

循環型社会形成推進科学研究費補助金 総合研究報告書概要版

・研究課題名・研究番号=破砕選別による建設系廃棄物の地域循環システムの設計に関する研究

・研究番号=K1912, K2058, K2157

・国庫補助金精算所要額（円）=62,533,000（3年間の総計）

・研究期間（西暦）=2007～2009

・研究代表者名=山田正人（(独)国立環境研究所）

・共同研究者名=遠藤和人（(独)国立環境研究所）、朝倉宏（復建調査設計(株)）、阿部誠（秋田県立大学）、大和田秀二（早稲田大学）、藤田豊久（東京大学）、東條安匡（北海道大学）、石垣智基（龍谷大学）、小野雄策（日本工業大学）、渡辺洋一（埼玉県環境科学国際センター）

・研究目的=3Rをベースとした循環型社会の構築のため、特に廃棄物発生量の多くを占める建設系廃棄物・副産物をターゲットとし、それらを取り扱う破砕選別技術に着目した地域循環システムの構築に関する提案を行う。これにより、資源生産性と循環利用率を向上させ、最終処分量を低減させる社会の実現を目指す。具体的には、地域における建設系廃棄物等の発生から再利用・処分に至るマテリアルフロー、化学物質フローならびに処理費用を解析してモデル化する。新しい破砕選別技術として、入口における性状判定技術、金属やプラスチック等の分離性能を高める乾式・湿式の破砕技術、選別残さから軽量小粒径物を分離する技術について、適用前後の残さの安定性（生分解性）、環境安全性（生態毒性）ならびに資源利用可能性（用途適合性）を評価する。また、新技術を導入した拠点形成によるフローおよび費用の変化をモデルにより評価する。

・研究方法=「**研究統括および破砕選別技術システム導入による総費用変動の評価**」：産業廃棄物の中間処理と再生品の加工・利用、及び最終処分を行っている全国 1,450 社の事業場を対象にアンケート調査を行い、廃棄物の種類別に中間処理（破砕選別、焼却等）と最終処分に係る処理料金および、施設が有する技術と投入・産出品目の関係等について整理した。破砕選別に要する費用の構造を次式で仮定し、破砕選別に要する技術費用の算定を試みた。利潤 = 受入料金 + 再生品の売却益 - 残さの処分費 - 技術費用。再生品の売却益 = 販売額(有料分を含む) - 利用先までの輸送費。残さの処分費 = 処分先での受入

