに述べたが、酸処理によりこの部分を抽出すれば、セメント水和物と骨材の接着物質が消滅することになり、両者が自然に分離する可能性がある。

またセメント水和物の主要構造体であるC-S-H中、最も含有量の多いカルシウムを抽出することで微細構造が大きく変化し、その強度を低下させられる可能性があると考えられる。

#### 1.4.1 既存の研究

酸処理によって廃コンから骨材が再生可能であるという特許は数例存在する(1.3.3.4.1 の④参照)が、これらは実験データ等が明らかではなく、その実用性については未知である。またこれらの報告では、酸として硝酸などの強酸を用いており、それ自体の毒性が強だけでなく排水処理に必要なエネルギーも大きくなるなど環境負荷の大きいプロセスとなることが予想される。強酸は腐食性が大きいいため処理装置に特殊な金属を用いる必要があり、コスト面でも不利になる可能性が高い。

他にセメント水和物を酸処理した研究報告例として、廃セメントに含まれるカルシウムを利用した二酸化炭素固定のプロセス評価を行った飯塚らの研究がある<sup>[30]</sup>。この研究では、骨材再生時の副産物である粒径 0.15 mm 以下の廃セメント微粉を水中で攪拌しつつ高圧下で二酸化炭素を溶解させることでカルシウム抽出を行い、適当な微粉/水比を選ぶことで比較的短時間で含有カルシウムの 50%が抽出されると報告している。セメント水和物中に含まれる結晶性の水酸化カルシウム含有量は約 10%<sup>[2]</sup>であることから、炭酸水処理によって水酸化カルシウムのみならず、構造体 C-S-H を形成しているカルシウムの溶出が進行していると考えられる。

まとめると酸による廃コンからの骨材再生方法については、その概念については特許が取得されているものの、実用性については全く不明である。しかし、少なくとも炭酸水のような弱酸を用いることでもセメント水和物の大部分のカルシウム抽出は可能であることが報告されている。

#### 1.4.2 酸としての炭酸水

酸には無機酸と有機酸さらに弱酸から強酸まで多くの種類が存在する。セメント水和物からのカルシウム抽出に適した酸の選定基準は、酸のコスト、腐食性、排水処理のほかに効果的にカルシウムを抽出できることが重要な要素となる。硝酸、硫酸などの強酸には毒性、装置の腐食、排水処理の問題があり、塩酸については塩素分混入によるコンクリート中鉄筋の腐食問題があり使用は望ましくないと考えられる。また酢酸やシュウ酸などの有機酸は腐食性や毒性の問題は低いものの、価格が無機酸の 10 倍以上(酢酸 180-200 円/kg、シュウ酸 410-420 円/kg)<sup>[31]</sup>とコスト面で問題となる可能性が高い。

そこで本研究では高圧二酸化炭素溶解水(高圧で二酸化炭素を水に溶解させた炭酸水)に着目した。炭酸水は弱酸であるため装置の腐食という問題がなく、また圧力を開放すれば水に戻るため毒性も低いと考えられる。排水処理についてもセメント水和物からの抽出成分のみの処理を考えれば良く、他の酸と比較して容易であると思われる。

ここで炭酸水を用いた時のコストについては簡単な試算を行う。既存の研究<sup>[30]</sup>では炭酸水処理時の水温 50°C、二酸化炭素分圧を 30 気圧として廃セメント微粉からのカルシウム抽出を行っているが、この条件で処理を行ったとするとカルシウム共存下の飽和溶解度は平衡計算よりおよそ 0.6 mol/L(26.4 g/L)である。火力発電所などの煙道ガスからの二酸化炭素回収コストは 13.2-25.5 円/kg(5657-566 t-CO<sub>2</sub>/yr 処理時)<sup>[32]</sup>であることから、抽出水 1L に使用する二酸化炭素回収コストは 0.35-0.67 円/L となる。これを無機酸の場合と比較すると、特許<sup>[33]</sup>によれば骨材再生には硝酸を 0.3-0.7 N(1.89-4.41 g/L)で使用するとあり、硝酸価格を 70 円/kg<sup>[31]</sup>とすれば抽出水 1L に使用する薬品代は 132-309 円/L となる。本試算では二酸化炭素圧縮費用を含まないが、各種有機酸・無機酸と比較しても十分に安価な酸である可能性が高いと考えられる。また腐食性の低さから反応装置にステンレスなどの一般的な金属が使用できることのコスト面への寄与は大きいと考えられる。

二酸化炭素は地球温暖化ガスとして削減が求められている廃棄物である。2005 年 2 月に発効



した京都議定書で日本は2008-2012年までの第一約束期間内に1990年の排出量を基準として温室効果ガスを6%削減義務があるが、2004年の温室効果ガス排出量は13億2900万トンであり基準より7.4%の増加となっている。すなわち、日本は現在より6年以内に約13%を削減する必要があり、多くの分野での対策を必要とする。このような背景から火力発電所などの集中発生源から積極的に二酸化炭素を分離回収して、これを海洋または地下に固定あるいは産業に利用する動きも活発化する可能性があるが、そうなれば二酸化炭素を用いるプロセスはコストや社会的要請という点でのメリットがさらに大きくなるものと考えられる。

#### 1.4.3 酸処理によるセメント水和物からのカルシウム抽出まとめ

廃コン粒子を酸処理することでカルシウムが抽出されることはすでに実験的に確認されており、これによりセメント水和物の構造が変化し強度が低下するという予想は妥当であると考えられる。さらにセメント分-骨材の接着面は結晶性水酸化カルシウムで覆われていることから、酸処理はセメント水和物の強度低下のみならず骨材との分離が促進されるとも予想される。また酸としては、既往の研究でセメント水和物からのカルシウム抽出が確認され、毒性、排水処理、コストなどの面で優位性が期待できる炭酸水が優れていると考えられる。以上より、炭酸水処理を用いた処理は廃コンからの骨材再生に適した方法であることが示唆される。

### 1.5 結言

廃コンの発生量が今後急激に増大していくのに対して、その受け皿となっている路盤材の需要は伸び悩む可能性が高いこと、さらに骨材資源の枯渇や産廃処分場の残存容量の逼迫から、廃コンから再びコンクリート原料として使用可能な高品質骨材の再生技術の開発が進められているが、その際に大量発生する廃コン小粒径成分は有効活用されておらず、このような廃コン小粒径成分からの細骨材再生技術は、廃コンの再資源化率維持および新規な省エネルギー骨材再生技術の開発に必要であることを述べた。

一方、酸処理でセメント水和物からカルシウム抽出を行えば、セメント水和物の微細構造から考えてこれが脆弱化する可能性が高いと推定した。また、毒性、排水処理、コストなど種々の側面から評価した結果、酸としては炭酸水処理を用いることが適当であることを述べた。

### 参考文献

- [1] 株式会社 E&P ホームページ (<http://www.eandp.jp/j/kotuzai.html>)
- [2] 無機マテリアル学会編集; セメント・セッコウ・石灰ハンドブック; 技報堂出版
- [3] 鈴木康範; コンクリートの構成材料 セメント・コンクリート; 674 (2003) 45-52
- [4] 森一広ら; セメント硬化体の構造解析; 京都大学原子炉実験所学術講演会 2004 年 ([www.rri.kyoto-u.ac.jp/KOUEN/](http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/KOUEN/))
- [5] K.O. Kjellsen, et al; Preparation of flat-polished specimens for SEM-backscattered electron imaging and X-ray microanalysis- importance of epoxy impregnation; cement and concrete research 33 (2003) 611-616
- [6] William A. Tasong, et al; Aggregate-cement paste interface Part 1. Influence of aggregate geochemistry; cement and concrete research 29 (1999) 1019-1025
- [7] Ivan Odler; The BET-specific surface area of hydrated Portland cement and related materials; cement

- 
- and concrete research 33 (2003) 2049-2056
- [8] R. Zimbelmann, et al; A contribution to the problem of cement-aggregate bond; cement and concrete research 15 (1985) 801-808
- [9] Dannys Breton, et al; Contribution to the formation mechanism of the transition zone between rock-cement paste; cement and concrete research 23 (1993) 335-346
- [10] Sidney Diamond; The microstructure of cement paste and concrete- a visual primer cement & concrete composites 26 (2004) 919-933
- [11] Paulo J.M. Monteiro; Analysis of the aggregate cement paste interface using grazing incidence X-ray scattering; cement and concrete research 19 (1989) 987-988
- [12] W. A. tasong; et al; Aggregate cement chemical interactions; cement and concrete research 28 (1998) 1037-1048
- [13] J. M. Gao, et al; ITZ microstructure of concrete containing GGBS; cement and concrete research 34 (2005) 1299-1204
- [14] 茅陽一監修; 環境年表 2004/2005; オーム社編
- [15] 鈴木康範; コンクリートの構成材料; セメント・コンクリート 678 (2003) 54-61
- [16] 友澤史紀; コンクリートのリサイクル; セラミックス 37 (2002) 946-951
- [17] 建設副産物の現状; 国土交通省のリサイクルホームページ  
(<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/fukusanbutsu/genjo/index.htm>)
- [18] 環境省ホームページ (<http://www.env.go.jp/>)
- [19] 社団法人日本砕石協会ホームページ (<http://www.saiseiki.or.jp/>)
- [20] 有田正史; 需要と供給を結ぶ骨材供給ブロックの構築を; コンクリートテクノ臨時増刊号 19-25, (株)セメント新聞社
- [21] 財務省貿易統計
- [22] 鈴木康範; コンクリートの構成材料 骨材; セメント・コンクリート; 678; (2003), 54-61
- [23] 麓隆行、妹背吉彦、山田優; 再生細骨材の品質がモルタルの性状に及ぼす影響についての検討; コンクリート工学年次論文集, 22 (2000) 1111-1116
- [24] 石倉武、最首貞曲、助清満昭、友澤史紀; 高品質再生骨材製造技術の開発; コンクリート工学, 37 (1999) 16-23
- [25] 前川昭礼; 再生コンクリート骨材およびその処理方法; 公開特許公報(A), 特開平 9-241054
- [26] 住野正博、川地武、十河茂幸; 再生骨材及びそれを用いたコンクリート並びにそれらの製造方法; 公開特許公報(A), 特開平 10-316459
- [27] 大神鋼章、藤井悟、小野雅史; 再生骨材の製造方法; 公開特許公報(A), 特開平 11-21156
- [28] 黒田泰弘、森健治、宮地義明; 建替工事へのコンクリート資源循環システムの適用; コンクリート工学, 41 (2003) 150-152
- [29] 麓隆行、妹背吉彦、山田優; 再生細骨材の品質がモルタルの性状に及ぼす影響についての検討; コンクリート工学年次論文集, 22 (2000) 1111-1116
- [30] 飯塚淳、藤井実、山崎章弘、柳沢幸雄; 廃コンクリートを用いた新規な二酸化炭素固定プロセス; 化学工学論文集 28 (2002) 587-592
- [31] 17300 の化学商品; 化学工業日報社
- [32] 株式会社中国電力より提供
- [33] 荒井康夫; コンクリート廃材の処理方法; 公開特許公報, 特開平 6-285454

## 第2章 本研究の目的

### 2-1 本研究の目的

第1章では、既存再資源化方法の限界、さらに産廃処分場残存容量の逼迫、資源枯渇などの背景から、近年廃コンからの高品質骨材再生技術の開発が進められており、その中で大量発生する廃コン小粒径成分(5 mm アンダー)からの細骨材再生技術の必要性が今後高まっていくことについて述べた。5 mm アンダーには、大きく分けて骨材再生処理の前処理としてコンクリートを粉砕する過程で発生するものと、骨材再生の一手法である機械すりもみ法で粗骨材を再生する際に発生するものの2通りの発生経路があるが、これらから細骨材を再生する手法はこれまでに報告されていない。

