

コンクリート構造物のライフサイクル設計における
材料保存ストラテジー

田村 雅紀

論文題名：コンクリート構造物のライフサイクル設計における材料保存ストラテジー

論文目次

第1章 序論

1.1 本研究の背景 --- 2

1.2 本研究の目的 --- 5

1.3 本論文の構成 --- 7

第1章の参考文献

第2章 ライフサイクルを考慮した資源循環手法に関する既往の研究

2.1 概説 --- 10

2.2 既存コンクリートの資源循環手法 --- 11

2.2.1 コンクリート塊の再利用実態 --- 11

(1) 国内の状況

(2) 海外の状況

2.2.2 分解モデル --- 24

(1) 処理装置の分類

(2) 圧壊機構

(3) 衝撃機構

(4) 摩耗機構

(5) すりもみ機構

2.2.3 組立モデル --- 29

(1) 概要

(2) 再生砕石

(3) 低品質再生骨材コンクリート

(4) 高品質再生骨材コンクリート

2.2.4 運用モデル --- 37

(1) 基準・指針レベル

(2) 間接制御型－方策レベル

(3) 直接制御型－方策レベル

2.3 リサイクラブル製品の資源循環手法 --- 50

2.3.1 概念形成モデル --- 50

(1) インテリジェントマニュファクチャリング

(2) ジェネティックマニュファクチャリング

(3) インバースマニュファクチャリング

(4) ユビキタスマニュファクチャリング

2.3.2 ライフサイクル計画モデル --- 54

2.3.3 組立モデル --- 59

2.3.4 分解モデル --- 63

2.3.5 運用モデル --- 66

(1) 間接制御型－方策レベル

(2) 直接制御型－方策レベル

2.4 リサイクラブルコンクリートの資源循環手法 --- 71

2.4.1 概念形成モデル --- 71

2.4.2 結合材回収型モデル --- 74

2.4.3 骨材回収型モデル --- 77

2.5 資源循環を実行可能にする目標の設定と展望 --- 82

第2章の参考文献

第3章 コンクリートの材料保存性が導く生産システム	
3.1 概説	--- 92
3.2 資源循環の共通言語	--- 93
3.3 コンクリート構造物の生産システム	--- 95
3.3.1 順工程生産システムの限界性	--- 95
3.3.2 順逆工程生産システムの基礎的性質	--- 96
3.4 コンクリートのリサイクルシステム	--- 99
3.4.1 順工程生産システムにおけるリサイクルテクノロジー	--- 99
3.4.2 順工程生産システムにおけるマテリアルフロー	--- 101
3.5 第3章のまとめ	--- 104
第3章の参考文献	
 第4章 コンクリート構造物のライフサイクル設計手法	
4.1 概説	--- 108
4.2 ライフサイクル設計のコンセプト	--- 109
4.2.1 ライフサイクル設計に包含される個別設計要素と設計目的	--- 109
4.2.2 ライフサイクル設計の構成	--- 111
4.2.3 既存構造物におけるライフサイクル設計の適用度評価	--- 113
(1) 経済基盤創成期	
(2) 循環型社会創成期－SI建築－	
(3) 循環型社会創成期－完全リサイクル住宅－	
4.3 ライフサイクル設計の実装	--- 117
4.3.1 個別設計要素と設計目的における設計レベルマトリックス	--- 117
4.3.2 ライフサイクル設計の実装モデル	--- 121
4.3.3 材料保存性を確保するリサイクラブルコンクリート	--- 124
4.4 第4章のまとめ	--- 126
第4章の参考文献	
 第5章 セメント回収型－完全リサイクルコンクリートの実証化	
5.1 概説	--- 130
5.2 成分調整不要型完全リサイクルコンクリート	--- 131
5.2.1 背景と目的	--- 131
5.2.2 コンクリートに導入する産業廃棄物起源材料の抽出	--- 132
5.2.3 コンクリートへの産業廃棄物起源材料の取り込み試算	--- 134
(1) 使用材料	
(2) 試算方法	
(3) 結果および考察	
5.2.4 コンクリートの基礎的性質	--- 137
(1) 使用材料および計画調合	
(2) 実験方法	
(3) フレッシュ性状と力学特性	
(4) 耐久性状	
5.2.5 再生セメントの基礎的性質	--- 145
(1) 使用材料	
(2) 実験方法	
(3) 再生セメントの製造	
(4) 再生セメントの物性	
5.2.6 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートによる資源投入量削減効果	--- 150
5.2.7 まとめ	--- 150
5.3 完全リサイクルコンクリートの利用拡大にむけた材料調整法の検討	--- 151
5.3.1 背景と目的	--- 151
5.3.2 汎用型コンクリートと粒形改善型コンクリートの基礎的性質	--- 151
(1) 使用材料	
(2) 実験方法と計画調合	
(3) フレッシュ性状と粒形改善効果	
(4) 力学特性と粒形改善効果	

5.3.3 完全リサイクルコンクリート標準調合表の提案	---	157
(1) 使用材料		
(2) 実験方法		
(3) 標準調合の作製		
(3.1) 石灰石骨材コンクリート		
(3.2) 汎用型砕砂型－完全リサイクルコンクリート		
(3.3) 粒形改善砕砂型－完全リサイクルコンクリート		
(3.4) 完全リサイクルコンクリート標準調合表		
5.3.4 まとめ	---	165
5.4 完全リサイクル住宅(S-PRH)への実施工と適用性評価	---	166
5.4.1 背景と目的	---	166
5.4.2 完全リサイクルコンクリートの将来像	---	166
5.4.3 完全リサイクルコンクリートの実用化	---	167
(1) 構造物概要		
(2) 使用材料		
(3) 完全リサイクルコンクリート標準調合表を用いた調合推定		
(4) 完全リサイクルコンクリートの実施工		
(4.1) 基礎支持面コンクリートの施工		
(4.2) PC独立基礎コンクリートの施工		
5.4.4 まとめ	---	173
5.5 第5章のまとめ	---	174
第5章の参考文献		
 第6章 骨材回収型－完全リサイクルコンクリートの実証化		
6.1 概説	---	177
6.2 ペースト界面との易分解を可能にする骨材の開発	---	180
6.2.1 背景と目的	---	180
6.2.2 骨材表面の改質処理方法	---	180
6.2.3 骨材表面の改質実験	---	183
(1) 使用材料		
(2) 実験方法		
(1) 結果および考察		
6.2.4 骨材表面の吸水率低減効果	---	190
(1) 試験体概要		
(2) 実験方法		
(3) 結果および考察		
6.2.5 骨材モデル試験体の曲げ付着強度	---	192
(1) 使用材料		
(2) 実験方法		
(3) 結果および考察		
6.2.6 まとめ	---	194
6.3 骨材回収型リサイクル指向コンクリートの基礎的性質	---	195
6.3.1 背景と目的	---	195
6.3.2 コンクリートの力学特性と改質処理効果	---	195
(1) 使用材料		
(2) 実験方法		
(3) 結果および考察		
6.3.3 コンファインドコンクリートの圧縮強度	---	201
(1) 横補強筋比の設定		
(2) 使用材料と実験方法		
(3) 結果および考察		
6.3.4 まとめ	---	204
6.4 骨材回収型リサイクル指向コンクリートの破壊特性	---	205
6.4.1 背景と目的	---	205
6.4.2 実験概要	---	205
(1) 使用材料		
(2) 実験方法		
(3) 破壊力学パラメータ		

6.4.3 結果および考察	---	209
(1) 改質処理が荷重－ひび割れ開口変位特性に及ぼす影響		
(2) 改質処理が破壊エネルギー G_F^{WOF} に及ぼす影響		
(3) 改質処理が引張軟化曲線に及ぼす影響		
(4) 改質処理が初期結合応力に及ぼす影響		
(5) 改質処理が有効引張強度に及ぼす影響		
(6) 改質処理が初期結合応力に及ぼす影響		
(7) 改質処理がエネルギー解放率に及ぼす影響		
(8) 改質処理が破壊エネルギー G_F^{TSD} に及ぼす影響		
6.4.4 まとめ	---	217
6.5 骨材回収型リサイクル指向コンクリートのリサイクル性評価	---	222
6.5.1 背景と目的	---	222
6.5.2 実験概要	---	222
(1) 実験要因		
(2) 実験方法		
6.5.3 結果および考察	---	224
(1) 改質処理がコンクリート破断面の表面粗さに及ぼす影響		
(2) 改質処理がコンクリート破断面の原骨材剥離面積率に及ぼす影響		
(3) 改質処理が骨材界面剥離効果に及ぼす影響		
(3) 改質処理が骨材回収性に及ぼす影響		
6.5.4 まとめ	---	233
6.6 第6章のまとめ	---	234
第6章の参考文献		
第7章 建築構造用コンクリートに関する需給環境の将来予測		
7.1 概説	---	237
7.2 建築構造用コンクリートの環境シミュレーション	---	240
7.2.1 背景と目的	---	240
7.2.2 建築構造用コンクリートの基本情報の整理	---	240
7.2.3 環境シミュレーションの概要	---	242
(1) コンクリートの条件		
(2) シミュレーションの条件		
(3) セメント製造量		
(4) コンクリート製造量		
(5) 石灰石消費量		
(6) 廃棄物発生量		
7.2.4 まとめ	---	251
7.3 建築構造用コンクリートのLCCO₂削減の方策	---	252
7.4 第7章のまとめ	---	255
第7章の参考文献		
第8章 結論	---	257
Glossary		
関連文献リスト		
謝辞		

第 1 章 序論

- 1.1 本研究の背景
- 1.2 本研究の目的
- 1.3 本論文の構成

1.1 本研究の背景

コンクリート塊に関わる廃棄処理問題は、1960年代に始まった経済の高度成長以来、高水準で推移してきた建設投資による膨大な構造物ストックに起因していることは明らかである。そこで1974年に、(財)建築業協会建設廃棄物処理再利用委員会における「再生骨材および再生コンクリートの使用基準(案)・同解説(案)」作成に関するプロジェクト研究が開始され、その後、建設省建設技術総合開発プロジェクトにおける「建設事業への廃棄物利用技術の開発研究(1981-1985年)」および同プロジェクトにおける「建設副産物の発生抑制・再利用技術の開発研究(1992-1996年)」など、再生骨材の実務的運用を図ることを目的としたプロジェクト研究が実施されるなど、精力的な研究開発が展開されてきた。しかしながら、それらの検討が始まってから30数十年が既に経過したにも関わらず、コンクリート塊の廃棄処理問題は未だ解決していない。コンクリートのリサイクルに関連する地球環境問題を根本的に解決することを目的としたコンクリートの再資源化技術、さらにはコンクリートの生産技術の確立には大きな障壁が存在するものと考えられる。

一方、諸外国においてもコンクリート塊の廃棄処理に関連するさまざまな取り組みが展開されており[1]、精力的な検討が継続されているヨーロッパに関しては、各国の資源賦存量および最終処分場残余容量により再資源化対策が大きく反映される傾向があり、コンクリート塊の最終処分が全く問題とならない地域がある一方で、道路用路盤材として積極的に再資源化することで廃棄処理問題を解決している地域もある状況である。全体的には、対処療法的な再資源化手法により、要求性能が低く需要の確保が容易である路盤材や埋め戻し材などに適用するケースが多いといえる。コンクリート塊の廃棄処理問題を検討する場合は、対象地域における再生材料に対する社会的ニーズを正確に捉えることが重要になってくることが理解できる。

日本では、現在のコンクリート塊の主な再資源化用途は道路用路盤材であり[2]、産業社会における生産システムにその再生品を取り込む努力がなされながら、これまで一定の需用を築いてきた。2000年には再生骨材を用いたコンクリートの標準情報であるTR A 0006[3]が公開され、道路床板などに適用可能な非構造用再生コンクリートが今後一般化する可能性もある。しかしながら、日本における産業廃棄物処分場の残余容量は極めて乏しくなっており[2]、また政府における将来的な道路網整備計画は、用地買収の複雑化、都市基盤インフラの充足性および将来人口の自然減に伴う交通需用量の低下などの種々の要因が影響して、当初の計画案は縮小を前提とした見直しの検討が余儀なくされている[4]。現在すでに道路用碎石の需要量が減少し始めている状況を踏まえると、今後は対処療法的な処理技術により道路用路盤材となる再生碎石を継続的に生産し続けることは極めて困難になると結論づけられる。

以上より、現在のコンクリート塊の処理手法には抜本的な変化が必要と考えられる。財団法人日本建築センターでは新建築技術認定事業として、2000年に建築構造用コンクリートに使用可能な再生骨材製造技術の認定システム[5]を立ち上げた。その結果、コンクリート塊から天然骨材と同等の品質を有する高品質再生骨材を製造可能にし、構造用コンクリートに適用することを実証した再資源化技術[6]も登場し、既にその認定を受けて実務的な使用が開始されている。一方、社会制度も変化しており、循環型社会元年とされる2000年を区切りに循環型社会基本法、各種個別リサイクル法が公布・施行され、建設業においても従来型の生産システムに対する抜本的な変化が要求されるようになった。政策面からのこれらのアプローチは、21世紀の循環型社会を構築するための重要な礎を築いたといえる。

しかしながら、それらの政策的アプローチは順工程生産システムに偏重した技術を未だに主要な生産システムとして位置づけた上で逆工程における対処療法的な処理技術の合理的運用に焦点を当てている点、既存生産システムを基本とし資源循環を可能にする仕組みを緩やかに導入することを意図している点などにより、現在切迫している地球環境問題の解決を最優先的させた施策となっていないことは今後問題とされる要因と考えられる。これらの政策的アプローチを有効に利用するためにも、その基盤となる技術的手法の革新は今後更に重要になるといえる。

ここで循環型社会を構築する上で建築物に求められる最も必要な条件とは何かを考える。また、その条件を満たすために必要な技術のあり方を具体的に検討する。まず地球環境時代においては、人間は経済活動を前提条件として持続可能な社会生活を営むことが重要であると考えられている[7]。そしてその先にある豊かな社会生活を実現するためには、経済活動により生み出した製品を市場に流通させてそれらによる恩恵を享受する仕組みの構築が必要である。それにより人間は充足感(安定)を得ることができると思われる。なお安定とは、個人レベル、組織レベル、地域レベルそして国レベルというように領域の規模が拡大することによりその性質は補強されていくものと考えられ、最終的には地球レベルでの安定を達成することが最終的な目標になると思われる。地球レベルでの安定とは、地球上の水循環、大気循環および物質循環が、地球の自浄作用を損なわないように成立し続けることであると思われ、この場合、地球レベルでの安定が確保されれば、内包されるそれより小さな規模の領域の安定は自然に確保されるものと考えられるのである。なおこのような考え方は、建築物の性能検証型の設計理論を展開する際の条件とされる物質性能のヒエラルキー[8]において、各段階における物質性能が生産行為を介して連動的に繋がり、その仕組みが完備することにより全体である建築物の性能が確保される仕組みと相関すると思われる。

以上より、「地球の安定」を確保するために「建築物」に要求される本質的条件とは、地球における水循環、大気循環、物質循環を保証する仕組みを建築物自身が有していることであると考えられる。そして物質循環に着目した場合、それは建築物自身およびその構成材料の循環性を確保することであると説明できる。既存建築物の生産システムとは、順工程、つまり「ゆりかごから墓場まで」の生産工程を合理化することに終始した研究・開発に基づいていたため、その後の段階である「墓場からゆりかごまで」の逆工程、さらにはそれを繋げる「循環」そのものを研究対象とすることはなかった。近年、コンクリートのリサイクルに関する「循環」の研究が増加したのは、これまでの生産システムに対する問題点の顕在化と、地球環境問題の解消を背景に循環を捉え直す必要性が認識され始めた結果であろう。なおこのことは、現在の「地球の安定」の条件となる水循環、大気循環、物質循環が、地球の自浄作用により回復できない程に乱れ始めたことを意味しているともいえる。

順工程生産システムというものは、最終製品・生産物を完成させるために必要な機能を細分化し、それらに対する生産システムを高度に合理化することが目的であったと考えられるため、逆に細分化された機能を結束させた「循環」の機能というものは、結果的に考慮されにくい概念であったと思われる。循環を考慮しない既存の仕組みが、地球環境問題の元凶となっていると捉えた場合、未だ主流であるその順工程生産システムやその背景にある生産方法論には、地球環境を悪化させる原因となるシステムが内在していると考えられるため、地球環境問題の解決を図る上で根本的な見直しが要求される要因であると考えられるのである。

このような状況を打開するために「循環」自身を研究対象とする動きも見られ始めている。家電製品などを対象とする精密機械の分野では、80年代の早い時期から「循環」に関する研究・開発を積極

的に実施しており[9]、現在市場にある製品の多くは「循環」を考慮した製品設計・生産システムが着実に反映されている。これに対し建設業では順工程生産システムを合理化する取り組みが基本となっており、循環を考慮した生産システムの構築度は十分ではないため、他産業における取り組みは、建築の「循環」を考える上で有効な知見になると考えられる。

吉川は、循環と関係する生産システムの本質的な仕組みについて次のように述べている[9]。「独立した領域は、数個の基本法則である仮説形成という推論による基礎的記述・法則により公共性を帯び、学問としての重要な性格が獲得されるが、局所的最適化を目標に行われるために、結果として不可避免的に生じる大域的不適正となることは否めない。」ここでは、局所性と大域性の関係を明確にしている。続いて、「その場合は、既に領域化した複数の領域を、各領域で得られた知識を十分に生かしながら統合する実証的な研究開発を行うことが重要である」と説明している。この考え方を、建設業およびコンクリート構造物に例えると、コンクリート構造物の「循環」を確保するための新たな方策を導出するために、構造物全体としては局所的な位置づけにあるコンクリートを大域的な性質である構造物全体の設計システムに関連づけた生産システムを構築することが重要になるというように構造物の生産システムのあり方を見出すことも可能になるのである。

以上、「地球の安定」を確保することを目的として、建築物さらにはコンクリート構造物における「循環」する生産システムを構築することは今後の社会のために重要であることが示された。そのためにこれまで「循環」を阻んできた既存の順工程生産システムに潜在する問題点を具体化して、建築の「循環」という性能を建築生産の初期段階で構造物に要求されるべき基本性能として位置づけること、そしてその性質を反映した設計概念とコンクリートの新しい材料設計手法を導入することが今後重要になると考えられるのである。このことが建築における「循環」の安定を図るための唯一の方策になると考えられ、その実証化に向けた検討が期待される。

1.2 本研究の目的

本研究の最終目的は、材料保存を可能にする完全リサイクルコンクリートを用いて、閉じた系内での資源循環を図ることを前提としたコンクリート構造物のライフサイクル設計手法を提案することにより、コンクリート塊のダウンサイクリングに起因して発生する環境問題の解決策を示すとともに、環境に配慮したコンクリート構造物の生産システムを持続可能にするための方法論を具体化することにある。

現在、産業領域の枠を越えて環境問題をキーワードとした研究開発が精力的に推し進められており、その事例に位置づけられる建築分野でのコンクリート塊の再資源化技術は、今後も主要な研究課題となると考えられる。このように、分野を越えて地球環境問題の解決という共通の目的に向けて研究の方向性が定められるような状況は過去には存在しえなかったと思われるが、この状況を導いた根本的な理由は、地球環境破壊が進行していることへの危機感、地球における自浄能力に対する不安感などが顕在化したためであろう。そして現在は、全産業をあげて具体的な対応を図る努力がなされている。なお現在の地球は、その自浄作用が健全に機能する状態を基点とした場合、既に健全度が低下した状態にあると考えられるため、マイナスの段階から地球環境の改善策を実施することになる。従って、第1ステップとして、閉じた系内でゼロエミッションを達成する方策を実行し健全度が低下しないようなシステムを構築し、第2ステップとして、当該生産システムの運用度に比例して環境が改善され健全度が向上する仕組み、つまり作れば作るほど環境が美しくなるような方策を実現可能なものにして、段階的かつ着実に地球の自浄作用を回復させる努力が必要と思われる。

環境問題を解決するための目標自身も時々刻々と変化し、方策自身も目標達成を目指して成長するべきものと考えられる。既存のコンクリート構造物の生産システムは前掲した第1ステップの達成を阻むような仕組みが内在している可能性があるため、逆工程における解体処理方法の検討を継続的に進めたとしても既存の生産システムが存在する限り閉じた系内でのゼロエミッションは達成できず負のスパイラルを構成する可能性も考えられる。従って、まずは既存の生産システムに内在する問題点の抽出および改善手法を具体化し、その後に第1ステップ、更には第2ステップの実現を可能にするような新しい建築生産システムの条件を提示することが重要になると思われる。

本研究では、以下の最終目的を達成するための具体的な研究目標を掲げ、調査、分析、実験および解析を通じて検討を行う。

(1) 既存の建築生産システムにおける問題点の明確化

既存のコンクリート構造物の生産システムを順工程生産システムと位置づけ、その仕組みに内在する資源循環の阻害要因を明らかにする。そして抽出された問題点を改善・解消するための方法論を導出し、閉じた系で資源循環を可能にするために必要な新しい概念を示す。

(2) コンクリート構造物のライフサイクル設計手法の構築

閉じた系内で完全に資源循環化を果たすコンクリートを基本とした設計概念により構造物のライフサイクル設計手法が構築されることを示す。またその場合、順工程生産システムに生産の逆工程を統合した順逆工程統合生産システムが構築できる条件が整うことを示す。

(3) セメント回収型－完全リサイクルコンクリートの実証化

コンクリートの構成材料の品質を低下させないで資源循環を可能とすることを条件に、コンクリートの全量がセメント原料となるような材料設計が適用されたセメント回収型－完全リサイクルコ

ンクリートについてその実証可能性を示す。そしてライフサイクル設計の基盤となるリサイクル設計を適用したコンクリートにより環境負荷低減が果たされる可能性を示す。

(4) 骨材回収型－完全リサイクルコンクリートの実証化

コンクリートの構成材料の品質を低下させないで、資源循環を可能とすることを条件に構造用コンクリートの原骨材が容易に分離採取できるような材料設計が適用された骨材回収型－完全リサイクルコンクリートについて、その実証可能性を示す。そしてライフサイクル設計の基盤となるリサイクル設計を適用したコンクリートにより環境負荷低減が果たされる可能性を示す。

続いて、研究目標を達成するための具体的な方法について示す。

上記(1)の既存の建築生産システムにおける問題点の明確化に関しては、まずコンクリート構造物をその構成材料の生涯と循環の観点から見直し、そこで発生する新たな概念を具体的に言語化する。その場合、コンクリート構成材料は構造物を介しての存在の仕方が決定されるため、コンクリート構造物を再資源化する段階に至るとコンクリート構成材料におけるその特徴・存在状態により再資源化手法および用途の制約が発生する構図が導かれることを示す。これらにより、構成材料の特性に起因してコンクリートの再資源化手法が体系化され、再資源化を図る上で最も利用可能性の高い手法が明確になる。

上記(2)のコンクリート構造物のライフサイクル設計手法の構築に関しては、コンクリート構造物の短寿命化現象がコンクリート構造物を生産する上での技術的な問題以外に使用者による運用上の機能寿命が継続的に得られなくなる点が影響していることを考慮して、コンクリート構造物に要求される本質的機能を示し、その機能を充足するための設計目的を具体化する。そして、設計目的は構造物の所要性能により重要度の重みづけが変化し、その結果、最適な個別設計要素さらにはライフサイクル設計のフレームが導出されることを示す。ライフサイクル設計は、コンクリート構成材料の材料保存性の確保を前提とした資源循環を図ることを目的とする設計手法である。

上記(3)のセメント回収型－完全リサイクルコンクリートの実証化に関しては、廃棄物起源材料をコンクリート中に一定量取り込むことで、最終処分廃棄物を低減しつつ成分調整不要のまま全量が再生セメントになる完全リサイクルコンクリートの基礎的物性と再生セメントの全量リサイクル可能性について示す。続いて、完全リサイクルコンクリートの拡大利用を図るために、汎用型骨材およびその粒形改善骨材を用いたコンクリートの標準調合表を作成するとともに粒形改善骨材がコンクリートの基礎的性質に及ぼす影響を実験的に確認することでコンクリートが高品質化する可能性を検討する。最後に、これまでの検討結果を踏まえて、セメント回収型－完全リサイクルコンクリートの実構造物への適用および既存コンクリートを比較対象とした需給環境のシミュレーションにより、構造用コンクリートとして一般化することの妥当性を検証する。

上記4)の骨材回収型－完全リサイクルコンクリートの実証に関しては、セメントペーストと骨材との易分解性が確保できかつ安全性、使用性および経済性に優れる骨材改質処理剤を抽出し、その基礎的性質を実験により明らかにする。続いて改質処理骨材を用いたコンクリートについて、普通強度から超高強度までの強度範囲でコンクリートを製造し、構造用コンクリートとしての基礎的性質、破壊特性およびリサイクル性を実験および解析を通じて示す。そして将来的な骨材需給構成を考慮し、改質処理骨材を使用する場合の材料的最適条件を導くとともに、需給環境のシミュレーションを行い、構造用コンクリートとして一般化することの妥当性を検証する。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第2章では、「製品ライフサイクルを考慮した資源循環化手法に関する既往の研究」と題して、従来型コンクリートの再資源化手法、リサイクラブル製品の資源循環化手法およびリサイクラブルコンクリートの資源循環化手法に関する既往の研究を整理し、コンクリート構造物におけるライフサイクル設計を実現するための条件について考察する。

第3章では、「コンクリートの材料保存性が導く生産システム」と題して、資源循環の共通言語、既存コンクリート構造物の生産システムおよび解体コンクリート塊のリサイクルシステムについて検討する。

第4章では、「コンクリート構造物のライフサイクル設計手法」と題して、3章における検討結果を基にライフサイクル設計のコンセプトおよびライフサイクル設計手法の実装について検討し、コンクリート構造物のライフサイクル設計手法を具体化する。

第5章では、「セメント回収型—完全リサイクルコンクリートの実証化」と題して、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの基礎的性質、完全リサイクルコンクリートの利用拡大に向けた材料調整法および完全リサイクル住宅への実施工と適用性評価について検討する。

第6章では、「骨材回収型—完全リサイクルコンクリートの実証化」と題して、ペースト界面との易分解性を可能とする骨材の開発および骨材回収型完全リサイクルコンクリートの基礎的性質・破壊特性・リサイクル性評価について検討する。

第7章では、「建築構造用コンクリートに関する需給環境の将来予測」と題して、第5章および第6章で検討されたセメント回収型および骨材回収型完全リサイクルコンクリートを中心に建築構造用コンクリートの環境シミュレーションを行い、その妥当性を評価する。

第8章では、本研究における結論を総括して述べる。

第1章の参考文献

- [1] Report to DGXI, Construction and Demolition Waste Management Practices, and their Economic Impacts, Report to Symonds Group, ARGUS, COWI Consulting Engineers and Planners, PRC Bouwcentrum, 1999
- [2] 建設副産物リサイクル広報推進会議編：総合的建設副産物対策,平成12年度建設副産物実態調査結果,2000
- [3] コンクリートへのリサイクル資材活用技術の標準化に関する調査研究委員会：エコセメントの標準情報 TR および再生骨材を用いたコンクリートのTRの概要,コンクリート工学,Vol.39,No.11,pp.53-59,2001
- [4] 政府経済財政諮問会議「循環型社会に関する専門委員会」中間報告書,2001
- [5] 財団法人日本建築センター：新建築技術認定事業,建築構造用再生骨材認定基準,1999
- [6] 石倉武,友澤史紀,他：高品質再生骨材の製造技術に関する開発その1,日本建築学会学術講演集, pp.1094-1096,1995
- [7] 仙田満：地球環境・建築憲章制定について,建築雑誌,Vol.115,No.1458,pp.3-5,2000
- [8] 野口貴文：鉄筋コンクリート造建築物の性能検証型耐久設計,コンクリート工学 Vol.40,No.5,pp.59-66,2002
- [9] 吉川弘之：人工物工学の提唱,東京大学人工物工学研究センターWeb Site, <http://www.race.u-tokyo.ac.jp>

第2章 ライフサイクルを考慮した資源循環手法に関する既往の研究

2.1 概説

2.2 既存コンクリートの資源循環手法

2.3 リサイクラブル製品の資源循環手法

2.4 リサイクラブルコンクリートの資源循環手法

2.5 資源循環を実行可能にする目標の設定と展望

2.1 概説

本章では、本研究に関連する既往の研究を整理して述べる。なお、研究の概説の過程で見出された考察・分析内容等を太字で示し、2.5「資源循環を実行可能にする目標の設定と展望」を具体化するための知見とした。

2.2 では、「既存コンクリートの資源循環手法」と題して、国内外におけるコンクリート塊の再資源化状況、再資源化するための初期段階におけるコンクリート塊の解体処理方法、製造された再生材料の特性および再利用パターンの分類、そして再生材料を実務的な使用するための基準・指針・方策を整理した。

2.3 では、「リサイクラブル製品の資源循環手法」と題して、資源循環を果たすための概念モデル、ライフサイクルの視点を盛り込んだ概念モデル、具体的な設計段階における資源循環化を可能にする製品製造モデル・製品分解モデル、そして資源循環化を支援するための基準・指針・方策を整理した。

2.4 では、「リサイクラブルコンクリートの資源循環手法」と題して、コンクリート構成材料の資源循環を果たすための概念モデルの整理およびコンクリートの主構成材料のひとつであるセメント分を資源循環させるためのコンクリートの特徴、もうひとつの主要構成材料である骨材分を資源循環させるためのコンクリートの特徴について整理した。

2.5 では、「資源循環を実行可能にする目標の設定と展望」と題して、既往の研究による知見を基に、資源循環を果たす上で重要となる実行可能な目標を具体化しその展望についての私論を述べる。

2.2 既存コンクリートの資源循環手法

2.2.1 コンクリート塊の再利用実態

(1) 国内の状況

現在、既存のコンクリート構造物から発生するコンクリート塊の大部分は、設計段階で解体後に再資源化を容易とする手法が導入されていないため、再資源化段階では、材料化することを目的とした特殊処理を適用しない場合はコンクリート塊は大幅に品質が低下し産業廃棄物として最終処分されるような性質を帯びたものとなる。従って現在は、コンクリート塊をそのような性質を持つ物質として認識し、その上で社会的ニーズを見出して最も利用価値の高い適用方法を見出すことが重要と思われる。

日本における全産業廃棄物の総排出量は、1990年以降は年間4億トン程度[1]で推移しており、その中でも建設業から発生する産業廃棄物は、全廃棄物量の18%程度を占めており、農業および電気・ガス・熱供給・水道業と並んで、最大の廃棄物排出業種であるといえる。

1994年に建設省は、建設副産物の再利用の促進と最終処分量の低減を推進するプロジェクト研究の成果[2]を基に、建設副産物対策行動計画－リサイクルプラン21－を定めた。この行動計画は、将来的に建設廃棄物の最終処分量をほぼゼロにするゼロエミッションを目標にし、2000年度までには、建設廃棄物の発生量を同統計から10%減少させること、最終処分量を1990年基準に対してほぼ半減させることを具体的な目標とした。この中で、アスファルトコンクリート塊およびコンクリート塊の再利用率に関しては、1990年の50%から2000年の90%に引き上げることを目標に、実行に移された結果、アスファルトコンクリート塊の再利用は進んだものの、コンクリート塊は不十分であるとされ、コンクリート廃棄物の発生抑制のための取り組みが、以後も継続的に実行される必要性が強調された。