料金 + 処分先までの輸送費。技術費用 = 電気使用額 + 燃料使用額 + 人件費 + 施設減価償却（土地除く）。**「破碎選別技術システム導入による地域マテリアルフロー変動の評価」**：発生源から排出された廃棄物の中間処理施設や最終処分場までのフロー評価が受入や運搬コストに依存すると仮定し、データベースとして発生源、中間処理、処分場の位置と受入可能品目、受入可能量等の情報を用いて、発生源事業者の支出最小化を目的関数とした上流側と、中間処理施設の利益最大化を目的関数とした下流側の二つの廃棄物フローの評価を行った。**「破碎選別技術システム導入による化学物質フロー変動の評価」**：破碎選別施設の物質フロー調査として、初年度に 1.7t 投入によるバッチ試験、最終年度に 15t の廃棄物を用いた 3 回のバッチ試験を実施した。いずれの試験も回収物の有機物、石膏、重金属の含有量を分析した。篩下残渣からの石膏と有機物の分離は、重液選別を採用し、各比重で Float と Sink へ移行する有機物と石膏の割合を求めた。再生採石を用いた硫化水素捕捉は、液中の硫化物イオン捕捉試験と気相硫化水素ガスの捕捉試験を実施した。篩下残渣からの有機物溶出特性は、シリアルバッチ試験を用い、さらに溶出有機物の分画を行った。**「破碎選別残さへの流動層分離法の適用性評価」**：新しい破碎選別技術として、破碎選別残さから軽量小粒径物を流動床分離する技術の適用を図るため、残さから除去すべき成分の量と含有形態を把握し、流動床によって乾式分離し、装置の充填高さ方向の性状分布を把握した。**「建設混合廃棄物への電気パルス粉碎法の適用性の評価および細粒部の成分分離」**：廃コンクリートからの骨材回収を目的として、水中で多成分系の固体粒子に電気パルスを与えて異相境界面での優先破壊現象を促進させる基礎研究を行った。各種建設廃材の表面不純物を除去する目的で、インテンシブミキサによる表面粉碎の適用を試みた。多成分粒子混合物の選択粉碎を目的として、硬軟 2 種粒子の混合粉碎における選択粉碎機構を解明した。セメントペースト内部に種々の鉱物粒を分散させた 2 成分混合人工試料系について ED に関する理論的考察と各種実験を行った。**「建設混合廃棄物への湿式破砕法の適用性の評価」**：従来の機械破砕は廃棄物全体に力をかけて粉碎して微細にして単体分離する方法であり、破碎物が過粉碎となり、エネルギー的に効果的単体分離法とはいえなかった。水中爆砕が水中で少量の火薬を爆発させて生じる気泡と衝撃力により、水中におかれた物質に異なる密度材料界面で剥離させることで容易に単体分離できる可能性を、実験により調べた。さらに機械粉碎とのエネルギー比較も試みた。また、水中電気破砕では数 10kV という高電圧パルスを水中の物質に作用させ、導電率の低い部分を瞬間大電流が流れ、ジュール熱で膨張して剥離することが期待されるので、参考に試みた。**「建設混合廃棄物の搬入性状の評価」**：搬入された混合廃棄物に関する発生源情報や見かけ比重等の情報と残渣の分析結果を比較検討し、残渣の化学成分に影響を与える要因を抽出した。建設廃木材及び混合廃棄物の選別残渣の化学成分と色彩との関係を明らかにし、カメラ画像から得られた色彩情報による品質評価の現場適用性を検討した。**「破碎選別残さの安定性の評価」**：生物分解性有機物由来の環境負荷のポテンシャルを「安定性」と位置づけ、その評価について検討した。嫌気性生分解性試験としては気相を窒素置換したガス化試験による、ガス発生

量およびメタン発生量の評価と、酵素処理との併用による成分分画試験法の確立を試みた。「**破碎選別残さの環境安全性の評価**」：破碎選別残さ等に対して、トビムシ等の陸生動物を用いた生態毒性試験で環境安全性を評価した。「**破碎選別残さの資源利用可能性の評価**」：環境省、(社)石膏ボード工業会の統計資料及び埼玉県の産業廃棄物実態報告書をもとに廃石膏ボード量を試算した。また、廃石膏ボード及び建設混合廃棄物の破碎処理残渣の化学分析を行い、有害化学物質の含有量及び溶出量を求めた。有害物質の除去及び硫化水素ガス発生抑制のための処理方法として、廃石膏粉及び建設混合廃棄物の破碎選別残渣の塩化第2鉄溶液処理について検討した。処理条件の最適化及び処理物中の有害物の残存量及び鉄の添加量を求めた。JIS K6960 を参考にして、処理物の安全性評価のための嫌気性培養試験法について検討を行った。

・結果と考察=「**研究統括および破碎選別技術システム導入による総費用変動の評価**」：破碎選別施設への投入量（受託量）に対する破碎選別後に資源化される割合は、廃プラスチックが 72%、木くずが 86%、ガラス陶磁器くずが 54%、がれき類が 98%であった。また、再生品の利用先での料金区分で整理すると、有償である資源化量は、それぞれ、63%、74%、38%、87%と見積もられた。また、利用先との料金区分が有料であるものが、それぞれ 6.9%、11%、15%、11%と 1 割程度あった。4 品目全体の輸送距離(ton・km で加重平均)は、破碎選別施設への投入に要する距離が 53～92km、破碎選別後の再生品(資源化)の利用先までの距離は 66～209km、破碎選別後の残さの処分に要する距離が 132～224km となっており、比較的狭いエリアから集められた廃棄物が、破碎選別処理後に、再生又は処分のため広域的に動いていることを示していた。全ての品目で、再生品の収支は、売却による収益より、有償とならない再生品の再委託費や輸送費を上回り、トータルではマイナスとなった。また、算出された技術費は、廃プラスチックが最も高く、がれき類が最も小さかった。さらに、算出された利潤は、がれき類がマイナスとなったが、4 品目の合計ではプラスとなった。「**破碎選別技術システム導入による地域マテリアルフロー変動の評価**」：上流側の廃棄物フローを評価した結果、排出源からの移動においては運搬距離とコストが大きく依存し、排出源近くに施設等が新設されると、廃棄物フローが大きく変化することが示された。また、中間処理施設の受入最大量の制約が計算結果に大きく影響することがわかった。「**破碎選別技術システム導入による化学物質フロー変動の評価**」：破碎選別施設の物質フロー調査において、初年度に実施したバッチ試験に於いては、篩下残渣が全排出量の 32%強を占め、最大の排出先となったが、15t の投入で 3 回実施した最終年度の試験では、再生採石が 43% となり残渣は 21%に減少した。これは当該施設のプロセス変更によるものであり、残渣選別における篩目の影響が大きい。いずれの試験においても可燃性の有機物の分離は良好であり、産物は搬出先に適した熱量の高いものとなっていた。石膏、有機物等の分離効率を上げるために、それらが濃縮している比重範囲を検討した結果、篩下残渣においては、比重範囲 1.59～2.28 の範囲に石膏の 93%が存在していることが明らかとなった。この比重に