5 mm アンダーからの細骨材再生は、機械的処理のみでは達成が困難であり<sup>[1]</sup>、他の何らかの処理を組み合わせる必要がある。セメント水和物を脆弱化させる手法の一つとして加熱処理を行うことが考えられるが、消費エネルギーが大きくなる可能性が高いと考えられることから、他の手法を考える必要がある。報告<sup>[2]</sup>によると、廃セメント微粉を、高圧二酸化炭素を水に溶解させた炭酸水中で攪拌処理し、セメント水和物の主成分である含有カルシウムを抽出した場合、これを高い割合で抽出できることが報告されている。セメント水和物の微細構造から、酸によりカルシウムを抽出すれば、セメント分と骨材の分離が容易となることが予想された。また酸には様々な種類のものがあるが、種々の側面から炭酸水が適当であると考えた。

以上より、本研究では炭酸水処理によるカルシウム抽出を利用した廃コン小粒径成分(5 mm アンダー)からの細骨材再生プロセスの開発を目的とする。

本細骨材再生プロセスにより、これまで付加価値が低く埋め戻し材などにのみ利用されてきた 5 mm アンダーから、建設材料である細骨材を得ることが可能となり、廃コンのリサイクル率維持に貢献できるほか、機械すりもみ処理と組み合わせることで加熱処理を含む既存技術と比較して省エネルギーなコンクリートリサイクルプロセスを開発できる可能性がある。

### 2-2 研究の流れ

まず本研究で使用する二種類の 5 mm アンダー実試料のキャラクタリゼーションを行う(第3章)。

次に、炭酸水処理を用いてそれぞれの 5 mm アンダーから細骨材再生試験を行う。炭酸水処理のみで品質の良い骨材が得られない場合は、機械処理を導入し細骨材再生プロセスを設計する(第4章)。

設計した再生細骨材プロセスの実用性を評価するため、コスト/エネルギー評価手法を開発する(第5章)。この評価手法により種々の実験パラメータがプロセス全体に与える影響を定量的に評価してエネルギー/コストを削減する観点から処理条件最適化の方向性を示し、これを実験的に検証する。さらに実験により得られた知見を条件検討にフィードバックすることでさらなる最適化のための処理条件設計方法を示す(第6章)。

## 参考文献

- [1] 麓隆行、妹背吉彦、山田優; 再生細骨材の品質がモルタルの性状に及ぼす影響についての検討; コンクリート工学年次論文集, 22 (2000) 1111-1116
- [2] 飯塚淳、藤井実、山崎章弘、柳沢幸雄; 廃コンクリートを用いた新規な二酸化炭素固定プロセス; 化学工学論文集, 28 (2002) 587-592

### 第3章 廃コン小粒径成分のキャラクターゼーション

#### 3.1 緒言

本章では、本研究で用いる発生経路の異なる2種類の廃コン小粒径成分（5 mm アンダー）のキャラクターゼーションと、試料の品質評価指標である吸水率測定方法について述べた。

なお本研究で用いている粒子の粒径は、その目の大きさの篩を通過または残留したことを示す。例えば、粒径0.6-1.2 mmの試料であれば、1.2 mmの篩を通過し0.6 mmの篩上に残ったものである。しかし、ここで用いている篩の目の大きさであるが、便宜上近似値を用いる慣習があり、実際の篩の大きさと若干異なる場合がある。実際の篩の目のサイズを呼び寸法(網の一目の一辺の長さ)と呼び、近似値との関係を以下に示す。

Table 3-1 篩サイズの近似値と呼び寸法(実際の網の一目の一辺の長さ)の関係

| 近似値 [mm]  | 0.15 | 0.3 | 0.6 | 1.2  | 2.5  | 5    |
|-----------|------|-----|-----|------|------|------|
| 呼び寸法 [mm] | 0.15 | 0.3 | 0.6 | 1.18 | 2.36 | 4.75 |

また篩分けはステンレス製の篩と垂直振動方式の電磁振とう機(FRITSCH 社製 A-3 SPARTAN)を用いて、振幅1 mmで2分間行った。

#### 3.2 廃コン小粒径成分の品質評価方法

5 mm アンダーから細骨材を再生するためには付着しているセメント水和物を除去する必要がある。セメント水和物は吸水性の高い物質であるため、骨材の品質を定義する種々の物性値の中でも、「吸水率」がセメント水和物の付着量をもっとも良く反映する指標であると考えられる。試料の乾燥時の密度も良い指標になり得るが、骨材成分の密度が不明でありかつ少量の試料の体積を厳密に測ることが困難であると予想されたことから、本試験では吸水率を指標として再生細骨材の品質評価を行った。細骨材の吸水率は正式にはJIS A1109で定められた手法によって測定されるが、この手法では測定のために多量の試料(1 kg)を必要とすることから、少量の試料で実験を行う本研究には適さない。そこで本研究では、水蒸気吸着率(試料絶乾重量あたりの吸湿量)を指標として、吸水率の推定を水蒸気吸着法(Appendix B 参照)を用いて処理後の再生細骨材の品質評価を行った。

#### 3.3 廃コン小粒径成分のキャラクターゼーション

5 mm アンダーは第1章で述べたように、既存技術による高品質骨材再生プロセスで発生する(Figure 3-1)。

既存技術では骨材再生処理に先立って建造物を粒径40 mm以下の廃コンクリート塊に破碎する必要があるが、この過程で原料の約20%が発生経路Bの5 mm アンダー

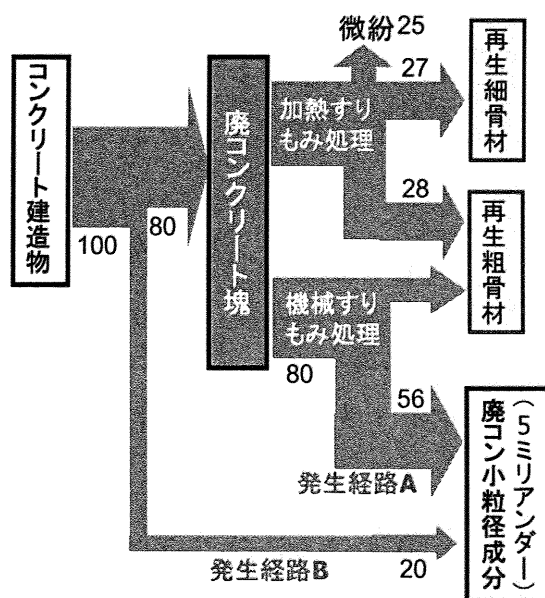


Figure 3-1 既存の高品質骨材再生プロセスの材料フロー

として得られる。また機械すりもみ処理により粗骨材を製造した場合には廃コンクリート塊の56%がさらに発生経路Aの5mmアンダーとして得られる。本研究では、これら2種類の発生経路にそれぞれ対応する5mmアンダーとして、「機械すりもみ式再生細骨材(試料A)」と「未処理5mmアンダー(試料B)」を用いて実験を行った。

### 3.3.1 機械すりもみ式再生細骨材(試料A)

機械すりもみ処理にはボールミル処理やスクリー磨砕処理など種々の方式が存在し、これらの方式により発生する5mmアンダーの量・性状は異なると考えられる。本研究で用いた5mmアンダーは細骨材再生を目的として試料表面を十分に研磨しセメント水和物の大部分を除去したもので、これを機械すりもみ式再生細骨材(試料A)と命名した。試料Aの表面は白色であるが、セメント分の付着は少なく、骨材表面の形状は明瞭に観察可能である(Figure 3-2)。粒度分布をTable 3-3に示すが、後述の未処理5mmアンダー(試料B)と比較して小粒子の割合が大きい。これは機械すりもみ処理による摩耗・粉砕の結果生成した小粒径成分が多く含まれているためと考えられる。吸水率は0.3-5mmに篩い分けしたものについての値が分かっており3.7%となっている。この粒径0.3-5mmの成分が試料全体(0-5mm)に占める割合は約81wt-%である。炭酸水処理試験には吸水率データのある0.3-5mmを用いた。カルシウム含有率はデータが入手不可能なため不明である。吸水率の測定方法についてもデータがないがJIS A 1109「細骨材の密度及び吸水率試験」によるものと思われる。

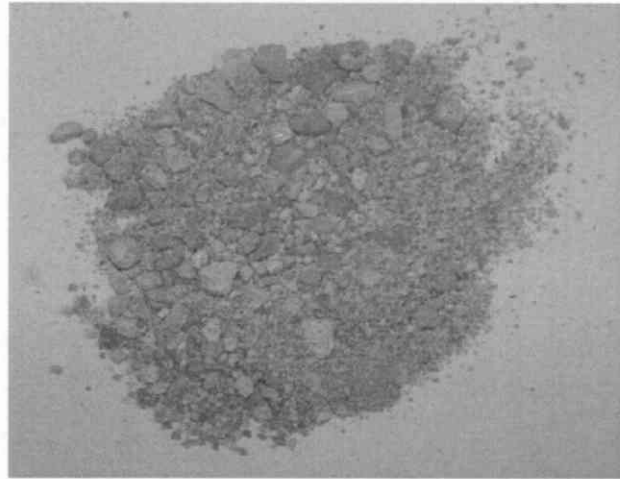


Figure 3-2 機械すりもみ式再生細骨材(試料A)

Table 3-2 機械すりもみ式再生細骨材の物性

| 試料名称         | 粒度分布    | 吸水率  | カルシウム含有率 | 生成装置          |
|--------------|---------|------|----------|---------------|
| 機械式すりもみ再生細骨材 | 0.3-5mm | 3.7% | 不明       | 機械すりもみ式骨材再生装置 |

Table 3-3 機械すりもみ式再生細骨材の粒度分布(質量比)

| 粒径 [mm]    | 2.5-5 | 1.2-2.5 | 0.6-1.2 | 0.3-0.6 | 0.15-0.3 | <0.15 |
|------------|-------|---------|---------|---------|----------|-------|
| 存在比 [wt-%] | 11.1  | 24.3    | 20.5    | 25.4    | 15.2     | 3.6   |

### 3.3.2 未処理 5 mm アンダー(試料 B)

建造物の解体に伴い発生する巨大な廃コン塊を、ハルトパクト(機械的な衝撃作用を利用した粉砕装置)によって 40 mm 以下に粉砕し、振動篩でこの中から粒径 5 mm 以下の成分を回収したものを「未処理 5 mm アンダー」と命名した。粒子表面は白色で多量のセメント水和物が付着しており、接触等によって容易に白色微粉末が発生する。試験では、骨材成分の重量割合が低いと考えられる小粒子を除去した成分(粒径 0.6-5 mm)を使用した(Figure 3-3)。この粒度分布は試料全体の約 72%を占める(Table 3-5)。その他の各物性は Table 3-4 にまとめた。吸水率は JIS A1109、カルシウム含有率は JIS R5202(アルカリ融解によるフレイム原子吸光法)にそれぞれ基づき外部委託によりデータを得た。

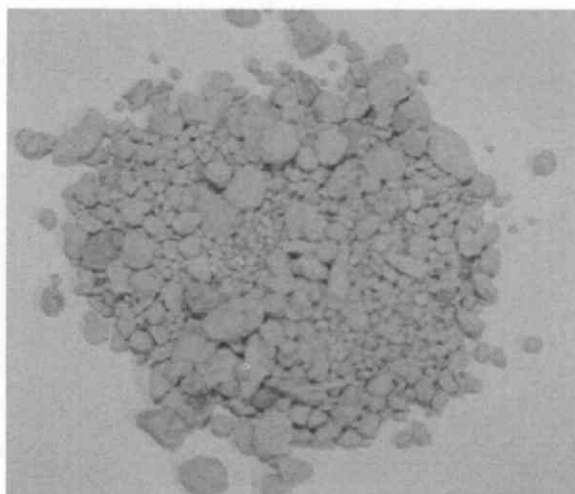


Figure 3-3 未処理 5 mm アンダー(試料 B)

Table 3-4 未処理 5 mm アンダー試料情報

| 試料名称          | 粒度分布     | 吸水率   | カルシウム含有率  | 骨材含有率* | 生成装置   |
|---------------|----------|-------|-----------|--------|--------|
| 未処理 5 mm アンダー | 0.6-5 mm | 15.3% | 11.3 wt-% | 57%    | ハルトパクト |