建設副産物の実態データを把握するには、建設副産物実態調査(センサス)が適当であり、建設副産物の政策立案に不可欠なデータベースを提供することを目的としており、平成2年度調査より5年間隔の実施が計画されている。図2.1.1に平成2年度、平成7年度および平成12年度における建設廃棄物種類別排出量の調査結果[3-5]を示す。昨今は、人口の自然減の影響により、公共工事や建築着工数自体が減少する傾向にあり、平成7年度と比較した平成12年度の総排出量が約15%程度減少した点にも、そのことが反映されていると思われる。この現象は、人口減少に歯止めがかからない限り継続するものと思われる。細目に関する特徴は、コンクリート廃材が、1990年度は2500万トン、1995年度は3600万トンおよび2000年度は3500万トン建設廃棄物の中で最大量を占め、アスファルトコンクリートも含めると、

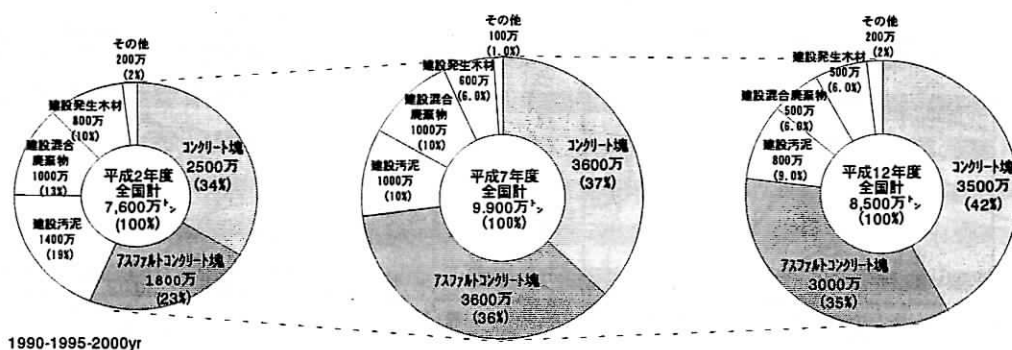


図 2.2.1 建設廃棄物－種類別排出量 (1990-1995-2000 年度) [3-5 参照]

全体の 70% 程度の膨大な量となることが理解できる。また 1 人当たりの排出量に置き換えて考えると、2000 年の日本の人口は 1 億 2693 万人であるため、建設廃棄物は 669kg/人年、コンクリート廃棄量は 276kg/人年となる。なお、西ヨーロッパ諸国におけるデータ[6]によると、建設廃棄物の最多要因であるコンクリート塊(40%)の排出量は 601-800kg/人年であり日本と同程度である。

建設廃棄物—最終処分量の調査結果を図 2.2.2 に示す。平成 12 年度調査では、前回調査結果と比較して大幅な減量が達成されている。新築工事から発生する廃棄物排出量減少に起因する要因と、廃棄物の再資源化が大きく進展した要因が大きく影響したものといえる。

建設廃棄物の再利用率を図 2.2.3 に示す。平成 12 年度調査結果におけるコンクリート廃材の再利用率は 98% であり、調査回数に比例して再利用率が増加していることが確認できる。なお、建設リサイクル推進計画'97 では、リサイクルプラン 21 の見直しも含めて建設リサイクルの推進に向けた施策を打ち出しており、平成 12 年度のコンクリート廃材の再利用率に関しては 90% とすることなどが新たな目標とされた。そして、結果的にその目標も達成されたため、再資源化率に着目した場合、非常に優れた循環材料として認ることができる。しかし、再資源化用途の大部分は路盤材や埋め戻し材であり、品質低下を許容したリサイクル、いわゆる「ダウンサイクリング」に基づいているといえる。この点に関して、次のような分析が可能である。ダウンサイクリングは、製品の要求性能が低いため、用途が広範にある場合は、需要が喪失するまでの一定期間は、有効な手段として位置づけられる。しかし、日本は、一般的にコンクリート廃材発生地と路盤材の需要地が遠隔地にあるため、輸送コストを考えると全量を路盤材とすることは非現実的であり、また将来における道路拡張整備計画が複雑化している状況、現在の都市基盤インフラの充足度および人口の自然減に伴う新規事業の必要性の低下性等の要因を考慮すると、現状の再資源化手法により、需給バランスに優れる状況を長期的に維持することは困難である。

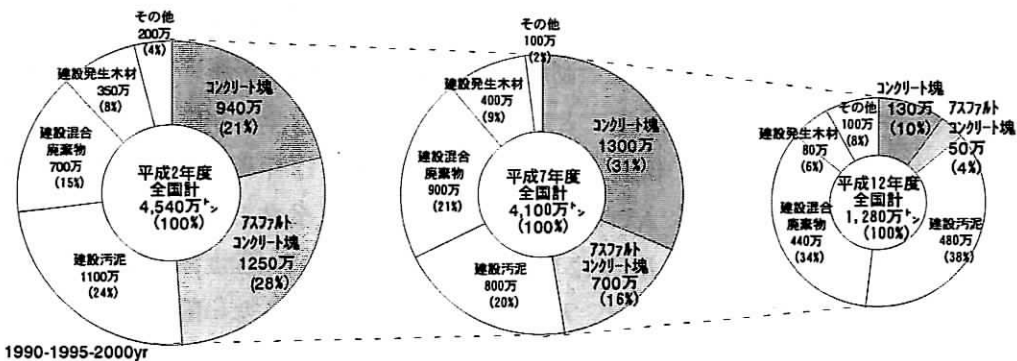


図 2.2.2 建設廃棄物—最終処分量 (1990-1995-2000 年度) [3-5 参照]

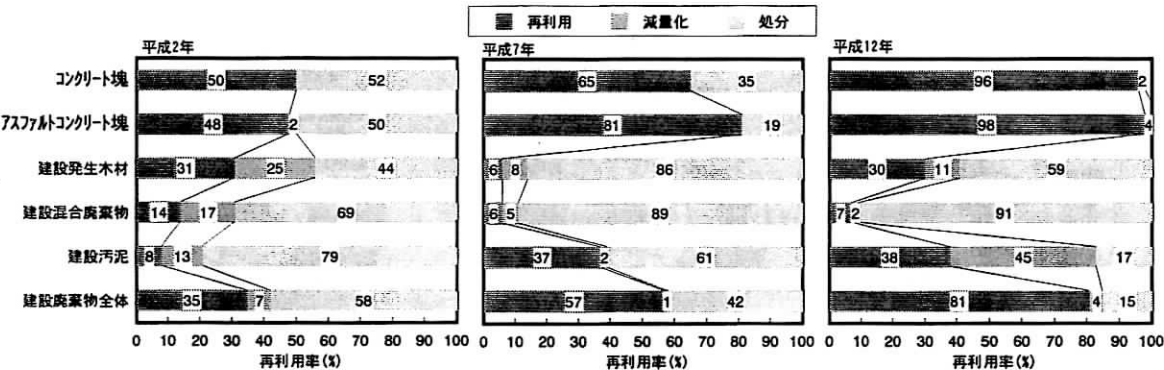


図 2.2.3 建設廃棄物—再利用率 (1990-1995-2000 年度) [3-5 参照]

一方、廃棄物排出量や最終処分量の減量化が達成されることは望ましいことではあるが、それは正確な実態の把握が大前提となる。図 2.2.4 に除去建築物統計とコンクリートの廃棄量予測値[2]を示す。センサス調査によると、1995 年度コンクリート廃材発生量は、全国で約 3600 万 t とされているが、実際の発生量はこれよりはるかに多いことが指摘されている[7]。それは、コンクリート塊発生量を、建築物に使用されるコンクリートの原単位（1 m^3 当たり使用量）、除却建築物統計およびその予測値から計算した場合、RC、SRC および S 造の除却建築物から排出される本来のコンクリート量は、1990 年では 5600 万トンであり、1995 年では 7000 万トンを超えると考えられ、センサス統計値よりも数倍の量が実際には発生することになる。センサスでは、その不明分は考慮されていない。また土木構造物からの発生量を加えると、実際のコンクリート塊発生量は、更に大きな値となることは容易に想定される。

上記のコンクリート塊発生量の調査値と推定値の差が発生する原因を明確にする必要がある。原因として考えられることは、建設副産物である建設発生土への混入廃棄である。建設発生土は、1995 年度で 4 億 4600 万 m^3 発生しており、コンクリート塊よりも数倍も多く発生しているが、建設発生土は廃棄物処理法で定める産業廃棄物に含まれないため、埋め立て、埋め戻し材として容易に使用することが可能である。従って、地下構造物を中心としたコンクリート廃材などは、建設発生土に混入して廃棄されていることが想定され、その場合、結果的にコンクリート塊の総発生量は低下するものと分析できる。

今後、コンクリート廃材の発生量が漸進的に増加することは明らかである。そこで、コンクリートの製造予測量に基づいた将来における廃棄量推計が示されている[8]。コンクリート製造量は、1998 年までは実績データ[9-11]を、それ以降は国民 1 人当りのコンクリート消費量に、国立社会保障・人口問題研究所が示す人口推計値(1997 年)[12]のデータに乗じて求めている。またコンクリート解体時期の予測には、建築系のコンクリート構造物では既往の研究における調査結果[13]、土木系のコンクリート構造物では、橋梁に対する調査結果[14]を参考に、対数正規分布による廃棄確率を用い、残存率が 0.5 になる年数と標準偏差を定めて推計を行っている。これによると、2000 年のコンクリート廃棄量は、約 1 億 t /年であり、2011 年には 2 億 t /年を越え、2025 年には 3 億 t /年を越えることが予測されており、2055～2060 年に増加のピークとなるの約 4 億 t /年を達成し、その後は減少傾向に転じるとしている。また廃棄量が製造量を越える時は、2037 年～2045 年の間であるとし、2040 年代以降は、全量をコンクリートに再生する需要が無くなるという理由から、解体コンクリートの全量をコンクリートにリサイクルする必要はなくなるとしている。しかしながら、現在のコンクリートに関わる環境問題を考慮した廃棄物発生抑制の問題は、製造量と廃棄量とのバランスのみで解決できるほど容易ではない[7]という見方も存在する。

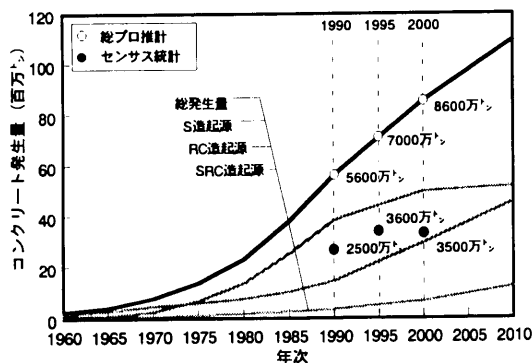


図 2.2.4 除去建築物—コンクリート塊発生量推移 [2]

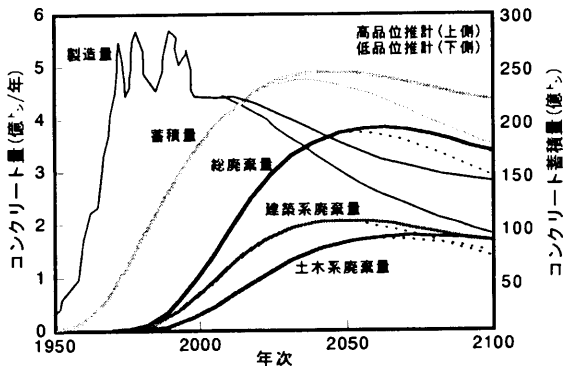


図 2.2.5 コンクリート製造量・廃棄・蓄積量の将来予測 [8]

(2) 海外の状況

EU [16-22 参照]

EU はドイツ連邦共和国、イギリス、フランス共和国、イタリア共和国、スペインの EU5 を中心に全 15 ヶ国で構成されており、1999 年時点の総人口が 3.7 億人を越えている。そして、2002 年における通貨統合に象徴されるように、広範な領域にわたり協働的な取り組みを実施する方向にある。建設廃棄物の再資源化に向けた取り組みに関しても、各国政府と業界団体との間に、1996 年の時点で 300 以上もの環境保全関連の自主協定(Voluntary Agreements: VAs)が締結されており、共同体レベルで廃棄物処理問題の解決を図る傾向にある。なお VAs とは、環境保全を実行する上での行政主導の規制的手法や民間主導の経済的手法と並ぶ第 3 の政策手法として位置づけられるものであり[15]、環境協定(Environmental Agreements)または環境協約(Environmental Covenants)とも呼ばれる。VAs を実務的に使用している欧州においても、その明確な定義はないが、一般的には法律のような強制力はなく、政府と事業者との具体的な合意に基づき、事業者側に自主的に必要な対策を講じさせることで、行政主導の目的を達成するものであり、EU 全体では VAs を有効な政策手段として位置づける方向にあるようである。

EU の研究組織である欧州委員会(European Commission: EC)では、建設廃棄物に関する総合的研究を実施するため、1990 年に Priority Waste Stream Project (PWSP) を発足させ、1992~95 年の間に民間の建設技術コンサルタント等により構成される Symonds Group (イギリス)、ARGUS (ドイツ)、COWI Consulting Engineers and Planners (デンマーク) および PRC Bouwcentrum (オランダ) に産学官 60 を越える団体が共同調査研究を実施することを要請し、1999 年にその最終報告書である European Commission Report to DGXI (Symonds Report) を EU による最新レポートとして示している。報告書では、EU15 を対象に、再利用可能な建設発生土および道路用材料を除いた建設廃棄物を、主要建設廃棄物('Core' C&DW(Construction and Demolition Waste))とし、その発生量を中心とした各種指標に関する調査が行われている。図 2.2.6 に人口構成、図 2.2.7 に'Core' C&DW 発生量、図 2.2.8 に単位人口当たりの単位'Core' C&DW 発生量、図 2.2.9 に'Core' C&DW 再資源化割合、そして図 2.2.10 に再資源化処理施設数のデータを、日本およびアメリカのデータを追記した形で示す。EU15 全体の'Core' C&DW 発生量は年間 18000 万ト(480kg/人/年)に及び、全量の 80%が EU5 により占められている。その全量の 28%程度が再資源化され、残りの 72%は廃棄処分されている。その量は、13.0km²の敷地に対し、毎年 10m の深さまで、埋める量に匹敵するとされ、近年では、EU 全体の見解として、埋め立て税を導入することで、その発生

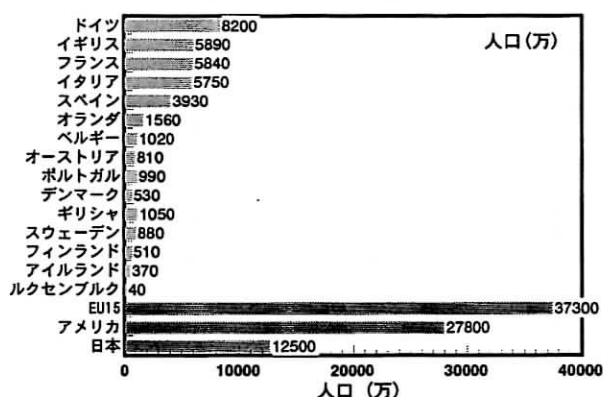


図 2.2.6 人口構成[16]

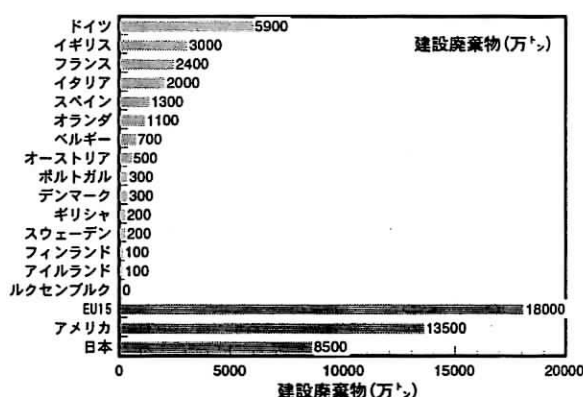


図 2.2.7 Core C&DW 発生量[5,16,38 参照]

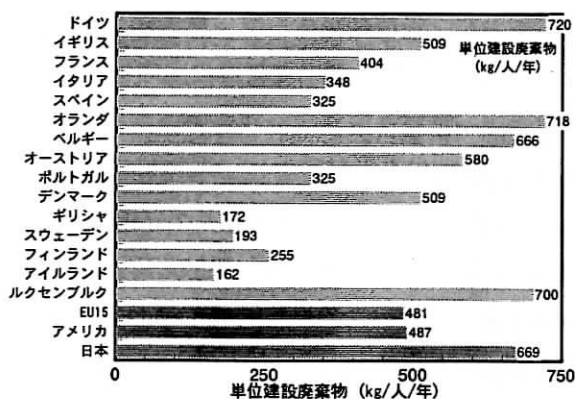


図 2.2.8 1人あたり Core C&DW 発生量[5,16,38 参照]

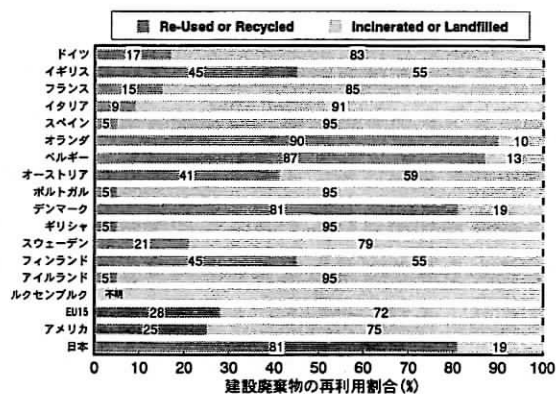


図 2.2.9 C&DW—再利用率[5,16,38 参照]

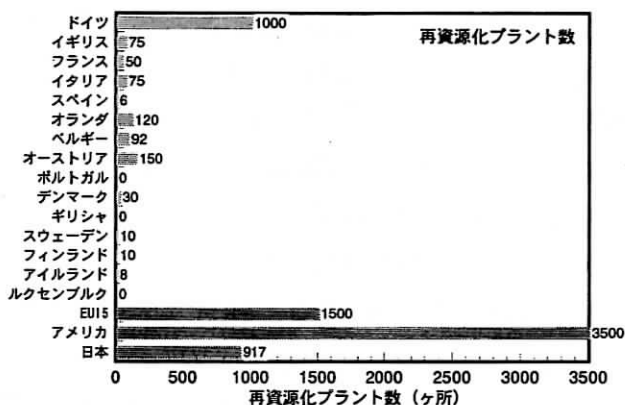


図 2.2.10 再資源化処理施設数[5,16,38 参照]

を抑制する手段を講じる方向にある。なお将来的には、EU における建設廃棄物の移動をインターネット上で管理するデータベースを構築することが検討されている。

‘Core’ C&DW の主要因となるコンクリート塊に関しては、再資源化のあり方として、EU 全体で大きな地域差があるが、大部分の国において、コンクリート中の primary aggregate は解体処理後に品質低下を許容する路盤材などの secondary aggregate として再利用することが一般的となっている状況である。

その他、建設廃棄物の合理的な処理もしくは再資源化を行うための環境事業を推進する共同組織として、建設業団体により構成される The European Construction Industry Federation (FIEC)、建設廃棄物処理団体により構成される European Demolition Association (EDA)、EU 各国の政府組織および建設材料産業団体による構成される The council of European Producer of Materials for Construction (CEPMC)、および EU15 における FIEC 主要メンバーと 16 の建設業団体から構成される European International Contractor (EIC) などが存在し、ヨーロッパ全域を網羅する包括的な取り組みを推進する方向にあるといえる。

ドイツ [16,17,22-24 参照]

ドイツは、広範の地域から建設廃棄物に関する詳細なデータを収集している。Symonds Report における 1994-96 年の ‘Core’ C&DW は 5900 万トン/年 (720kg/人年) であり、全体の再資源化率は 17% である。コンクリート塊の再資源化率は明確にされていない。一方、1995 年の C&DW が 9700 万トン/年 (1191kg/人年) で、再資源化率が 73% とする調査結果も存在するため、対象とする建設廃棄物の品目と再資源化レベルの評価方法により統計量が変動する現象が起きている。このように同一地域・国家から複数のデ

ータが発生し、評価が複雑化する問題は世界的に発生しており、最終的な原因は、廃棄物の定義方法および見直しを前提とした更新の程度に起因すると分析できる。例えば、ドイツの建設団体による VAs の活動でまとめられた特定建設廃棄物（建設現場の石屑・発生土、道路系廃棄物、建築物系廃棄物）の利用状況に関する報告書によると、1998 年は 7710 万トンの特定建設廃棄物が発生し、約 72% に当たる 5520 万トンが有効利用されていることが示されたが、これに対し、Symonds Report では、ドイツ国内において、廃棄物から除外対象となる建設発生土が 1994-96 年調査で、21500 万トン/年発生していることを確認しているため、上記レポートにおける石屑・発生土の扱い方により、統計上の廃棄物発生量および再資源化率は大きく変動する可能性があるため注意する必要があることが示された。

また、再資源化施設数に関しては、ドイツ建築材料リサイクル協会（Bundesverband der Deutschen Recycling Baustoff-Industrie）の調べによると、1999 年の総施設数は 1000 ヶ所以上、総可動能力は 800 万トン/年という推定値を示している。また Brite-EuRam report での調査結果では、一般的な再資源化施設の可動能力は 12 万トン/年であるが、実質稼働率は 4 万トン/年に留まっているという報告もある。

政策面に関しては、産業廃棄物の管理全般に関して、最終処分場における受け入れ量と残余量を厳密に管理することを重視されており、1996 年に、Closed Cycle & Waste Act と称し、経済的に成立するリサイクルの推奨と廃棄物の発生抑制を図るための管理プログラムが施行され、1999 年 1 月には建設廃棄物に関する適性処理のためのマニフェスト管理が義務化された。

建設廃棄物の発生抑制に関連する規準類に関しては、現在の建設用コンクリートの設計・施工に関するドイツ工業規格（DIN1045）に一部規定があり、構造体に適用可能な条件を明確にし、合理的な運用を図るための配慮がなされている。またモルタルにおける再生骨材の使用に関する規格（DIN4226-100）が規定されており、再生骨材の有効利用を推進する仕組みが確立しつつある。経済的に成立することを条件とした廃棄物の有効利用を促進するための法律も存在するため、無機系建設資材のリサイクルに着目した研究活動は今後も積極的に実施され、コンクリート塊に関しても DIN を基本とした再生骨材コンクリートの製造・利用指針が作成されることが期待できる。なお、VAs に基づく地域的なコンクリート塊を中心とした廃棄物有効利用は着実に進んでおり、ベルリンとブランデンブルクの環境局による取り組みは、先進的なものとして一定の評価がある。

イギリス[16,17,22,23,25-27 参照]

イギリスは、建設廃棄物発生量データを国内全域から収集しておらず、地域データを代表値として扱う場合がある。そのため、国内最終値は推定値として示される場合が多い。Symonds Report によると 1996 年の'Core'C&DW は 3000 万トン/年（509kg/人年）であり、再資源化率は 45% とされている。再資源化施設に関しては、推定施設数が 50~100 ヶ所であり、360 以上のクラッシャー設備が国からライセンス許可を受けて実働している。しかしながら、その数は天然骨材採掘用のクラッシャーも含めた値であるため、再資源化専用の破碎機総数は不明である。なお、一般的な再資源化施設の可動能力は 0.4~8 万トン/年であるとしている。

コンクリート塊に関しては、年間 400 万トン程度が廃棄されず再資源化处理されているが、その大部分は路盤用材料となっている。コンクリート用骨材としての使用を可能にするためには、英国規格 BS882（コンクリート用天然骨材）を満足する必要があるが、エネルギーを投入して高度処理を実施し、同規格に適合する骨材を製造するよりも、BS 6543-1985（工業副産物および建設廃材の利用に関する指針）

に適合する低品質再生骨材として市場価値をもたせることが適当とされている。

政策面に関しては、イギリス環境・運輸・地域省によると、年間 16500 万トンの建設用骨材が天然骨材として採取されており、昨今は周辺環境に影響を与えるという認識が高まったため、2000 年 10 月に建設骨材の持続可能な供給のあり方を提案する骨材採取権認可指針が公表された。これは 1994 年の鉱物採取計画ガイダンスノート 6 (Minerals Planning Guidance Note 6) を改定したものであり、新たな提案として、天然骨材代替として再生骨材を最大限利用する原則を打ち出している。また建設廃棄物の再資源化を促進するために、廃棄物・資源アクション・プログラム (The Waste and Resources Action Programme : WARP) が建設業界が中心となる NPO として発足した。WARP の設立は、政府が 2000 年に発表した廃棄物戦略 2000 (Waste Strategy 2000) で提案されたものであり、建設廃棄物の再生材料としての需要を喚起し、リユースおよびリサイクルを促進するため基準作り、マーケットの展開方策に重点を置いた活動を行うとしている。政府機関である環境省からも財政支援 (初年度以後 3 年間で 51 億円) も準備されており今後の取り組みが期待されている。その他、廃棄物の合理的運用を可能にする税制的手法も活用しており、1996 年 10 月からは廃棄物埋立税を導入し、非可燃性廃棄物の埋め立てには全て課税対象にするとした。また埋立処分許可権を市場取引するためのコンサルテーションペーパーも公表されており、これらの合理的な運用により、イングランドとウェールズの廃棄物処理量を、現在の 3 分の 1 の量まで確実に削減できる見通しが立てられている。

フランス[16,17,22 参照]

フランスは、建設廃棄物データは政府の公式文書 (Guide des Dechets de Chantiers de Batiment, ADAME) に基づいているが、土木分野のデータが不明確であるために最終量は推定値となっている。国内全体では、建設廃棄物は 2360 万トン/年 (404kg/人年) で、再資源化率は 24%程度としている。再資源化施設数は 50 ヶ所が都市地区に固定されており、総可動能力 500 万トン/年、各施設の平均可動率は 10 万トン/年としている。建設廃棄物の発生量には地域差があり、イルドフランス (ile de france) の 680kg/人年から、オートノルマンディー (Haute Normandie) とリムーザン (Limousin) を含めた 240kg/人年までの格差がある。Brite-EuRam project における Report on Brite EuRam III (Industrial and Materials Technologies) では、フランスの主要 50 ヶ所の再資源化施設のうち、22 ヶ所はイルドフランス地区、その他はアルザス (Alsace) やローヌアルプス (Rhone-Alpes) 地区に集中しており、地域集約的な産業として成立している。

混合物も含めたコンクリート廃材の推定量に関しては、1560 万トン/年 (271kg/人年) とする調査結果が示されている。道路改修や大規模施設の解体工事でクラッシャーランとしてコンクリート塊が再資源化される場合もあるが、再生コンクリートとして使用することを想定した開発事例は極めて少なく、指針類もないため、住宅・建設局の要請によりフランス独自の技術基準の策定も検討が開始されたような状況である。なお、欧州共同体研究には参加しており、再生骨材のコンクリートへの適用に関する研究開発も今後は実施する方向で検討している。

政策面に関しては、フランス環境・国土整備省は、EU の廃棄物埋立処分に関する指令 (1999/31/EC) を国内法制化する作業を進めており、国内産業における新規定への円滑な対応が図られるように、安定型廃棄物管理施設に関する技術ガイドラインが公表されている。なお国民レベルにおける再資源化活動も推進されており、現在、国民の 85%以上がリサイクル推進団体の NPO あるエコ・アンバラージュま

たはアデルフィーとの契約下で生活しており、これまで殆ど再資源化されていなかった一般廃棄物が、現在は再資源化率を45%まで高めることに成功している。政府はこの取り組みを建設廃棄物の再資源化促進に向けた有意義な手法と認め、産業界に対し廃棄物問題の根本解決を図るための新たな方針として示している。その他、建設物を始めとするあらゆる製品開発に対し、設計段階での環境配慮を導入するエコ・コンセプトや環境配慮製品のラベリング表示を積極導入することを検討している。

イタリア[16,17,22,29 参照]

イタリアの1995-97年における'Core'C&DWは、2000万トン/年(348kg/人/年)であり、再資源化率は9%であるとしている。また1997年の建設廃棄物は、1500~3000万トン/年(261~522kg/人/年)で、再資源化率が10%とする研究データも存在するが、ほぼ同程度の統計データが示しているため、実状を反映しているといえる。再資源化施設数は60~110ヶ所程度存在するが、特定の民間業者が10ヶ所程度の固定式プラントを保有しており、残りの50~100ヶ所は、地域的に偏在する小型の移動式簡易破碎プラントとなっている。

建設廃棄物の処理方法は、基本的には各地域の自治体における方策に委ねられている。発生量の特徴はフランスと同様に、都市人口に応じた地域差があり、トリノ市周辺地区(Piemonte Val D'Aosta)の680kg/人/年から、シシリア地区(Sicilia)とシャンパーニャ地区(Campania)を含めた220kg/人/年までの割合で分布している。古代都市国家を形成したローマを含むラツツィオ地区(Lazio region)では、古代都市街区を補修・改修により保存する傾向にあるため、260kg/人/年と例外的に廃棄物発生量が激減していることが特徴的である。なお近年は1990年からの産業不況の影響により、フランスの建設会社の多くがイタリアから業務撤退し、建設工事も新築部門が減少し、リノベーション部門が増加する産業構造が一般化してきたため、歴史的に廃棄物発生量が低い水準が続いている。しかしながら、2050年頃には建設総廃棄物が6000万m³に到達するという推定も示されており、国民の問題意識は高い。

コンクリート塊から発生した再生骨材の利用促進に関する国内基準は現在のところ存在しないため、廃棄物の最終処分を抑制する税制措置による経済的手法が早くから導入されており、廃棄物埋立税としてECU10/tonを課税している。

スペイン[16,17,30-32 参照]

スペインの1997年における'Core'C&DWは、1280万トン/年(325kg/人/年)であり、再資源化率は5%としている。しかしながら、大半の建設廃棄物はその内容・容量が把握されないまま最終処分されている状況であるため、総廃棄量は単位廃棄量(325kg/人/年)に人口割合乗じた推定廃棄量として算出されている。単位廃棄量は、建設廃棄物の管理を比較的厳密に実施しているカタロニア政府における調査データ(カタロニア基準)を採用したものであり、調査値である275-375kg/人/年の中間値を採用している。なおこのような廃棄物量算定方式は、隣国のポルトガルでも実施されており、単位廃棄量は、カタロニア基準の325kg/人/年を採用している。首都のマドリッド近郊の再資源化施設による実態調査では、全建設廃棄物の54%はレンガ類で、コンクリート廃材は12%程度であり、その全量の5~10%が路盤材料のクラッシャーランとして再利用されている。1997年時点での再資源化施設は6ヶ所であり、主に移動式破碎機により再資源化処理を実施している。

建設廃棄物処理は、各自治体のコントロールに委ねられており、廃棄物の合理的運用を可能にするよ

うな税制的手法も存在しないが、カタロニア、バスクおよびマドリッド地区では、比較的進んだ廃棄物マネジメントが実施されており、道路整備業務を仕事とする CEDEX 社がスペインにおける廃棄物再資源化活動の中心的な役割を担っている。

オランダ[16,1722,33-35 参照]

オランダの建設廃棄物に関連するデータは、EU15 の中でも比較的厳密な調査に基づいた信頼性のあるものであり、EU 内でも広く取り扱われている。またコンクリート塊の再資源化に関しても、構造物に取り込まれた primary aggregate を合理的に回収し、secondary aggregate として、再び構造体を使用することを唯一実施している国でもある。

1996 年の 'Core' C&DW は 1120 万トン/年 (718kg/人/年) であり、再資源化率は 90% としている。建設廃棄物は 1400 万トン/年 (910kg/人/年) とするデータも存在する。廃棄物の再資源化目標を、1995 年で 75%、2000 年で 90% としている点からも、建設廃棄物発生抑制の取り組みを継続的に実施していることがわかる。再資源化施設は全国で 120 ヶ所存在し、20 ヶ所は現場内プラント、残りの 100 ヶ所は現場外固定式プラントであり、総可動能力は 16250 万トン/年で、各施設の平均可動率は 9000 トン/年程度とされている。