存在する重量割合は 24%であった。したがって、この比重範囲に含まれる成分を分離することで、石膏の 93%が分離可能である。再生採石による硫化水素捕捉能は粒径が小さくなるほど大きくなる傾向があったが、最大の捕捉能を有する 1mm 以下の粒径でも 18mg-S/g であり、捕捉能は大きくなかった。シリアルバッチ試験より、篩下残渣も他の石膏含有材料も硫酸イオンの溶出は石膏の溶解度に支配され長期的に溶出が継続した。一方、有機物については、TOC では石膏ボード、篩下残渣、石膏含有材料の順であったが、グルコースでは累積溶出量の解離は大きくなかった。「**破碎選別残さへの流動層分離法の適用性評価**」：破碎選別残さの熱しゃく減量の中央値は、安定型最終処分場埋立の基準値（5 %以下）の 2～3 倍程度であった。重液選別の結果、12.8 %が有機物（紙として 0.45 %）と結晶水であった。建設混合廃棄物の廃石膏ボードの混入の有無や、残さの色によって、含有される石膏と木の量に差がみられた。流動床分離によって、原サンプルに比べて、充填高さ 0～6cm の層では、SO₄ と溶出 TOC が半減した。「**建設混合廃棄物への電気パルス粉碎法の適用性の評価および細粒部の成分分離**」：理論的には、ED において異相境界面で誘起される双極子分極の度合いが上記優先破壊を促進させると考えられたが、セメント中に各種鉱物粒を分散させた人工試料での実験結果からは、むしろ鉱物粒の物理的弱部の影響が大きいと推測された。代替試料として表面を不純物に覆われたボーキサイトを用い、表面粉碎が通常粉碎に対して表面成分の除去能の高いことが確認され、シミュレーションの結果、インテンシブミキサ内で粒子表面に発生する接線方向のエネルギーが法線方向のそれより顕著に大きいことを見出した。圧縮力による破壊ではヤング率の大きい硬成分の破壊が優先的に起こり、せん断力による破壊では軟成分の破壊が優先的に起こることを明らかにした。また、独自に開発したせん断試験の手法について詳細な検討を行った。電気パルス粉碎（ED）の機構解明を目的として、セメントペースト内部に種々の鉱物粒を分散させた 2 成分混合人工試料系について、鉱物／セメント境界面に誘起されるマクスウェル応力を理論的に算出し、同等試料の ED 産物の単体分離性と比較した。鉱物粒内部に多数の物理的欠陥がある数種試料を除けば、マクスウェル応力絶対値と単体分離度の大きさの順序はほぼ一致し、異相境界面での双極子モーメントによる分極が破壊の起点として重要な役割を果たすことが推測された。分散鉱物粒の導電率の高い試料ほど、微小時間（電圧印加直後の数～数 10 ns）における異相境界面での電荷密度変化が大きく、そこに選択的に大電流の流れやすいことを明らかにした。また、セメントと鉱物粒の境界面に誘起されるマクスウェル応力が ED における物理的破壊の駆動力となり、異相境界面優先破壊を促進させる可能性の高いことを明らかにした。さらに、実廃コンクリートの ED と機械的破碎の両実験を行い、骨材回収において、ED の異相境界面優先破壊現象の優位性を証明した。「**建設混合廃棄物への湿式破砕法の適用性の評価**」：木質プレートをコンクリートで被覆した廃棄パネルは、少量の火薬を用いた水中爆砕で容易に木質プレート部とコンクリート破片に容易に単体分離できた。コンクリートを鉄板で被覆した廃棄パネルは、比較的多くの火薬を用いた水中爆砕で内部のコンクリートが微細粉となり、外側の鉄パネルからはずれて分離できた。一方、