\*骨材含有率は計算値で算出方法については下記参照

Table 3-5 未処理 5 mm アンダー試料の粒度分布(質量比)

| 粒径 [mm]    | 2.5-5 | 1.2-2.5 | 0.6-1.2 | 0.3-0.6 | 0.15-0.3 | -0.15 |
|------------|-------|---------|---------|---------|----------|-------|
| 存在比 [wt-%] | 18.6  | 27.9    | 26.1    | 19.4    | 6.4      | 1.6   |

#### 【骨材含有率の算出】

未処理 5 mm アンダーについてはカルシウム含有率が分かっているので、セメント水和物と骨材のカルシウム含有率を設定して骨材含有率を計算した。普通ポルトランドセメントのカルシウム含有率は 46%であり、コンクリート製造時に 0.5 倍量の水と混合した場合、セメント水和物中のカルシウム含有率は  $46 \times \frac{2}{3} = 30.7\%$  となる。未処理 5 mm アンダー試料 (0.6-5 mm) のカルシウム含有率は 11.3%であり、骨材中にカルシウムは存在しないと仮定すれば、試料中のセメント水和物の割合は  $11.3 / 30.7 = 36.8\%$  となる。すなわち試料中の骨材成分の割合は  $100 - 36.8 = 63.2\%$  であることが分かる。さらに粒径 0.15 mm 以上の骨材成分の割合を計算する。JIS で規定されたコンクリート製造時の細骨材中の 0.15 mm 以下の成分比率は 2 から 10%であり、これを 10%と見積もると、5 mm アンダー粒径中の 0.15-5 mm の骨材成分の割合は  $63.2 \times (1 - 0.1)$  から約 57%となる。

### 3.3.3 試料の計量方法

粒径ごと(0.3-0.6 mm, 0.6-1.2 mm, 1.2-2.5 mm, 2.5-5 mm)に保管してある 5 mm アンダー試料は、使用する度に Table 3-3 または Table 3-5 の粒度分布が維持されるように量り取って混合し実験に用いた。

### 3.4 本研究で未使用の 5 mm アンダー中の小粒子について

本試験では試料 A の 0-0.3 mm、試料 B の 0-0.6 mm の成分については使用しないことになるが、コンクリートのトータルリサイクルを考える上でこれらの小粒子についても再資源化方法を検討する必要があるが、本研究では扱わないこととする。選択肢の一例として、試料 B の 0-0.6 mm の成分についてはカルシウムを多量に含むことから、既存の方法<sup>[1]</sup>による炭酸カルシウム製造の原料として用いることなどが考えられる。

### 3.5 結言

5 mm アンダーおよび再生骨材の品質評価は吸水率を指標として行うことを述べた。また本研究で使用した二種類の 5 mm アンダーのキャラクタリゼーションを行った。

### 参考文献

[1] Yasuro Katsuyama, Akihiro Yamasaki, Atsushi Iizuka, Minoru Fujii, Kazukiyo Kumagai, and Yukio Yanagisawa; Development of a Process for Producing High-Purity Calcium Carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) from Waste Cement Using Pressurized  $\text{CO}_2$ ; Environmental Progress, 24 (2005) 162-170



## 第4章 5 mm アンダーからの細骨材再生試験

### 4.1 緒言

本章では炭酸水処理を含むプロセスにより、第3章で述べた2種類の5 mm アンダー試料をからの細骨材再生試験を行った。骨材再生試験にあたっては、まず炭酸水処理のみを行い、必要と判断されれば適時機械的処理としてボールミル処理を組合わせて行った。

### 4.2 機械すりもみ式再生細骨材(試料 A)からの細骨材再生

#### 4.2.1 炭酸水処理

##### 4.2.1.1 炭酸水処理試験装置

炭酸水処理は、バッチ式高圧攪拌装置(Figure 4-1)を用いて行った。反応容器は耐腐食性に優れた Hastelloy 製とし、内容積は 1 L、使用上限圧力は 3 MPa であり、外部の循環装置によってジャケット内に熱媒を通すことで内部温度を一定に保つことができる。攪拌羽根は傾斜角 45 度の 2 枚パドル翼を、気相-液相および液相-固相の攪拌効率を高めるため回転軸の上部と下部それぞれに一枚ずつ取り付け付けた。装置下部には反応溶液採取口があり、焼結フィルターを通して抽出溶液のサンプリングを行うことができる。

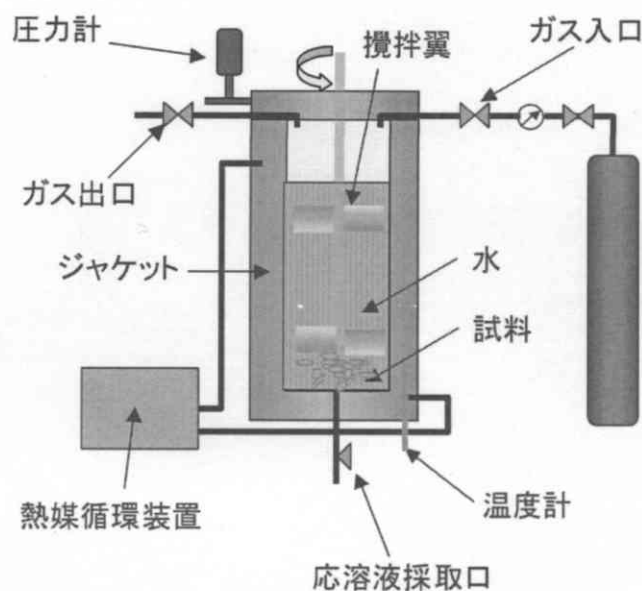


Figure 4-1 炭酸水処理で用いた攪拌装置の概略図

#### 4.2.1.2 炭酸水処理試験条件

炭酸水処理条件を Table 4-1 に示す。処理時間について 60 min 以上抽出を行う場合は、60 min 毎に水を交換するバッチ処理を繰り返した。例えば、処理時間 6 hr の場合は、60 min のバッチ処理を 6 回繰り返すことで行った。これらの条件検討については Appendix A を参照。

Table 4-1 炭酸水処理条件

| 処理条件              | 値       |
|-------------------|---------|
| 未処理 5 mm アンダー仕込み量 | 10 g    |
| 水仕込み量             | 800 mL  |
| 抽出温度              | 50 °C   |
| 攪拌速度              | 300 rpm |
| 二酸化炭素分圧           | 3 MPa   |
| バッチあたり処理時間        | 60 min  |

#### 4.2.1.3 炭酸水処理手順

炭酸水処理試験の手順は次の通り。

- ① 処理試験装置に所定量のイオン交換水、5 mm アンダー試料を仕込んだ後、蓋および攪拌翼を取り付ける。
- ② 処理装置内温度を所定温度に保ち、攪拌を開始すると同時に、ボンベから純度 100 % の CO<sub>2</sub> を吹き込み、容器内気相部を置換する。
- ③ 20 秒後にガス出口のバルブを密閉し、この時点を試験開始時間とする。攪拌中はガス入口を開放して二酸化炭素を供給することで、容器内圧力を所定気圧で保つ。
- ④ 反応溶液中のカルシウム濃度を測定するため、試験開始後、適当な間隔にて反応溶液を反応溶液採取口から径 50 μm の焼結フィルターを通して採取する。
- ⑤ 処理試験終了後、反応溶液と 5 mm アンダー試料を 0.15 mm の篩に空け、篩上の試料をイオン交換水ですすぎ、0.15 mm 以下の微粉末を除去する。
- ⑥ バッチ処理を繰り返し行う場合は、すすぎ終わった篩上の試料を再び処理装置に戻し手順①から⑤を繰り返す。処理を終了する場合は、プラスチック容器に回収し、上澄みを捨てたのち 80°C のオーブンにて乾燥する。
- ⑦ 乾燥して得られた 0.15 mm 以上の試料の重量を測定し、これを投入試料の重量で除し 100 を掛けた値を「収率」と定義する。試料は所定サイズのふるいに掛け、ふるい上に残ったものを「炭酸水処理試料」とする。
- ⑧ 試料はさらに篩がけして、処理前の粒径以下(試料 A の場合 0.3 mm 以下、試料 B の場合 0.6 mm 以下)の成分を除去し、Appendix B-2-2-2 の手順により吸水率を測定した。
- ⑨ 採取した反応溶液は、炭酸カルシウムの析出を防ぐために硝酸を添加し約 100-200 倍に希釈した後、高周波誘導結合プラズマ発光分析装置(日立製 P-4100 型)による濃度測定を行い、反応溶液中カルシウム濃度を算出する。

#### 4.2.1.4 炭酸水処理結果

試料 A の場合、炭酸水処理のみを 60 min 以上行うことで吸水率の JIS 基準 3.5% を達成する目標品質の再生細骨材を得ることができた。試料 A はカルシウム含有率が不明であるため、カルシウム抽出率が算出できない。白色であった試料表面は、炭酸水処理後には黒および茶に変色していた。本試料は、機械すりもみ処理によって粒子表面の摩耗は十分行われていると考えられる。それにも関わらず JIS 吸水率を達成できない理由は、機械処理では除去困難な部分、例えば骨材粒子表面の凹地などにセメント水和物が少量残存しているためと思われる。本試料に対する炭酸水処理は、このような少量のセメント水和物からカルシウム抽出を行うため短時間でそのほぼ全量が抽出され、その結果、水中攪拌作用によってセメント分残渣の除去が進んだものと思われる。収率は未処理 5 mm アンダーの場合(Figure 4-3)よりも良いが、これは炭酸水処理で失われるセメント水和物が、機械すりもみ処理によりすでに除去されていたためであると考えられる。

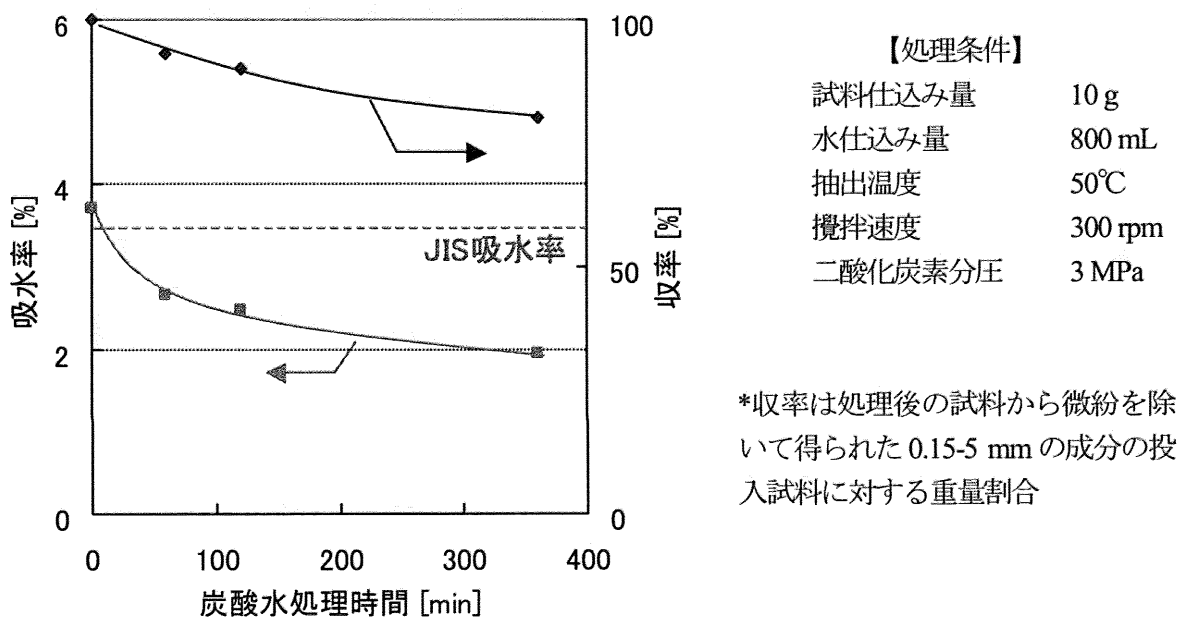


Figure 4-2 機械式すりもみ再生細骨に対する炭酸水処理結果

#### 4.2.2 まとめ

機械式すりもみ再生細骨材を炭酸水処理することで、JIS 吸水率 3.5% を下回るコンクリートに使用可能な細骨材を再生することができた。この結果から、既存の機械すりもみと炭酸水処理を組み合わせた新規な細骨材再生プロセスの開発が可能であることが示唆された。