コンクリート塊に関しては、発生量は総廃棄量の 42% を占めることが確認されており、再資源化率は明確に示されていない状況である。しかし、これまでその大部分が路盤材、埋め戻し材として再利用されていたが、市場における低品質再生骨材の価格維持問題、構造用天然骨材の資源枯渇問題などが緊迫化してきたため、1980 年代初期から再生骨材をコンクリート製品へ利用拡大することを目的とし、隣国であるデンマーク、ベルギーなどの国を巻き込む形で、RILEM の委員会活動が開始された。最終的には、再生骨材のコンクリートへの利用に関する RILEM 指針の作成に大きく貢献し、その成果を実務的に活用する動きもみられる。なお RILEM 指針は、上記 3 ヶ国の建設廃棄物に関する統計データと EU 内の特定国で用いられている規格や規則を整備して作成されており、この指針をもとに、再生骨材の製造・使用に関するオランダ工業規格(NEN5905-1997)が制定されている。そして、圧縮強度が 65MPa までのコンクリートについて、天然骨材に再生骨材を 20% まで置換した混合骨材を使用可能にしており、再生骨材をコンクリート構造物に使用することを可能な状況を具体化している。

政策的には、住居・国土計画・環境省は、廃棄物管理に関連する方策である国家廃棄物管理計画について、2002～2006 年期の改訂では、廃棄物管理の流れ、廃棄物の輸出入政策、サーマルリサイクルの推進、各種廃棄物の再資源化手法および焼却・埋立に関する廃棄物処理規制などについて抜本的な見直しを計画している。またそれらの方策を、社会的ニーズを正確に捉えた実状に見合うものにするために、インターネットによりパブリック・コメントを積極的に募集して最終的に法制化することを明言している。なお現在、建設廃棄物処理は、ライセンス供与制としており、廃棄物の合理的運用を促進するための税制手法も存在しているといえるが、再資源化処理が全地域的に実施可能な状況には至っておらず、各地域における最終処分場残余容量、受け入れ状況などに需給構造が支配されているのが現状である。

ベルギー[16,17 参照]

ベルギーの 1990～1992 年における 'Core' C&DW は 680 万トン/年 (666kg/人/年) であり、再資源化率は 87% であるとしている。再資源化施設数は 92 ヶ所とされており、フランダース地区に可動能力が 500 万トン/年の固定プラントが約 80 ヶ所、分級専用プラントが 40 ヶ所存在する。ワローニア地区に残り 12

ヶ所の可動能力が 9000 トン/年である現場外固定式プラントが存在する。なお首都であるブリュッセルには再資源化施設は存在しない。

建設廃棄物処理は、各地域自治体のコントロールに委ねられており、建設工事の過程で再資源化処理を全く規定していない地区も存在する。フランダース地区ではインターネットを利用して一般廃棄物を対象とした処理管理システムが整備されているが、建設廃棄物では全く実施されていない。なお廃棄物埋立税による経済的手法が導入されており、フランダース地区は 9.5ECU/ton、ワローニア地区は 3.75ECU/ton を課税している。

オーストリア[16,17,36 参照]

オーストリアの 1997 年における 'Core' C&DW は 470 万トン/年 (580kg/人/年) であり、再資源化率は 41% であるとされている。再資源化施設数は 150 ヶ所とされており、総可動能力は 500 万トン/年程度である。固定プラントの可動能力は 2 万トン/年であり、60%程度の可動状況が続いている様子である。なお移動プラントは、固定プラントの半分程度の数量割合である。

政策面に関しては、建設廃棄物処理に関する情報源となっている National Waste Plan が定期的に更新されているものの、建設廃棄物を合理的に運用するための税制的手法は採用されておらず、埋立税もなく、埋め立てを中心とした建設廃棄物の処理コストを、国内レベルで統一して実施している程度である。

ポルトガル[16,17 参照]

ポルトガルの 1997 年における 'Core' C&DW は 320 万トン/年 (325kg/人/年) であり、スペインにおけるカタロニア基準の 325kg/人/年から推定して算出されている。再資源化率は 5%程度とされている。固定式の再資源化施設はなく、建設業におけるリサイクル活動は環境保全活動の中心的な検討課題ではない様子である。廃棄物の合理的運用を促進するための税制手法は存在しない。なお廃棄物の再資源化は十分ではないが、研究レベルで secondary aggregate を路盤材に使用するための検討が一部で行われている。

デンマーク[16,17,22,37]

デンマークの 1996 年における 'Core' C&DW は 270 万トン/年 (509kg/人/年) であり、再資源化率は 81% であるとしている。再資源化率は、1986 年が 12%、1990 年には 80%を達成しており、将来的には 90%まで上げることを目標としている。建設廃棄物のうち、コンクリート塊は 83%を占めるが、再資源処理施設における実態調査では、コンクリート廃材は全搬入量の 35%程度とした報告もあり、正確なデータは把握されていない。再資源化施設は約 30 ヶ所存在し、総可動能力は 300 万トン/年である。典型的な固定プラントの可動能力は 10 万トン/年であり、移動プラントと固定プラントの数量割合は同等である。

政策的には、デンマークはオランダと同様に、国土の狭さに伴う天然資源枯渇問題・廃棄物処理問題の緊急性により、早い時期から廃棄物処理に関する基準・指針などが整備されており、1987 年には建設廃棄物の埋め立て、焼却による減容化処理、天然資源採取に対する課税制度を設けている。また同時期に約 60 におよぶ廃棄物の適性処理・再資源化のためのパイロットプラントやプロジェクトが企画・実行され、デンマークのコンクリート協会は、1990 年に再生骨材製造・使用に関する技術基準を策定し、随時改定・追加作業を実施している。再生骨材に関しても、製品ストック処理方法や使用に際しての基準化の問題が検討されているが、経済性の維持、市場価値の向上などの障壁があり、構造物に適用された

事例は極めて少なく、実務的に使用されるまでには至っていない。

ギリシャ[16,17]

ギリシャの 1997 年における 'Core' C&DW は 180 万トン/年 (172kg/人年) であり、再資源化率は 5 % としているが、再資源化の専用施設はほとんど存在しない。廃棄物の合理的運用を可能にするための税制手法は存在せず、政府によるプロジェクト研究などによる実証的検討もほとんどない。その他、一般的な情報はほとんど公開されておらず、不明な点が多い。

スウェーデン[16,17]

スウェーデンの 1996 年における 'Core' C&DW は 170 万トン/年 (193kg/人/年) であり、再資源化率は 21 % としている。再資源化施設は 2 ケ所の固定式プラントと 8 ケ所の移動式プラントが存在するが、その運転性能は不明である。典型的なプラントでは、2.5 万トン/年の可動能力がある。

政策的には、建設廃棄物処理に関しては、新規および既存構造物の施工・解体時において、廃棄物発生計画を立てることを法制化している。特に危険物に対する管理は厳しく、1997 年には可燃性廃棄物と生物系廃棄物の埋め立て禁止令をそれぞれ 2002 年、2005 年から施行することを決定している。天然骨材採取に対する課税制度は存在し、1999 年からは埋め立て税導入のための法整備が進められている。また National Road Authority (NRA) は、2000 年までに道路用碎石の 90 % を再生材料で賄うことを目的とした研究開発を行っている。

スウェーデンは国土が北欧地区に位置するため、循環資源である木造を主体とした構造物が多く、建設産業自体が比較的緩やかな生産活動を実施しているため、元来建設廃棄量が大変少ない。しかしながら、同じ北欧であるデンマークでは人口あたり単位廃棄量が 509kg/人年と倍の値を示しており、この原因は、主に人口密度と循環材である木材の使用割合によるとされている。

フィンランド[16,17]

フィンランドの 1997 年における 'Core' C&DW は 130 万トン/年 (255kg/人/年) であり、再資源化率は 45 % としている。再資源化施設は 10 ケ所存在するが、主にレンガ系材料の再資源化に焦点を置いているため、コンクリートを対象とした破碎プラントの数は少ない。

建設廃棄物処理に関しては、埋め立て制度、再資源化施設、輸送業者、廃棄処理のライセンス制度が環境政策の重要項目として挙げられており、多くの自治体が廃棄物管理の制度化に関心を寄せるようになってきている状況である。1998 年からは埋め立て税 (90FIM/ton+ECU19/ton) も導入されている。

アイルランド[16,17]

アイルランドの 1996～1997 年における 'Core' C&DW は 60 万トン/年 (162kg/人/年) であり、再資源化率は 5 % である。再資源化施設は 8 ケ所以下で、6 ケ所は移動プラント、残りは固定式プラントである。

建設廃棄物処理に関しては、最終処分場の管理を強化しており、EU 中央組織からバレイイエリー (Ballyeally) とバレイフェルモット (Ballyfermot) の 2 つの再資源化施設の整備援助を受けている。なお、バレイイエリーには 1996 年に道路用路盤材の再資源化施設が建設され、コンクリート塊から NRS 規準 (National Road Specification) を満たす再生碎石の製造を実施している。政府は長期的な目標として建設

廃棄物を含めた全産業廃棄物の 60%を再資源化する目標を打ち出している。

ルクセンブルグ[16,17]

ルクセンブルクの 1997 年における'Core'C&DW は 30 万トン/年（700kg/人/年）であり、再資源化率、再資源化処理施設に関するデータは不明である。総廃棄量は、スペインにおけるカタロニア基準を用いた算定方法と同様の方法を適用しており、単位廃棄量は 700kg/人/年としている。この値はドイツ、オランダ、ベルギーと同程度であり、廃棄物発生量は大きいといえる。

アメリカ[38-41]

アメリカの建設廃棄物に関連する概要は、アメリカ環境保護局（The U.S. EPA）の産業複合廃棄物管理局（Municipal and Industrial Solid Waste Division Office）による報告書に明確に示されており、廃棄物発生量データは通商産業局（National Census Bureau：NCB）のデータを参照にしている。一般的にアメリカにおける廃棄物管理は、生態系の循環環境を維持するための施策の一環として行われているようである。

アメリカは現在、全 50 州の行政地区で構成され、1999 年時点での総人口は 2.7 億を越える。国土が広いため、建設廃棄物と環境問題に対する取り組みは各州政府に委ねられており、検討レベルは州により大きな差異がある。各行政区における廃棄物の定義は各々明確にされてはいるものの、その内容は各地区の環境施策に大きく影響されており、各地区ごとの定義の違いも大きい。以下に EPA の長期的な調査活動により、一般化された C&D 廃棄物の分類体系を示す。

- (I) Construction & Demolition
- (II) Municipal Solid Waste
- (III) Industrial process Waste
- (IV) Agricultural Waste
- (V) Oil and Gas Waste
- (VI) Mining Waste
- (VII) Auto Bodies Waste
- (VIII) Trees & Brush

(I)の建設廃棄物に関しては、更に以下が分類されている。

- (I) Building related Waste (Construction, Renovation, Demolition)
- (II) Roadway related Waste
- (III) Bridge related Waste
- (IV) Landcleaning & Inert Debris Waste

1996 年に調査された'Core'C&DW は 135,350 万トン/年（437kg/人/年）であり、2000 年に日本で発生した建設廃棄物発生量（8500 万トン）の 1.5 倍強を示す。廃棄物は種類別による分類ではなく、一般建設工事(Construction)、補修工事(Renovation)、解体工事(Demolition)の工事種別を、住宅系(Residential)および非住宅系(Nonresidential)に区別して分類することが一般的である。図 2.2.11 に 1996 年の建設廃棄物発生量(道路、橋梁、土壌廃棄は除く)を示す。住宅系は全体の 43%、非住宅系は 57%であり、工事別には一般建設工事が 8%、補修工事が 44%、解体工事が 48%であり、補修工事の占有割合が多いことが特徴である。なお図 2.2.12 に種類別分類を示すが、木材、コンクリート系廃棄物が半数以上を占めている。

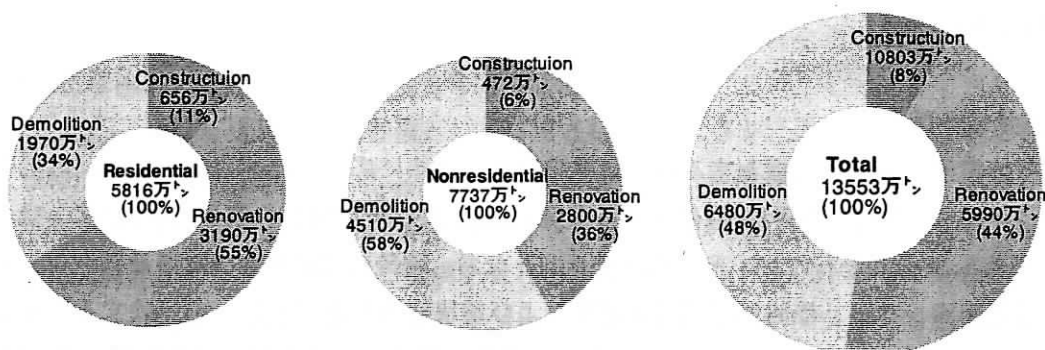


図 2.2.11 建設廃棄物一発生量統計(用途別) [38-40 参照]

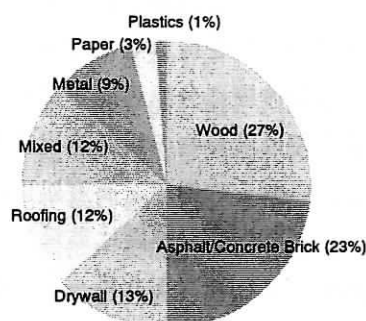


図 2.2.12 建設廃棄物一発生量統計(種類別) [38-40 参照]

建設廃棄物の再資源化率は 20～30%とされており、再資源化施設数は、アメリカ全土で 3500 ケ所とされているが、その大部分は道路改修時のコンクリート舗装材料としてのクラッシャーランの製造を目標としたものであり、70 年代からコンクリート用骨材資源とするための研究開発は実施されているものの、解体コンクリート塊の処分が問題になる状況が発生しにくいため、結果的に十分な検討成果は挙げるまでに至っていない。一方、最終処分場は、1994 年の EPA report において 1889 ケ所あることが確認されている。処分場数順位はフロリダ州 (277)、ルイジアナ州(167)、ノースカロライナ州(153)、オハイオ州(148)、ケンタッキー州(143)の順で構成されており、全体の 50%を占めている。この内容からも、各行政区による再資源化と最終処分に対する取り組みの重要度に差異があることが理解できる。

ちなみに隣国のカナダでは、国土が広大で人口密度が小さいため、他国からの廃棄物を有償で受け取り、それをビジネスとして慣行してきた経緯があったが、2000 年以降はその受け入れ割合を減らす方向での取り組みが強化されており、2000 年には有害廃棄物の輸入総容量 (約 28 万トン) が 1999 年比で 29%、埋め立て用有害廃棄物に限っては 32%減少したことを示されている。また、廃棄物輸入総量の 98%はオンタリオ・ケベック両州であることから、カナダの連邦政府は、両州政府の有害廃棄物の埋立処理方法や汚染土壌の処理ガイドラインを、アメリカ基準と同等なものに変更することを要請している情報などが公表されている。カナダ環境省は、有害廃棄物の排出および管理責任の割り当てについて各州政府と協力して検討している段階であり、新ガイドラインとして、有害廃棄物輸出入規則の改正案をカナダ環境保護法に組み込み、2002 年中には、その草案の完成が予定されている。今後、アメリカ・メキシコを含んだ北米内の廃棄物移動に関しては、北米自由貿易協定 (NAFTA) で 3 カ国間合意ルール作りを詰めていくとしている。

なお、米国では NIST により製品・試験方法などの標準化に関わる統括的取り組みが継続的に実施されているが、建設廃棄物を原料とした再生材料に関する標準化作業は行われていない。

2.2.2 分解モデル

(1) 処理装置の分類

再生骨材の製造装置は、目標とする再生骨材の品質レベルに応じて分類可能である。本節では、装置の概要(名称、普及率)、破碎機構(作用力、生産効率)および再生骨材の物理特性(密度、吸水率、回収率)等に着眼した分類を行ない、その特徴を示す。なお、破碎装置の実務的な普及状況は、当該地域における環境配慮レベル、最終処分場残余容量および環境政策の運用度などを反映する可能性があるため[16]、破碎装置の体系化は各地域における再資源化取り組み状況を把握する上で重要となる。

コンクリート塊の一般的な破碎装置は、現場で発生したコンクリート塊を 300～500mm 程度に粗割りして、場外の定置式破碎設備で再資源化处理を行うものである。その破碎設備は粗破碎機、中破碎機、細破碎機、粒径改善用破碎機および製砂機に分類可能であり、作用力は、圧縮、曲げ、衝撃、せん断、摩擦などに分類可能である。最近では廃棄物の場外排出をなくすために、現場内処理を可能にする移動式設備も数多く登場している。これらの中で、高度処理技術が組み込まれていない破碎装置により製造される再生骨材は、モルタルが再生骨材表面に重量比で 30%程度含有して製造されることが多く、その結果、密度が小さく吸水率が大きくなるため、天然骨材に比べ品質が低下し、構造用コンクリート用骨材として使用することが一般的に困難となる特徴がある。なお昨今では、特徴的な高度処理設備による高回収率を維持したまま構造用コンクリートの骨材として使用可能にする再生骨材製造システムも実証化されたため、構造用再生骨材コンクリートの BAT(Best Available Technology)を導くための技術的課題の具体的解決策は示されたといえる。

表 2.2.1 再生骨材製造装置の分類[42,46 参照]

処理レベル 分類	製造レベル 分類	頻度レベル 分類	作用力 分類	破碎機 分類	破碎機構 分類		
破碎処理	粗破碎 (原料 2000-50mm) (製品 500-50mm)	1次破碎	圧縮力	ジョークラッシャー	シングル型 ダブル型		
			圧縮力	ロータリッシャー	シングル型		
			旋動力 (圧縮+衝撃)	ジャイロリククラッシャー	一次用ジャイロリククラッシャー		
	中破碎 (原料 500-150mm) (製品 150-20mm)	2次破碎	圧縮力	ロータリッシャー	ダブル型		
			旋動力 (圧縮+衝撃)	ジャイロリククラッシャー	二次用ジャイロリククラッシャー		
			高速旋動力 (圧縮+衝撃)	コンクラッシャー	油圧式 サイレンズ式 製砂式		
					衝撃力	インパクトクラッシャー	二次用横型ロタ式 二次用立型ロタ式
						ハンマクラッシャー	横型ロタ式 立型ロタ式
			ゲージミル	二次破碎用			
			磨砕処理	細破碎 (原料 150-20mm) (製品 20mm 以下)	衝撃力	ハンマミル	横型ロタ式
						ロッドミル	従来型ロッドミル ニューロッドミル
						インパクトクラッシャー	正逆回転型横型ロタ式
ゲージミル	三次破碎用						
粒形改善および 軟石付着モルタル 除去 (原料 150-20mm)	3次破碎	骨材干渉衝撃力		インパクトクラッシャー	粒形改善用立型ロタ式		
		骨材干渉 すりもみ力		ボラダ-型磨鉱機	湿式 乾式		
				スクリー-式高度処理機	湿式 乾式		
				円筒すりもみ式高度処理機	湿式機械式 湿式機械 乾式全体加熱式		
		機械式摩擦力			製砂機	立型シ式 振動シ式 自主粉砕シ式	
						製砂 (原料 60-10mm)	

(2) 圧壊機構

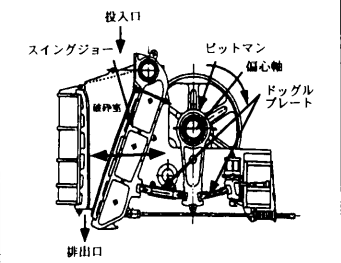
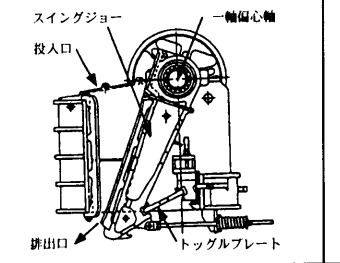
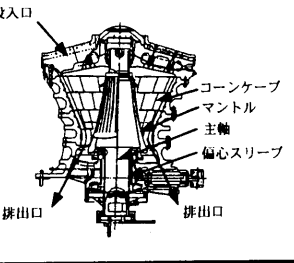
表 2.2.2 に圧縮機構を有する代表的な再生骨材製造装置を示す。

ジョークラッシャーは、定置式の破碎機として多用されており、フレームに装着した固定歯板 (Fixed Jaw) と、動力により揺動運動するスイングジョー (Swing Jaw) に装着した動歯板とが、所定の角度を保ちつつ対向することで破碎室を形成する。破碎室へ供給された原石は、重力により落下しながら揺動運動による圧縮作用を受けて破碎する機構を有している。ダブルトッグル型は、偏心軸を回転させてピットマンを上下運動させ、二枚のトッグルプレートを通じてスイングジョーに揺動運動を与えることで圧縮破碎を行なう機構を有している。この機構は、スイングジョーの動きが下端の排出口に近づくにつれ拡大するため、効率の良い破碎が行われる。また歯板の摩耗も少ないため、硬質原石や摩耗性の高い原石の一次破碎用として主に使用される。一方、シングルトッグル型は、1枚のトッグルプレートを除くスイングジョーの支持軸自体を偏心軸としたものであり、実際に破碎を行うスイングジョーの動きが、上部では円運動、下部で楕円から円弧状の運動により、原石を持ち上げて歯板との間で擦り揉みをするような動きがあるため、原石によっては歯板の摩耗が早くなる欠点がある[43]。しかし、構造が簡単で機械重量が軽く機械が安価かつ大型化が可能などの利点により、粗骨材の製造、原石の一次破碎用および再生骨材製造設備の一次破碎用として多用されている[43]。

ジャイレトリークラッシャーは、二つの円錐からなり、外側を固定し、内側の円錐を偏心した軸受に取り付けたものである。フレームの内側に装着した逆円錐形状のコーンケーブの中で、主軸に装着した円錐状マントルが対抗して破碎室を形成し、底部に設けた偏心スリーブの回転によりマントルが偏心旋動運動しながら、コーンケーブとの間で連続的に圧縮破碎する機構を有している。一次破碎用は、生産量の多い骨材設備における一次破碎機として多く使用されてきた経緯があり、ジョークラッシャーの揺動運動による間欠圧縮破碎に比べ、マントルの偏心旋動運動による連続圧縮破碎となる点が特徴である[43]。二次破碎用は、一次破碎の回転数と偏心量および破碎室の形状見直しを行なうことで、破碎性能を向上させたものであり、三次破碎同等の処理を可能にする技術が導入されている。

ロールクラッシャーは、試料投入口の手前に平行に置かれた2つの円筒形ロールの噛み込み回転力によって鉱石を圧縮剪断破碎する機構を有している。ゴムなどの弾性がある材料なども同様の機構で破碎することが可能となる。ダブルロール型とシングルロール型があり、骨材製造用には主にダブルロール型が使用されている。骨材を製造する場合の破碎比は4程度であり、破碎物は粒径が比較的揃う傾向にあることが特徴である。機械の構造が簡単であり、微粉分の少ない破碎物を得ることが可能になるため、以前は建設分野に限らず各種の産業分野で用いられていたが、現在は小規模な骨材製造施設や道路碎石用などの限られた領域で使用されている[43]。

表 2.2.2 代表的な再生骨材製造装置[42 参照]

破碎機名称	ジョークラッシャー(ダブルトッグル型)	ジョークラッシャー(シングルトッグル型)	ジャイレトリークラッシャー(一次破碎用)
機構図			

(3) 衝撃機構

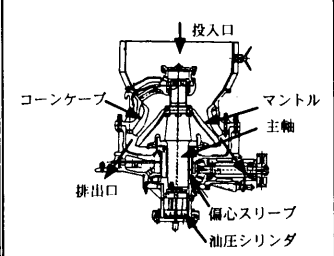
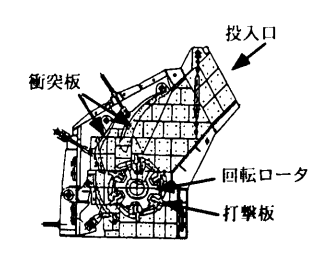
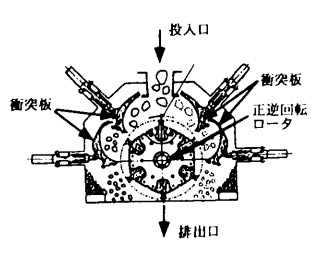
表 2.2.3 に衝撃機構を有する代表的な再生骨材製造装置を示す。

コーンクラッシャーは、破碎機構がジャイレトリークラッシャーと同様であり、円錐状のマントルに偏心旋動運動を与えて破碎を行う。その運動はジャイレトリークラッシャーに比べて高速度であり、原石は重力落下の途中で、衝撃を伴う圧縮力により破碎する。マントル下端および対向するコーンケーブ下端の直径を調節することで破碎室の形状が変化し、処理能力を容易に変化させることができる。破碎間隙を狭めて使用することで二次破碎および三次破碎に適した構造となる。コーンクラッシャーはジョークラッシャーとジャイレトリークラッシャーの各々の特徴を取り入れたものであり、破碎比の大きい二次破碎機と位置づけられる[42]。油圧式コーンクラッシャーは、マントルを装着した主軸を油圧シリンダーで支持し、破碎間隔を油圧で調整できるようにしたものであり、製砂用コーンクラッシャーは、破碎室の形状、偏心量および回転数を製砂機専用に改良して、破碎作用室において原料相互間での衝撃・圧縮が極密度状態で立体的に作用し、破碎間隙に比べて細かで粒形の良い産物が多く得られるようにした方式である。

インパクトクラッシャーは、ローターに取り付けられた刃が、ローターの回転と共に遠心力の作用により原石に衝撃力を与えて粉碎させる機構の破碎機であり、打撃板を取り付けた横型ロータを高速回転させて、原料に衝撃を与える機種や、立型ロータを高速回転させて原料を投げだすことで、壁やデッドストックに衝突させて衝撃力を与える機種などが実用化されている。横型ロータ式は、最も一般的なクラッシャーであり、二次破碎用・三次破碎用としての使用されるほか、圧縮式破碎機で中破碎した産物の粒形改善用としても使用することができるが、打撃板やロータの摩耗による性能低下が問題になりやすいことが特徴とされている。この問題を解消するために、ロータを正逆回転させることで、摩耗部分の長寿命化と交換作業の簡素化を図る改良を施した方式が一般化しつつある。インパクトタイプは、粒形が優れ、消費動力と設備コストが低いという利点があるが、消耗コストとメンテナンスの問題や、投入原料の影響を受けやすい点などが構造に起因する特徴として示すことができる。

ハンマークラッシャーは、ロータにインパクトクラッシャーにおける打撃板に相当するハンマーが取り付けてあり、これに対向する衝突板に打撃することで破碎を行う。破碎物はハンマーと衝突することで始めの破碎が行われ、跳ね返った破碎物はハンマーミル内の壁に衝突してさらに破碎されることになり、その後は重力の力によって落下する際に、再びハンマーが衝突して、破碎が行われる。また排出口に格子を設け、一定の大きさになるまで繰り返し破碎が行われるため、破碎物の大きさをある程度揃えることが可能としている[43]。しかしながら、インパクトクラッシャーと同様の機構にも関わらず装置の機構が若干複雑化するため、使用されている台数は制限される傾向にある。

表 2.2.3 代表的な再生骨材製造装置[42 参照]

破碎機名称	コーンクラッシャー(油圧式)	インパクトクラッシャー(横型一次破碎用)	インパクトクラッシャー(横型正逆回転式)
機構図			

(4) 摩擦機構

表 2.2.4 に摩擦機構を有する代表的な再生骨材製造装置を示す。

ロッドミルは、円筒形ドラムの中に、粉碎媒体としてロッドを装填して回転させることで、ロッドの転動・落下による摩擦力と衝撃力などにより、原石を破碎する機構を有している。接触媒体がロッドである場合、原石の粗粒子とは線接触で衝撃破碎するため、ボールを使用するボールミルに比べ、過粉碎が少ないことが特徴であり、製砂機として普及してきた経緯がある。ニューロッドミルは、従来型ロッドミルと同様の機構であるが、ドラム回転の円滑化、騒音の低減および摩耗部品の長期使用を可能にする仕組みを導入し、ドラムを空気タイヤで支持して駆動させることで、低騒音・低振動型ロッドミルとしていることが大きな特徴である。また製品の排出・分級を合理化するために、回転篩を装備している。このような仕様を標準とした湿式破碎の製砂機が数多く使用されており、100～150 トン/時の大型機も実用されている[43]。

正逆回転型インパクトクラッシャーは、打撃板やロータの摩耗による性能低下の問題を解消するために、ロータを正逆回転させることで打撃板などの摩耗部分の長寿命化と交換作業の簡素化を図る改良を施したものであるが、打撃板と衝突板による衝撃力で破碎する原理は保持されているため、結果的に軟質なもののほど破碎されやすく、ロータの回転速度を遅くすると、硬質なもののは破碎が進まずに角面が削り取られる程度に破碎される。粒形改善用インパクトクラッシャーは、この性質を応用したものであり、目標とする骨材の破碎レベルに応じてロータの回転速度を可変させる機構を有している。また衝突板が処理物のデッドストックとなり、処理物同士が衝突して摩擦されるため、付着モルタルの除去用として応用が可能となる。粒形改善用インパクトクラッシャーは、高度処理を目的とする破碎を行う場合の、最終段階の処理装置として使用される。

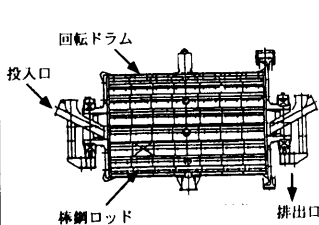
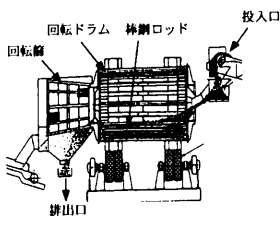
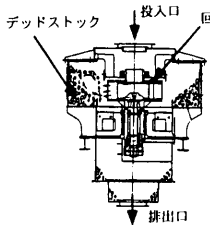
(5) すりもみ機構

表 2.2.5 にすりもみ機構を有する代表的な再生骨材製造装置を示す。

ボラウダー型磨鉱機は、ジョークラッシャーを改良したものであり、回転力を掛けながら独特なすりつぶし運動を可能とする破碎機であり、乾式と湿式が存在する。軟石、土タン等の強度の低い粒子を微粉状態にし、骨材の品質改善を図るシステムとすることが可能である。高い充填状態で個々の粒子が回転運動をしながら擦り揉まれるため、再生骨材表面に付着したモルタル分の除去を意図した破碎も可能である。

一軸スクリー式高度処理機は、圧縮、衝撃、せん断、摩擦等の破碎機構とは異なる破碎機構を有しており、円筒中の一軸スクリーが介在物を攪拌しながら、それ自身を擦り揉む破碎方式である。

表 2.2.4 代表的な再生骨材製造装置[42 参照]

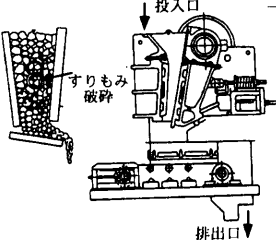
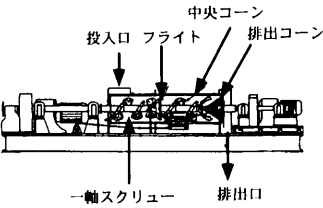
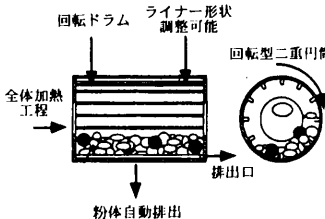
破碎機名称	ロッドミル(従来式)	ニューロッドミル	インパクトクラッシャー(立型粒形改善用)
機構図			