建設廃材には各種ホースなども混入してくる。鉄線ワイヤで被覆された直径の異なるゴムホースの水中爆砕では、ゴム部が細かく粉砕され、鉄ワイヤと良好に単体分離できた。水中電気爆砕による鉄筋入りコンクリートの破砕を行った。上部高電圧電極と下部の接地銅板間にコンクリート試料を配置した。破砕に使用した電圧と電流正極を電極に使用し、印加電圧は最大 48 kV であった。電流は最大ピークが 750A でその後、減少し 40 μ sec で消失した。3 回放電して、コンクリートが鉄棒からはがれて徐々に単体分離するが、より高い電圧が必要と考えられた。機械破砕と水中爆砕の破砕状況の差異とエネルギー比較を鉄筋の入った廃コンクリートで行った。機械粉砕では図 1(a)に示すようにコンクリートが細かく破砕された。一方、水中爆砕では火薬が少なくてもコンクリートの種類によっては単体分離は図 1(b)に示すように良好であった。図 1(c)に、破砕片と積算粒度分布を示すが、水中爆砕のほうが粒度は大きく、水中爆砕で鉄筋コンクリートを破砕することはエネルギーが機械破砕に比べて小さく粉砕効率が低い。本実験結果より求めた、機械破砕のエネルギーは 0.94kWh/kg であり、一方、水中爆砕のエネルギーは 0.02kWh/kg とかなり少ないことが明らかとなった。