### 4.3 未処理 5 mm アンダーからの細骨材再生試験

#### 4.3.1 炭酸水処理

##### 4.3.1.1 炭酸水処理装置

4.2.1.1 と同じとした。

##### 4.3.1.2 炭酸水処理条件

4.2.1.2 と同じとした。

##### 4.3.1.3 炭酸水処理手順

4.2.1.3 と同じとした。

##### 4.3.1.4 炭酸水処理結果

炭酸水処理による未処理 5 mm アンダー試料のカルシウム抽出率と吸水率および収率の評価を行った。実験結果を Figure 4-3 に示す。炭酸水処理を 360 min (60 min×6 回)行うことで、試料の含有カルシウムの 90%以上が抽出された。乾燥後の粒子の表面形状を SEM によって観察すると、炭酸水処理前(Figure 4-4 左)の表面は比較的緻密な凹凸を形成しているが、処理後(同 右)では起伏が目立ち、その表面構造変化が目視により確認される。処理後試料を目視にて観察すると、白色から茶色に変化することからも、カルシウム抽出によってセメント水和物の構造に変化が起こっていることが分かる。また抽出溶液中には茶色の微小粒子の沈殿が見られたが、これは試料に付着していた微粉やセメント水和物の一部が攪拌の水洗作用により脱離し、カルシウムが抽出されたものであると考えられる。

吸水率について見ると、炭酸水処理のみでは、未処理 5 mm アンダーから JIS 基準を満たす細骨材の再生が困難であることが示された。吸水率は抽出開始直後に大幅に低下しその後は横ばいとなる。抽出開始直後の急激な低下はセメント水和物の微粉が水洗いによって除去される効果が大いと考えられる。その後、カルシウムは大部分が抽出されるが吸水率は 10%前後で下げ止まる。このとき粒子表面にはカルシウム抽出後の茶色に変色したセメント水和物残渣が大量に付着しているが、これが吸水に大きく寄与していることが吸水率が大きい原因であると推察される。

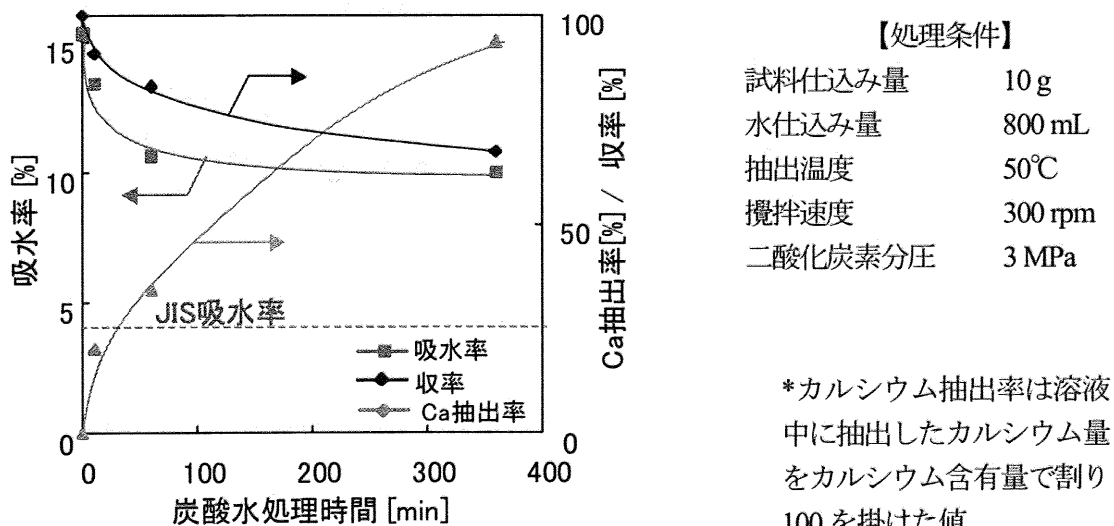


Figure 4-3 炭酸水処理によるカルシウム抽出率と吸水率の関係

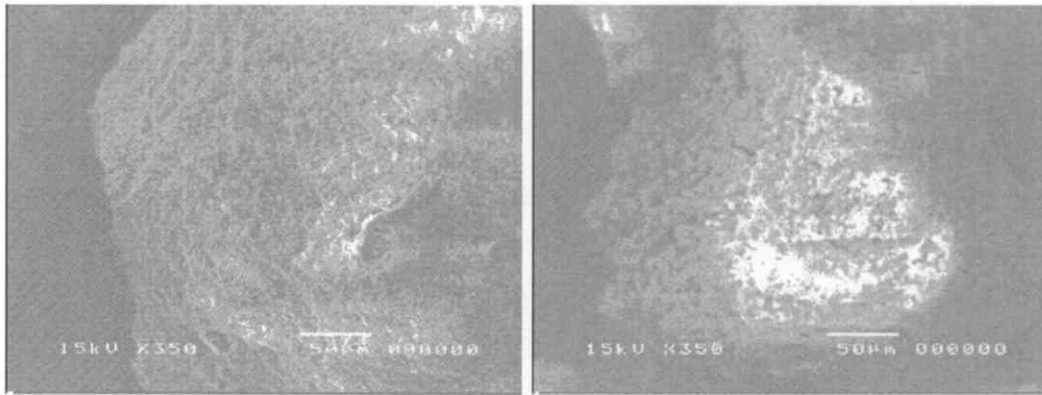


Fig.44 SEMによる炭酸水処理前後の試料Bの表面観察画像(350倍)  
炭酸水処理前(左)の表面は比較的緻密な凹凸を形成しているが、処理後(右)では起伏が目立つ

#### 4.3.15 炭酸水処理まとめ

炭酸水処理を繰り返し行うことで、未処理5mmアンダーの含有カルシウムの90%以上が抽出されるが、吸水率は10%程度で下げ止まることが示された。これは、カルシウムが抽出されたセメント水和物残渣が吸水に大きく寄与しているためであると考えられ、さらなる吸水率の低下のためには炭酸水処理だけでなく、機械的処理を組合わせてこの残渣を除去することが効果的であると考えられた。

### 4.3.2 ボールミル処理

炭酸水処理のみを行った場合、含有カルシウムの90%以上を抽出しても吸水率は10%程度で下げ止まることが示された。これはカルシウムの抽出されたセメント水和物残渣骨材表面に残存し、これが吸水に大きく寄与することに起因するものと考えられた。この残渣は炭酸水処理のみでは除去が困難であることから、本研究では機械的処理として実験室で簡便に実施可能なボールミル処理を行うこととした。ボールミルは円筒形の容器（ポット）に試料と破砕媒体であるボールを仕込み架台上で回転させることで、本来は試料を粉砕する装置であるが、ここでは試料の表面摩耗を目的として使用した。

#### 4.3.2.1 ボールミル処理条件

処理条件を Table 4-2 に示す。破砕媒体であるボールは、比重が大きく摩耗の少ないジルコニア (YTZ:  $Y_2O_3-ZrO_2$ 、密度  $6.0\text{ g/cm}^3$ ) 製のボールを、ポット容量 (0.4 L) に対する充填率が40%となるように仕込んだ。5 mm アンダー試料は、ボールの空隙体積に対する比率が十分小さくなる(0.1以下)量とした。また乾式粉砕では、生じた微粉体がミル壁や媒体表面に付着するコーティング現象により試料と微粉の分離が困難であると予想されたため、ポットに水を仕込み湿式にて処理を行った。

ボールの粒径についての検討は Appendix A を参照。

Table 4-2 ボールミル処理条件

|         |            |
|---------|------------|
| ポット容量   | 0.4 L      |
| 試料仕込み量  | 10 g       |
| 回転速度    | 100 rpm    |
| ボール(粒径) | YTZ(10 mm) |
| ボール仕込み量 | 544 g      |

#### 4.3.2.2 ボールミル処理手順

- ① 試料、ボールとイオン交換水 50 mL をポットミルに仕込んで蓋を閉め、架台上で所定時間回転させる。
- ② 内容物をふるい上に空け、イオン交換水で洗浄しながら試料とボールを分離する。
- ③ 分離した試料はさらにイオン交換水で洗浄して粒径 0.15 mm 以下の微粉を分離する。また、微粉を含むスラリーは吸引ろ過により  $0.45\ \mu\text{m}$  のメンブレンフィルター上に捕集する。試料・微粉はそれぞれ  $80^\circ\text{C}$  で乾燥させる。
- ④ 乾燥後に得られる試料(0.15-5 mm)を「ボールミル処理試料」とし、この重量を投入試料の重量で除し 100 を掛けた値を「収率」と定義する
- ⑤ 微粉は乳鉢を用いて粉砕したのち、エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置(日本電子製 JSX-3220 エレメントアナライザ)により元素分析を行う。

### 4.3.2.3 ボールミル処理結果

#### 4.3.2.3.1 粒径 10 mm の YTZ ボールを用いた場合

粒径 10 mm の YTZ ボールを用いた処理で得られた試料の吸水率および収率と粒径別重量割合をそれぞれ Figure 3-5 および 3-6 に示す。処理開始後、収率は短時間のうちに大きく低下したのち、6 hr まで緩やかに減少を続けた。吸水率の低下は 60 min 程度で下げ止まり、その後 6 hr までは約 5% で横ばいとなる(Figure 4-5)ことから、処理の初期においてはセメント水和物が優先的に、そして後半においてはセメント水和物と骨材がほぼ同じ割合で粉砕されていると推察される。

ボールミルの粒径別の処理効果(Figure 4-6)をみると、試料の減少する割合は粒径に異なる傾向がみられる。これを試料中の重量割合(Figure 4-7)に変換すると、粒径 0.6-1.2 mm の粒子に対する粉砕効果が大きく、処理に伴って試料中の相対的な割合が低下する一方、大粒径のものに対する粉砕効果は小さく、その試料中に占める割合が増加していることが分かる。処理前には含まれていない粒径 0.15-0.6 mm の粒子は処理開始後に出現するが、その存在比は徐々に低下してゆく。この成分は、粉砕による大粒子の小粒径シフトによって生成する傍らで微粉に粉砕されており、処理の初期においては大粒子からの供給速度が大きいため試料中の割合が高まるが、時間とともに供給速度が減少しその存在比が低下するものと考えられる。

ボールミル処理による粒子の小粒径シフトのメカニズムについて考察する。5 mm アンダー粒子は、はじめ表面付近の構造的に強度の低いセメント水和物が除去されるため急速に小粒径シフトが進むが、この部分が除去された骨材とセメント水和物は粉砕されにくいいため、粒径の減少速度は大幅に減少し、かつセメント水和物と同時に骨材も粉砕により徐々に失われていく。粒子の粒径が 1.2 mm 程度以下になると、粒子が受け取る単位体積あたりの力積が骨材を破砕する十分な大きさに達し、急激に微粉化が進行するものと考えられる。