処理機における中間部と排出部に円錐形のコーンが設置してあり、スクリーとケーシングとの間隙を通過する際および原料同士の接触により、骨材の表面モルタルが粗取りされる。この時中央コーンから排出コーンまでの充填率は 100%とすることができ、原料同士の頻繁な接触により再生骨材表面のモルタル分の粗取りも十分に期待できるとしている[43]。このような攪拌と高い充填状態でのすりもみ運動によりモルタルの剥離と摩耗が進んで良質の再生骨材を製造することも可能となる[43]。

すりもみ機構を有する破碎装置の導入により、回収率をそれほど低下させずに、再生骨材を構造用コンクリートに使用することが可能な状態を確保することが容易になる[44-46]。全体加熱方式による円筒すりもみ式高度処理機[44]は、解体コンクリート塊から一次破碎により粗破碎して得られる、モルタル分およびセメントペーストが多分に付着した再生骨材に対し、プロパンガスを熱源として、原骨材の品質に悪影響がないとされる 400℃以下の温度域で再生骨材全体を加熱し、モルタル分およびセメントペースト分を脆弱化させる。続いて、二重円筒型ボールミルにより再生骨材自身とボールとのすりもみ式破碎により脆弱部分を削ぎ落とし、最終的に原骨材とペーストが分離除去されて良質の再生骨材が製造されるという機構を有している。

上記について次のことが分析できる。2000 年を起点に、コンクリート塊から回収した再生細骨材および再生粗骨材を再生コンクリートの全骨材として使用した鉄筋コンクリート造建築物がいくつか竣工しているが、これはすりもみ機構を有する破碎機の登場により再生骨材の品質を天然骨材と同程度になり構造用コンクリートとして使用が可能になるものと考えられる。従って、この技術が登場したこれからの時代は、1970 年代に開始されたコンクリート塊を再生骨材として有効利用する取り組みに対する新たな局面を迎える状況にあると分析できる。

表 2.2.5 代表的な再生骨材製造装置[42,44 参照]

破碎機名称	ポ*ラタ*	スクリー式高度処理機	すりもみ式高度処理機(全体加熱式)
機構図			

2.2.3 組立モデル

(1) 概要

日本では、1970年代より再生骨材コンクリートを実務的に使用することを念頭に、コンクリート廃材を合理的に再利用するさまざまな手法を検討してきたが、量的に最も期待できる有効な方法は、再生骨材を製造し、再度、構造用コンクリートの原材料として利用することであると考えられている[7]。再生骨材コンクリートに関しては、これまで多くの研究がなされ、再生骨材の品質基準や再生コンクリートの使用規準等[2]も提案されてきた。試験的にではあるが、実工事への利用も行われている。しかしながら、構造用コンクリートに使用するには、解決が必要な課題がいまだ残されているため、結果的に路盤材として商品化されている以外は使用されておらず、レディーミクストコンクリート用骨材として市場性は確保されていないのが現状である。

以上より、次のことが分析できる。再生骨材コンクリートは、開発が始まってから30年以上が経過しているが、その運用が、今だ十分ではないその理由は、社会的ニーズの捉え違いに起因する開発目標の不適合性、抜本的変化を導く技術開発の欠如および、生産系事業者における環境配慮意識の不十分さなどの問題が存在していたためと考えられ、そのことが30年以上も再生骨材コンクリートを実現できなかった原因となっている可能性は大きい。

再生骨材自体に関しては、コンクリートとして使用する場合、再生骨材の品質により、用途が制限される場合が多いことが特徴と考えられる。そして、通常のコンクリートと比較した再生骨材コンクリートの品質・性能面の問題点として、圧縮強度が出にくい、品質のばらつきが大きい、乾燥収縮やクリープが大きい、ヤング係数が小さい、耐久性が劣るなどが挙げられるが、これはコンクリート中の占有体積が大きい骨材の品質が低下する場合には、当然起こりうる性質であるといえる。従って、従来型の仕組みにより製造される再生コンクリートを、構造用コンクリートと同様の要求性能を充足可能なものとしては位置づけずに、品質および性能を正確に見極めた上で新たな用途を確保することを重視した扱いが必要と考えられる。現在製造される低品質再生骨材においても、特定用途に限定すれば十分に使用可能であり、上記のプロジェクト研究で示された技術基準においても、各種タイプのコンクリートについて使用可能な部位や用途を具体的かつ詳細に示すことで、合理的に運用することは可能と考えられる。つまり、現状の技術により製造される再生骨材は、その品質特性と用途を明確にすることで市場性を持たせることが可能になるのである。

続いて、再生骨材の物性の概要を示す。再生骨材の原料となるコンクリートは、粗骨材・細骨材・セメントペーストにより構成されるが、破碎処理により、その多くは再生細骨材および微粉末となり、再生粗骨材は表面にモルタルが付着した状態で発生する。これらの粒子構成の特徴を把握することは、その用途を明確にする上で重要と考えられる。一般的に再生粗骨材は主に以下の3種に大別される[47]。

- ①原コンクリートの粗骨材がそのまま残った原骨材粒子
- ②原コンクリートの粗骨材にモルタル分が付着したモルタル付着粒子
- ③原骨材を含まず、モルタル分で構成されているモルタル独立粒子

上記粒子に加え、モルタル独立粒子が分解して得られる細粒分も含めた全4粒子による構成も示されている[48]。現状の再生骨材製造技術では、再生骨材は、①の原骨材粒子と②のモルタル付着粒子で構成されるものが半分程度になると指摘している[47]。この状態を定量的に確認するために、再生骨材の比重、吸水率を測定した結果、モルタル粒子の品質と含有割合が、再生骨材全体の品質に大き

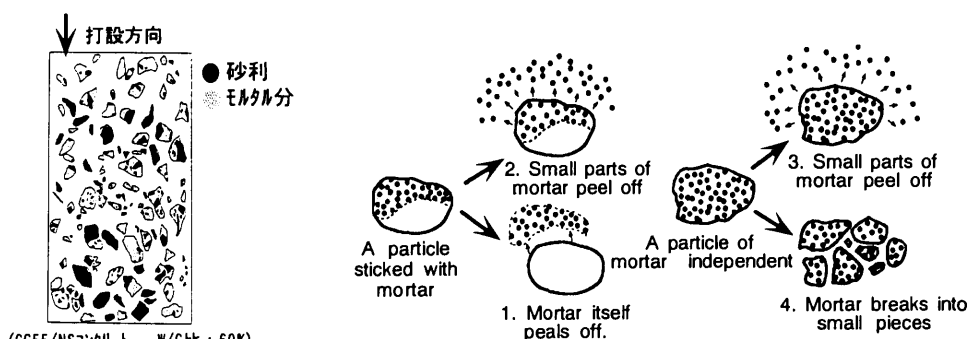


図 2.2.13 再生骨材粒子構成と粒子破碎パターン[48,60 参照]

く影響し、再生骨材全体の品質の決定要因となることが示された[48]。

再生骨材に含まれる各粒子は図 2.2.13 の破碎パターンに基づいて構成される。再生骨材の処理頻度に比例して、粒子は原骨材粒子と細粒化したモルタル独立粒子が大半を占めるようになる。原骨材粒子の成因過程は、モルタル付着粒子のモルタルに含有する細骨材粒子の大きさ、ペーストの強度および原骨材表面状態により、ペースト分が少しずつ剥がれる場合と、原骨材界面でモルタル部分が剥がれる場合との 2 通りがある。細粒化したモルタル独立粒子の成因過程は、ペースト微粒子が表面部より少しずつ剥がれて小径の粒子となる場合と、吸水率が比較的高く、粒子自体が碎ける場合の 2 通りがある。なお、原骨材自体が割れることなく、原骨材粒子とモルタル界面の分離が効果的に行われる臨界点は水セメント比 55% 程度の場合であるとする報告[49]もある。

上記より、次のことが分析できる。再生骨材の粒子構成に基づく場合、再生骨材の高度処理は、モルタル独立粒子の除去およびモルタル付着粒子表面の付着モルタル分を効果的に低減させることに焦点をおいた研究開発が有効と考えられ、この条件を開発目標とした高度処理技術の発展により、再生コンクリートを構造体に使用することが可能になると考えられる。

(2)再生碎石

再生骨材を原料とした製品として、アスファルト・コンクリート塊、セメントコンクリート塊から製造するクラッシャーラン、再生アスファルト合材および粒度調整材を、再生碎石と位置づけ、その概要を示す。

再生碎石を製造する再資源化施設の特徴について整理する。国内では 1997 年の段階で、再生碎石プラント 186 件および再生アスファルトプラント 731 件で総計 917 施設が存在している。道路工事現場にて発生したコンクリート塊、アスファルトコンクリート塊は、発生地点より 40km 範囲内に再資源化施設がある場合は、当事者において、再資源化施設までの移送義務が生じ、また、新規道路工事現場から 40km 範囲内に再資源化施設がある場合は、経済性に関わらず再生碎石を使用する義務が生じるとしている[50]。この法規制の順守により、再生碎石は市場性を確保するための条件が整い、路盤用材料として継続的に有効利用することが可能になるといえる。なお道路用路盤材として使用される再生碎石の要求性能はさほど高いものではなく、一般的に圧壊機構を有するジョークラッシャーや衝撃機構を有するインパクトクラッシャーなどによる二次破碎までの処理工程で製品化することが可能であるため、日本における既存の再資源化施設において対応が困難な場合は殆どないといえる。

以上より、道路用路盤材となる再生碎石は、ある程度の市場性を確保した再生製品として位置づけることが可能であると分析され、昨今では、地域差はあるものの、製品の価格もある程度明確に示さ

れるようになってきている。表 2.2.6 に再生砕石の価格設定事例を示す。

続いて、再生砕石の将来における需要可能性について検討するため、道路整備計画の現状および道路構造の規格について整理を行う。国土交通省道路局では、道路を「高規格幹線道路および都市高速道路」と「一般道路」に区分した上で、年度単位で実延長距離を調査している。高規格幹線道路および都市高速道路に関しては、最終的に日本国内において、整備する必要のある総延長距離を開発目標値として掲げており、昭和 29 年に開始された第 1 次道路整備 5 箇年計画から第 12 期目となる平成 10 年の第 12 次道路整備 5 箇年計画では、都市高速道路を除く総延長目標距離は 15000km と定めている。平成 13 年度末の供用延長結果[52]では、その 57%である 8017km が運用状態にあることが示された。

「一般道路」に関しては、平成 13 年度末の供用延長結果では、国・都道府県道が 181,959km、市町村道が 977,763km、合計 1,159,723km が運用状態にあることを示されている。そのうち、車道幅員 5.5m 以上の改良区間は全体の 54.4%、車道幅員 13.0m 以上の改良区間は全体の 1.3%となっており、地域交通量バランスに応じて改良率を高めることを目的とした整備の実施が目標とされているようである。

続いて、道路構造の規格に関わる道路舗装種別ごとの総延長距離について整理する。舗装種別は大きくアスファルト舗装、セメントコンクリート舗装に区分されており、平成 8 年 4 月時点での舗装別総延長距離の割合は、「高規格幹線道路および都市高速道路」に関してはアスファルト舗装が 92.4%、セメントコンクリート舗装が 7.6%であり、「一般道路」に関してはアスファルト舗装が 74.9%、セメントコンクリート舗装が 25.1%である[53-54]。図 2.2.14 にアスファルト舗装とセメントコンクリート舗装の構成図を示す。舗装構造における舗装厚さは設計交通量区分(5 段階)と舗装の厚さを決定するための路床強度指標である設計 CBR(舗装種別ごとに設定)により決定されるが、図 2.2.14 では各舗装構造における設計交通区分と設計 CBR により求められる舗装厚さに関して、厚さの最大値と最小値を示してある。これによると、道路構造の規格により、クラッシャーランや、アスファルト可燃物で占められる床板厚さが変化し、それに応じて砕石の投入量が変化することがわかる。

以上より、この道路構造の基礎データと、道路種類に応じた道路拡張計画に基づく総延長距離により、舗装別ごとの道路延長距離に応じた材料投入量を導きだして、将来的な再生砕石の需要予測が可能になると分析できる。

国土交通省における平成 12 年度建設副産物実態調査では、コンクリート塊の再資源化率は 96%を満たしており[55]、統計上はコンクリート塊のほぼ全量が再利用できる状況を実現している。この点に関して、次のことが分析できる。再生品の用途の大部分は再生砕石による道路用路盤材や埋め込み材に止まっており、広い産業領域に物質が拡散するダウンサイクリングを引き起こしているといえるが、このようなりサイクル手法を、需用がある一定期間は有効なりサイクル手法として位置づける場合は、上記の道路整備計画と道路構造に関する基礎データを元にした道路用路盤材としての受入可能量を推計し、道路用路盤材として使用可能となる限界年数を導いておくことで、更なる合理的な運用が可能になるといえる。

表 2.2.6 再生砕石の価格設定（財団法人横浜市廃棄物資源公社 1998 年 12 月）[51 参照]

建設副産物受入価格		製品販売価格	
項目	単価	項目	単価
アスファルトコンクリート塊	1,200 円/トン	再生アスファルト合材	5,690 円/トン
セメントコンクリート塊	2,100 円/トン	クラッシャーラン	2,300 円/トン
切削	1,400 円/トン	粒度調整材	2,900 円/トン
旧路盤材	1,000 円/トン		

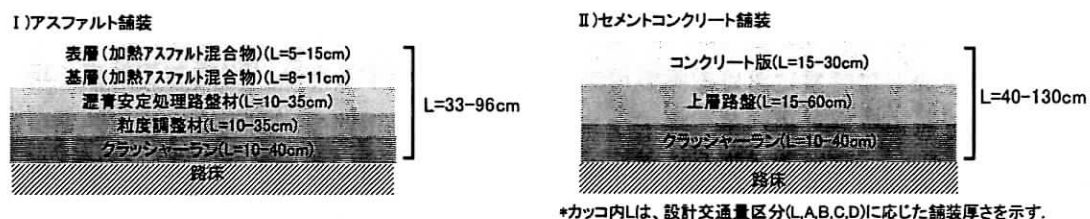


図 2.2.14 アスファルト舗装とセメントコンクリート舗装の構造[53-54 参照]

以上の内容から、再生砕石全般の内容について、次のことが分析される。現在は、人工物が氾濫すると同時に、再資源製品の新たな用途開発や生産性を高めることに社会全体の関心が高まっている。その一方で、社会全体が同時にリサイクルを推し進めるような状況を憂慮し、将来的に不合理となると想定されるマテリアルリサイクルは実施せずに、サーマルリサイクルもしくは廃棄する手段を採用するほうが、地球環境への負荷は結果的に小さくなる場合が存在する[56-57]この意味を理解し、その上で新しく導入した再資源化システムの環境負荷低減性を検証することが必要であるといえる。従って今後は、リサイクル性評価の有効なツールを開発し、運用段階にあるリサイクル手法の妥当性を評価した上で、実用化に向けた研究開発を行う必要があるといえる。なお現在一般化している再生砕石の路盤材としての利用は、リサイクルを実行することによる環境負荷低減性や、将来的な材料の資源循環性を十分に検討した上での適用ではないため、その再生処理方法を実行し続けると、将来的に需用が乏しくなり、逆に過剰な再生資源ストックを生み出す可能性があることは、否定できないといえる。

(3)低品質再生骨材コンクリート

アスファルト・コンクリート塊、セメントコンクリート塊から製造した再生材料のうち、非構造用コンクリートに適用される再生骨材を低品質再生骨材、そのコンクリートを低品質再生骨材コンクリートとして位置づける。

低品質再生骨材コンクリートに関する研究は、国内では長期にわたり検討されており、海外でも主要な研究開発の対象としている国も多い。国内では、コンクリート塊の主用途が再生砕石である状況は変え難く、部分的に、低品質再生骨材コンクリートとして、二次製品や埋め戻しコンクリートとして、使用される状況であるといえる。

低品質再生骨材コンクリートの材料特性について概要を示す。なお、低品質再生骨材コンクリートは、一般的に骨材の密度、吸水率にその物性が大きく影響を受けるが、密度および吸水率を向上させるために処理回数を増加させることは、骨材回収率の低下、再生細骨材および微粉発生量の増加を導くなどの特徴が、ある程度明らかにされており[58]、重要な特性として位置づけられるため、これらの指標を材料特性を説明するための主な着眼点とする。

図 2.2.15 に再生骨材の密度－吸水率の関係を示す。吸水率の低下と密度の増加は良好な反比例の関係にあり、このことは、付着ペーストの密度が原骨材の比重と大きく相違するものではないことを示すものである[59]。低品質再生骨材は、一次破碎を基本とした処理工程により製造されるが、一次破碎の場合、再生粗骨材の吸水率は原骨材の影響を受けにくく、その値は、原骨材の 1.5-2.5 倍程度、再生細骨材の場合は 2.5-3.5 倍程度、再生軽量細骨材の場合は原骨材との差がやや小さくなり 1.5-2 倍程度となる。再生骨材の吸水率は、原骨材の吸水率と粒子寸法が複雑に影響することが分かる。

図 2.2.16 に強度の相違する各種コンクリートの処理回数と吸水率の関係を示す。マトリックス強度の増加に比例して、吸水率は一般的に小さくなる傾向があるが、処理回数が増加するにつれて、付着モルタルの剥離が進行するため、結果的に原コンクリートのマトリックス強度差の影響は小さくなり、再生骨材の吸水率は同程度になることが確かめられている[60]。また再生粗骨材の場合、10mm 以上の骨材については 2 次または 3 次処理により吸水率 3% 以下の条件を確保することが可能であるが、5～10mm の骨材については、10mm 以上の骨材よりも吸水率が 2～4 割程度大きくなる傾向があり、3 次破碎以上の処理を実施しないと吸水率 3% 以下とならないとする報告[60]もある。従って再生粗骨材全体で、吸水率 3% 以下の状態を確保するためには、3 次以上の破碎処理が必要になると分析できる。しかしながら、吸水率 3% 以下を製造目標とした場合、回収率が 2 割程度に低下することが指摘されており[60]、単純に処理回数を上げて再生処理を行うことは適当ではないと考えられる。

他の性質として、低品質再生粗骨材の実積率に関しては、処理回数が少ない場合、付着モルタルにより形状が角ばり、骨材種に関わらず、原骨材の実積率よりも小さな値を示す傾向がある。粒度分布に関しては、処理回数が少ない場合、粗目の骨材となるため、10～15 mm の中粒度範囲が多く製造される傾向があり、通常そのような骨材は JIS に規定される碎石の標準粒度を外れた製品となる。

以上より、次のことが分析される。低品質再生骨材を原料とする再生コンクリートは、再生骨材が低品質であることにより発生する問題が数多く存在するため、構造用コンクリートとして一定の品質を確保するためには、再生骨材の品質を予め高めておくことが重要と考えられる。それを実行しないでコンクリートとした場合には、結果的に構造用コンクリートとしては不適合となる可能性が多く、長期耐久性を確保するコンクリートとすることは困難を極めるといえよう。

続いて、破碎処理方法が再生骨材の回収率に及ぼす影響に関する概要を示す。一般的に骨材種に関わらず、破碎処理を 3 次処理まで実行した場合、骨材回収率は大きく低下するとされている。特に 3 次破碎処理装置としては一般的であるが、摩擦効果が大きいとされるロッドミルの場合、骨材表面のペースト分の剥離による微粒分が急激に増加し、粗骨材回収率が大きく低下する傾向がある[61]としている。また、摩擦効果に関してもモルタル付着粒子の表面のペースト分剥離には有効であるが、モルタル独立

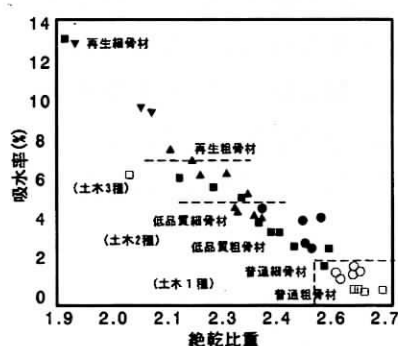


図 2.2.15 比重—吸水率の関係[59]

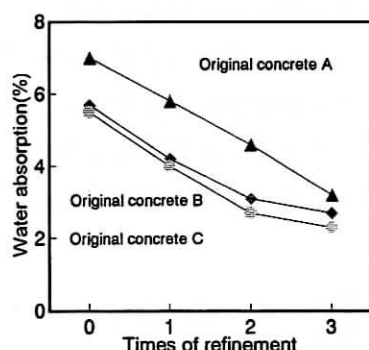


図 2.2.16 破碎回数—吸水率の関係[60]

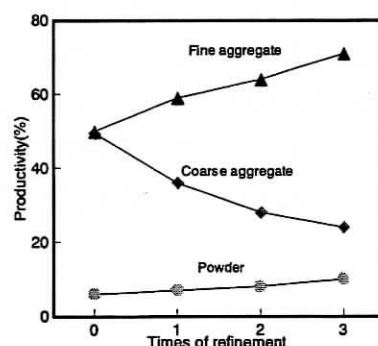


図 2.2.17 破碎回数—回収率の関係[62]

表 2.2.8 低品質再生骨材の高度処理条件[62 参照]

a: 骨材回収率の向上	1. 表面研磨を主とする方法ではモルタル粒子が 5mm 以下になるまで研磨を継続する 2. 粉砕を主とする処理方法の段階では、原骨材を破碎しない程度の作用力で粉砕を継続する
b: 破碎効率の向上	3. 原骨材に近いモルタル付着粒子群とモルタル独立粒子群を分離した上で処理を実行する 4. 処理装置の中で選択的に表面研磨や粉砕を実行可能なシステムを構築する

粒子の除去には適当ではなく、逆にモルタル独立粒子を粉碎可能な状態にすると原骨材も破碎する可能性が増大するため、**摩擦処理による高度処理方法を導入する場合は、処理目的を明確にすることが重要であると分析できる。**図 2.2.17 に破碎回数と製品回収率の関係を示す。一般的な破碎装置により 3 次処理を実行した場合、再生粗骨材は約 2 割、再生細骨材は約 7 割、微粉は約 1 割程度の回収率にとどまる。原コンクリート中の粗骨材が 4 割程度であることを考慮すると、粗骨材回収率は 50%程度となることが確認できる。つまり、処理回数の増加により粗骨材自体が破碎されていることとなる。破碎処理回数と回収率とのトレードオフの関係を解消するために、表 2.2.8 に示すような再生骨材を合理的に製造する条件が具体化されており、最終的に製造する再生骨材コンクリートの要求性能に応じて、破碎段階で考慮すべき製造目標および技術の適用頻度を十分に考慮した運用が必要であるとしている。

ちなみに原骨材種類の影響に関しては、一般的に砂利を原石とする再生骨材は、碎石骨材の場合と比べて、粗骨材、細骨材ともにモルタルおよびペーストの付着率が小さくなる傾向があり、原骨材の表面性状が影響することがわかる。コンクリート強度の影響に関しては、圧縮強度が小さいもの程、角張りはなくなり、逆に圧縮強度が大きいものほど、原骨材の破断が顕著になる[62]としている。

以上、低品質再生骨材コンクリートの原料となる低品質再生骨材の特性を示したが、これらの要因により、コンクリートは通常のコンクリートと比較した場合、**圧縮強度が出にくい、品質のばらつきが大きい、乾燥収縮やクリープが大きい、ヤング係数が小さいなどの問題が発生すると分析できる。**しかしながら、付着ペーストの少ない高品質の再生骨材を合理的に製造することは容易ではないため、対処療法的ではあるが、これらの問題の解決を目的とした技術的手法の事例を挙げる。

再生骨材表面のセメントペースト分が及ぼす短所を逆に長所にかえる方法として、図 2.2.19 に示す真空ミキシング法による再生骨材コンクリート製造方法[63]が挙げられる。これは骨材表面に減圧によるインターロッキング効果を付与し、付着ペースト表面に存在する空隙に対してセメントペーストを強固に付着させて骨材界面組織の結合を緻密にし、圧縮強度およびヤング係数の増大を図るというものである。続いて、骨材界面にポゾラン反応を期待できる液体(コロイダルシリカ)を塗布した改質再生骨材を使用する方法[64]がある。低品質の再生骨材を液体に浸漬することで、骨材界面の空隙が低減して緻密になることで、コンクリートの強度低下が改善されるとしているが、骨材の最適浸漬時間が 30～90 分と時間が長く、かつ骨材種類および容量に対する塗布方法の最適化が検討されていないため、実務的な使用を可能にするためには、更なる検討が必要であると考えられる。なお両者ともに、一次再生時の再利用手法としては検討可能な技術ではあるが、二次再生時以降の対策が考慮されていないため、コンクリート材料の循環性を考慮した技術として導入することが必要となる。その他、2 次再生時以降の処理における材料の循環性を考慮した技術として、低品質再生骨材に、モルタルの水

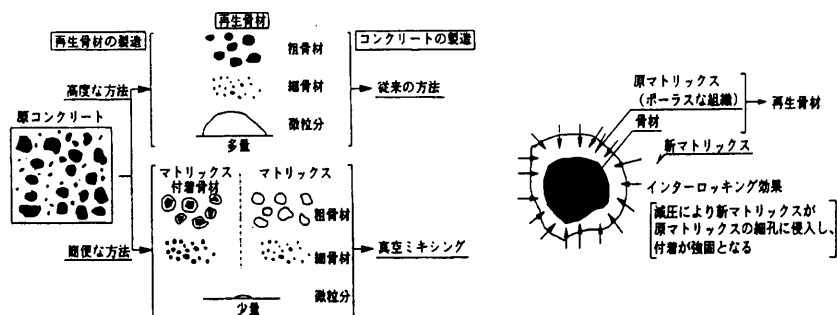


図 2.2.19 真空ミキシング法による低品質再生骨材の改質方法[63]

分移動の抑制を図りつつ微細空隙を低減することで、コンクリートの性能向上を図りつつ二次再生時に降の旧再生骨材を回収しやすくするために、一定の剥離効果を導入したコンクリートの提案[65]もなされている。これは、低品質の再生骨材を用いて構造用コンクリートを製造する場合には、要求性能が更に複雑化する性質を考慮しており、計画段階で低品質再生骨材コンクリートとして必要となる性能の位置づけを明確にしているため、低品質再生骨材コンクリートの開発のあり方としては有効であると分析できる。

最後に、低品質再生骨材の合理的な利用を実証するために、平成8～12年度にかけて日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業として、ライフサイクルを考慮した建設材料の新しいリサイクル方法の開発プロジェクト[66]が実施された。現在の一般的な破碎処理により発生する再生骨材による低品質再生骨材コンクリートを対象とした実証化研究の集大成として位置づけられるものである。低品質再生骨材コンクリートのBATもしくは今後のあり方を明確に示す時期にきていると分析できる。

(4)高品質再生骨材コンクリート

高品質再生骨材コンクリートは、高品質再生骨材を全骨材に使用したコンクリートであり、再生骨材の製造目標は、建築工事標準仕様書 JASS5N（原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事）で規定する骨材基準値と同等の品質を確保するものとしている[44]。製造される再生骨材は、低品質再生骨材コンクリートで発生する問題はほぼ解消されており、普通コンクリートと同様に使用することが可能になる。なお高品質再生骨材の実証化を可能とする本格的な取り組みは、旧通産省の委託研究である廃炉確証試験実施委員会において原子力発電所の廃炉措置に必要な技術開発の一部として開始されており[44]、新しく原子力発電所工事を行う際にも同一コンクリート塊から製造した再生骨材が使用可能となるように、一定水準の再生骨材を高回収率で再生することを目標としていた。しかし、将来的な原子力発電所のあり方も不透明になってきた状況も考慮して、同技術を一般のコンクリート構造物に適用することを新たな目標として掲げ、その技術レベルは高められたといえる。

図 2.2.20 に高品質再生骨材の製造目標値と加熱すりもみ方式による再生骨材の品質特性を示す。高品質再生骨材製造技術の例として、機械的すりもみ方法[46]は、一次破碎により 50mm までに砕かれたコンクリート塊を、改良横型回転式破碎機で機械的な擦り揉み作用により破碎し、分級破碎を実行しながら再生骨材の生産を行うものである。円筒ミルの内部に、特殊な歯形の突起を持つ筒形回転体があり、その間で擦り揉まれ、付着モルタルや付着ペーストが効率的に除去される仕組みとなっている。この製造システムでは、高品質再生細骨材の製造はやや困難であるものの、再生粗骨材に関しては JASS5 に規定される普通骨材に適合する品質を得ることが可能であり、その骨材を使用した再生コンクリートにおける実構造物へ部分的な適用は、既に実証されている。

加熱すりもみ方法[45]は、一次破碎により 50mm 程度に破碎したコンクリート塊を縦型の加熱炉に装填し、下部から熱風を吹き込んで加熱温度 300℃程度で加熱し、セメントペーストを脆弱にした後、チューブミルにより擦り揉み破碎をして、骨材とペースト分を分離する技術である。再生粗骨材および再生細骨材の品質は、JASS5N の目標を達成しており、回収率も十分に高い値となり、再生コンクリートの品質も原コンクリートと同等となることが実証されている。また、コンクリート塊に含まれる骨材が、品質の良い砂利等である場合、再生コンクリートとした場合、その品質向上も期待できるとしている[45]。加熱処理段階で燃焼用ガスを大量に使用する問題点の解消が、今後の課題とされているが、同骨材による再生コンクリートを全量使用したコンクリート構造物は、2001 年に既に竣工し

ている点を踏まえると、今後漸進的に増加する解体コンクリート塊を、閉じた系内で循環利用するための先進的な技術として位置づけられるといえる。

以上の内容より、次のことが分析できる。高品質再生骨材コンクリートを一般化する上で、今後取り組むべき課題は、技術的な面よりも制度的な問題であることが指摘されているが[7]、再生骨材の流通システム、再生骨材コンクリートの製造・供給システム、骨材・コンクリートの品質保証システムにおいて、未着手である部分も存在し、市場性を確保上での仕組みが十分ではない。また、コスト問題や再生物利用に対する一般の忌避意識も根強く存在するため、これらに対処するためにも制度的問題の解決が、再生コンクリートを一般化する上での条件になると考えられる。特に、再生コンクリートの供給システム、つまりコンクリート製造工場が適切に配置されており、購入者の希望する再生コンクリートが生コンクリートとして容易に手に入りやすい環境を作ることは不可欠である。現状は、生コンクリートの製造・流通体系との併存がきわめて困難であり、このことが再生骨材コンクリートの実用化と普及の大きな障害になっていると考えられる。この問題を回避する取り組みの早期実施が、高品質再生骨材コンクリートの一般化に向けての第一歩となると考えられる。

指標	品質目標	絶乾比重	吸水率 (%)	回収率 (wt %)
再生粗骨材	絶乾密度 2.5 以上 吸水率 2.0%以下	2.69	0.84	41.1
再生細骨材	絶乾密度 2.5 以上 吸水率 2.0%以下	2.53	2.28	32.8
全骨材	コンクリートに対して 骨材回収率 70%以上	---	---	73.9

* JASS5N に定める骨材の品質

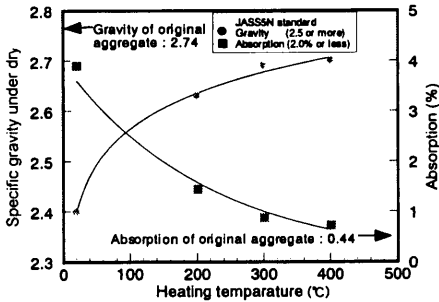


図 2.2.20 高品質再生骨材の製造目標と加熱すりもみ方式による再生骨材の特性 [8,44,45 参照]