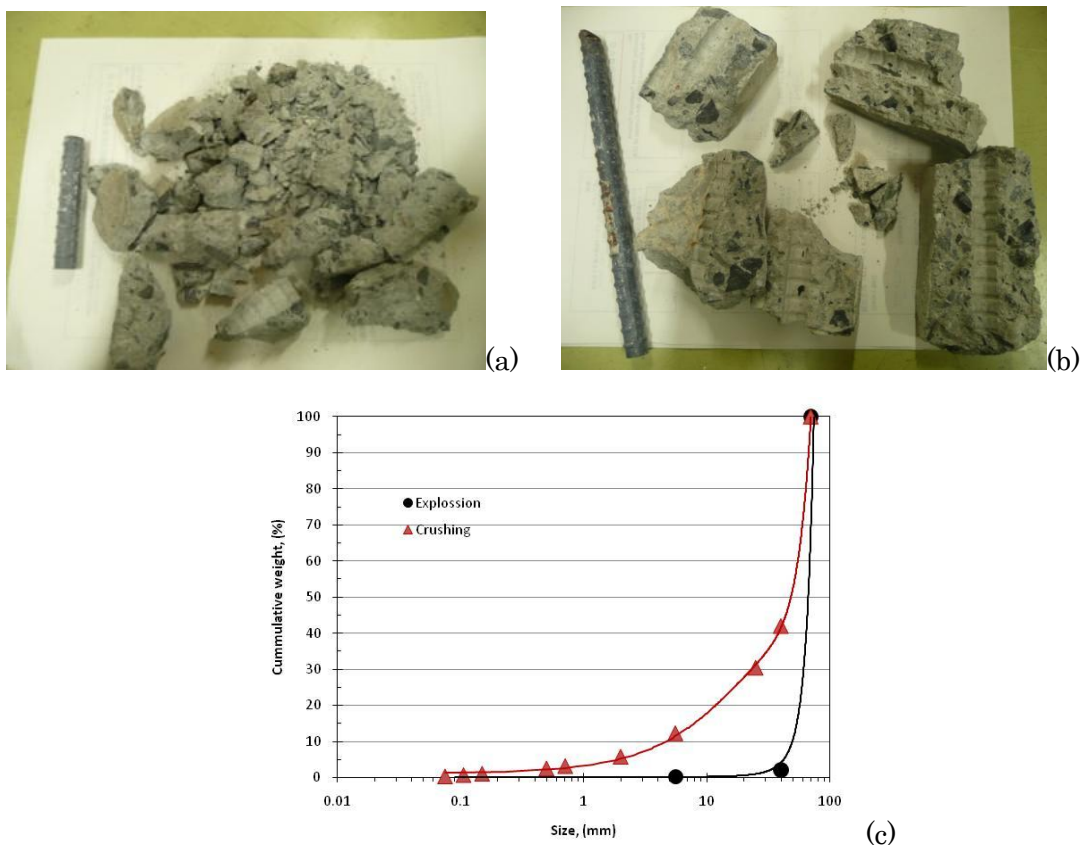


図 1 水中爆砕と機械粉砕の比較 (a) 機械粉砕、(b) 水中爆砕、(c) 破砕片と積算粒度分布

「建設混合廃棄物の搬入性状の評価」：建築物の用途や工程の違いによる使用材料の違いが、発生する混合廃棄物の性状に影響していると考えられ、分別に用いる容器の違いが分別精

度に影響している可能性があることなどが分かった。廃木材で a^* の値が 2.5~20、 b^* が 0~40 の範囲をはずれるもの、及び特定の波長の反射率が著しく低いものは有害金属含有の可能性が高かった (図 2)。有害金属含有廃木材の判定、建設混合廃棄物選別残渣中の Ca、S 濃度、熱しゃく減量の推定は、 a^* 、 b^* 等の色彩情報により可能と考えられ、カメラ映像も利用可能と考えられた。

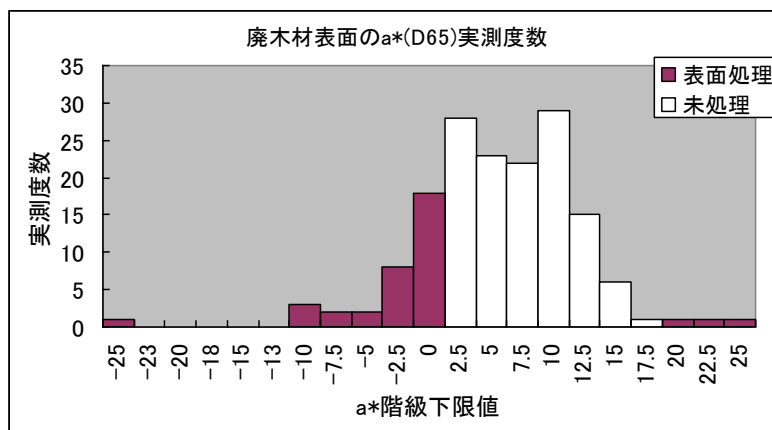


図 2 木材表面処理と a^* の関係

「**破碎選別残さの安定性の評価**」: 畜産糞尿および食品廃棄物などの易分解性廃棄物に比べて分解性の低いセルロース粉末および木質チップを対象とした場合の嫌気性ガス発生ポテンシャル評価においては、有害物質と pH の影響による分解阻害について検討する必要性が示された。確立された手法により、処分場掘削試料のガス化完了には数十年から数百年を要することが示された。また、処分場に埋め立て後の速やかな安定化が期待できるという点で、破碎選別の効果が確認された。複数の酵素を適用することで酵素反応の基質となりうる分解性有機成分の分画評価が可能な手法が提案された。