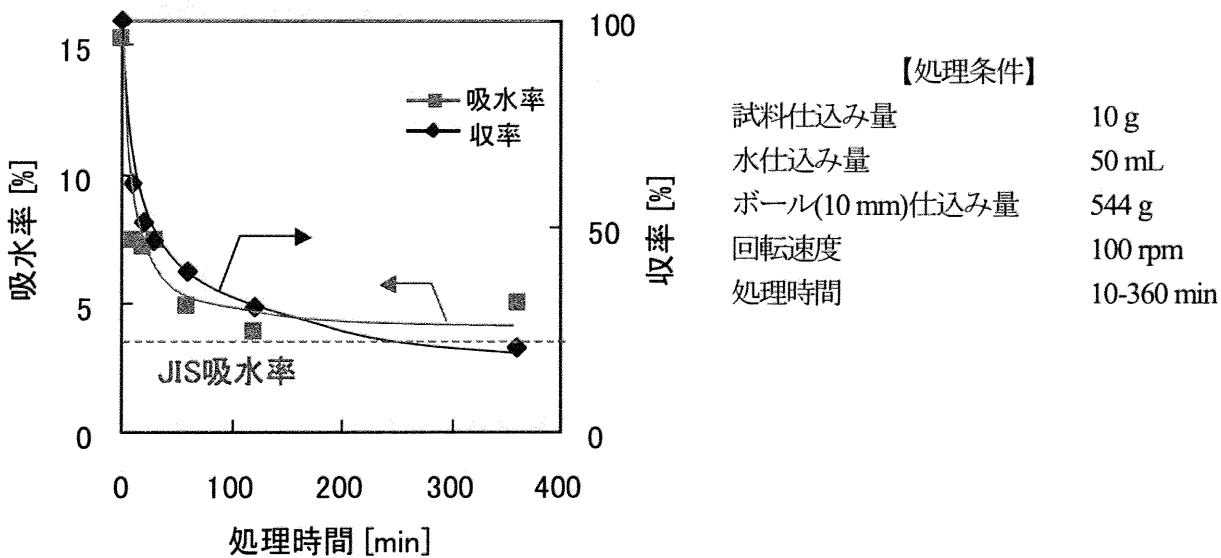


Figure 4-5 10 mm のボールを用いたボールミル処理結果

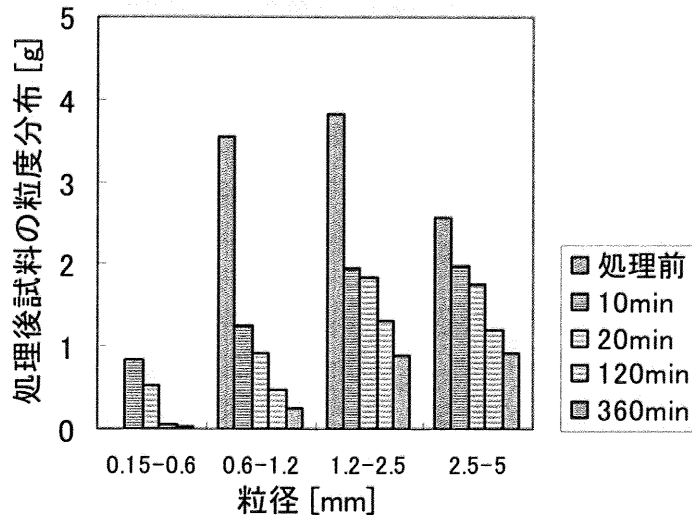


Figure 4-6 10 mm のボールを用いたボールミル処理後試料の粒度分布

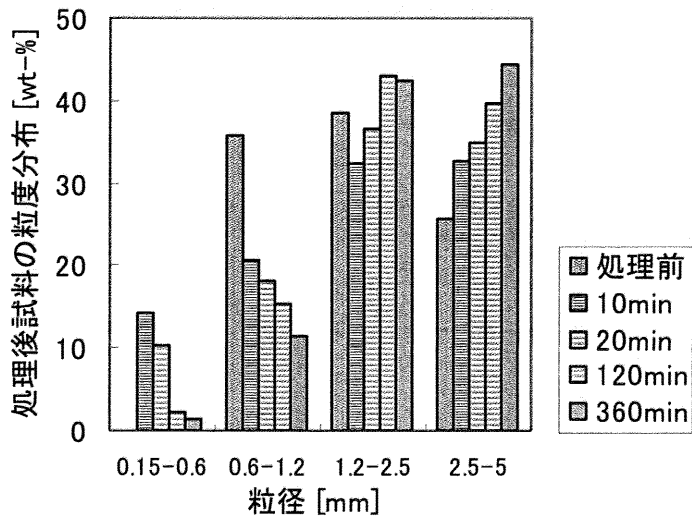


Figure 4-7 10 mm のボールを用いたボールミル処理後試料の粒度分布(処理後試料全量に対する各粒径成分の重量比)

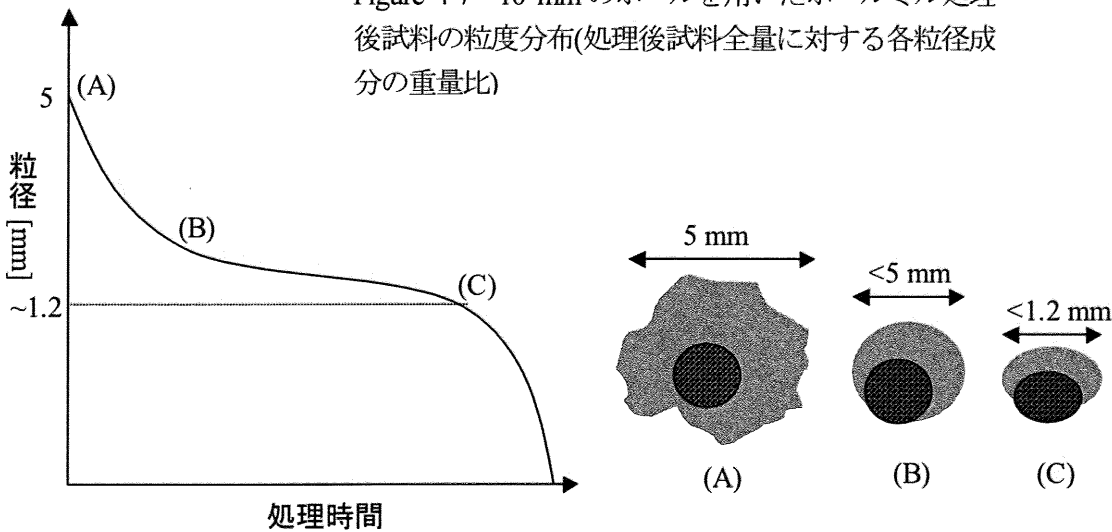


Figure 4-8 ボールミル処理による粒子破碎の時間変化。ここでは粒径 5 mm の粒子を処理した時の収率の時間変化。(A)は処理前の試料。処理によって構造的な強度の弱いセメント水和物が除去され(B)のような状態となった粒子は、セメント水和物が徐々に失われる過程を経て粒径がおよそ 1.2 mm 以下となった時点で急激に粉碎が進む。



#### 4.3.2.3.2 微粉末のキャラクタリゼーション

コンクリートのトータルリサイクルを考える上で、骨材再生に伴って大量発生する微粉の有効利用は重要であり、そのためには化学組成は重要な情報である。また、微粉に含まれる骨材成分量から処理の粉砕効果に関する情報も得られるが、これはボールミル処理条件を最適化する有用な知見になることが期待される。

ここでは、未処理 5 mm アンダーを 10 mm のボールで処理した際に発生する微粉をエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置(EDXRF)を用いて元素分析を行った。また処理は水を加えず乾式で行った。

微粉の元素分析結果(Table 4-3)をポルトランドセメントの含有元素(Table 4-4)と比較すると、珪素分と鉄分の割合が多いことが分かる。珪素分は、骨材成分の混入に起因し、鉄分はコンクリートに使用された鉄筋に由来するものと予想される。また、ポルトランドセメントのカルシウム含有率は 46%であるが、セメント/水比=2 でコンクリートを製造したと仮定すると、微粉が骨材成分を含まずセメント水和物のみを含んでいた場合のカルシウム含有率は  $46 \times 2/3 = 36\%$  となるはずである。測定したカルシウム含有率は 15%であることから、微粉中の骨材推定含有率は  $1 - 15/36 = 58.3\%$  となる。

Table 4-3 ボールミル処理で発生する微粉の含有比(全体に対する重量比) [%]

| Al  | Si   | Ca   | Fe   | K  | S  | Mg |
|-----|------|------|------|----|----|----|
| 5.2 | 37.8 | 15.0 | 3.80 | nd | nd | nd |

Table 4-4 ポルトランドセメント中含有元素(全体に対する重量比) [%]

| Al  | Si  | Ca   | Fe  |
|-----|-----|------|-----|
| 2.6 | 9.8 | 46.0 | 1.9 |

#### 4.3.2.4 ボールミル処理まとめ

粒径 10 mm の YTZ ボールによるボールミル処理は、5 mm アンダー試料中の粒径 1.2 mm 以下の成分に対する粉砕効果が大きいことが示された。本研究におけるボールミル処理の役割は、骨材ではなくカルシウム抽出により強度の低下したセメント水和物残渣を粉砕することである。

4 種類のボールを検討した結果、粒径が 10 mm 未満のボールの破砕効果は極めて弱い(Appendix A を参照)。また粒径が 10 mm を越えるボールでは、骨材成分の粉砕がさらに進むと予想されたため、本研究では粒径 10 mm の YTZ ボールを用いることとした。

また処理により発生する微粉には骨材成分が全体の約 58%を占めることが推定された。

### 4.3.3 炭酸水およびボールミルの複合処理

#### 4.3.3.1 緒言

本節では、先に述べた実験条件で炭酸水処理とボールミル処理を組合わせて行い、未処理 5 mm アンダーから JIS 吸水率 3.5% を下回る細骨材を再生するプロセス設計を行った。

#### 4.3.3.2 検討プロセス①

##### 4.3.3.2.1 プロセスフロー

炭酸水処理でカルシウム抽出後に粒子表面に残存し、吸水に大きく寄与すると考えられるセメント水和物残渣を、機械的処理によって除去するために、炭酸水処理に続いてボールミル処理を行うプロセスを設計した。それぞれの処理時間については、まずこれらの組合わせ処理による骨材再生の可否を明らかにし、今後の実験条件最適化における処理時間の上限を設定するため、過剰と思われる時間を設定した。

プロセス①： 炭酸水処理 + ボールミル処理

##### 4.3.3.2.2 処理方法および手順

炭酸水、ボールミルの処理方法および手順は Table 4-2 および 4-3 同じとした。

##### 4.3.3.2.3 プロセス①による試験結果と考察

プロセス①による試験結果を Table 4-5 の試料 ID 4-3 に示す。炭酸水処理によってカルシウムの 90% 以上を抽出した後にボールミル処理を行うことで、カルシウムの抽出されたセメント分残渣が除去され吸水率は 5.3% まで低下した。しかし、この処理後試料を目視にて観察すると、骨材表面に炭酸水と未反応の白色のセメント水和物が確認され、これは炭酸水が粒子内部まで進行していないことを示していると考えられた。このプロセスにおいてボールミル処理または炭酸水処理をより長時間行うことは非効率的であると考え、次に炭酸水処理に先立ってある程度セメント水和物を除去するプロセスを検討した。

試験 ID 4-1 および 4-2 は炭酸水処理およびボールミル処理をそれぞれ単独で行ったときの結果である。ID 4-2 における吸水率が 4-3 を下回っている理由としては、ボールミル処理が過剰で炭酸水処理の効果が現れにくかったことの他に、吸水率の測定誤差、処理のバラツキが考えられる。

Table 4-5 プロセス①による処理結果

| 試験 ID | 処理方法                   | 吸水率 | 収率[%] |
|-------|------------------------|-----|-------|
|       | C: 炭酸水処理               | [%] |       |
|       | B: ボールミル処理             |     |       |
| 4-1   | C (1 h×6)              | 10  | 67.0  |
| 4-2   | B (60 min)             | 4.9 | 39.0  |
| 4-3   | C (1 h×6) + B (60 min) | 5.2 | 30.2  |

### 4.3.3.3 検討プロセス②

#### 4.3.3.3.1 プロセスフロー

検討プロセス①では炭酸水処理が粒子内部に十分浸透しないことが、吸水率が十分低下しない原因であると考えられたため、ここでは炭酸水処理に先立ってボールミル処理を行ってある程度セメント水和物を除去するプロセスを設計した。炭酸水処理時間およびボールミル処理時間は、プロセス全体としては①の場合と等しくなるようにし、これを検討プロセス②とした。プロセス②において他のボールを用いた場合や、ボールミル処理時間を変えた場合の結果は Appendix A を参照。