2.2.4 運用モデル

(1)基準・指針レベル

再生骨材をコンクリート用骨材として運用するために必要となる基準・指針の概要を示す。再生骨材の基準・指針は、吸水率を基本とした級別がなされる場合が多い。これは、再生コンクリートの品質・性能が、再生骨材表面の付着ペースト量の影響を受け、付着ペースト量は再生骨材の吸水率に直接関係するためである。一般的に吸水率が大きい骨材を用いたコンクリートは、強度、変形特性、収縮特性、耐久性などの品質が低下するとされている。従って、過去の国内における基準策定を行うことを目的としたプロジェクト研究では、使用する再生骨材の品質によって、コンクリートの許容最大設計強度を制限し、使用が可能な部材や箇所を限定するような結果を導いたものが多い。

表 2.2.9-11 に再生骨材に関連する基準策定を行ったプロジェクト研究の概要と提案された品質基準を示す。1)および2)のプロジェクト研究の成果は、実際にはほとんど実用化されず、再生骨材は普及しなかった。3)により、再生骨材および再生コンクリートの技術的な基準が整備されたが、現在まで有効に運用された例は極めて少ない。このような背景を考慮して、改めて低品質再生骨材を合理的に運用するために、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業として、ライフサイクルを考慮した建設材料の新しいリサイクル方法の開発[66]のプロジェクトが平成8～12年度にかけて実施され、その研究成果と

表 2.2.9 再生骨材・再生コンクリートに関連するプロジェクト研究

プロジェクト名および内容	
1) 財) 建築業協会建設廃棄物処理再利用委員会(1974-77)「再生骨材および再生コンクリートの使用基準(案)・同解説」	コンクリート廃材を再生骨材として利用することを目的とした最初の研究。しかし、コンクリート廃材を単純に破碎し、分級したものを骨材としたため、品質が悪く、再生コンクリートの用途も限定されたものであった。建設業界が、初めて建設廃材のリサイクルを目的とした研究として評価される。
2) 建設技術総合開発プロジェクト「建設事業への廃棄物利用技術の開発」(1981-85)	土木構造物分科会「再生骨材を用いたコンクリートの設計施工指針(案)」(1986) 建築物分科会「再生粗骨材を用いるコンクリートの使用規準(案)」(1986) 再生骨材の品質として、密度、吸水率、粒度、安定性、洗い損失量などが規定され、骨材の品質の級別が規定された。各級の骨材を用いた再生骨材コンクリートの設計基準強度の範囲と用途が規定された。
3) 建設技術総合開発プロジェクト「建設副産物の発生抑制・再生利用技術の開発」(1992-96)	建設廃材のリサイクルに対する要求が非常に強くなってきたため、量的に多い建設発生土、建設汚泥およびコンクリート廃材を中心にその再利用をより強く推進するため行ったプロジェクト研究である。コンクリート廃材については、上記2)の成果をさらに発展させ、実用化を図ることを目的とした検討が行われた。このプロジェクト研究の結果として再生骨材および再生骨材コンクリートの基準がある。土木構造物用と建築構造物用の2種類の基準が提案されたが、骨材の品質基準については、整合された上で基準化されている。

表 2.2.10 再生骨材の用途別暫定品質基準 [2]

種類	再生粗骨材			再生細骨材	
	1 種	2 種	3 種	1 種	2 種
吸水率 (%)	3 以下	5 以下	7 以下	5 以下	10 以下

表 2.2.11 再生骨材コンクリートの品質基準[67]

種類	粗骨材	細骨材	設計基準強度 (MPa)	用途
A	1 種	バージン	18 以上	構造用コンクリート
B	2 種	バージン	18 以上	基礎スラブ、ブレイクスクワット、擁壁等
C	2 種	1 種	18 以上	基礎スラブ、地中梁用コンクリート、土間コンクリート、ベリング材等
D	3 種	2 種	18 以上	土間コンクリート、ベリング材等

表 2.2.12 再生骨材コンクリートの TR A 0006 [68 参照]

種類	呼び強度 (N/mm ²)	最大粒径 (mm)	スラブ (cm)	塩化物イオン含有量 (kg/m ³)
標準	12	20 or 25	<15	---
標準(塩化物イオン制限)	12	20 or 25	<15	<0.6
一般	<18	仕様による	仕様による	仕様による

して、再生骨材に関する技術情報 TR A 0006 が示されている。その特徴として、再生コンクリートの規格であること、用途制限のあるコンクリートを製造目的とすること、JIS A 5308 とは独立した規格であること等[68]を示しているが、再生コンクリートの原料が低品質再生骨材であることを前提としているため、既往の研究で示される低品質再生骨材コンクリート特有の問題が同様に発生する可能性があると思われる。従って、TR A 0006 により再生コンクリートの普及が促進することは想定し難く、再生骨材の利用形態についても抜本的に変化することは期待できないと分析できる。

昨今になり、高品質再生骨材製造技術は更に発展し、実務的な使用が期待できるようになった。再生骨材が一定の品質を満たしていれば、用途制限がない状態でバージン骨材と同様に使用可能にする流れを促進するために、1999 年に財団法人日本建築センターの新建築技術認定事業において建築構造用再生骨材認定基準が策定された。新建築技術認定事業とは、先端的・革新的な建築技術のうち、建築基準法や JIS・JAS 等で基準・規格化されていないものについて、その品質を認定することにより、新建築技術の開発・普及、建築物の品質確保の促進に寄与することを目的とする事業である。2003 年頃より、環境 JIS の規格制定作業が一斉に開始されると思われるが、同認定業務は、環境 JIS の制定を推進することとなった背景に存在する諸問題を同様に反映していると考えられるため、建築構造用再生骨材認定基準の制定業務を実施した時点で、既に多くの社会的意義が包含されると分析できる。認定基準の内容は、建築物および工作物の構造躯体コンクリートに用いる骨材およびその製造システムに対して、再生骨材の品質および再生骨材を使用したコンクリートの品質が通常のコンクリートと同様であり、その製造システムが完備していることを評価するものである。現在、ゼネコン、材料メーカーを中心に、同認証を取得し、高品質再生骨材を構造用コンクリートに利用することを目的とした取り組みが実施されており、その雰囲気は今後高まるものと分析される。

続いて、海外の動向に関する概要を示す。再生骨材および再生骨材コンクリートの規格化に関して

表 2.2.13 建築構造用再生骨材および再生コンクリートに関する技術基準[69 参照]

I)再生骨材の品質				
項目	試験方法	基準	参考規格・参考仕様書	備考
①絶乾比重	JIS A 1109 JIS A 1110	2.5g/cm ³ 以上	JASS 5 JIS A 5308	再生粗骨材の場合、5mm のふるいにとどまるものを試料とする。
②吸水率	JIS A 1109 JIS A 1110	粗骨材(3.0%以下) 細骨材(3.5%以下)	JASS 5 JIS A 5308	再生粗骨材の場合、5mm のふるいにとどまるものを試料とする。
③粒形判定実積率	JIS A 1104	粗骨材(55%以上) 細骨材(53%以上)	JIS A 5005	
④粒度	JIS A 1102	表 2 に示す粒度とする。	JASS5 JIS A 5005	製造時の目標とする標準粒度を参考規格により定める。ただし、コンクリート試験を行う場合は、粒度調整することを認める。。
⑤微粉分量	JIS A 1103	粗骨材(1.0%以下) 細骨材(7.0%以下)	JASS5 JIS A 5005	
⑥塩化物量	JIS A 5002 (4.6 試験)	細骨材 (NaCl 0.04%以下)	JASS 5 JIS A 5308	
⑦アルカリ骨材反応性	JIS A 5308 (附属書 7,8)	無害。無害と判定されないもの。	JASS 5 JIS A 5308 JIS A 1804	①無害と判定されないものは、アルカリ骨材反応抑制対策を明示すること。② JIS A 5308 の試験を行う場合で、セメント付着の影響が懸念される場合は、試験前に適切な処理(塩酸処理様)を行うこと。
⑧ 1.95 浮遊不純物量	JIS A 5308 (附属書 2)	粗骨材(1.0%以下) 細骨材(1.0%以下)	JIS A 5308	
II)再生骨材を使用したコンクリートの品質				
コンクリートの調合	申込者の提案する再生骨材を使用したコンクリートについて、②及び③に示す基礎物性調査に使用したコンクリートの調合およびその他の資料をもとに、一般的なコンクリートと同様に調合することができるかを評価する			
フレッシュコンクリートの品質	コンクリートの調合およびフレッシュコンクリートの品質(ワーカビリティ、スランプ、空気量、ブリーディング、凝結性状等)が一般的なコンクリートと同等であるかについて測定データをもとに評価する。			
硬化コンクリートの品質	コンクリートの計画調合を明示した上で、硬化コンクリートの品質(圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮及び凍結融解抵抗性等)が一般的なコンクリートと同等であるかについて測定データをもとに評価する。			
コンクリート製造・施工実績	当該再生骨材を使用したコンクリートのレディーミクストコンクリート工場等における製造実績およびコンクリート製品または構造物もしくはその部分に使用した実績(実験を含む)において、工事概要、施工した部材の概要、施工時および施工後の確認事項等に基づき評価する。			

備考) ⑤、⑦および⑧の基準は暫定的項目とする。

は、日本と同様に、天然資源が稀少であり、将来的に廃棄物処理が、物理的・制度的に困難となることが予想される国・地域で検討される傾向がある。ヨーロッパにおいても、規格・基準づくりが、地域集約的に進められており、EU15 の大部分の国においては、コンクリート塊に関しては、構造物中の primary aggregate は、その処理段階で、secondary aggregate となる際に品質低下することを許容して、路盤材等の原料として位置づけることが一般化している様子である[16]。廃棄物と再生資源とを、明確に区別するための基準が必要となると考えられる。

ヨーロッパでは、RILEM と CEN が中心となり、再生骨材のコンクリートへの有効利用を可能にするため、1970 年代初期から複数の委員会活動が実施されている。RILEM では 1976 年に Technical Committee 37-DRC によりコンクリートの廃棄処理と再利用に関連する委員会が組織され、1978 年には再生骨材のコンクリートへの利用に関する RILEM 指針[21]が作成された。CEN では、Technical Committee (CEN/TC 154 および CEN/TC 227) における活動を中心に精力的な検討が行われ、1998 年には再生骨材のコンクリート利用に関する仕様書原案が示されている。なおこの指針は、オランダ、デンマーク、ベルギーを中心とした国の検討実績が基にされており、EC 内の特定国において、基準や規格を整備する基礎資料とするところに焦点を置いている。このような過程の中、RILEM と CEN は 1985 年にロッテルダムにて EDA(European Demolition Association)の協力を得て、コンクリートのリサイクルに関する第 1 回目の国際シンポジウムを、1988 年には東京にて、第 2 回目の国際シンポジウムを開催しており、再生コンクリートに関する研究を世界的な研究活動へと展開させるきっかけを作ったものと分析できる。

ヨーロッパ全域における活動が活発になった時点で、社会的背景を踏まえた上で、再生骨材の品質基準に関する規格策定作業がEUのEuropean CommissionにおけるDGX II の研究課題として実施された。主導的役割を担ったのはRILEMとCENであり、1998年にBrite-EuRam projectにおける研究課題 'Use of Recycled Materials as Aggregate in the Construction industry'における活動の成果を反映している。そして最終的に、解体コンクリート塊から製造した再生骨材を使用したコンクリートが、建設材料として適

表2.2.14 RILEMにおける再生骨材・再生コンクリートの分類 [21参照]

分類	内容			
Type I	レンガ,ブロックくず			
Type II	コンクリート解体材			
Type III	上記再生骨材と天然骨材の混合物			
種類	項目	RCAC Type I	RCAC Type II	RCAC Type III
再生骨材	絶乾密度(ton/m ³)	1.5以上	2.0以上	2.4以上
	吸水率(%)	20以下	10以下	3.0以下
	表乾密度2.2 (t/m ³)以下物質含有率 (%)	---	10以下	10以下
	表乾密度1.8 (t/m ³)以下粒子含有率 (%)	10以下	1.0以下	1.0以下
	表乾密度1.0 (t/m ³)以下粒子含有率 (%)	1.0以下	0.5以下	0.5以下
	不純物混入率(%)	5.0以下	1.0以下	1.0以下
	鉄くず混入率(%)	1.0以下	1.0以下	1.0以下
	有機物(%)	1.0以下	0.5以下	0.5以下
	微粉 (<0.063mm)含有率(%)	3.0以下	2.0以下	2.0以下
	砂 (4mm以下)含有率(%)	5.0以下	5.0以下	5.0以下
	SO2含有率 (%)	1.0以下	1.0以下	1.0以下
	その他材料特性	CENの基準に準拠する		
再生コンクリート	強度レベル上限	C16/20	C16/20	---
	暴露クラス 1 による追加実験	なし	なし	なし
	暴露クラス 2a, 4a による追加実験	ASR (4a : ×)	ASR	ASR
	暴露クラス 2b, 4b による追加実験	×	ASR, 凍結融解試験	
	暴露クラス 3 による追加実験	×	ASR, 凍結融解試験, 耐氷結材試験	

用可能になる条件を具体的に提示するまでに至っている。

EU 全体における今後の検討課題は、再生骨材に対する国内および国家間レベルでの基準の策定であるとしている[16]。これまで、オーストリア、デンマーク、ドイツ、オランダは、オランダにおける再生骨材に関する品質基準データを基にした規格の標準化作業を共同実施しているが、アイルランドやイギリスでは、再生骨材を路盤用材料として使用することを前提とした規格化作業を行っており、BS6543 (British Standard Guide to the Use of Industrial By-products and Waste Materials in Building and Civil Engineering 1985) の内容の改定を目的とした活動を独自で展開している状況である。ドイツでは、2000年に再生骨材をコンクリートに使用する規格化作業に着手した状況である。そして、フランス、イタリア、ポルトガル、フィンランドは再生骨材の規格化は行われていない状況であるが、EU15 の統一的な見解は、今後も再生骨材の合理的な運用に関する継続的な研究が必要であり、再生骨材の規格の標準化や使用基準の策定は重要な課題であると位置づけて、引き続き RILEM や CEN のワークグループを中心とした研究活動の実施を強く推進するとしている[16]。

RILEMにおける再生骨材・再生コンクリートの分類を表2.2.14に示す。再生骨材の利用に関するヨーロッパ統一コードであるRILEM TC 121-DRGは、オランダで提案された再生骨材品質基準を基に、1994年に定められている。対象となる再生骨材は、4mm以上の再生粗骨材のみで、4mm以下となる再生細骨材は、天然骨材の品質基準を満たすことを条件としている。再生コンクリートは、type I～Ⅲの3種類に分類が可能であり、使用環境条件によって、用途制限や追加試験の実施を定めたものとなっている。

(2) 間接制御型－方策レベル

再生骨材をコンクリート用骨材として運用するための法律支援を基本とした間接的制御となる方策の概要を示す。なお、間接制御型の方策とは、再生骨材の資源循環に関わる既存の規準・法律等に対し、内容の変更、新たな性質の積極導入を図ることで、再生骨材コンクリートの運用の合理化が期待できる手法とする。

まず、再生骨材コンクリートの原材料となるコンクリート廃材の状況を把握するために、法令で定められている廃棄物等の分類・定義や取り扱いについて整理する。国内においては、生活および産業活動から排出される廃棄物の処理は、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」に基づいて実施されており、廃棄物の量的増大を抑えること、廃棄物に含まれる有用資源の再利用を促すことを目的に、1991年に「再生資源の利用の促進に関する法律」が制定されており、コンクリート塊を始めとする建設廃棄物の新たな適用性を導く法律として位置づけられるようになった。つまり、従来廃棄物とされてきたものが、見方によって再生資源として差別化することが可能になると分析できる。

廃棄物処理法においては、廃棄物は、事業活動に伴い発生する「産業廃棄物」と家庭から出る「一般廃棄物」に分類される。従って、建設工事により発生する廃棄物は、産業廃棄物であり、汚泥、金属くず、建設廃材等として具体的に位置づけることができる。コンクリート塊は建設廃材に分類されており、その移動・保管・中間処理・最終処分は、法律に基づく厳重な行政的管理が課せられている。ちなみに廃棄物であることの判断は「占有者が自ら利用し、他人に有償で売却できないため不要になったもの」とされている[70]。

一方、新しく制定された再生資源リサイクル法に関しては、建設工事から副次的に発生するものを「建設副産物」と呼び、そのうち原材料として利用可能性のあるものを「再生資源」、利用可能性の

ないものを「廃棄物」としている。つまり、廃棄物処理法で廃棄物とされていたもの（建設廃棄物）を一つ前の段階で、有用物（再生資源）と不要物（本来の廃棄物）に分けて、再生資源の有効利用を図る仕組みが成立している。最終処分場残余容量が切迫する中、使用価値のある建設廃棄物を「再生資源」として位置づけ、再利用を推進することは非常に重要であると考えられる。なお建設業は、同法において、再生資源利用促進を図るべき「特定業種」として、さらにコンクリート塊は「指定副産物」として位置づけられている。このことを背景に、1994年に建設省は、建設副産物の再利用の促進と最終処分量の減少を推進するため、建設副産物対策行動計画（リサイクルプラン21）を定め、将来的に建設廃棄物の最終処分量をほぼゼロにする目標を掲げた。当面の計画として、2000年度までに、建設廃棄物の発生量を予測値から10%減少させることおよび、最終処分量を1990年を基準にしてほぼ半減させることを行動目標とした再資源化活動を実施してきた。結果は、人口減少に伴う新規構造物の着工数の低下、既存構造物の解体量の低下の影響もあり、最終的に、目標を達成する結果を導いたとされている。

このような状況において、循環型社会元年といわれる2000年6月に、廃棄物処理法の見直しが行われている。排出事業者（ゼネコン等）や、産廃事業者に対する罰則がさらに強化されており、排出事業者により廃棄物を排出する責任を感じることに帰結するような定め方にするすることで、不法投棄対策の実効性を挙げるとしている。例えば、不法投棄現場から排出企業との関連を示すものが発見されると、排出企業は、中間処理として介在した産廃事業の対処方法に問わず、原状回復責任というリスクを負う。また、マニフェスト制度も大幅に改正され、これまで排出事業者は中間処理までの経路を確認すれば良いとされてきたが、中間処理だけでなく最終処分場までのルートを確認に定め、マニフェスト伝票の公布日から180日以内に最終処分することが義務づけられるようになった。このため、マニフェストの提出時には、予め最終処分を行うまでのルート、場所および信頼のおける業者を特定しておくことが不可欠になると分析できる。結果、排出企業は、これまで産廃事業者を処理価格の安さで選んでいたが、産廃処理事業者に対しての一般注意責任が科せられるため、相場を大きく下回るような産廃事業者に依頼し、その不法投棄が確認された場合、結果的に排出事業者が、金銭的な補償も含めた原状回復責任を負う仕組みとなっている。

これまでの検討により、建設廃棄物を含めた廃棄物を減量化し、副産物として有効に利用する仕組みを構築する手段の一つとして、廃棄物区分を明確にすることが重要であることがわかる。2001年7月に、国政の総合規制改革会議において、2002年度中に廃棄物の定義・区分見直しを行うという方針が示され、それを受けて、2001年9月には全国産業廃棄物連合会が、廃棄物連合会定例理事会で承認された新廃棄物の定義・区分(案)[71]を提案した。新案では、一般廃棄物と産業廃棄物の区分の廃止、

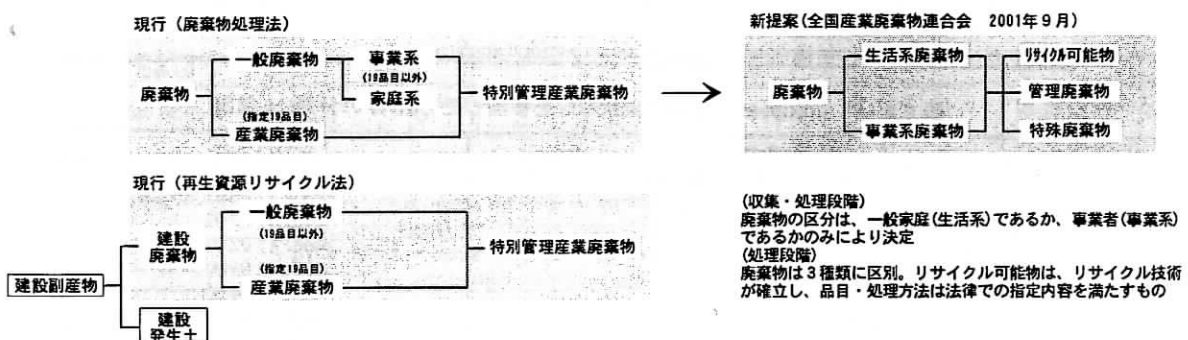


図 2.2.21 産業廃棄物の新しい定義・区分(案) [71 参照]

リサイクルを廃棄物処理の延長として位置づけるなどを中心に、いくつかの特徴を示している。一方で、リサイクル可能物を廃棄物の枠組みで明確にしたことは有効であるとしたが、将来的には、リサイクル可能物を廃棄物の分類から外し、循環材料として別体系で扱うことが必要になるという考え方を示し、この点を考慮した廃棄物区分案の策定が、今後の活動目標になるとしている[71]。

次に、海外における再生骨材コンクリート運用のための法的支援となる方策の概要を示す。

European Commission では、1990 年に開始した Priority Waste Stream Project (PWSP) において、産学官 60 を越える団体を巻き込んでの研究活動を行っており、そこで、一般的な建設物の C&DW に起因して発生する環境インパクトを表 2.2.15 のように示している。そして、表 2.2.16 に示す廃棄物マネジメント手法のヒエラルキーに基づき、先に示した環境インパクトの低減を図ることで、建設廃棄物の発生抑制と環境負荷低減が可能になることを示した[16]。このような仕組みが廃棄物の発生抑制と再資源化を推進する生産システムのあり方にフィードバックされることが重要と分析できる。構造物起源廃棄物の最終処分量をできるだけ抑え、材料の再資源化を基調とした仕組みを積極導入することで、先に示した 7 大環境インパクトは表 2.2.17 の 5 つに集約されるとしており、この範疇に環境インパクトを抑えることは、経済的に成立する循環型社会を構築するために必要な条件であるとしている。

日本における建設廃棄物の定義に関する問題と同様に、海外でも C&DW の定義の明確化が早期に必要であることが示されている[16]。PWSP では、Symonds Report にて EWC (European Waste Catalogue) を参照した新たな分類法を提示しており、EU15 に対しては、建設廃棄物の環境マネジメントを行う際には、この分類を基本としたマネジメントの推進を要請している。その背景には、EU 共同体レベ

表 2.2.15 C&DW による 7 大環境インパクト [16]

1. noise and dust;
2. some air pollution;
3. vibration;
4. potential for pollution of surface and groundwater of fuels and lubricants used in plant and machinery;
5. visual and aesthetic impacts;
6. changes in land form
7. changes to natural habitats and possible destruction of historical artefacts

表 2.2.16 廃棄物マネジメント手法における 5 原則のヒエラルキー [16,26 参照]

1. prevention or reduction (sometimes termed avoidance or minimisation)
2. re-use;
3. recycling or material recovery
4. energy recovery
5. disposal in a safe manner

表 2.2.17 材料の再資源化を基調とした仕組みを導入した場合の 5 大環境インパクト[16]

1. noise and dust;
2. some air pollution;
3. potential for pollution of surface and groundwater of fuels and lubricants used in plant and machinery;
4. visual and aesthetic impacts;
5. changes to natural habitats and possible destruction of historical artefacts

表 2.2.18 European Waste Catalogue を参照した C&DW の分類[16 参照]

Contents	EWC codes
1. concrete, bricks, tiles, ceramics and gypsum based materials	code 17 01 00
2. wood	code 17 02 01
3. glass	code 17 02 02
4. plastic	code 17 02 03
5. asphalt, tar and tarred products	code 17 03 00
6. metals	code 17 04 00
7. soils and dredged spoil	code 17 05 00
8. insulation materials	code 17 06 00
9. mixed construction and demolition waste	code 17 07 00

ルで、統一的かつ合理的に建設廃棄物による環境負荷低減を実施する意図が認められるといえる。表 2.2.18 に PWSP の活動により提示された C&DW の分類を示す。

C&DW の分類を明確にすることは、建設廃棄物の発生源の特定・体系化に有効であると考えられる。表 2.1.15 に示した環境負荷因子の発生源は表 2.2.18 の C&DW に分類された物質群を根拠とすることが可能であると考えられる。Symonds Report では、環境負荷因子の発生を低減するために、図 2.2.22 に示す構造物の基本処理計画の手順を踏ませることで、図 2.2.23 に示すような建設廃棄物発生源と基本処理計画の関係を明らかにする仕組みを提案している。また基本処理計画を完備するために、追加的な検討要因となる Optional Activities を示している。表 2.2.19 に建設廃棄物処理における Optional Activities の概要を示す。Symonds Report では、表 2.2.16 におけるヒエラルキーの re-use 段階では、Optional Activities を慎重に検討する必要がある、環境に配慮した上で建設廃棄物の処理をで合理的に進めるために、更なる検討を要する部分であるとしている。しかしながら、逆にこの re-use 段階における問題点を明確にすることで、廃棄物定義および建設廃棄物の処理計画に関する諸問題を解決することが可能になると指摘している[16]。

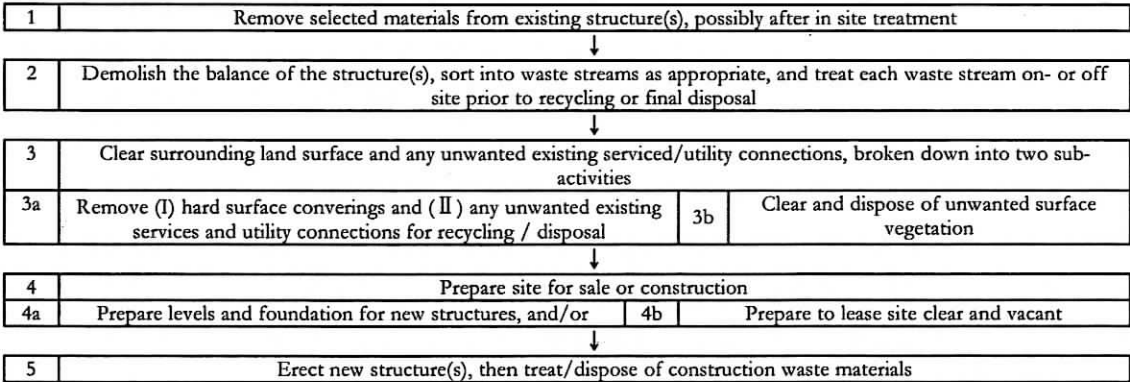


図 2.2.22 建設廃棄物の基本処理計画[16]

Types	1	2	3a	3b	4a	4b	5
Demolish and clear							
Demolish, clear and built							
Renovation							
Greenfield							
Road build							
Road refurbishment							

Key

Darker cells show unavoidable activities

Darker cells show optional activities

図 2.2.23 建設廃棄物の発生源と基本処理計画の関係[16]

表 2.2.19 建設廃棄物の基本処理計画における Optional Activities[16 参照]

Options	Contents
Re-use options	(I) re-use on-site for original intended purpose; (II) re-use off-site for original intended purpose;
Recycling options	(III) on-site processing to recover high value saleable materials; (IV) off-site processing to recover high value saleable materials; (V) recycling on-site for long-value purpose (including non-essential land raising); (VI) recycling off-site for long-value purpose (including non-essential land raising);
Incineration options	(VII) off-site incineration with energy recovery; (VIII) off-site incineration without energy recovery;
Landfilling options	(IX) off-site landfilling of segregated waste materials; (X) off-site landfilling of unsegregated waste;

表 2.2.20 建設廃棄物の定義に関する検討[16,26 参照]

事例	内容
The Framework Directive on waste (75/442/EEC as amended by 91/156/EEC)	廃棄物カテゴリー全 15 種類のものおよびカテゴリーに含まれない建設系材料・製品の副産物
The report of the C&DW by PWSP	Council Directive 75/442/EEC に示す建設廃棄物のうち将来的にリユースおよびリサイクリング対象と見なすことができない廃棄物
The OECD definition (Final guideline document for distinguishing waste from non-waste)	材料特性に起因する 16 項目の廃棄条件により、積極的な最終処分が必要とされる放射性廃棄物以外の廃棄物

表 2.2.20 に建設廃棄物の定義に関する検討事例について示す。建設廃棄物の循環的使用を実現するために必要となる廃棄物の定義に関しては、国内および EU レベルにおいても、更に検討の余地があると分析できる。なお廃棄物の性質として、その定義には地域性および時限性が存在するといえるため、一定の間隔で定義の更新作業を行う必要があると分析できる。

続いて、循環型社会元年を期に、政策的手段として導入された資源循環に関わる新しい試みの中で、コンクリート塊の有効利用に寄与する間接制御となる方策についてその概要を示す。

2001年4月に施行された家電リサイクル法は、製造者、消費者、行政に対し、製品に対する一定の責任を課す拡大生産者責任（Extended Producer Responsibility：EPR）[72]を、国内で施行された各種個別リサイクル法で初めて導入した。2000年6月に成立した循環型社会基本法における「循環型社会の形成に必要な措置は、行政・生産者・国民が役割分担する」という基本精神を具体化した点で、その価値が認められている。なお、拡大生産者責任の基本原則とされるリサイクルコストの製造原価への直接組み入れの仕組みに関しては、再資源化コストの事前決定による整合性、既存の非適用製品の料金徴収問題、使用者による廃棄コストの意識化などの問題を考慮して、家電品を排出する際に、再資源化費用を負担する間接制御の手法とした点は、今後の検討要因とされているが、これまで廃棄物処理を担当してきた自治体や廃棄物処理業が、製造者や物流産業を巻き込んだ新しい静脈ビジネスモデルを展開する可能性も見出すことができるとしている。

ここで拡大生産者責任(EPR)について整理する。環境政策の原則として一般化している「汚染者負担の原則(Polluter Pays Principle：PPP)」は、製造過程で排出される廃棄要因（大気汚染物質、固形廃棄物、污水）が明確になっている場合は導入しやすいが、消費者を経由する廃棄要因（製品廃棄物）に対しては、適切な対応を図ることが困難となることが指摘されている[73]。そして、この問題を解決する手法として、拡大生産者責任(EPR)が取り上げられた経緯がある。1991年にドイツで施行された包装廃棄物発生抑制令における拡大生産者責任制は、使用済み製品の廃棄物処理の流れを変えとともに、新しい展望を与えたといわれている[74]。日本政府は、EPR政策について、経済協力開発機構(OECD)に研究委託をし、最終的に2001年3月に最終報告書(拡大型製造者環境責任－政府のためのガイダンスマニュアル)を示して、また同時に国内の個別リサイクル法に適用するとで、日本におけるEPR政策を実行可能なものにするための検討を展開してきた。

表2.2.21にOECD最終報告を中心としたEPR政策の概要を示す。日本においては責任分担型EPRが導入されつつあるといえるが、それに関連して表2.2.22に示す問題点も既に指摘されている[73]。EPR政策は始まったばかりであり、今後も新たな展開が発生することが予想される。ドイツのEPR政策における環境汚染の原状回復責任の対象を製造者に集約させて改善効率を高める方式などは有効な知見であろう。生産者と消費者を中心とした社会構造を正確に把握した上で、環境負荷の最小化が図られるようなEPR政策を実行する必要があると分析される。