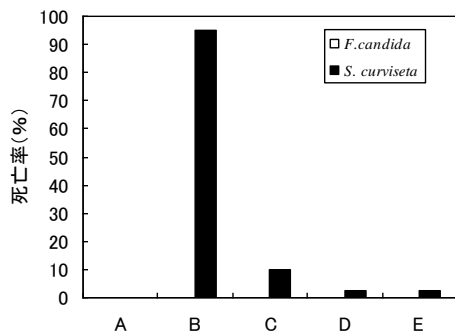


図 3 固体試料暴露によるトビムシ 2 種の死亡率

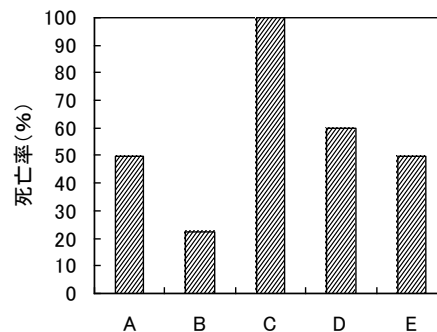


図 4 固体試料暴露によるシマミミズの死亡率

「**破碎選別残さの環境安全性の評価**」：破碎選別残さを用いた試験結果から、ユミゲカギズメアヤトビムシ (*Sinella curviseta*) とシマミミズ (*Eisenia fetida*) が有効な供試生物であることが示された (図 3、4)。また、人工土壌よりもろ紙粉末を用いた試験方法が致死要因の検定法として有効であることが明らかになった。両種の死亡率が高かった試料の分解物で致死性が低減したことから、試料に存在する両種への致死要因は、分解の過程で低減されたものと考えられる。「**破碎選別残さの資源利用可能性の評価**」：廃石膏粉及び建設混合廃棄物破碎選別残渣の化学分析結果から、資源化処理物を土木資材として環境中で使用する場合、土壤汚染対策法指定基準の溶出試験値を上回るまたは上回るおそれのある有害元素は鉛、ヒ素、フッ素であることが分かった。また、溶出液中の硫黄濃度は破碎選別残渣においても飽和濃度であり、硫化水素ガスの発生要因となりえることが分かった。これらの廃棄物を塩化第 2 鉄溶液で処理した場合、廃石膏からのフッ素の除去及び鉄の添加が可能であることが確かめられた。

・結論=建設系混合廃棄物の破碎選別施設は、排出事業者で分別・選別が行われていない廃棄物から、資源化物の回収による最終処分量の縮減、資源化物及び処分物を集約し輸送コストの縮減を行っており、受入料金 (4 品目平均 15,104 円/t) の約 7 割 (4 品目平均 10,077 円/t) が技術費に費やされていた。建設系混合廃棄物の破碎選別施設は、廃プラスチックや木くずの破碎選別による利潤により事業が成り立っていることが示唆された。最終処分施設の受入料金は、混合廃棄物で 14,200~22,000 円/t (本調査調べ) であり、破碎選別施設が最終処分施設との受入料金と競合しながらも、利潤を得て資源循環に貢献していることがわかった。廃棄物のフローを評価するためロジスティクスモデルの構築を行った結果、計算速度を改善するアルゴリズムが必要であることが明らかとなった。また、運搬距離とコストが廃棄物フローに大きく影響することが明らかとなり、排出と受入施設の位置が最も重要であることがわかった。建設混合廃棄物の破碎選別施設は、混合廃棄物の約 6 割を資源化に向ける機能を有しており、また資源化物はそれぞれの利用先に適した性状を有していた。主な回収物は、再生骨材、代替燃料である。篩下残渣中の石膏は比重範囲 1.5~2.3 程度に濃縮しており、分離の可能性はある。篩下残渣からの有機物の溶出は TOC としては大きいですが、直接硫酸塩還元菌に利用されるものの割合は小さい。破碎選別残さは、熱しゃく減量が 5%以上であることが多く、現状では管理型最終処分場に埋め立てられるべきである。ただし、熱灼減量の大部分は結晶水である可能性があり、熱しゃく減量を 5%以下にすることは困難である。建設混合廃棄物の廃石膏ボードの混入の有無や、残さの色で分けることによって、含有される石膏と木の量が低い残さを得られる可能性がある。破碎選別残さから、流動床によって SO₄ や溶出 TOC を多く含む粒子を分離できることが分かったが、分離効率が悪かった。電気パルス粉碎 (ED) の機構解明を行い、骨材回収において ED の異相境界面優先破壊現象の優位性を証明した。水中爆砕により、通常破碎困難な各種建設廃棄物を破碎分離することができた。水中電気破碎は 50kv よりも大きい印加電圧がコンク