プロセス②： ボールミル処理 + 炭酸水処理 + ボールミル処理

#### 4.3.3.3.2 処理方法および手順

炭酸水、ボールミルの処理方法および手順は Table 4-2 および 4-3 に同じとした。

#### 4.3.3.3.3 プロセス②による試験結果と考察

結果を Table 4-6 に示す。炭酸水処理に先立ってある程度セメント水和物を除去しておくプロセス②では、JIS 吸水率をクリアする吸水率 2.6%の再生細骨材が得られることが示された。プロセス②による骨材再生のメカニズムについて考察すると(Figure 4-9)、まず一回目のボールミル処理(ボールミル①)によって粒子表面付近の凹凸に富んだ物理的強度の弱いセメント水和物が除去され、その結果吸水率は低下し、またセメント水和物に含まれる形でカルシウムも除去されるためカルシウム抽出率は上がる。続く炭酸水処理では残ったセメント水和物に含有されるカルシウムの大部分が抽出され抽出率は 100%に近づくが、セメント水和物残渣が付着しているため吸水率はほとんど低下しない。この残渣は二回目のボールミル処理(ボールミル②)で除去されるため、最終的に低吸水率の再生骨材が得られる。また、この時の収率 30.1%は、処理前の試料 B に含まれていた骨材量に対する収率としては約 50%である。またバッチ処理ごとのカルシウム抽出率は Table 4-7 のようになり、1 回目のボールミル処理でセメント水和物の多くが除去されているため、未処理 5 mm アンダーに炭酸水処理のみを行った場合(Figure 4-3)と比べてカルシウム抽出率が低くなっていることが分かる。

Table 4-6 プロセス②による処理結果

| 試験 ID | 処理方法                                  | 吸水率 | 収率[%] |
|-------|---------------------------------------|-----|-------|
|       | C: 炭酸水処理                              | [%] |       |
|       | B: ボールミル処理                            |     |       |
| 4-4   | B (30 min) + C (1 h × 6) + B (30 min) | 2.6 | 30.1  |

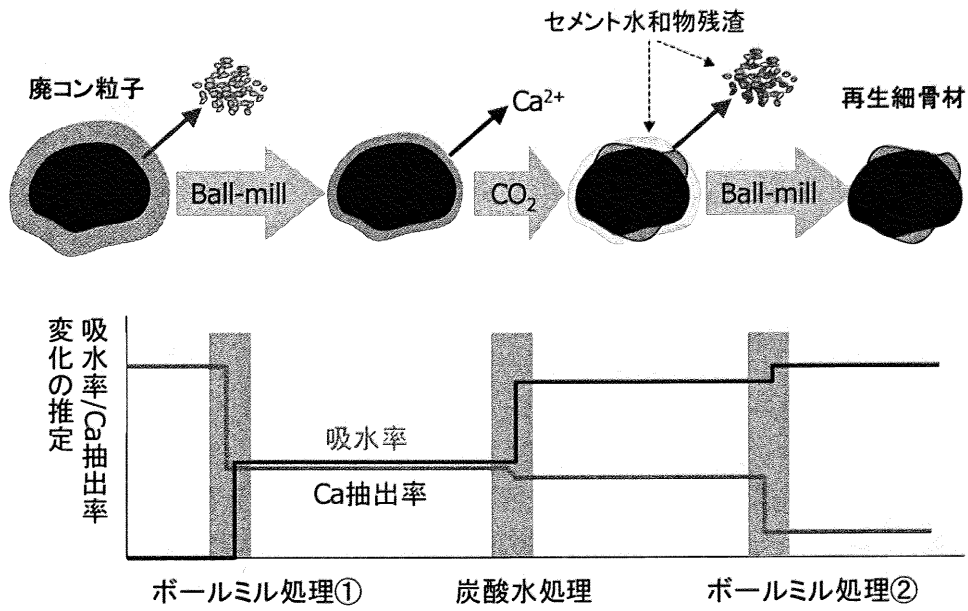


Figure 4-9 プロセス②による 5 mm アンダーからの細骨材再生の各工程における吸水率と Ca 抽出率の変化

Table 4-7 炭酸水処理抽出溶液中 Ca 濃度

| バッチ処理回数 | 抽出溶液中 Ca 濃度          |                  |
|---------|----------------------|------------------|
|         | 抽出溶液中 Ca 濃度<br>[ppm] | 累積 Ca 抽出率<br>[%] |
| 1       | 137                  | 12.5             |
| 2       | 52                   | 17.2             |
| 3       | 33                   | 20.2             |
| 4       | 27                   | 22.6             |
| 5       | 23                   | 24.7             |
| 6       | 17                   | 26.3             |

#### 4.3.3.4 複合処理まとめ

炭酸水処理後にボールミル処理を行うプロセス①で、カルシウムの抽出されたセメント分残渣が除去され吸水率は大きく低下したが、処理後試料の骨材表面には炭酸水と未反応のセメント分が認められた。これは試料Bのように多量のセメント分が付着した試料では、炭酸水中の攪拌処理のみで骨材表面付近のセメント分から含有カルシウムを完全に抽出することは困難で、何らかの処理を追加する必要があることを示している。この対策としては、本試験で行った前処理でセメント分をある程度除去するプロセス②が有効であることを示した。この他に、炭酸水処理と機械処理を繰り返す、炭酸水処理と機械処理を同時に行う、などの方法が有効であると考えられるが、今後の検討課題である。

#### 4.4 結言

セメント水和物の付着量が少ない機械すりもみ式再生細骨材に対しては、炭酸水処理のみを行うことでJIS吸水率3.5%を達成する細骨材が再生された。

一方、セメント水和物付着量の多い未処理5mmアンダーに対する炭酸水処理では、カルシウム抽出後のセメント水和物残渣が粒子表面に残存するため吸水率は10%程度で下げ止まることが分かった。この残渣は炭酸水処理のみでは除去されにくく、吸水率をさらに低下させるためには、機械的処理を組み合わせることが必要であることが示された。

炭酸水処理とボールミル処理の複合処理として、ボールミル処理(30 min)→炭酸水処理(60 min×6回)→ボールミル処理(30 min)というプロセスにより、未処理5mmアンダーからJIS吸水率3.5%を満たす細骨材が再生された。

#### 参考文献

- [1] 飛坂基夫:高強度コンクリートに関する圧縮強度および静弾性係数に及ぼす骨材の影響; セメント・コンクリート, 394 (1979) 30-33
- [2] 飯塚淳、藤井実、山崎章弘、柳沢幸雄; 廃コンクリートを用いた新規な二酸化炭素固定プロセス; 化学工学論文集, 28 (2002) 587-592

## 第5章 細骨材再生プロセスのエネルギー/コスト評価手法の構築

### 5.1 緒言

第4章では発生経路の異なる二種類の5 mm アンダー試料「機械すりもみ式再生細骨材(試料 A)」と「未処理5 mm アンダー(試料 B)」から、炭酸水処理とボールミル処理を組合わせた処理によって JIS 吸水率を満たす細骨材が得られることを実験的に示した。既存の骨材再生処理は天然骨材を発掘する場合と比較して製造に手間がかかるため割高となり、現在は骨材再生プロセスを大規模に行うための経済的インセンティブが存在しない。しかし、将来的には資源の枯渇および廃コン発生量の増大に伴う骨材価格および5 mm アンダーの処理費用の増大から骨材再生プロセスが積極的に実施され得るものと予想される。とはいえ、本プロセスを利用した骨材再生に必要なエネルギーが極端に大きく、コストが市場価格を大きく上回れば、例え技術的な優位性を有したとしても実用上の有用性は低下する。

本章では本プロセスによる骨材再生処理のコスト/エネルギーを評価するプラットフォームを構築する。本手法は、プロセスの評価のみならず処理条件緩和(最適化)の方向性を検討するツールとして用いることも想定する。

### 5.2 プロセスのエネルギー評価手法の開発

#### 5.2.1 計算の前提

##### 5.2.1.1 プロセスの範囲

エネルギー評価は二酸化炭素分離回収・圧縮工程および骨材再生工程から構成されるプロセスを想定した(Figure 5-1)。原料・生成物の輸送、処理で発生する微粉の処理、排水処理は範囲外とした。処理フィールドは二酸化炭素集中発生源である火力発電所近郊とし、廃熱利用が可能であるとした。なお、Figure 5-1 に示したフローは試料 B に対するプロセスであり、炭酸水処理のみで骨材再生が可能な試料 A に対してはこれよりボールミル処理を含まないプロセスを想定した。

##### 5.2.1.2 プロセスのフロー

###### 5.2.1.2.1 未処理5 mm アンダー (試料 B)

プロセスでは年間6万トンの未処理5 mm アンダーから細骨材再生を行うと想定する。これは、国内で発生する廃コンを全国の都道府県ごとに設置された3箇所の処理場に均等配分して、既存技術で骨材再生処理を行い、このとき廃コンの20%が5 mm アンダーとなって回収されると仮定した時の量である。プロセスは1日24時間で年間300日稼働させると仮定し、時間あたりの処理量を8333 kg/hrとした。投入試料に対する細骨材の回収率は30%とし、そのほかの各工程における収率、カルシウム抽出率は第4章の実験データを使用した。

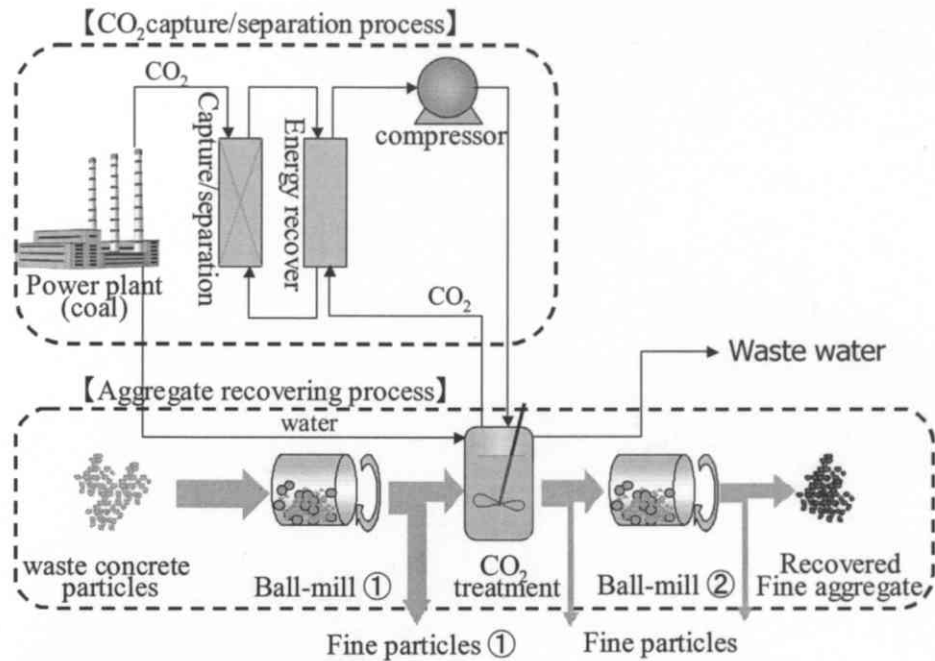


Figure 5-1 エネルギー評価を行う細骨材再生プロセスの範囲

Table 5-1 想定するプロセスのマテリアルフロー(試料B)

|             | 未処理 5 mm アン<br>ダー投入量<br>[kg/hr] | ボールミル①<br>[kg/hr] | 炭酸水処理量<br>[kg/hr]  | ボールミル②<br>[kg/hr] | 再生細骨材回<br>収量[kg/hr] |
|-------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| 各工程後の収率 [%] | 100                             | 46.5              | 38.1               | 30.1              | 30.1                |
| 各工程後の収量     | 8333                            | 3875              | 3177               | 2510              | 2510                |
| 微粉発生量       | -                               | 4458              | 549                | 667               | -                   |
| カルシウム抽出量    | -                               | -                 | 149                | -                 | -                   |
| 二酸化炭素分離回収量  | -                               | -                 | 177                | -                 | -                   |
| 二酸化炭素圧縮量    | -                               | -                 | 87564              | -                 | -                   |
| 使用水量        | -                               | 1042              | 40380 <sup>1</sup> | 397               | -                   |