なお、環境省大臣官房廃棄物のリサイクル対策部が管轄する政府中央環境審議会の廃棄物・リサイクル部会では、廃棄物の定義・区分、廃棄物処理法の改定作業を進めるなかで、廃棄物の新しい区分として「拡大生産者責任廃棄物(EPR 廃棄物)」を設定することなどを新たに提案している。

以上を背景とし、2002年5月には、建設リサイクル法（建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律）が施行された。建設リサイクル法は、解体設計に関連する義務規則(解体方法の明示、解体工事費の算定、解体計画の届け出、登録業者の選定)および一定規模以上の新築・解体工事における特定廃棄物の分別解体義務（コンクリート、アスファルトコンクリート、木材）を示したことが特徴的であるといえる。しかし同法は、循環型社会形成推進基本法の基本原則である拡大生産者責任と排出者責任の強化に対しては、家電リサイクル法で示されるような具体的な方策は盛り込まれておらず、特定廃棄物の減容化に重点を置く緩やかな変革を想定したものと分析できる。結果、コンクリート塊に関しても、高品質再生骨材の構造用コンクリートへの使用を推奨することを示すという内容ではなく、従来同様の道路用路盤材としての使用を許容したものとなっている。

現代日本は、廃棄物が及ぼす環境悪化が切迫した状況にあり、産業生態系における資源循環を、制度的なアプローチを利用しながら、積極的に改善することが急務とされる段階にあるため、今後も引き続き、政策支援に基づく資源循環を図る検討が必要と分析される。

表 2.2.21 EPR 政策の要点[72,74 参照]

定義	製品に対する製造事業者の責任を製品のライフサイクルの消費後段階に拡大させた環境政策手法	
目的	上流側にある製造事業者へ使用済み製品の処理責任を移動させること 製造事業者が製品の設計段階で環境配慮をすることにインセンティブを付与し、製造事業者と消費者および自治体との間の責任バランスを変化させること	
責任分与方針	責任分担型	法律に基づく政策であり、政府、企業、消費者に規制的措施を講じる方式
	協定型	法律に準ずる政策であり、政府と企業による共同対策に期待する方式(コベナント)
	自主型	法律に拠らない企業戦略であり、企業による自主的な対策に期待する方式。
現状の責任分与形態	ドイツ型	廃棄要因に対するすべての責任を「製造者」に課している。循環型経済の理念を規定するために、1991 年の「包装廃棄物発生抑制令」の内容・成果を踏まえて、1994 年に制定された「循環経済法」がこの EPR 政策の基本となっており、以下の 3 点の基本原則を提示している。 ここでは、「製造者」こそが、最も低コストで環境負担を低減できる当事者(The Cheapest Cost Avoider)と定め、製品の回収と費用負担の責任を製造者に集中させている。 ・廃棄物は、量・有害性の低減ではなく「回避」するもので、回避できない場合は「有効利用」し、いずれもできない場合は「環境適合的処分」をする。この順序で優先的に対策を講じる原則。 ・製造者は、循環を考慮した製品開発と、製品の循環可能レベルの表示義務があり、違反者に対しては法的な強制力を持つ罰金規定を課す「製造物環境責任」の原則。 ・「製造物環境責任」を循環経済の原則に基づいて履行するために、「汚染者負担の原則」を忠実に適用するという原則
	米国型	1996 年における「持続可能な発展に関する大統領諮問委員会」の EPR に対する基本的概念の勧告に基づいており、「EPR を製品に置き換えて考え、製造者に課せられる責任の拡大という側面より、ライフサイクル全体を通じて及ぼす影響の責任を政府、消費者、企業で分担する。」という考えを基本原則としている。製造者の責任をゆるやかにとらえることを特徴としている。
	日本型	1998 年に施行された「容器包装リサイクル法」等は、製造者責任を強調するドイツの包装材対策をモデルにしており、消費者や政府に対しても責任を課す「廃棄物処理法」と「資源リサイクル法」の考え方を発展させたものである。個別の問題に対し、最適な処理を確実に実施するための方策を組み合わせる適用する新しい責任分担型の仕組みとしている。

表 2.2.22 日本における EPR 導入における問題点[73,75 参照]

1. 既存法(廃棄物処理法、資源リサイクル法)を修正したものであるため、廃棄物の責任分担が不明確で、消費者への理解浸透が遅い。
2. 個別リサイクル法ごとに、責任分担が変化する。分担先が変化することは起こりうるが、その理由が示されていない。
3. 処理費用徴収手法が「前払い廃棄物処理手数料制度 (ADF: Advance Disposal Fee)」と「廃棄物排出時使用者負担」の 2 本立てであるが、手法の違いに対する消費者の理解浸透が遅い。
4. 責任分担型に特有の分担者引き渡し(インターフェース)問題が発生する。製造者責任を 1 ヶ所に集中させる方式では、この問題は発生しない。

(2)直接制御型－方策レベル

再生骨材をコンクリート用骨材として使用する技術に対し、直接的に制御される方策の概要を示す。なお本節で示す方策は、経済性を確保しながら再資源化処理を合理的に実行することを目的としているため、対象地域における再生骨材の必要性、期待される需用量、製造システムの習熟度レベル等の考慮がなされていれば、再生骨材製造に関する BAT を導出する方策を示すことになる。

構造物から再生骨材を再資源化する技術に関して、Symonds Report では、表 2.2.23 に示す 4 条件が現場内外におけるコンクリート塊の再資源化に影響を与える要因としている[16]。実際には、各地域における参入業者の利権問題、土地利用計画、環境政策および市場原理などの制約を受けるため、この要因の反映度が、直接再資源化レベルに影響するわけではないが、再生骨材製造技術レベルおよび製造量に多大に影響するものと分析できる。また表 2.2.24 に再生骨材製造における場所条件の影響について示す。結果として、再生骨材の実用化には、場所条件を考慮したクオリティーコントロールが可能であることが最も重要であることを指摘しており[16]、購入側は製造側の独自の製造システムや品質基準の導入の有無を再生骨材の購入条件にしている場合もあるとしている。

表 2.2.23 現場内外におけるコンクリート塊の再資源化に影響する要因[16 参照]

1. the availability and ownership of different machines
2. the quality of aggregate required on the demolition site itself
3. the space and time available on the demolition site itself
4. the haul distance between site, the nearest available fixed processing site and other use planning and disposal site

表 2.2.24 再生骨材製造における場所条件の影響[16 参照]

	On-site crushing and sorting	Off-site crushing and sorting;
長所	<ul style="list-style-type: none">・規模より運用コストが低コストで可能・設備投資が低コストで可能・全体的な物質の拡散が低減可能	<ul style="list-style-type: none">・周辺地域への環境負荷緩和策が容易・設備能力向上への対応が容易・ライン改善による低コスト型の運用が可能・再生材料の品質調整が容易・再生材料の備蓄容易性による市場性の向上
短所	<ul style="list-style-type: none">・がら発生量と破碎設備容量の不適合性・断続的な粉塵と騒音の発生・再生材料の用途制限の発生・建設期間の延長可能性への対応義務	<ul style="list-style-type: none">・現場に最適な処理方法の選定が困難・規模により運用コストが増大・設備資本の高コスト化・処理現場ごとの処分コストに価格が影響

表 2.2.25 構造物の特徴を考慮した再生骨材品質評価システム[16,26 参照]

Heading	Sub-Heading	Notes
1. Resources	Determination of sources of input materials Avoidance of contamination /purity	Sources might include unbound C&DW, hydraulically bond C&DW, bituminously bound C&DW, industrial by-products or incinerator bottom ash To be attained by selective demolition and collection of mineral and other C&DW
2. Storage	Pre-treatment storage Post-treatment storage	Raw materials should be stored separately to achieve good product quality. Treated materials should be stored separately according to qualities classes.
3. Preparation	Achieving the required properties	Preparation should be carried out in such a way as to ensure that the materials fit specified quality classes.
4. Type (quality classes)	Classification according to the envisaged end use	Recycled materials should be classified according to their intended used.
5. Engineering tests	Particle size distribution Frost resistance Stiffness Compactability	Any other tests should be conducted according to national standard.
6. Composition	Percentage of other minerals Mixing ratio Detrimental components Dangerous components	Other minerals would be those which differ from the main product(i.e. concrete in asphalt granulate) Mixing ratio gives the variability of percentages of different mineral products in the granulate mix. Detremental components are materials which adversely affect the mechanical behavior of the material Dangerous components are organic or inorganic contaminants which create a risk for the environment
7. Environmental acceptability	Leachability	For recycled materials the parameters and limit values should be defined according to the quality class
8. External monitoring	Determination of parameters and frequency of testing	To be conducted by a laboratory or testing organization licensed or recognized by the Government
9. Internal monitoring	Determination of parameters and frequency related to volume of production quality classes	To be conducted by either an in-house laboratory or an external organization

表 2.2.25 に The International Recycling Federation(FIR)による再生骨材品質評価システムを示す。FIR はドイツ、フランス、オランダ、オーストリア各国における再生骨材品質評価に関する技術情報を参照して、構造体性能と関連づけた再生骨材評価システムを提案しており、このシステムを利用して、解体処理段階における現場情報、解体方法、再生材料用途、廃棄処理方法などを明確にすることにより、再生材料が広範にわたり、利用価値のあるかどうかの判断が可能になるとしている。

続いて、Symonds Report では、表 2.2.23-25 に示したコンクリート塊を再生骨材として再資源化する際に発生する環境側面を考慮に入れた上で、経済性と再生骨材製造レベルが最適化され、実務的な運用が可能となるような条件を具体的に示している。図 2.2.22 に提案された建設廃棄物の再資源化処理の適用度レベルの概要を示す。適用度レベルは、最も簡便な処理技術に基づいた Level 1 から、高度の処理レベルに基づく Level 3 およびその中間的な性質をもつ Level 2 の 3 段階に区別され、ヨーロッパの EU15 を中心に、各国および各地域で推奨される再資源化処理の適用レベルが具体的に示されている。なおこの適用レベルは、レベルの違いにより再資源化技術の習熟度が評価されるというものではなく、国、地域状況に最適な再資源化処理の適用レベルを示すものである。

Level 1

表 2.2.26 に Level 1 における建設廃棄物の処理量とコストとの関係を示す。処理施設の稼働能力に応じて破碎コストが示される形式となっている。Level 1 における破碎処理技術は移動式が大部分であり、場合により小規模の固定プラントが存在するような状況である。スペインのカタロニア政府の再生骨材に関する研究成果である The Junta de Residus (Waste Management board , Part of the Catalan regional government)は、建設廃棄物コストと処理レベルの関連を詳細に調べた研究として認識されており、その中で示されるカタロニアコストモデルは、Level 1 の性質を示すのに有効とされている。

Level 2

Level 2 における手法においては、Level 1 の処理技術が適用される場合があり、処理における経済性の確保を前提に、天然資源の採取制限が存在するもとの、廃棄物処理技術を向上させるための設備投資が実行される。この場合、経済的に成立しない場合は、最終的には淘汰され、コンクリート塊は最終処分される方向で展開することとなる。

イギリスにおいては、一定の経済性を確保することを条件とした上で、再生骨材の製造レベルを規定するために、SHWP モデル(The Specifications for Highway Works Prepared by the Highways Agency of the Department of Transport) を用いた手法が実用されており、表 2.2.27 に示す再生骨材製造レベルの範囲内で、再資源化を実行する仕組みがある。この方法に基づく再資源化処理を、Level 1 のコスト評価指標であるカタロニアコストモデルに反映させると、全量を再資源化処理行程にまわして製造量が最大

Steps	Contents
Level 1	移動式破碎設備のような簡便な破碎装置で、現場内において構造物を減容化し、主に最終処分を目的とした処理を行うパターン。スペインを中心としたヨーロッパ南部地域で発達しており、原材料および廃棄物の処理コストが非常に低廉である場合に適用される。
Level 2	システム化された処理方法により低品質の再生砕石を製造するパターン。この再資源化手法は、目的物を夾雑物から効率よく分離する技術であり、イギリス、フランス、イタリア、ベルギーなどの地域で発達している。
Level 3	複雑で高度化された処理方法により比較的品质の優れた再生骨材を製造するパターン。この再資源化手法は、最終処分の際の課税制度を設けており、廃棄処理コストは一般的に増大する。デンマーク、オランダ、ドイツなどの地域で発達している。

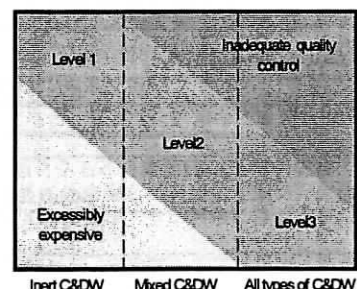


図 2.2.22 建設廃棄物の再資源化処理の適用度レベル[16,26 参照]

量となる場合の再生骨材製造コストは 2.00ECU/ton となり、輸送費も含めた場合、Level 1 として認められる経済性を超過することになり、結果的に Level 2 の段階に位置づけられるというような分析ができる。

フランスにおいては、再生骨材製造に関連する経済性の評価方法は、ADEME report (Guide des Dechets de Chantiers de Batiment 1997) や、Brite-EuRam Report (Use of Recycled Materials as Aggregate in the Construction Industry -State-of-the-Art in Europe 1997) に示されており、再生骨材の一般的な製造コストは 6ECU/ton 程度であると評価されている。これは、天然骨材製造の平均的なコストである 4ECU/ton よりも製造コストが高くなるため、市場競争を図るためには、輸送費の低減が鍵になるとされている。なお ADEME Report では、建設費の 6% までであれば、建設廃棄物に関連するコストとして盛り込み、再資源化業務を実施することが可能であるとしている。

表 2.2.28 に Level 2 における建設廃棄物の処理内容とコストとの関係をベルギーの事例を基に示す。評価項目に、再資源化物質の名称が表記され、それに応じたコストが具体化されるようになる点が特徴であり、Level 1 における仕組みに相違する点として認められる。

Level 3

Level 3 の処理手法の場合、Level 2 までの簡易処理技術による再資源化は困難となり、廃棄物マネジメント技術、政策的・経済的手法の導入が必要になるとしている[16]。

経済的手法の一つであり、最終処分コストに大きく影響する埋立税に関しては、EU15 内の Level 3 として認められる国ごとに、その設定条件がばらついており、デンマークは 45ECU/ton、スウェーデ

表 2.2.26 Level 1 における処理量と経済性の評価事例(ECU/ton)[16 参照]

Plant annual capacity	30%utilization	60%utilization	100%utilization
50,000ton/year	10.25	5.50	3.60
100,000ton/year	6.40	3.40	2.40
200,000ton/year	4.95	2.75	1.90

表 2.2.27 SHWP モデルによる処理レベルの段階づけ事例[16 参照]

Cost Level	contents
1A	埋め戻し材料としての使用を目的に、全量に対し一般的な摩擦処理を実施
6F1	粉体系キャッピング材料としての使用を目的に、細粒分に対し選択的摩擦処理を実施
6F2	粉体系キャッピング材料としての使用を目的に、粗粒分に対し選択的摩擦処理を実施
6N	構造物構成材料としての使用を目的に、全量に対し選択的摩擦処理を実施
6P	構造物構成材料としての使用を目的に、全量に対し総合的摩擦処理を実施

表 2.2.28 Level 2 における処理内容と経済性の評価事例 (ECU/ton) [16 参照]

Material	ECU/ton
Concrete (not Reinforced)	free of charge
Reinforced Concrete	1.25-2.50
Heavily Reinforced Concrete	6.25-12.50
Masonry	2.50-6.25
Mixed C&DW (including wood and plastics)	2.50-12.50

表 2.2.29 Level 3 における処理内容と経済性の関係 (ECU/ton) [16 参照]

Material	ECU/ton
Clean mineral C&DW	3.00-5.00
Masonry	7.50-10.00
Mixed C&DW (less than 20% mineral content)	50.00-75.00
Pre-sieved, non-crushed sub-base material (0-45mm)	1.00-1.50
Pre-sieved, non-crushed material (50-45mm)	2.50
Sieved and crushed sand, for pavement sub-base or embankments	1.50-2.50
Crushed branded aggregate (0-45mm or 5-45mm), for use as base materials	3.00-5.00
Crushed branded aggregate (>45mm)	4.00

ンは 30ECU/ton、フィンランドは 15ECU/ton、オランダは 13.6ECU/ton、ドイツは 7-10ECU/ton およびオーストリアは 4.5-7ECU/ton を課金するとしている[16]。EU15 内での埋め立て税に関する統一的な見解が示されていないことが、主な原因とされている。

表 2.2.29 にドイツの事例をもとにした Level 3 における処理対象と経済性との関係を示す。Level 2 と比較して、細目および処理レベルが更に具体的になることが特徴である。ドイツでは、近年になり再生骨材を含むすべての建設用骨材の価格が低下する傾向にあるが、これは鉄鋼市場において再生鋼が適正な技術に裏付けられた市場競争が可能になり、全体的な価格が低下する現象と同様に、低品質再生骨材の商品としての市場性を確保する条件が整ってきた点と、EU15 内におけるバージン骨材市場に再生骨材を巻き込む新たな流通形態が発生し始めた点が影響していると考えられている[16]。

オランダに関しては、Level 3 の国の中で再資源化処理を最も積極的に実行しているといえるが、最終処分場の残余量が切迫しているため、最終処分コストが全域的には 40～127ECU/ton、平均が 80ECU/ton と高騰している。結果、最終処分の対象物は、再生処理が不可能であるものに限られるようになり、再資源化技術レベルが着実に向上する現象が起きている。コンクリート塊の破碎・分級処理コストは 5～10ECU/ton 程度で、ドイツにおける平均的な再資源化処理コストより高い状態にあったが、将来的には低いコストで高度な処理を実行できるとしている[16]。

EU15 においては、建設廃棄物の再資源化処理の適用度と経済性との関係を明確にすることで、当該地域における再資源化処理の妥当性、将来的な方向性のある程度明確にすることができるとしている[16]。適用度レベルの移行に関しては、Level1 から Level2 の場合は、技術レベルには大差はないとされるが、Level 2 は背景となる社会システムおよび環境意識に対する習熟が必要とされ、再資源化処理に関連する制約を増大するため、移行は容易ではなく、逆に阻止する動きも発生する場合が多いとしている。Level 2 から Level3 の場合は、逆に技術レベルの習熟が必要であるとしており、設備投資量を 5 倍にすることで移行が可能になるとの報告[16]もある。そして将来的には、一般化した既存システムに対し、定期的に BAT、更には BATNEEC(Best Available Technology not entailing excessive costs)となる製造システムを明確に位置づけて、更新を繰り返す必要があるとしている。

表 2.2.30 に最終処分の規制レベルと建設廃棄物の再資源化レベルの関係について示す。建設廃棄物の再資源化処理は、法的制約のレベルにより、再資源化物の価値や運用システムの方向性が決定される傾向があることを示している。

EU15 では、オランダのように再生骨材がバージン骨材に代替して市場性を確保するような状況にある国は未だないといえるが、今後は技術支援を可能にする方策が積極的に運用されると考えられるため、再資源化技術のレベルに関わりなく再生骨材の使用は増加すると考えられる。

表 2.2.30 最終処分に規制レベルと建設廃棄物の再資源化レベルとの関係 [16,26 参照]

Disposal of C&DW	Value of recycled product	Outcome
Cheap and legal	Low	再資源化処理の合理的な実施にはいくつかの問題を有している。
	Higher than disposal costs	再資源コストは最終処分コストよりも高い状態にある。再資源化処理の市場競争は、廃棄物管理の費用に影響を受けるため重要となる。
Expensive but legal	Low	再資源化コストは最終処分コストよりも低い状態にある。再資源化コストの価格上昇に、廃棄物処理コストに直ちに影響するため、最終処分産業と再資源化産業が再生品を介した市場競争を展開することで、最終処分コストと再生コストが明確になり重要な価値基準を生み出される。
Illegal	Not important	再生材料の価格は、バージン材料の価格により影響を与え、産業間の市場競争は、再生材料の価格を低く保つことで成立する。独占的な利権を保持しようとする再資源化業者の取り組みは、再生材料のコスト増を助長する。適正な市場競争と最適化された技術の一般化が必要となる。

2.3 リサイクラブル製品の資源循環手法

2.3.1 概念形成モデル

クローズドタイプの再資源化技術を有し、製品の循環性を確保可能にする製品の生産システムに関して、その基礎的概念の確立に寄与する概念形成モデルの概要を示す。なお本節では、建設業以外の他産業分野の製品を中心に検討するが、それらは一般的に最終的に製品となるまでに、建築物における施工行為に該当する生産行為が、製品の品質もしくは性能に与える影響は小さいと思われるため、検討対象となった概念形成モデルのすべてが、資源循環を考慮した建築物生産システムに応用できるわけではないと考えられる。しかし、製品自身およびその構成材料を閉じた系内で循環させることを先進的に追求していることは明らかであるため、結果的にその概念モデルを効果的に利用することは可能であると考えることができる。

(1) インテリジェントマニュファクチャリング

吉川らは、生産知識の国際的共有化と次世代生産システムの構築を果たすため、1989年に世界に先駆けて、IMS(Intelligent Manufacturing Systems)国際共同研究プログラム[76]を提案した。同プログラムは、CAM-I(Computer Aided Manufacturing-International)の日本国内委員会において1988年以来提案されてきた生物型生産システム[77]および、Future Factory System 調査委員会におけるホロニック生産システム[78]に基づく生態系融合型生産システムの構築を目的としており、さらに吉川ら東京大学のグループを中心に進められた文部省創成的基礎研究「工学と総合化する知的人工物に関する研究」において、人工物の創造過程で、運用する人間の知的能力における理論との融合を果たし、従来の領域工学を越えんとする人工物工学が提唱され、生物指向概念を本格的に工学分野に導入する基礎的概念を構築した。1997年にはEUがIMSプログラムへ正式に参加表明をしたことで、2000年時点での参加は、日本、アメリカ、カナダ、オーストラリア、EFTA、EUとなっている。IMSにより、製品製造に関する高度な研究開発の成果を適切に管理することで、製造活動の改善や国際競争力の強化が容易となり、さらに市場に立脚した研究開発の遂行により、科学技術の飛躍的発展を可能にしている[76]。

IMSでは、表 2.3.1 に示す研究テーマを掲げている。IMS プログラムを指導し、人工物工学を提唱している吉川の仮説[76]によれば、既存の生産システムは、常に豊かさを追求した結果、効率的であることが重要とされ、自由な計画、実行が可能になった反面、その技術の正当性を保証する体系を同

表 2.3.1 IMS における最新研究テーマ[79]

1. 製品のトータル・ライフ・サイクル 製造システムの未来型総合モデル 製造における情報処理用の知的通信ネットワーク・システム 環境保護・省エネルギー・省資源・リサイクル性 採算性評価法	4. 人間・組織・社会の仕組み 製造業イメージ向上の推進・開発プロジェクト 製造業従事者の能力拡大・教育および訓練 自律型海外工場の経営効率改善 技術知識保存の改善 成果査定方法の開発
2. 製造法 クリーンかつ高エネルギー効率の製造法 加工モジュールの柔軟性・自律性の向上 製造システム構成要素と製造機能間の調和性の向上	5. 仮想・拡張企業 価値全域の情報処理とロジスティックス 技術支援のためのビジネス・機能・技術上の組織構成 拡張企業におけるコンカレント・エンジニアリング コスト責任・リスク・報償を割り当て方法
3. 戦略・企画・設計ツール プロセス・リエンジニアリング支援ツール 製造戦略モデリング・ツール	

時に内蔵する仕組みを構築しなければ真の合理性は得られないとしている。また特定の対象と深く関わりながら、更に高い研究効率、教育効率などに力点が置かれると、やがて領域の特定化が進行し、その成熟度の判定は、仮説形成(アブダクション)と呼ばれる領域の本質に関わる基礎的記述や法則により説明が可能となるが、常に「領域性」と「アブダクションに基づく記述の演繹性」を繰り返し検証し、その仕組みの公共性を持たせる必要があるとした。そして結びとして、このような性質はまさに既存の生産システムの大きな特徴であるとし、局所的最適化を目標にして行われてきた結果、不可避免的に生じる大域的不適正となるという結果を導くとしている。

IMS プログラムは、既存の生産システムに対する問題点の意識化および改善を前提にしていると考えられるため、IMS に基づく製品製造に関わる研究テーマは、既存の分散化した複数の領域を、大域的適正とすることを目標に最適条件の基で統合化するという研究開発であるとも可能と思われる。建築物生産システムの特徴を考察する上で、この仮説は重要な意味を持つと分析できる。

(2) ジェネティックマニュファクチャリング

ジェネティックマニュファクチャリングシステム(Genetic Manufacturing System : GMS)は、生物指向型生産システム(Biological-oriented Manufacturing Systems:BMS)の概念を基礎におき、それを工学的に一般化したシステム[80-81]である。BMS とは、生物に学び・生物と共生する生産システムのことであり、生物における、自己認識、自己成長、自己組織化などの優れた特徴を取り入れるものである。この特徴は、結果的に個体レベルの発生・成長ならびに生態系レベルの適応・進化という点に集約できるとしている[82]。従って、GMS は BMS を基礎におくために、発生・成長と適応・進化の特徴を理論的に取り扱い、製品設計システムに導入する仕組みを示すことの具体化を可能にしたものである。

図 2.3.1 に既存システムの変遷と生産システムが有する問題点について示す。本来、BMS が提案されるまでに、様々な変遷のもとで、各種生産システムが開発されて現在に至っている。GMS では生産行為とは、新しい何かを産み出す営為であり、工業製品の生産とは、個人や社会の要求を基に、意図された情報を、エネルギーを消費しながら素材物質の形態変化により実体化すること[82]としている。従来型の生産システムは、素材を入力値とし、製品を出力値とする典型的なインプット／アウトプットシステムで、生産の流れは、情報が製品計画の上流にあり、製造プロセスが下流になるトップダウンのシステムとなる傾向があるとしている。結果、それを基本としていた FMS や現在の生産指導原理とされている CIM までの生産システムというのは、情報の複雑化、大規模化に対する柔軟な対応が困難で、システムが硬直する性質をもつ[82]としている。つまり、従来のシステムに欠如している要素は、「開放性、多様性、変動性、調和性」というような特性であり、それらが本来生物の仕組みや

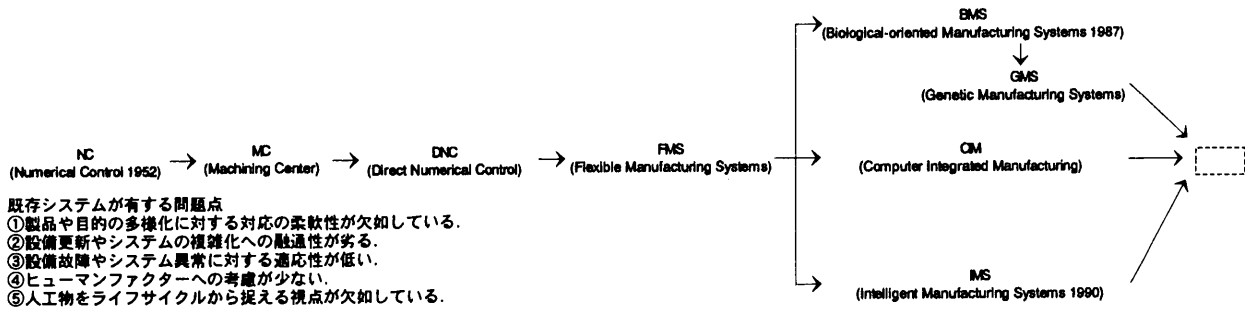


図 2.3.1 既存システムが有する問題点と生産システムの変遷[82]

生態系の営みが優れて有しているものであることを考慮すると、従来原理の生産システムから脱却するために、生物指向の発想に求めることが有効である[82]とする点が発想の根拠になるようである。

最後に、BMSを一般化したシステムであるGMSは、ボトムアップ性、分散性、局所性の三原理に基づき、発生・進化、および適応・進化の創発を導入するシステム[81]ともしている。なおそのような数理的方法論として、遺伝的アルゴリズム[83]、Lシステム[84]、セルオートマトン[85]などの手法の適用が可能であるとしている。

(3) インバースマニュファクチャリング

インバースマニュファクチャリング(Inverse Manufacturing：IM)は、1996年に産官学の共同研究の枠組みとして始まった取り組み[76]であり、製品ライフサイクル全体として、資源・エネルギー消費量、廃棄物、および環境負荷を最小にするような製品ライフサイクルシステムの構築を目的としている。IMの実現には、これまでの大量製造一販売型の形態ではなく、限定されたマーケットに必要な効用を最適のみ提供するという仕組みが必要であるとしており、製造業は、製品のライフサイクル全般に対して責任を持ち、システムとして安定な人工物の循環系を実現する産業に転換する必要があるとしている[86]。

表 2.3.2 に IM における基本的生産概念を、図 2.3.2 にライフサイクル設計の基本的流れとライフサイクルオプションの分類を示す。IMによる循環型製品ライフサイクルは、ものはすべて循環させることであり、資源は市場製品が部品倉庫となって流通していると捉え、そのサイクルはできるだけ小さいループであること、またカスケードリサイクル工程は極限まで小さくすることが望ましく、同一製品に十分に使える品質で循環させることが重要である[86]としている。ここでいう小さい循環とは、ゴミ処理型リサイクルではなく、メンテナンス、リマニュファクチャリング(製品再生産)、リユース(部

表 2.3.2 IM における基本的生産概念[86,87 参照]

Maintenance	順工程製造システムでは、メンテナンスは後ろ向き技術と捉えられる。インバースマニュファクチャリングでは、改造・交換により新たな付加価値を追加するアップグレード行為であり、積極的な行為である。
Re-use	使用済み製品から部品を取り出し、検査、清掃、修理の後に、同じ機能を有する別製品に使用すること。部品単位の視点である。
Re-manufacturing	使用済み製品を使用して、検査、清掃、修理の後に必要な部品を追加して、同種または類似の製品を製造すること。製品単位の視点である。
Recycle	素材レベルでの再利用を示しており、3Rで説明される、材料としてのマテリアルリサイクル、材料製造原料としてのケミカルリサイクル、エネルギー源としてのサーマルリサイクルがある。

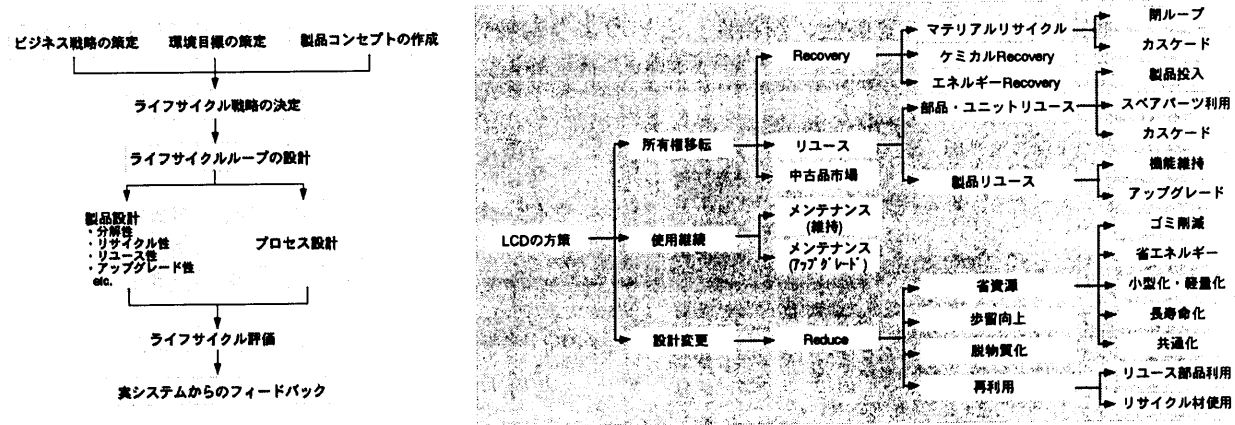


図 2.3.2 ライフサイクル設計の基本的流れとライフサイクルオプションの分類[87 参照]