リートの剥離に必要と考えられる。また、機械粉碎と水中爆砕を鉄筋コンクリートの破砕と比較すると、水中爆砕の方が少量のエネルギーでコンクリートと鉄筋を剥離できた。発生源や荷姿などの違いが、搬入廃棄物の質に影響していること、廃木材や選別残渣の判定に色彩情報が有用であることが明らかになった。処分場に埋め立て後の速やかな安定化が期待できるという点で、破砕選別の効果が確認された。複数の酵素を適用することで酵素反応の基質となりうる分解性有機成分の分画評価が可能な手法が提案された。ユミゲカギヅメアヤトビムシおよびシマミミズは、破砕選別残さの生態毒性試験の供試生物として有効であった。両種に対して高い致死性を示した破砕選別残さは、分解処理によりその致死性を低減することが可能であった。廃石膏粉及び建設混合廃棄物破砕選別残渣を土木資材として環境中へ適用する場合及び最終処分における安全確保の観点から、塩化第2鉄溶液処理はフッ素の除去及び硫化水素ガスの発生を抑制するため安全対策の一つの手法となりえることを示した。

英語概要

・ 研究課題名 = 「Design of Regional Material Cycle System for Construction and Demolition Waste by Crushing and Separation Technology」

・ 研究代表者名及び所属 = Masato Yamada (National Institute for Environmental Studies), Kazuto Endo (National Institute for Environmental Studies), Hiroshi Asakura (Fukken Co. Ltd.), Makoto Abe (Akita Prefectural University), Shuji Owada (Waseda Univ.), Toyohisa Fujita (Tokyo Univ.), Yasumasa Tojo (Hokkaido Univ.), Tomonori Ishigaki (Ryukoku Univ.), Yusaku Ono (Nippon Institute of Technology), Yoichi Watanabe (Center for Environmental Science in Saitama)

・ 要旨 = Our research focuses on regional material cycle system for construction and demolition (C&D) waste by crushing and separation technology. Cost balances of crushing and separation facilities for C&D waste were estimated. About 70% of acceptance fee was consumed for crushing and separation practice at facilities. Their profit would mainly be gained from reuse of plastics and wood separated from mixed C&D waste. Assuming that waste flow depends on the cost, a program for logistics simulation was coded. It was clarified that location relationship between source and acceptance sides is most important for the waste flow. Sorting facility of mixed C&D waste has capability to recover nearly 60% of material for recycling. And these recovered materials have suitable characteristics for each destination. Major recycled materials are aggregates and alternative fuel. Gypsum in the residue concentrates in the density range between 1.5 and 2.3 so that segregation of them will be possible.

Leaching out of TOC was high in residue but they are not necessarily usable for SRB. It was difficult to reduce the ignition loss of sieved residue under 5 % because of combined water. To obtain processed residue having low gypsum and wood contents, white processed residue (for gypsum) or brown one (for wood) should be removed without mixing with processed residue containing other colors at stockyards. Fluidized bed could separate the particle containing SO₄ and soluble TOC although separation efficiency was low. Three kinds of comminution technologies, electrical disintegration (ED), surface grinding, and multi-phase selective grinding, were investigated for the utilization of wasted construction materials. In especial, ED behavior was focused theoretically and experimentally in order to recover aggregates from wasted concrete and clarify the mechanism of preferential breakage at phase boundary between aggregates and cement paste in the ED. Underwater explosion can be crushed several kinds of construction wastes, including liberate reinforcement steel from concrete, by a low energy comparing mechanical crushing. The sulfur and calcium concentration in a residue, and the hazardous metal concentration of a waste wood can be judged roughly by measuring the color. And the source information and appearance information on construction wastes are useful for the quality evaluation of the residues. Estimation method of anaerobic gas generation potentials was established. It revealed that excavated waste from landfill required long duration for stabilization though the separation of C&D waste could effectively reduce it. Method of enzymatic fractionation of biodegradable component in solid waste was briefly established. Earthworm (*Eisenia fetida*) and collembola (*S. curviseta*) were useful test animals for ecotoxicity test of construction solid wastes. In treatment of extracts from solid wastes, cellulose powder was a useful test material for evaluation of toxicity of the extracts. By degradation treatment of construction solid wastes, the high mortality to collembolan and earthworm was reduced. The gypsum board waste and the shredded residual of construction mixed waste are treated by the ferric chloride solution, this treatment technology became one of the safety-measures technology when they are used as construction material or disposed in landfill site.

・キーワード= Regional Material Cycle, Construction and Demolition Waste, Crushing and Separation Technology, Economy, Quality Management