1 炭酸水処理では水の一部を入れ替つつ循環利用すると仮定したため、ここでの使用水量は実際に抽出に使用する量の 1/100 である。

2 試料 A については 5.2.1.2.2 節を参照

### 5.2.1.2.2 機械すりもみ式再生細骨材 (試料 A)

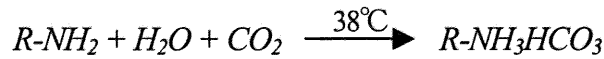
本試料については、本プロセスの前処理に相当する機械すりもみ式骨材再生装置におけるマテリアルフローが不明であるため、未処理 5 mm アンダーと同じ年間 60000 t から、収率 83% で再生細骨材を得るフローを想定した。

## 5.2.2 計算方法

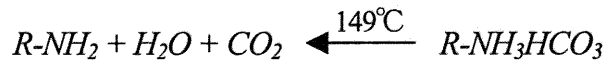
細骨材再生プロセスのエネルギー消費量を工程ごとに述べる。

### 5.2.2.1 二酸化炭素回収工程

プロセスで使用する高純度の二酸化炭素は、火力発電所の煙道ガスからアルカノールアミンを使った化学吸着法で回収するとした。アルカノールアミン法は実施例が極めて多く、実際に多数のプラントが稼働している<sup>[1]</sup>。この反応では、以下の反応<sup>[2]</sup>により、煙道ガス中の二酸化炭素をアルカノールアミンに化学吸着する。



吸着した二酸化炭素は次の反応で回収される。



二酸化炭素の分離回収で消費されるエネルギーはガス回収量に係数(815 kW/t-C)<sup>[3]</sup>を乗じることで算出した。二酸化炭素の回収量は、炭酸水処理終了後抽出溶液を大気圧下に開放した際に溶存している二酸化炭素種( $\Sigma CO_2 = [CO_2] + [H_2CO_3] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}]$ )の飽和溶解量とし、4038000 kg/hr(水量)  $\times$  0.0010 mol/kg  $\times$  44 g/mol(50°C・0.1 MPa における飽和溶解量)で算出した。減圧時に放出されるガスについては回収し循環利用するとした。ただし、このとき回収した二酸化炭素からの水蒸気除去などについては考慮しなかった。

消費エネルギー：

815 [kWh/t-C] (回収装置に必要な熱量)  $\times$  12/44 [t-C/t-CO<sub>2</sub>]  $\times$  4038 [m<sup>3</sup>/hr] (水量)  $\times$  0.0010 [mol/L] (50°C・0.1 [MPa]における飽和溶解量)  $\times$  44 [g/mol-CO<sub>2</sub>]  $\times$  3.6 [MJ/kWh]

### 5.2.2.2 二酸化炭素圧縮工程

二酸化炭素圧縮のために必要なエネルギーの算出方法は、理想気体を想定した等温圧縮に効率 0.9 を乗じることで算出した。理想気体の効率 100% の圧縮エネルギーは、1 mol あたり

$$E_{comp} = RT \ln \frac{p_1}{p_0}$$

で与えられるとした。ここで、R は気体定数、T は絶対温度、 $p_0$  および  $p_1$  はそれぞれ圧縮前および圧縮後の圧力である。炭酸水処理後は圧力エネルギーを効率 0.9 で回収できるとした。二酸化炭素圧縮量  $n_{CO_2}$  は抽出溶液への溶解する CO<sub>2</sub> 種濃度( $\Sigma CO_2$ )とし、次式により算出した。

$$n_{CO_2} = \Sigma [CO_2]_{sat} \cdot \frac{[Ca]}{[Ca]_{sat}} m$$



ここで  $\Sigma[CO_2]_{sat}$  は平衡到達時の溶液中  $CO_2$  種濃度、 $[Ca]$  は処理終了時点でのカルシウム濃度、 $[Ca]_{sat}$  は平衡到達時のカルシウム濃度、 $m$  は水量である。また圧縮に必要なエネルギーは電力によって供給されるとした。

### 5.2.2.3 炭酸水処理工程

炭酸水処理工程で消費するエネルギーは、抽出溶液の攪拌に要する電力と抽出溶液の加熱に必要な熱に分けられる。

後者は  $50^\circ C$  と低温であるため発電所の排熱利用が可能であるとし 0 と見積もった。

抽出溶液の攪拌に必要な電力は、次の式で見積もった。

$$P[W] = N_p \rho n^3 d^5$$

ここで、 $N_p$  は動力数と呼ばれる無次元数、 $\rho$  は溶液の密度、 $n$  は攪拌速度、 $d$  は攪拌翼径である。 $N_p$  は攪拌槽および攪拌翼に依存する定数であり、永田の式と呼ばれる経験式から見積もった。永田の式は攪拌装置における動力数  $N_p$  と呼ばれる定数を求めるための経験式で、次のように表される。

$$N_p = A/Re + B((1000+1.2Re^{0.66})/(1000+3.2Re^{0.66}))P(Z/D)^{(0.35+b/D)}(\sin \theta)^{1.2}$$

ここで定数  $A$ 、 $B$ 、 $P$  はそれぞれ

$$A = 14 + (b/D)(670(d/D-0.6)^2 + 185)$$

$$B = 10^{(1.3-4(b/D-0.15)(b/D-0.15)-1.14(d/D))}$$

$$P = 1.1 + 4(b/D) - 2.5((d/D) - 0.5)^2 - 7(b/D)^4$$

ただし  $b$  は翼高、 $d$  は翼径、 $D$  は容器径、 $Z$  は容器高、 $\theta$  は羽角度[度]、 $Re$  は攪拌レイノルズ数である。

攪拌速度のスケールアップに関しては、単位水量あたりの動力数が実験機と等しくなるように算出した。これは、カルシウム抽出反応においては試料の界面物質移動速度が重要であるため、乱流場のマイクロ混合を一定とするスケールアップ方法である。炭酸水処理塔の基数はバッチ処理回数と同基数で並列処理するとし、バッチ処理毎に行う水・試料交換の所要時間は 30 分と仮定した。

### 5.2.2.4 ボールミル処理工程

ボールミルで消費されるエネルギーは、装置の稼働に必要な電力として算出した。計算はスペック既知のボールミル装置（栗本鉄工所株式会社製、消費電力 35.8 kW、定格処理量 3500 kg/h）にべき乗則を用いて次のように算出した。

$$35.8 \text{ [kW]} (\text{装置の消費電力}) \times ((5 \text{ mm アンダー処理量 [kg/h]} + \text{水量 [kg/h]}) / 3500 \text{ [kg/h]})^{0.7}$$

### 5.2.3 計算結果

計算結果は工程ごとに再生細骨材 1 t あたりのエネルギー消費量として表した。またプロセス全体からの排出される二酸化炭素量についても同様に再生細骨材 1 t あたりの量として算出した。二酸化炭素の排出原単位は電力が 0.378 kg/kWh、加熱は軽油を用いるとして 0.0687 kg- $CO_2$ /MJ をそれぞれ用いた。

Table 5-2 プロセスのエネルギー消費量

| 工程                                      | 試料 A             |     | 試料 B             |    |
|---|------------------|-----|------------------|----|
|   | 電力<br>[MJ/t-細骨材] | 熱   | 電力<br>[MJ/t-細骨材] | 熱  |
| CO <sub>2</sub> 分離回収                    | -                | 3   | -                | 56 |
| CO <sub>2</sub> 圧縮                      | 5                | -   | 536              | -  |
| 炭酸水処理                                   | 33               | 0   | 638              | 0  |
| ボールミル                                   | -                | -   | 96               | -  |
| 合計エネルギー消費量                              | 83               | 3   | 1270             | 56 |
| 二酸化炭素発生量<br>[kg-CO <sub>2</sub> /t-細骨材] | 9                | 0.2 | 134              | 4  |

この結果から、処理時間が短く収率の高い機械すりもみ式再生細骨材(試料 A)からの骨材再生に必要なエネルギーは少ないが、処理時間が長く低収率な未処理 5 mm アンダー(試料 B)については多量のエネルギーが必要となることが示された。また試料 B についての試算結果を工程別にみると、炭酸水処理と二酸化炭素圧縮に必要なエネルギーが大半を占めていることが分かる。

#### 5.2.4 加熱すりもみ処理との比較

Table 5-2 の結果が細骨材再生プロセスとして許容できるのか、もしできなければどの程度まで削減する必要があるのかを評価するためには、何らかの基準が必要である。細骨材の再生例はまだ少ないため適当な対象を選定することが困難であるが、ここでは既存技術の一つである加熱すりもみ処理を取り上げ参考としての比較を行う。加熱すりもみ処理は現在細骨材の再生が可能な唯一の技術であるとされているが、原料や生成物が本プロセスと異なる。相違点をまとめると次のようになる。

Table 5-3 本研究のプロセスと加熱すりもみ処理の相違点

|     | 本プロセス(試料 A)            | 本プロセス(試料 B)            | 加熱すりもみ処理 |
|-----|------------------------|------------------------|----------|
| 原料  | 低セメント分含有率<br>5 mm アンダー | 高セメント分含有率<br>5 mm アンダー | 廃コン塊     |
| 生成物 | 細骨材                    | 細骨材                    | 粗骨材・細骨材  |

加熱すりもみ処理で廃コン塊 1000 kg から粗骨材 350 kg と細骨材 300 kg を再生した場合、電力 29 kWh と灯油 8 kg を消費すると報告されている<sup>[4]</sup>。このデータから粗・細骨材 1 トンあたりの消費エネルギーおよび二酸化炭素発生量を計算すると次のようになる。ここで灯油の比重=0.7、燃焼熱=37MJ/L、二酸化炭素排出原単位=0.0687 kg-CO<sub>2</sub>/MJ を計算に用いた(Table 5-4)。

Table 5-4 加熱すりもみ処理における細骨材再生エネルギー

|                   | 電力量 | 熱量  | 単位                        |
|-------------------|-----|-----|---------------------------|
| 電力 29kWh          | 104 | -   | MJ                        |
| 灯油 8kg            | -   | 373 | MJ                        |
| 合計消費エネルギー         | 104 | 373 | MJ                        |
| 細骨材 1t あたり消費エネルギー | 161 | 573 | MJ/t-細骨材                  |
| 同 二酸化炭素発生量        | 17  | 39  | kg-CO <sub>2</sub> /t-細骨材 |

この結果を本研究のプロセスと比較すると(Figure 5-2、5-3)、骨材再生に必要なエネルギーは機械すりもみ式再生細骨材(試料 A)については加熱すりもみ処理と比較してかなり小さいものの、未処理 5 mm アンダー(試料 B)についてはその 2 倍近くとなった。二酸化炭素排出量もこれとほぼ同様の結果だが、電力消費量の多い試料 B で二酸化炭素の発生量が多くなっている。Table 5-3 で述べたそれぞれのプロセスの処理条件(バウンダリー)の違いによりこれらの数値の優劣の判定は困難であるが、試料 B については既存の骨材再生技術と比べて消費エネルギーは大きく、これを削減するために処理条件を検討する必要があると考えられる。一方、試料 A の消費エネルギーは評価に前処理の機械的すりもみ処理を含んでいないため過小評価していると考えられるが、一般に機械的な処理は消費エネルギーが小さいため、骨材再生プロセス全体で比較しても加熱すりもみ処理より省エネルギーなプロセスであると思われる。

### 5.2.5 エネルギー評価手法のまとめ

発生経路の異なる二種類の 5 mm アンダー試料からの細骨材再生プロセスのエネルギー評価を行った。機械すりもみ式再生細骨材(試料 A)については、既存の骨材再生技術である加熱すりもみ処理による骨材再生と比較して少ない投入エネルギーで骨材再生が可能であるが、未処理 5 mm アンダー(試料 B)では消費エネルギーが 2 倍近くとなった。試料 B の骨材再生プロセスを工程別にみると、炭酸水処理および二酸化炭素圧縮工程が占める割合が大きいことが示された。