品再使用)、閉ループマテリアルリサイクルを実行することであるとしている。

インバースマニュファクチャリングを実行し、製品の長寿命化を図る上での基盤となるメンテナンス学は、製品の性能が始めから終わりまで一定ではない性質を再考し、寿命を延ばすには、保全したり壊れないようにするという観点から発達したものであり、壊れた製品のデータと、修復データを集積することが特徴であるとしている。既存製品は、壊れないことを前提に設計しているため、修復データは蓄積されないが、逆に積極的に壊れることを受け入れて、寿命管理を行い、壊れた部分の修繕により、積極的メンテナンス、さらにはインバースマニュファクチャリングを可能にするものである。ちなみに製品の故障とは、製品自体が本来有している潜在的性能を徐々に消費しながら、製品としての機能を発揮し、最後にはその全量を使い果たすことである[86]としており、メンテナンスとは、その減少する「機能」を後から付け加えていく行為である[86]としている。ここから「機能的メンテナンス」という概念が発生している。なお、機能を対象とした製品価値の維持が可能であるシステムを有している場合、機能を維持する判断基準と、それを維持する機械を内部に包含していれば自己修復機械とすることも十分に可能になる[88]としている。

(4) ユビキタスマニュファクチャリング

図 2.3.4 にユビキタス生産の概念について示す。持続可能な生産活動の実現には、「ものづくり」の行為を制御するのではなく、閉鎖系で集約的に運用してきた技術のアクティビティーを、生活の場などの空間に分散させ、オープンな活動とすることを基本原則とすることが有効であり、それにより、ユビキタスとなる生産システムが実現できるとしている[89]。ユビキタス生産は、技術レベル（一般技術と特殊技術）および仕様レベル（標準使用、個別仕様）の2軸を基にした領域設定により、生産システムの位置づけを区別できるとしているが、すべての製品の生産にユビキタス生産が適用できるわけではない[89]と説明している。

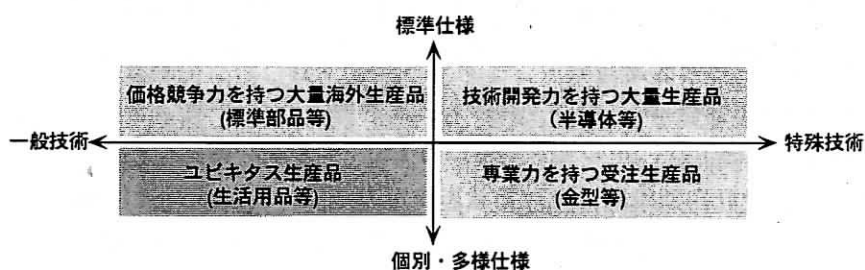


図 2.3.4 ユビキタス生産の概念[89]

2.3.2 ライフサイクル計画モデル

製品の運用効率を向上させるために、製品のライフサイクル計画(Life Cycle Planning : LCP)は実行される。ライフサイクル計画を実行することは、資源あたりの生産効率を 4 倍にするファクター 4 [90]あるいは 10 倍にするファクター10[91]などの概念を実行可能とするための方法論の一つであるとも捉えられる。本節では、製品設計の前段階で、製品の生涯における環境負荷を低減することを目標とするライフサイクル計画を導入した事例を取り上げ、その製品を実現可能とする手法のあり方について概要を示す。

LCP に関連するツールとして、LCA 評価手法があり、これを用いて製品・生産物のライフサイクルを通じて各種の環境負荷値を求めることは可能であり、製造業の分野では一般的な概念となっている。しかしながら、この LCA 評価手法に関して、表 2.3.3 に示すような問題が指摘されている。

これらの LCA 評価システムに包含される問題を解消することを目的に、組織内外に蓄積されている各種情報システムとデータ交換が可能で、拡張性、柔軟性に富む環境調和型製品設計支援システムの構築が検討されている。機械設計分野での取り組み事例として、グリーン調達システム、CAD システムおよび部品調達システムを統合化させた WebTop 型評価システム[92]などの事例として具体的に挙げられる。なお、このようなシステムを検討するにおいては、上記問題の解決に加え、資源循環システムの特徴とされる、システム全体の規模が極めて大きく、かつ動的に変化するシステム（経済事状況、自然環境など）や、行動予測が困難な生体(人間等)の動きを考慮する必要がある[93]とする考えが示されており、それに対し、通常は生体を介した資源循環システムの場合、完全な合理的追求のためのモデルの作成は困難を極めるため、生体の認知メカニズムにおける情報処理の仕組みを取り込んだ EBM モデル[93]により処理可能であることなどが提案されている。また LCP により、資源循環システム全体を構築するアプローチには、トップダウン的アプローチ（法的規制や広範的制約を導入した方法論）とボトムアップ的アプローチ（消費者や製造者の経済性、環境意識を反映した行動原理を導入した方法論）の 2 通りがあるとし[94]、ボトムアップ的なシステムを構成するために、システムの境界条件や前提条件を変化させて間接的にトップダウン的アプローチの影響を作用させることで、物流のレベルと意志決定のレベルにより構成できるとする階層モデル[94]のツールが提案されている。なお、同手法における意志決定レベルのモデル化にも EBM モデルが適用されている。

LCP を実行する際の設計初期段階における意志決定方法は、製品設計後に適用される LCA や分解性・リサイクル性評価に関する方法論[95-96]等に比べて、製品の品質や開発コストに与える影響が大きいとしている[97]。そこで、開発初期段階で「環境」に着目して優先的に環境配慮を可能とすることを目的とした製品 LCP の方法論および支援システムを具体化した手法[98]がある。図 2.3.5 に環境要素を優先的に考慮した LCP の概要を、図 2.3.6 に寿命概念オプション選択マップを示す。これらは、

表 2.3.3 従来型 LCA の問題点[92 参照]

問題	内容
データの整備	地球環境問題に反映することが可能な環境影響評価を実行するにあたり、原材料の採掘および廃製品の解体・分別・廃棄の生産行為に伴い発生する環境負荷定量値が不足している点。
データの分散化	データ量の膨大化・分散化により、統一的な公表データベースへの構築が困難となっている点
データベースの運用	データ種類別に分散管理された環境情報システムが存在しないため、インターネットなどの共通ネットワークシステムを介した標準データの運用が困難となっている点
設計反映レベル	完成製品に対する性能やサービスを環境側面により評価するため、設計終了後に使用される傾向が強い点

環境配慮型 LCP と製品企画プロセスとの相互連携と統合を実行しながら、同時並行的に製品コンセプトを構築することで、得られる製品は、LCA 的な物質・エネルギーの出入力と、寿命概念オプションの 2 つの観点から捉えることが可能になり、製品における環境仕様の設定が可能になる[98]というものである。なお、製品寿命オプションにおける耐用寿命(la)は、要求された故障率より小さい故障率を維持する期間であり、価値寿命(lr)は製品ユーザーが価値を維持している期間を意味し、価値寿命は機能寿命とは異なる概念である[98]としている。

続いて、環境調和型製品の LCP コンセプトが生成された後に、それらが性能やコストを加味した状況で実務的に適用可能かを判断するために、品質機能展開(Quality Function Deployment : QFD)[99]について、検討することが必要である。QFD は、顧客要求と製品特性および製品特性と部品特性との関連づけを行い、実務的な使用性を評価するマトリクス式分析法であり、最終的に、LCP において生成したコンセプト要素を優先的に適用するために必要な工程と位置づけられる。

以上のような各種方法論を組み合わせることで適用することにより、LCP を前提として、設計段階で制約条件となる環境要求を考慮しつつ顧客要求を満足することを可能とする環境調和型製品を予め計画することも十分に可能になると分析できる。

続いて、表 2.3.4 に製品の材料特性を考慮した環境調和型設計手法における、各種性能に対する評価指標を示す。製品の構成材料のコストパフォーマンスと環境調和性を評価するために、概念設計、具現化設計、詳細設計に従い、上流における製品に必要な機能のモデリングを前提とした材料設計手法の決定から、下流における全体の生産工程の最適化を行い、再び上流の材料設計までフィードバックする機能を含めた材料設計反映型の評価方法[100]を具体化した事例といえる。ここでは、材料設計のシステムを構築する 2 大主要因子として、「材料選択方法論」および「質量性能指標(MPI)」を挙げており、MPI の自動創出方法などの応用理論を構築することが重要であるとしている。材料選択方法論は、機械設計の材料選択手法に関する Ashby の概念[101]に、環境調和性を同時に評価するための材料選択チャート[102]を関連づけることで、製品の材料特性である質量性能指標(MPI)、コストパフォーマンス指標(CPI)、環境調和性指標(EPI)、トータルコスト値(TCV)等の評価関数を導出することを基本的な仕組みとしている。具体的には、TCV を最小化することが目標とされ、環境負荷と材料コストの相対的な価値を示す基準となるとしている。MPI は、材料に起因する環境調和型設計の根幹部分であり、製品機能を実現する材料の境界条件として、「断面形状」「負荷様式」「端部拘束様式」「制約様式」「形状因子」等について、機能と性能に着目した重み付けを行うことができる仕組みを有している。

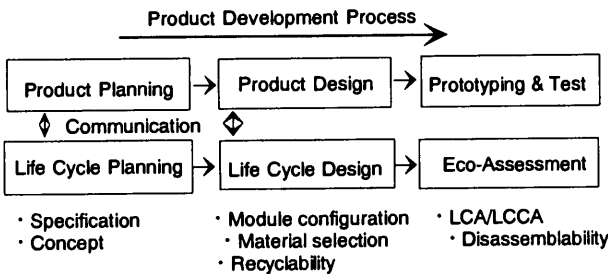


図 2.3.5 環境配慮型 LCP の概要[98]

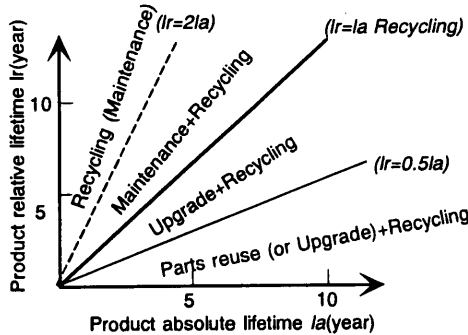


図 2.3.6 寿命概念オプション選択マップ[98]

表 2.3.4 製品の材料特性を考慮した環境調和型設計における評価指標[100]

評価指標	概要
$M = DAL = Ct \cdot \frac{1}{[MPI]}$ $[MPI] = \frac{S'}{D'}$ $C = MC_s = \frac{C_i}{[MPI]} \cdot C_s = C_i \cdot \frac{1}{[CPI]} L = MF_s = \frac{C_i}{[MPI]} \cdot F_s = C_i \cdot \frac{1}{[CPI]}$ $[TCV] = \frac{1}{[CPI]} + \frac{P}{[EPI]} = \frac{1}{[MPI]} (C_s + PF_s)$	MPI:質量性能指標 CPI:コストパフォーマンス指標 EPI:環境調和性指標 TCV:トータルコスト値 D:密度、A:断面積、L:長さ、C:材料コスト、S:考慮する材料特性の物性値、L:環境負荷、P:環境コスト

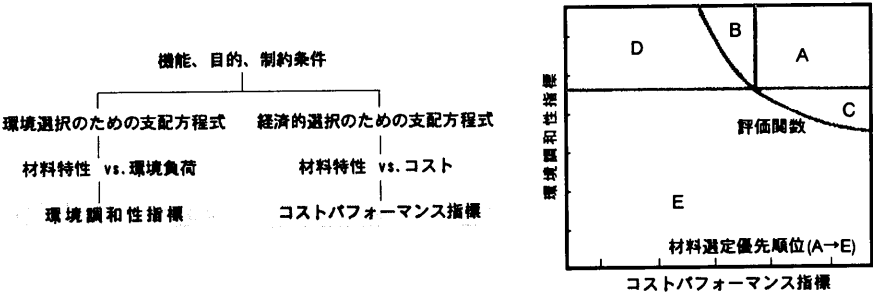


図 2.3.7 製品の材料特性を考慮した材料選択方法論[100]

表 2.3.5 リサイクル性評価法を導入するため条件[103]

情報の限定	設計段階で得られる情報(設計図、計画図等)のみで評価できること。具体的には、部品の材質等の基本的性質に関する情報が該当する。
情報の定量化	評価指標(推定リサイクル費用指数、リサイクル可能率、リサイクル容易性)が具体化されており、定量的に評価できること。
技法の一般化	リサイクル工程に関する詳細な知識を要しないで一般的な使用が可能であること。この場合、リサイクル工程情報は内部的にモデル化されている。

続いて、LCP の段階で、製品の分解時間の短縮、リサイクルの可能率向上を目標とした環境配慮型設計の開発も重要であると考えられる。それに関しては、リサイクル実効性、製品試作設計をシミュレーションにより評価可能とするリサイクル性評価法(Recyclability Evaluation Method : REM)[103]が提案されている。表 2.3.5 にリサイクル性評価法を導入するための条件を示す。同手法により、LCP の段階でリサイクルコストが小さくかつリサイクル可能率の高い処理が可能になる製品設計を実行することが可能となると期待できる。

実際の評価方法の概要は、まず具体的な製品情報を元に想定可能な分解プロセスを決定し、生産分野で一般化している組立性評価方法(AEM)で順工程―逆工程を区別することなく、リサイクル性評価の検討が簡便となる組立性設計を実行する。次に、リサイクル費用を算出するために、部品の分解動作手順から分解時間を算出する分解性評価法 (DEM) [104]を導入し、分解費用指標、処理費用指標、処分費用指標等を設定する。この流れを基本とし、最終的にリサイクル可能率が算定され、以下の簡便な評価式で表されるとしている。この指標は、単位質量あたりのリサイクル費用が大きいほど減点が大きくなり、部品の改良可能性の水準を示すことができる。これにより、設計者は点数の低い部品を重点的に改良することで、効果的な設計改良を行うことができる。

$$rEi = \left\{ 1 - \frac{rC - rC_{\min}}{rC_{\max} - rC_{\min}} \right\} \times 100 \quad (rEi: \text{リサイクル性評価値}, rC: \text{リサイクル費用})$$

建設分野においても、LCPと同様な仕組みを導入し、設計段階で最終生産物の部位・部材等の各種品質および性能をある程度制御可能なものにすることが将来的には重要となる。そこで、従来の構造物における構造安全性を長期的に確保することを中心とした設計の枠組みに対し、環境性能を要求性能として積極的に導入することで、LCPを考慮した設計とする可能性を検討する動きがある。

図 2.3.8 に土木分野におけるコンクリート構造物の環境設計体系[105]を示す。ここでは、構造物に対して環境性能を導入するために、施工の観点から環境負荷低減を図る上で重要となる4項目の環境側面（周辺環境への配慮、生活環境の保全、自然環境の保全、地球環境の保全）を明確に示し、最終的には材料・構造・施工すべての領域において環境配慮項目を具体化する手法を提案している。

建築分野においては、1997年12月における地球温暖化防止京都会議に際して、建築物の寿命を現在の3倍にするとした提言[106]、1997年版のJASS5において建築物の総合的耐久性の指標において構造物の大規模修繕不要期間として3段階(30年、65年、100年)の標準寿命を設定・導入した内容[107]、および2000年に施行された住宅の品質確保の促進等に関する法律(品確法)に関して、住宅性能表示制度の「劣化の軽減に関すること」部分にて、住宅の限界状態到達期間を3段階(3世代以上、2世代以上、2世代未満)にランク分けし、対応する劣化対策等級を示した内容[108]等を背景に、建築物の寿命を性能として指標化する動きが高まっているといえる。

続いて、図 2.3.9 に物質性能・目的指向型仕様書のヒエラルキーを示す。建築物の寿命を指標化し、最終的に評価するためには、直接に関連する耐久性についての検討が必要といえる。現在の鉄筋コンクリート造建築物に関する耐久設計手法は、ノルディック建築基準委員会(NKB)により開発されたNKB Level System[109]の考え方を基本にした物質性能ヒエラルキーの性質を考慮した上で、建築構造物の生産行為の性能と位置づけられる形而上性能[111]とを関連づけた目的志向型仕様書[110]に関し、

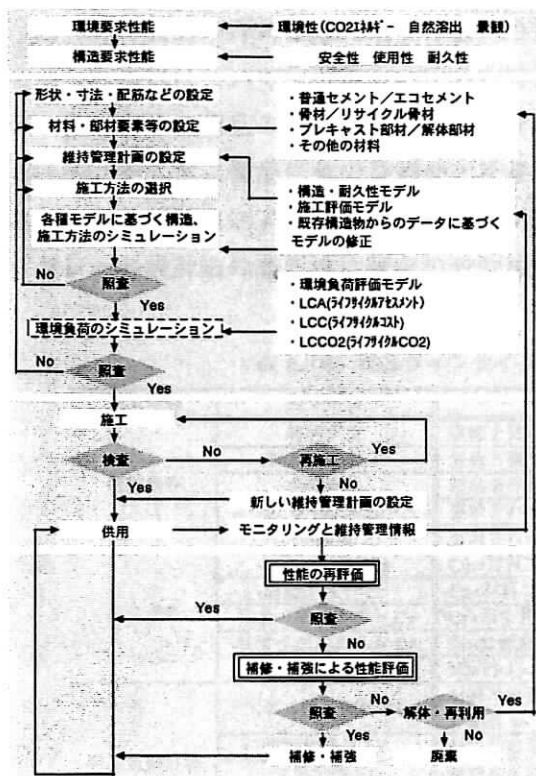


図 2.3.8 コンクリート構造物の環境設計体系[105]

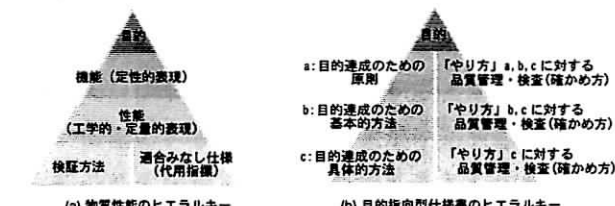


図 2.3.9 物質性能・目的指向型仕様書のヒエラルキー[110]

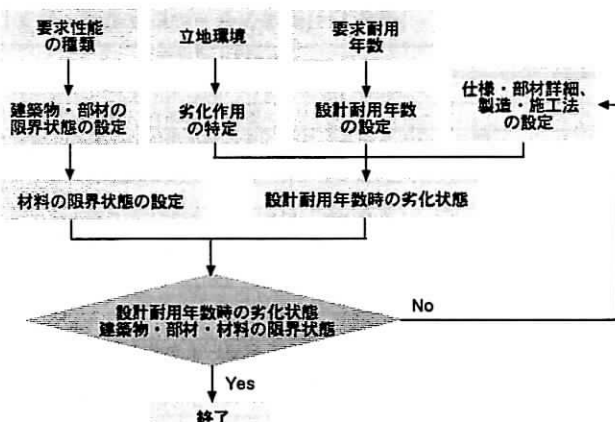


図 2.3.10 建築物の耐久設計の流れ[111]

て、その構成システムを前提とした性能検証型の耐久設計手法[111]の構築が新たな目標として、打ち出されている。これにより、鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計フローは図 2.3.10 のようになり、性能に立脚した構造物の耐久設計、さらには LCP を実行するために必要な耐久性要因と位置づけることが可能になると分析できる。

なお、建築物の物質性能以外の環境負荷因子となる室内環境、サービス性能、室外環境等の影響を加味して、建築物の環境性能効率を評価可能にし、最終的に建築物の総合環境評価システム (Comprehensive Assessment System of Building Environmental Efficiency : CASBEE) として建築物の持続可能性に関連する性質を指標化する動きもみられる[112]。LCP を前提とした建築物の生産計画の具体化は今後の重要な課題となると分析できる。

2.3.3 組立モデル

製品のライフサイクル計画を前提とし、製品の機能・性能を維持しつつ、全ライフサイクルに渡り、省資源・省エネルギー・低エミッション・ライフサイクルコストの最小化等を可能にするという、製品設計の最終目標に近い形でのアプローチを適用した手法について概要を示す。

表 2.3.6 に製品ライフサイクル設計・製造支援ツールの概要について示す。これは、製品の全ライフサイクルを考慮した環境配慮型製品設計と製造プロセスの統合化を図ったモデル[113]に対して適用された設計・製造支援ツール[114]であり、材料コスト、製造コスト、保全修理コストおよびリサイクル処理コストの総和から定義されるライフサイクルコストが最小化されるような設計を実行している。その上で、6項目にわたる環境負荷評価カテゴリーの評価を通じて、省資源、省エネルギー、リサイクル指向および有害物質削減という環境目的が連動的に達成可能となるというものである。なお、この製品設計情報を元に、リサイクル支援計画・管理システム[114]も具体化することが可能になるとしている。

上記モデルのように、製品の製造・分解・再利用に関わる全環境負荷を考慮して、それを最小化し循環性を確保するような仕組みは、研究的には既に実務的な検討を可能とするような成熟期に達していることを同わせる研究も見受けられる。その場合、次に目標とすべき課題とはどのようなものであるべきか。ここで改めて、環境に配慮した上で、製品を製造することの最終目的は何かを考えると、エコデザインの定義に関連づけて説明する場合、その回答は、生活水準と企業利益を維持したまま、人工物の「生産」と「廃棄」を持続可能な範囲まで「削減」することである[115]とする事例がある。これは換言すると、製品の最終処分をなくし、大幅な長寿命化を達成することがエコデザインの使命であるというように分析できる。

続いて、製品の寿命を最大化するという見地から、寿命拡大への具体的手法について、そのあり方を示した事例について整理する。その内容は、製品寿命の拡大には、「物理的寿命」の拡大だけでは不十分であり、製品の陳腐化や機能の相対的低下を防ぐ「価値の寿命」を伸ばすことが重要としている[116]。そして、製品価値の長寿命化を果たすには、機能のアップグレード化が不可欠な要素であるとし、製品設計法にアップグレード性を付加する方法の具体化が重要な課題であるとしている。アップグレード設計法の概要は、既存の設計法に対して、基盤部分への改良を加えずに、若干の機能、製

表 2.3.6 製品ライフサイクル設計支援・製造支援ツールの概要[114 参照]

基本情報	設定項目	要素および内容
制約条件	材料選定	機能を発現するために必要となる機械強度、材質、形状、寸法など
	製造プロセス	製造工程で要求される寸法誤差、表面粗さなど
	全体形状	製品条件を満たす材料、形状、寸法等の組み合わせによる全体形状の性質
	リサイクル性	要求されるリサイクル率の確保
	生産量	要求される生産量の確保
目的関数	材料コスト C_m	$C_m = \text{材料コスト} + \text{材料加工コスト} + \text{エネルギー費用} + \text{製造コスト}$
	製造コスト C_p	$C_p = \text{材料コスト} + \text{工具費用} + \text{設備費用} + \text{エネルギー費用}$
	保全・修理コスト C_s	$C_s = \text{保全費用} + \text{部品・ユニット交換費用} + \text{調達費用}$
	リサイクルコスト C_r	$C_r = \text{分解費用} + \text{再生処理費用} + \text{設備費用} + \text{エネルギー費用}$
	トータルコスト Y	$\text{Min} Y(m, p, h, d) = C_m + C_p + C_s + C_r$
環境負荷評価 カテゴリー	エネルギー消費 EC	材料単位量生産に要する石油・天然ガス・石炭・電力の消費量(MJ)、目標達成重み付け係数 w 、等価係数 e および資源使用量 Q により決定
	資源消費量 EP	材料単位量生産に要する資源消費量(kg)。
	大気汚染 ET	材料単位量生産当りに排出される $\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{Nox}$ 量
	ゴミ廃棄物 ES	材料単位量生産当りに排出される灰・スラグ・有害ゴミ・粗大ゴミによる環境負荷
	有害物質 EF	化学物質を使用することによる水質汚染や土壌汚濁の短期・長期的評価
	リサイクル評価	材料のリサイクル率と材料単価に対する上記の環境負荷値

品の性能向上を果たす「シリーズ設計」、シリーズ設計を進め、製品自体はアップグレードしないが、その根幹である設計情報を数世代に渡りアップグレードする「設計アップグレード」およびマスターモデルを基本に第2世代以降の製品に追加・交換モジュールをアップグレードする「製品アップグレード」により構成される。そして、アップグレード設計を実務的に使用可能なものにし、長寿命化を可能にするためには、長期アップグレード計画が必要としている。これは、世代間の対象機能を同定し、具体的な設計プロセスを計画するという内容により構成されている。なお、設計プロセスは、アップグレード計画、マスターモデル設計、設計解導出、副作用検索、副作用解消の循環による全5ステップで1つの機能に対するアップグレード設計が終了する仕組みとなっており、これをすべての世代において実行することになる。このように製品の機能寿命を確保することで、製品長寿命化を図る方法論には、次世代における製品の明確な価値と設計法の新たな方向性を見出すものとして、積極的な検討が必要とされるべきものと分析できる。アップグレード設計の支援システムに対する検討もされており、その中心概念には、機能と挙動のモデリング手法である FBS (function-Behavior-state) モデラー[117]を構築することで実現可能になるとしている。

製品の寿命概念について概要を示したところで、再び寿命を拡大することを前提に、製品に対する要求性能を、品質特性や製品機能に効果的に変換する仕組みについて整理する。

環境調和型設計における既存技術の重要な問題として、LCA の場合、完成品に対する性能やサービスを環境側面で評価している点など、現在ある設計支援システムの多くは、設計終了後にしか適用できない点が問題であること[118-119]は先にも示したが、製品長寿命化を前提とし、設計の上流段階で、実際の設計やメンテナンスを支援し、かつ顧客の満足度を充足する仕組みを導入するために、品質機能展開(QFD)[120]の概念を応用し、製品企画や開発の初期段階で適用が可能となる環境指向型品質機能展開(QFD for Environment : QFDE)[121]が提案されている。なお QFDE とは、QFD のユーザーの要求性能を品質特性に変換し、部品の品質、機能さらに工程に対して、系統的に展開することにより顧客満足度を確保する方法に対し、寿命概念も含めた環境側面を取り込むことを大きな特徴としている。図 2.3.11 に QFDE を適用した設計法の流れについて示す。手順は、QFDE 基本フェースの6段階のステップに、環境側面に関する5段階のステップを追加した形で構成されている。これにより基本項目と環境側面項目を同時に考察した検討が可能になることが実証され、環境側面により製品またはサービスを設計・計画するための適切な方策が示されるといえる。

なお、QFDE に対して LCA と LCC を統合させる GQFD II[122]という手法も開発されている。この手法は製品コンセプトを決定する際に、コスト、品質、環境の3側面を関連づけることが可能としている。

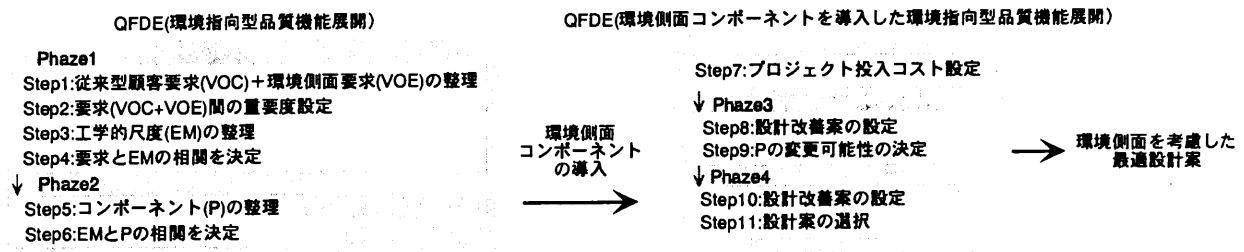


図 2.3.11 QFDE を適用した DfE の流れ[121]

続いて、設計段階でリサイ클ル製品をすることを目的とした製造および製品構成システムを検討した後に、実際に製品をリサイ클ルな状態とするために、材料レベルで、リサイクルにおける3R概念を確立しておくことが重要となる。中でも、エネルギー的に最も負荷のかかるマテリアルリサイクルを可能にする条件の明確化が必要であると分析できる。以下に具体的な検討事例を示す。

自動車、電子機器製品設計においては、素材統一化を前提とした生産システムの構築が進められている。自動車の場合、内外装で使用する部品の多くは基本的にプラスチックであるために、各部品の薄肉軽量化、環境問題に対応したリサイクル化、コストダウンを目的とした無塗装化・統合化・モジュール化が可能であるとしている。それを実際に可能とするプラスチック材料としては、高流動・高剛性・高衝撃材を備えたナノコンポジット[123]が有効であるとしている。ナノコンポジットとは、分散相の大きさがナノメートル次元(1~100nm程度)の複合体のことであり、物質がナノコンポジット化すると、引張強さ、弾性率、熱変形温度などの物性が飛躍的に向上することがわかっている。代表的なポリマー系ナノコンポジットとしては、スーパーオレフィンポリマー (Super Olefin Polymer) [124]が有効視されており、ポリプロピレン(PP)、エチレンプロピレンゴム(EPR)、エチレン系共重合体、タルク(滑石)により構成され、エラストマー中に結晶をマイクロ分散させたナノコンポジット[125]となっている。スーパーオレフィンポリマーは、強化されたエラストマー成分に耐衝撃性や寸法安定性を付与し、低分子量の高結晶成分に溶融時の流動性と固化時の剛性を持たせた複雑な高次構造を持つポリマーとなっているため、自動車の金属以外のプラスチック系のあらゆる材料をスーパーオレフィンポリマーで代替することを可能としている。なお、自動車のバンパーへ応用した場合、弾性率が5割向上したことで15%の軽量化が可能になり、更には、成形流動性が2倍向上することで生産性が30%向上する[126]というような結果も示されており、総合的な材料性能が大幅に向上するといえる。また、製品の構成材料を統一化することで、材料レベルでの完全なリサイクルが可能になるといえる。以上の例は、材料開発のあり方が既存の生産モデルやシステムを変化させる可能性があることを多に示唆している。

建設分野での検討では、日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業における「低環境負荷・資源循環型居住システムの社会工学的実験研究」(プロジェクトリーダー・尾島俊雄早稲田大学教授)がその事例として挙げられる。製造物の原単位モデルとして戸建住宅を挙げ、住宅およびその構成要素に対し、規格化・標準化、構造の単純化、部品減、軽量化などを設計段階に積極的に導入し、現在10%以下とされるリサイクル率を80%以上に向上させることを可能とする完全リサイクル型居住システムを設計・施工し、部位・部材を監視する技術を確立した上で、環境負荷の低減を実証する検討を1997

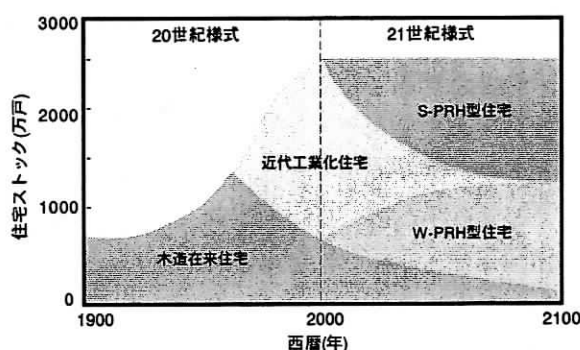


図 2.3.12 将来における住宅ストックの推移予想[128]