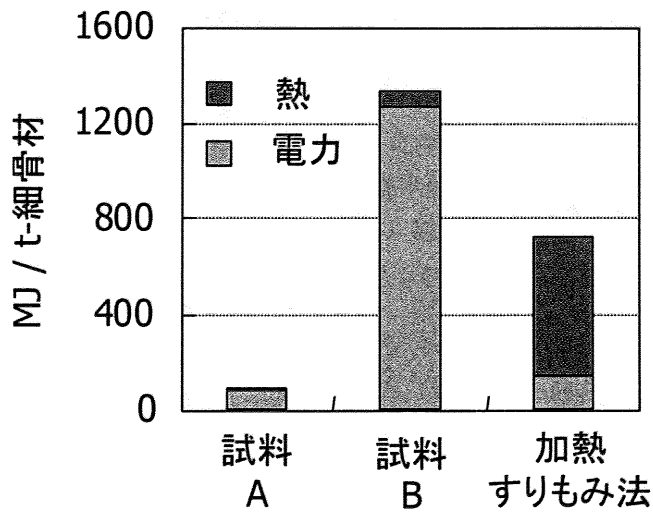


Figure 5-2 試料 A、B からの細骨材再生処理における再生細骨材 1 トンあたりの消費エネルギー比較

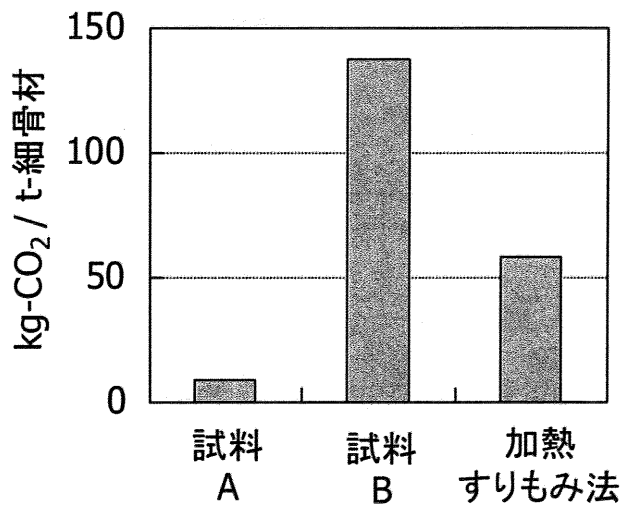


Figure 5-3 試料 A、B からの細骨材再生処理における再生細骨材 1 トンあたりの二酸化炭素排出量比較

### 5.3 細骨材再生プロセスのコスト評価手法の開発

実験データを用いて機械すりもみ式再生細骨材および未処理 5 mm アンダーからの骨材再生コスト試算を行った。計算結果は、各工程のイニシャルコストである設備費(材料費、建設費、購入費など)、および運転費(電気代・水道費)、その他の人件費・輸送費などをそれぞれ個別に算出し、再生細骨材 1tあたりの製造費として算出した。またボールミル処理で発生する微粉から炭酸カルシウムの製造販売、そのときの二酸化炭素固定に伴う炭素税による収入を考慮するケースを検討した。

#### 5.3.1 計算の前提

##### 5.3.1.1 計算の範囲

コスト試算の対象は、炭酸水処理およびボールミル処理による骨材再生工程、火力発電所煙道ガスからの二酸化炭素分離回収・圧縮工程の他に、排水処理、5 mm アンダー原料と再生細骨材の輸送を含む範囲とし、さらに検討ケースではボールミル処理①で発生する微粉①からの炭酸カルシウムの製造・販売を含めた(Figure 5-4)。また人件費やサイロ、作業現場で使用する重機類の費用などについても考慮した。

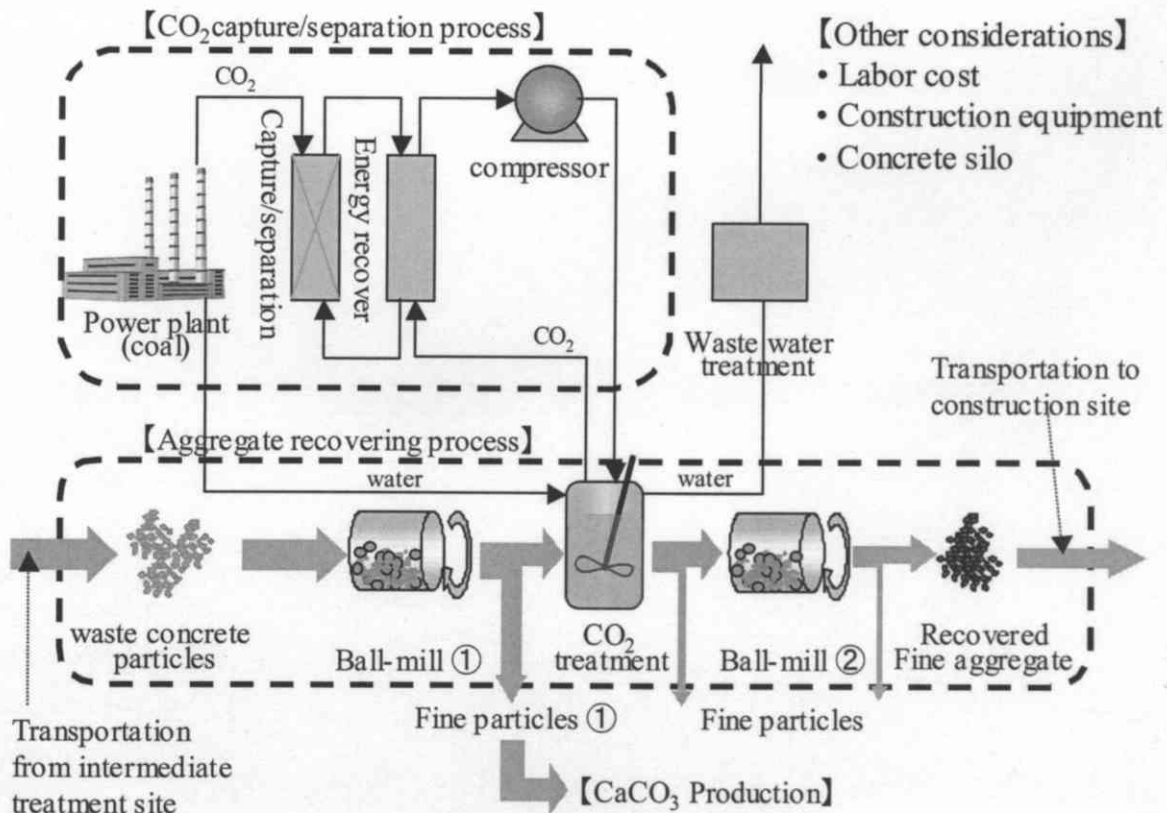


Figure 5-4 細骨材再生プロセス経済性評価の範囲

### 5.3.1.2 検討するケース

コスト試算は、再生細骨材のみ製造販売するケース①と、ボールミル処理①で発生する微粉①から高純度炭酸カルシウム(27000 yen/t)を製造販売すると同時に固定される二酸化炭素に対して炭素税(6000 yen/t-C)による収益があるとしたケース②の二ケースについて検討を行った。また機械すりもみ式再生細骨材(試料 A)からの骨材再生についてはボールミル処理を含まないためケース①のみを対象とした。

ケース①： 細骨材のみを製造販売するケース (試料 A および B)

ケース②： 細骨材および炭酸カルシウムを製造販売し、固定される二酸化炭素に対して炭素税による収益があるとしたケース (試料 B のみ)

### 5.3.1.3 マテリアルフロー

細骨材再生工程のフローは Table 5-1 と同じとし、炭酸カルシウム製造工程のフローについては Figure 5-5、Table 5-5 に示した。

### 5.3.1.4 設備費の共通事項

①原価償却期間： 設備費(材料費、建設費、土工工事費)は 15 年で減価償却するとして年間の支出に計上した。

②設備保守費： 各設備の保守費は、設備費の 10%を毎年計上した。

③土工工事費： 各設備の土工工事費は、設備費の 25%として設備費に計上した。

### 5.3.1.5 未処理 5 mm アンダーの入手

プロセスに投入する 5 mm アンダーは、試料 A、B ともに無償で入手すると仮定し、輸送費のみを計上した。

### 5.3.1.6 プロセスで発生するセメント残渣の処分

発生する微粉のうち、炭酸水処理を経るものについては酸処理によって有害物質が除去された良質な土壌成分として無償で譲与可能であるとして輸送費のみを計上し、そうでないものについては安定型処分場への処分費用 3000 yen/t を輸送費に上乗せした。

## 5.3.2 計算方法

### 5.3.2.1 支出

#### 5.3.2.1.1 細骨材再生工程

##### 5.3.2.1.1.1 炭酸水処理

###### ①抽出反応塔の設備費

5 mm アンダー処理速度、試料/水比、バッチ処理あたり抽出時間、水交換時間、抽出塔基数から、バッチ処理あたりの水体积を算出しこれが抽出反応塔体積と等しいとした。抽出塔の形状は実験機と幾何学的に相似であるとした。抽出反応時の圧力を最高使用圧力とし、JIS 規格から反応塔の最小厚さを次式から算出した。

$$t[\text{mm}] = P[\text{kgf/cm}^2] \cdot D[\text{mm}] / (200 \rho[\text{kgf/cm}^2] \cdot 0.25 - 1.2P)$$

ここで、 $t$ は容器壁面圧、 $P$ は最高使用圧力、 $D$ は容器径、 $\rho$ は材質比重であり、この式は容器高/容器径=5の時の式である。算出した壁面厚から耐圧構造に必要な金属量を見積もって材料費を算出し、その5倍が建設費用にかかるとした。抽出塔の材料はステンレス鋼(400 yen/kg)とした。

#### ②抽出反応塔の動力費・運転費

エネルギー消費量計算(5.2.1.5)で見積もった攪拌に要するエネルギーPと発電単価(10 yen/kWh)から算出した。

$$1 \text{ 基あたり動力・運転費}[\text{yen/yr}] = P [\text{kW}] \times 24 [\text{hr/day}] \times 300 [\text{day/year}] \times 10 [\text{yen/kWh}]$$

#### 5.3.2.1.1.2 ボールミル処理工程

設備費、運転費ともに、スペック既知のボールミル(株式会社栗本鐵工所製、3000万円、消費電力100kW、処理量8t/h)からべき乗則を用いて算出した。

$$1 \text{ 基あたり設備費}[\text{yen/yr}] = 3000 \text{ 万円} \times (\text{廃コン処理量} / 8 [\text{t/hr}])^{0.7} / 15 \text{ 年}$$

$$1 \text{ 基あたり運転費}[\text{yen/yr}] = 100 [\text{kW}] \times (\text{廃コン処理量} / 8 [\text{t/hr}])^{0.7} \times 24 [\text{hr/day}] \times 300 [\text{day/year}] \times 10 [\text{yen/kWh}]$$

#### 5.3.2.1.2 二酸化炭素回収圧縮工程

##### 5.3.2.1.2.1 二酸化炭素回収

二酸化炭素回収コストの単価は回収量が多いほど低下する。単位は中国電力株式会社より提供を受けたデータから算出した次式により算出した。

$$y = 12952 + 19410 \times \exp(x / 1297)$$

ここで $y$ は二酸化炭素1トンあたりの回収費[yen/t-CO<sub>2</sub>]、 $x$ は二酸化炭素の年間回収量[t-CO<sub>2</sub>/年]である。これを用いて年間の二酸化炭素回収費用は次のように計算した。

$$\text{二酸化回収費用}[\text{yen/yr}] = y [\text{yen/t-CO}_2] \times \text{二酸化炭素処理量} [\text{t/年}]$$

##### 5.3.2.1.2.2 二酸化炭素圧縮

###### ①設備費

見積もり不能のためエアコンプレッサー(石川島播磨重工業株式会社製、1500万円、消費電力150kW、処理量1500Nm<sup>3</sup>/h)の3倍強程度とし、べき乗則を用いて算出した。

$$\text{設備費}[\text{yen/yr}] = 5000 \text{ 万円} \times (\text{二酸化炭素圧縮量} / 1500 [\text{Nm}^3])^{0.7} / 15 \text{ 年}$$

###### ②運転費

見積もり不能のためエアーコンプレッサーの5倍とした。