年より実施している[127]。また、大量生産・大量廃棄の技術から低環境負荷・資源循環型技術への移行を図る上で必要な、技術の合理性を測るための尺度、技術評価システム、さらに合理的技術の開発を促すインセンティブを内蔵する社会システムの設計原理を確立することも視野にいたったものである。

実際の研究は、2棟の実験住宅の建設と実測を中心としたものであり、かつて循環性が確保されていたとされる日本民家における伝統技術と現代技術と併用し、資源循環と低環境負荷を目指した富山プロジェクト（郊外型・WPRH）、近代技術を最大限に用い、資源循環と低環境負荷を目指した北九州プロジェクト（都市型・SPRH）が実施された。当該住宅では実際に人間が生活し、実測を通じた生活実験を経て、最終的に解体・再築されその資源循環性を定量的に評価している。

図 2.3.12 に将来における住宅ストックの推移予想[128]を示す。21 世紀初頭に完全リサイクル住宅が実用化された場合、その 100 年後には、日本の住宅すべてが郊外型と都市型の完全リサイクル住宅に置き換わるとしている。

2.3.4 分解モデル

製品の分解性を考察する際には、製品の構成材料、用途などにより、その施行プロセスが製品ごとに大きく変化する傾向があることを理解する必要が考えられる。そのような特徴を考慮した上で、資源循環のために有効となる分解性および組立性の設計手法に関してその概要を示す。

まず製品の世代更新の際に重要になるプロセスとして、分解およびその組立という概念自身に着目する。それらの概念は分解性設計と組立性設計により具現化される。製品設計において両者の有効性は従来より述べられていながらも、個別に論じられてきた経緯があり、その結果、製品の総合的な分解組立性能には有限性が発生していたことが特徴として挙げられている。この問題を解決するために、分解性と組立性が最適な割合を保って共存するための設計法[129]が提案されている。その内容は、製品のライフサイクルの各所で、繰り返し発生する分解と組立の双方の状態に着目し、共通する設計部分（分解性と組立性の設計が比例の関係にあり、分解容易性設計を行うと組立性も容易になる設計）と、相反する設計（分解性と組立性の設計が反比例の関係にあり、分解性[組立性]の容易な設計を行うと組立性[分解性]が困難になる設計）について、両方に効果のある共通要因を最大限に製品の設計に導入し、逆に相反する部分、どちらかをもつ部分である共存範囲を最小限にする[130]というものである。そして「共存範囲の最小化デザイン」とは、分解性と組立性が共存する部分を最小にするデザインであり、「共通範囲の最大化デザイン」とは、分解性と組立性が共通する部分を最大化することであるとしている。

図 2.3.3 に分解性・組立性の基本方針と設計フロー[129]を示す。この設計法の基本は、設計要因を部品、結合、手順、全体構造に分けて考えることであり、部品は、形状、材質、取扱条件、寸法、重量の設計によるパーツデザイン、結合は、部品間の抽出、挿入、結合方法の設計によるジョイントデザイン、手順は、分解、組立性の設計によるプロセスデザイン、全体構造は、個々の部品の配置を設計するフレームデザインという形で構成される。

共存の設計の最小化と、共通要因の最大化は、共存設計法の原則であり、4つの設計要因による設計概念は、共存設計法を実行する上での設計要求項目を具体化するものである。分解性、組立性を設計の基本方針とし、共存範囲の最小化を図りながら、基本設計の優先順位を、フレームデザイン・ジョイントデザイン、パーツデザイン、プロセスデザインへ求め、トップダウン的に全体から個別へ設計を実施することで分解性と組立性が両立する設計が可能になるとしている。

続いて、分解設計に着目した検討に関する整理を行う。分解性設計は、リサイクルを目的とした段階

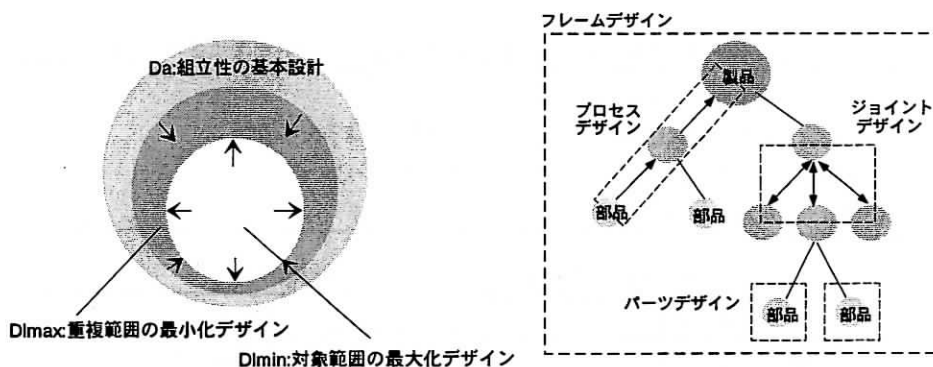


図 2.3.3 分解性・組立性の基本方針と設計フロー[129]

だけではなく、部品更新のためのメンテナンスを目的とした段階もある。このような、ある目的物のみを取り出す分解行為は、選択的分解[131]と呼ばれ、製品の寿命拡大に寄与するメンテナンス行為を効率良く実施するためには、選択的分解を考慮に入れた分解設計法の確立が重要とされている。具体的なアプローチとしては、選択的分解を考慮しない場合に適用できる分解パターン自動生成システム[132-133]の仕組みを応用し、製品の部品接続グラフを元に、分解対象である目的物の効率的な取り出しに有効であるとされる初等的カットセットを求め、それらの分解が可能であるかどうかを判断するという仕組みを用いたもの[134]がある。リサイクルを目的とした分解モデルが、部品接続グラフに多数存在する、分解が不可能なカットセットを含むすべての部品のカットセットから最適なものを選択するというアプローチを取ることからも大きな違いがあることが理解できる。また、メンテナンスを目的とした分解の場合は、目的物を効率良く取り出す必要があるため、目的物とそれ以外の部品群に分かれるような初等的カットセットを取り出すことが有効になることから、エントロピー概念[135]を用いて、初等的カットセットの評価値の良いもの（評価値であるエントロピーが小さいもの）を優先選択し、目的物の分解可能性を容易にする方法もある。

以上、分解組立を合理化するシステムに関連する内容の整理を行ったが、そのようなシステムが完備している場合においても、最終的にはリサイクルおよびメンテナンスを目的とした分解に因らず、部品における物理的な接合の仕組みのあり方が重要になる。つまり部品および製品の解体性に関わる要求性能に、接合強さと接続持続性に対する信頼性と同時に、必要な時に容易に分解できる性質が確保されていることが重要になると分析できる。

金属を中心とした無機材料の接合部に対して、分解を条件とした接合に関する検討[136]が行われている。表 2.3.7 に金属製品における分解・組立設計を可能とする界面の接合方法について示す。基本的には、接合部の組織を熱・物理的かみ合わせ力を利用して制御することにより接合と分離を簡便に行うというものであり、表面活性化常温接合法[137]という方法も具体化されている。これは、アルミニウムとステンレスを、微粒子研磨による球面加工、電解研磨、真空状態での希ガス原子線照射等により表面活性状態で接合し、解体時には外部から一定の熱エネルギーを加えることで容易に相変態を起こし、分離するというものである。接合材料である 2 固体の構成元素が混合しないように原子レベルで直接結合していることが特徴であり、2 固体による溶融層はほとんど見られなくなる。アルミニウムとステンレスの接合体を用いた実証実験では、常温および高温(573k)でも強い接合強度を生じ、接合材料としての一定の品質を確保できている状態で、特定環境下ではあるが、真空状態で 2 時間加熱(823k)後、冷却すると無負荷で自然に分離する状態となることを示した。

表 2.3.7 金属材料における分解・組立設計を可能にする界面の接合方法[137]

1. 脆い反応層の形成による界面の脆化による分離方法
2. 接合面での水素吸蔵合金の微粉化や水素化合物形成による分離方法
3. 水素ラジカルや水酸基との反応による分離方法
4. 熱応力の積極的利用による分離方法

表 2.3.8 非可逆的分解のプロセス評価指標[144]

評価指標	算定式
En: 回収条件適合部品率	En=適合部品点数／総部品点数 [%]
Ew: 回収条件適合重量率	Ew=適合部品重量／総部品重量 [%]
Ep: 総作業数	Ep=分解作業数＋破碎作業数＋選別作業数

また自動分解作用の創出を目的に、構造体内部にアクチュエーター機構を持たせ、必要な時に作用させることで構造体を積極的に分解する仕組み[138]も検討されている。分解性をサポートするメカニズムを積極的に導入して易分解性を向上させる設計コンセプトはアクティブディスアセンブリと称され、マイクロマシンの領域で実現可能なレベルから、マクロな材料レベルにおける自己解体性のレベルまでの広範で普遍的な性質として定義している。また易分解性を体系的に分類・解析可能であるような設計条件を満たすものはスマートディスアセンブリ[138]となる。

以上、合理的な分解を可能にする製造システムと、実際の分解を支配する材料レベルでの条件について整理を行った。数多くの部品の集合体である製品の分解・破碎・選別作業プロセスは、具体的な可能解を設計段階で導出することが重要であると認識されている。そして、優れた分解方法を実証するためには、提案されている様々な可能解を比較評価するリサイクル・リユース計画システムの存在が必要になると分析できる。リサイクル・リユース計画システムの研究事例[139-146]はいくつか報告されているが、その多くは可逆的分解が可能である製品、部品、素材について検討したものであり、分解行為で実際に発生する非可逆的分解[144-146]を対象としたものは少ないといえる。非可逆的分解を対象としたシステムは、部分的破壊や、分解時における材料の混入、破碎による構造や形状の消滅、選別による材料の分別など、現在の実務的な状況で発生する事象も考慮することが可能であるとしている。表 2.3.8 に非可逆的分解のプロセス評価指標[144]を示す。具体的な方法は、製品情報モデルおよび部品回収条件（再利用・再使用・破棄）を入力事項とし、そのような製品に対する分解方法を導出することで、非可逆的分解が検討可能になるとしている。分解・破碎・選別の各処理のプロセスを総当たり検索手法により求め、プロセス評価指標値を計算することで、設計者は最適な非可逆的分解プロセスを対話的に選択することができる。

2.3.5 運用モデル

(1)間接制御型－方策レベル

製品がリサイクラブルであることを追求する過程において、技術的には条件を満足していても社会システムにおける運用上の問題がある場合、結果的に産業領域や循環系は拡大する可能性がある。従って、法的支援等を基にした間接制御による方策を積極的に導入することが必要とされるようになる。本節では、その概要について示す。

1992年にリオデジャネイロで環境と開発に関する国際会議（地球サミット）が開催され、持続可能な発展（Sustainable Development）の概念の提唱がなされ、地球規模の環境問題の解決および有限な資源や自然環境の保全が国際社会の共通認識となったのはあまりにも有名な話である。その後、資源循環を考慮した持続可能な発展を具体化するために、ISO(International Organization for Standardization：国際標準化機構)は、地球サミットから4年後の1996年に環境マネジメントシステムの国際規格ISO14001を発効した。これは英国の環境管理システムに関する規格であるBS7750を基にしている。ISO14001により、企業活動が環境に与える影響に配慮し、環境と経済の両立を図りながら事業体の持続可能な発展を世界規模で構築する準備が整ったものと分析できる。

ISO14001に準拠する活動内容は、事業体の経営責任者が環境配慮に対する意思表示を行った後に、現状把握、法規制の順守レベルなどを基に新たな環境方針を策定し、環境に影響する活動に対して長期的・短期的な具体的改善目標を設定し、実行することである[147]。行動計画は、計画(PLAN)→実施(DO)→点検(CHECK)→見直し(ACTION)のPDCAサイクルに準ずることが重要とされ、継続的な自主環境改善を図る仕組みとなっている。重要な点として、ISO14001では表2.3.9に示すように「環境目的」と「環境目標」を明確に区別した上で環境改善活動を実施することを強調している点[147]であり、これにより環境を考慮したリサイクラブル製品のコンセプトの具体化が容易になると分析できる。

地球環境を保全し、持続可能な発展を検討する事業体にとって、ISO14001の導入は、不可欠であるとの認識が一般化している。認証の取得により、省エネ対策や再生処理によるコスト削減、環境リスクの回避、モラルの向上などが図られると同時に、国際基準に則した環境マネジメントシステムを導入した経営を実施しているという対外的な認知が得られ、イメージアップが図られることが想定されるためである。環境配慮型でリサイクラブルとなる技術的方策を製品開発に導入する事業体においてはその効果的な運用を可能にするために逆にISO14001の取得が基本条件になる可能性がある。

環境関連のこのような規格類はユビキタスな形で広く遍く取得されることが不可欠であり、グローバル化に伴う独占性が発生することは大きな問題であると思われる。しかしながら、ISO認証取得に関する問題として、中小事業体の場合、資金的・人力的に負担が大きくなる場合があり、事業体規模により、世界的に取得率が伸び悩む傾向があるといえる。そこで、2001年4月になり、京都における「京のアジェンダ21フォーラム」では、京都環境マネジメントシステム・スタンダード(KES)の認証を開始する取り組み[148]を開始している。同フォーラムは市民・企業・学識研究者および行政が協

表 2.3.9 ISO14001における「環境目的」と「環境目標」[147 参照]

環境目的	環境目標
「環境方針」から生じる全般的環境の到達点であり、組織が自ら達成するように設定し、可能な場合には定量化されるもの。	「環境目的」から導かれ、その目的を達成するために目的に合わせて設定される詳細なパフォーマンスの要求事項で、実施可能な場合に定量化され、組織又はその一部に適用されるもの

力し、京都における環境保全活動を実施するための NPO 組織であり、ISO 認証取得が困難な中小事業体に対して、KES 認証事業部が第 3 者審査を行うことで、ISO14001 に準拠した地域共有規格の認証を与えるものである。審査に必要な環境影響評価の方法は事業体の経営実態に合わせて選択できるように 3 手法(簡易影響評価法、チェックリスト法、評価点算定法)を設定している。これにより、京都では事業体規模に因らず、環境マネジメントシステムを導入することが可能な状況にある。KES による審査の信頼性とその社会的認知度を高めることが今後の課題であるといえるが、ユビキタスな環境活動を実行する上での法的支援による方策としては、発足の意図およびその手法のアプローチには、環境活動の価値を高めるための、非常に重要な要素が内包されているものと分析できる。

ここで、環境活動の価値に関連する性質である「環境の価値」について、改めて情報の整理を行う。このことは、法的支援による方策レベルを検討する上で、非常に重要な性質であると思われる。現在、「環境の価値」というものは、どのように評価されているのであろうか。実際は、「環境」の定義自体が明確にされないため、環境の価値を評価することは更に困難を要するといえるが、逆に、普遍性のある概念として擁立することが困難である場合、多様な性質を帯びた概念として使用される状況が成立する場合があるため、そのような概念として認識することとする。

高度成長期における日本の市場経済の枠組みの中で、環境の価値はどれほどの重要性を帯びていたであろうか。市場経済の規模が拡大した初期には、そのような概念は恐らく存在しなかったため、結果的に際限なく廃棄物を自然界に放出して多くの公害問題を発生し、最終的には生産行為自体が製品の製造とともに多くの弊害を生み出し環境の価値を著しく低下させる状況を引き起こしたと理解できよう。つまり、環境の価値を見出す必要性が求められている現在は、一見不明瞭ではあるが、明らかに存在する環境の価値を市場経済に組み込むことで、製品の生産に関わる環境側面を積極的に制御する必要がある状況と分析できる。

環境経済学の分野において、経済取引に反映されない「便益」や「費用」はそれぞれ「外部経済」、「外部不経済」と呼ばれ、環境にかかわる「便益」や「費用」を経済取引に反映させることは一般に「経済の内部化」と呼ばれている。この場合、環境の価値は、経済取引に反映されない便益に含まれるものと捉えられるが、環境の価値による便益や費用の内部化が必要になるのは、自然による自浄能力などの環境性能に比べて経済活動の規模が相対的に大きくなる場合である[149]と考えられている。この場合、資本主義社会経済のように発展・成熟した経済では、市場評価になじむ便益を優先させて、環境の便益を無視する結果、環境を著しく害し、それにより失われる環境の価値は多大になる場合がある[149]とも考えられてる。つまり、環境資源を使用する事業体を汚染者と見立て、汚染者に対し経済取引の中に、環境資源のもたらす便益や、環境資源にかかわる費用を適正に反映させる「汚染者支払いの原則」のような原則の擁立や、環境費用を市場経済に取り込むための構成則[150]を組み込むことで、未然防止的に環境の価値を低下させないことが必要になると分析できるのである。

ちなみに日本においては、事後的に公害の加害者が被害者に補償するという考え方として、OECD が提唱し、現在では世界各国の環境保護の基本となっている「汚染者負担の原則(Polluter Pays Principle : PPP)」が存在するが、「汚染者支払いの原則」は、PPP とは区別されることが必要であり、外部不経済の内部化手法として、汚染物質排出行為に対する課税制度の導入する形で「汚染者支払いの原則」を具体化することが、環境の価値を保持していく上で、重要になる[149]としている。

現在は、上記のような法的支援に基づく方策の導入は途上段階にある。しかしながら、将来的にはこれまでの環境破壊に対する規制的措施だけでは、新しいタイプの環境破壊に対して対応できないと

分析できるため、法的支援を前提とした市場機能を有効に活用する経済的手法の導入は、注目される動向と位置づけられよう。なお具体的には、市場経済の中に環境税制、デポジット制度、排出権取引、補助金等を組み込むことが該当する。

表 2.3.10 にグリーン税制の仕組みを示す。地球環境問題の最終目標は、温暖化防止を図ることであると考えられるが、それを間接的に制御可能な経済的手法のひとつに、炭素税の導入が挙げられる。炭素税に代表される環境税は、一般に環境の汚染・破壊を、外部不経済とみなした上で、環境を汚染・破壊する行為に課税し、外部不経済を市場に内部化する取り組み[152]と理解することが可能であり、税率の設定や使途の工夫で、多様な温暖化ガスの削減効果が期待できると考えられる。日本では、1997年の地球温暖化防止京都会議(COP3)までは、経団連や通産省において炭素税は経済成長を阻害するものであるとし、導入に積極的ではなかったが、昨今では、炭素税導入に際しての税制中立の原則[151]に基づくことで、経済的手法としての一定の効果が期待できるとしている。図 2.3.14 に炭素税を導入した場合における GDP 増減率の長期予測を示す。なお先進国においても、炭素税の導入による経済成長は中立的ないしは促進的である[153]という結論に達している。

表 2.3.11 に税制中立の原則に基づくグリーン税制の適用事例を示す。1990 年代になり EU を中心に環境税が導入され始めており、1990 年にフィンランドが世界で初めて炭素税を導入している。今後は、炭素含有量に応じた燃料税、熱利用に対する税、鉱物油課税などの導入が検討されているが、「良い行為」の実施により減税措置が図られることを利用し、「悪い行為」の発生率を抑制する手法はコンクリート構成材料の環境配慮型運用方法を具体化する上でも有効となる可能性があるといえる。

表 2.3.10 グリーン税制による資源循環性の確保[151 参照]

経済的手法	内容
税制中立方式による グリーン税制	一般的に政府が行う公共投資や福祉などの財源は、労働や企業活動による「良い行為」によって得られる所得に課税することで確保されるが、環境破壊による健康被害や、資源浪費などが著しい時代には、その原因となる「悪い行為」に課税をすることで原因行為の抑制と財源の確保が同時に可能となる。この場合、「悪い行為」の課税（バツ課税）の税収分により、所得税や法人税などのいわゆる「良い行為」の税金(グッツ減税)を減税が可能になり差金がゼロに近くなれば、最終的に個人・法人が支払う税金は変わらなくなり「税制中立」となる。アメリカの環境分析シンクタンクである WRI（世界資源研究所）のロバート・C・レベット博士らのグループにより提唱された。なお、1991 年にスウェーデンで世界初の税制中立方式によるグリーン税制を経済的手法として導入している。

表 2.3.11 EU における税制中立原則を適用したグリーン税制の動向[155-156 参照]

国名	開始年	主な増税項目(バツ増税)	主な減税項目(グッツ減税)	税収変化率
スウェーデン	1991	炭素税、二酸化硫黄排出税	個人所得税	+1.9%
デンマーク	1992-	炭素税、自動車燃料税、電力税、水売却税、廃棄物処理税、埋立処分税、自動車所有税、炭素排出税、農業使用税 etc.	個人所得税、農業資産税	+2.0%
スペイン	1995	自動車燃料売り上げ税	個人所得税	+0.2%
オランダ	1996	燃料税、電力売り上げ税	個人所得税、社会保険料	+0.8%
イギリス	1996	燃料税、廃棄物埋立税	個人所得税、社会保険料	+0.2%
フィンランド	1990-	炭素税、エネルギー売上税、廃棄物処分税	個人所得税	+0.5%
ドイツ	1999-	炭素税、エネルギー売上税	個人所得税、社会保険料	+2.6%

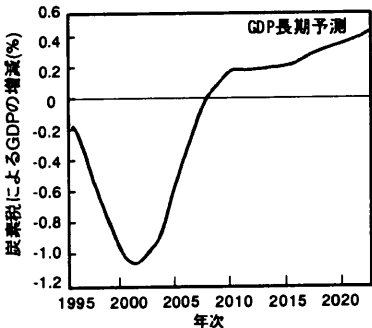


図 2.3.14 炭素税導入による GDP 増減率の長期予測(炭素税で財政赤字を補った場合)[154]

(2) 直接制御型－方策レベル

リサイクル製品に備わっている性質を最大限に発揮するためには、法的支援等を前提とした間接制御による方策に加え、製品特性、市場性、環境調和性等の性質に直接的に影響を与えることが可能である方策の適用が有効と考えられる。本節では、その具体的事例について概要を示す。

製品を製造主体である事業体が、経済活動に関わる環境負荷が少なく持続可能な社会経済システムを保有した仕組みへの転換を図るには、事業体自らが直接管理する経済活動に対し、環境保全性のチェックシステムを内在化させ、自主的に環境保全活動を進められるシステムを構築することが重要であると分析できる。この場合、自らが生み出した環境負荷に対し、実行した対策の効果として位置づけられる「環境改善性能」を的確に把握し評価することが重要となる。そして、環境改善性能の指標のひとつに「環境パフォーマンス指標(Operational Performance Indicator:OPI)[157]」がある。この指標は、1996 年における社団法人全国環境保全推進連合会による「環境活動評価プログラム」における活動を拡大的に発展させることを目的として設立された「事業者の環境パフォーマンス指標に関する検討会」により示されたものであり、環境パフォーマンス指標の望ましい在り方、共通の枠組み、および実際に事業者が活用可能な指標等[157]を提示したものである。2001 年に、ISO14031(環境パフォーマンス評価―指針)に準拠した JIS Q 14031 が規格化されているが、環境パフォーマンスの用途、データ収集等について規定しているものの、指標選択の考え方や手順についてはまだ具体的には触れられていない状態である。

表 2.3.12 に環境パフォーマンス指標作成ガイドラインの世界的な動向を示す。現在のところ、世界的には大きく 3 つの方向で環境パフォーマンス指標を実務的に使用するための検討が行われている。なおこの状況に関して、最終的には各種ガイドラインを包含するような標準化作業を実行しなければ、情報の質、考え方の違いにより混乱が生じるとする可能性[158]が示唆されている。

本来、事業体における「環境改善性能」を評価する「環境格付け」の動きは欧米を中心に活発化していたとされており[156]、欧米には古くから、組織の資産運用に関しては、社会正義に反する行為を行う企業には協力・投資をしないという「社会的責任投資(Socially Responsible Investment)」の考え方[157]が備わっており、環境問題に熱心に取り組んでいる事業体は、省資源・省エネルギーなどを通じて、高い経営効率を実現することができ、将来的な環境リスクも回避することが可能となり、結果として優れた企業業績を達成できるという認識[157]が一般化していた。そのような背景のもと、事業体に対する環境対策の要求度は高くなる傾向が続いており、少ないコストで高い効果を得るための実効策が求められるようになったといえる。その結果、新たに導出されたツールとして環境会計がある。

表 2.3.12 環境パフォーマンス指標作成ガイドラインの世界的な動向[158 参照]

分類	内容
個別団体のガイドラインによる地域標準化	国・地域・団体レベルのガイドラインとして作成・制定するものであり、オランダやデンマークのように環境報告書作成の法制化に伴いガイドラインが構築された国もある。1990 年初頭に多くみられ、米国 NPO である環境責任経済連合(CERES: Coalition for Environmentally Responsible Economics 1989-)、国連常設機関である国際連合環境計画 (UNEP: United Nations Environment Program 1994-)、世界 150 社の国際的企業により運営されている持続可能な発展のための世界経済人会議(WBCSD: World Business Council for Sustainable Development 1994-)等によるガイドラインが有名である。
GRI(Global Reporting Initiative)による世界標準化	地球報告イニシアティブ(GRI: Global Reporting Initiative 1999-)は、1997 年に CERES が UNEP と連携して呼びかけを行い設立された機関であり、UNEP、WBCSD、WRI を始め、日本、英国、アメリカ、インドなどが参加している。Sustainability Report は、持続可能性に関連する 3 側面(経済的側面、環境的側面、社会的側面)の相互関係を示すことを主目的とした環境パフォーマンス指標作成ガイドラインである。
ISO14000 シリーズガイドラインによる世界標準化	ISO 環境マネジメント専門委員会である ISO/TC207 委員会により方向性が定められた環境報告書ガイドラインがあり、ISO/TC207 ストックホルム総会(2000 年)では、環境パフォーマンス評価分科会の取り組みに、GRI が参加し、ISO と GRI の連携を期待させる動向が確認された。

環境会計は、環境対策のコストと効果を算出し、両者を比較することで環境対策の費用対効果を示すものと位置づけられ[159]、環境パフォーマンス指標と環境会計による評価を実務的に使用することで、事業体における環境対策の効果の程度を明確にすることが可能になると分析できる。

続いて、事業体における環境対策における根拠のある社会的効果として定量化するためにバックグラウンドデータを揃える必要性がでてくるが、現在そのようなデータとしては国全体の年間に製造したすべての生産物を金額に換算して表記する経済指標である国民総生産（GNP）や、国内の経済が新たに生み出した付加価値の総額を示す国内総生産(GDP)などが利用されている。しかしこれらの指標は、人間の健康の阻害要因、地球環境の汚染要因および、犯罪、事故、訴訟、破壊等というような負の要因もプラス要因として換算し、一方、人間の実生活と直接関係のある家事、育児、奉仕、教育、安全、美化、社会貢献等の定量化はされない本来プラス要因として換算可能な各種の効果を計算外とするような、根本的な欠陥を有していることが指摘されている[160]。循環型社会においては、環境保全活動が生み出すプラスの効果を経済性指標のプラスの要因として正確に評価することが重要となるため、経済活動や社会活動が生み出す、個人や社会に対する真の豊かさを包括的かつ現実的に忠実に計測することが必要になるといえる。なお現在、事業体が一般公表しているような環境会計は、結果的にその算出方法が、「GNP や GDP で示される根拠に基づく社会的効果」を抽出して定量化していると捉えられ、最も重要である「環境対策による社会貢献等の効果」を定量化して示されたものではないと考えられる。従って、そのような環境会計は、真の社会的効果を導出する手法とはならず、構造的欠陥を有したまま環境政策のひとつとして実施された活動として認識される可能性がある。

以上より改めて今後必要となることは、環境保全活動による社会的効果を根拠とした真の「環境の価値」の定量化が挙げられると分析できる。環境経済学の分野では、環境の価値を金銭単位で評価する手法がいくつか開発されており、それらは、大別すると顕示選好法(Revealed Preferences)、表明選好法(Stated Preferences)[162]の二種類がある。顕示選好法は、人々の経済活動から得られるデータをもとに環境の価値を評価する手法であり、消費者余剰法(HDM)、旅行費用法(TCM)、代替法などがあり、表明選好法は人々に環境価値を直接質問し、環境価値を評価するという手法[162]である。現在の環境会計における構造的な欠点を補正する手法としては、表明選好法に分類できる仮想評価法(Contingent Valuation Method：CVM)が有効[162]と考えられている。この手法は、質問形式により「環境保護を果たすために抛出可能な自己負担額」を具体的に提示してもらい、その回答をもとに統計処理を行い、環境対策の効果を金額で評価するというものである。これにより、現在の環境庁ガイドラインの限界性や、現在の環境会計におけるステークホルダーへの費用・効果の公表に終始した仕組みを大きく変えられる可能性がある[163]としている。ちなみに、国内の CVM 評価により社会的効果を金額で評価した事例として、屋久島の生態系破壊（支払い意志額 287 億円）、釧路湿原の生態系破壊（支払い意志額 361 億円）[162]などが具体化されている。

表 2.3.13 循環型社会に適した経済性指標とその概要[161 参照]

GPI：Genuine Progress Indicator 米国非営利団体の Redefining Progress が 1994 年以来提唱している経済指標であり、日本語では「真の進歩指標」となる。日本では、世界に先駆けて GDP と併用する形で導入することが提案されている。GPI は大気・土壌・森林・海洋・水などの汚染費用や、犯罪・事故・訴訟・破壊などの負要因の改善に要する費用を計算外とする一方、家事・育児・奉仕活動・教育・保全・安全・美化・社会貢献などを計算に入れた指標であり、持続的発展に不可欠な人生的価値を考慮している。
ISEW：Index of Sustainable Economic Welfare 経済学者であるハーマン・デイリーが提唱している経済指標であり、日本語では「持続可能経済福祉指数」となる。所得格差や、家庭内労働の経済価値、環境破壊のコスト、自然資本の喪失、将来のダメージなどの要因を取り入れた指標となっており、米国では GNP より ISEW 指数の方が経済福祉の動向を現実的に反映するという見解も示されている。

2.4 リサイクラブルコンクリートの資源循環手法

2.4.1 概念形成モデル

地球全体の産業体系に占める建設業の就労、資源投入量割合は甚大であり、地球温暖化問題さらには地球環境問題を解決するためには、最終的には建設業における資源循環・環境負荷低減への取り組みが重要な意味を持つ。そして、現在の地球規模的な人口増加の問題を前提として、安定した地球の環境を維持するためには、国際的な取り組みによる維持・管理が不可欠であると思われる。

地球温暖化防止に向けた国際的な取り組みは、1985年の地球温暖化問題に関する世界初の国際会議であるフィラハ会議が国連環境計画(UNEP)主催により開催されたことに端を置き、その後、1988年の気候変動に関する国際会議であるトロント会議および UNEP と世界気象機関(WMO)による気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の設置、1992年のリオデジャネイロにおける国連環境開発会議(地球サミット)が開催され、続いて1995年のベルリンにおける気候変動枠組条約第1回締約国会議(COP1)、1997年の地球温暖化京都会議(COP3)、以後1998年のブエノスアイレス会議(COP4)、1999年のボン会議(COP5)、2000年のハーグ会議(COP6)、2001年のマラケシュ会議(COP7)および2002年のニューデリー会議(COP8)が開催され、問題解決のために精力的な取り組みが実行されているといえよう。なお、地球環境問題は、国際的な安全保障問題や政治経済問題において国家間の協力を形成・維持していく難しさがあるのと同様の解決が容易では社会問題[164]として位置づける見解も示されている。

多次元社会シナリオ
世界各地域が固有の文化を重んじ、多様な社会構造や政治構造を構築するため、世界の経済や政治はブロック化する。環境への関心は相対的に低くなり、地域的な環境問題の深刻化のみが環境対策の動機づけとなる。
地域共存型社会シナリオ
環境への関心は高いが、地球規模の問題への発展や国際的な問題解決という方向に向かわない。地域ごとの公平性が重視され、ボトムアップ的な発展を展開が図られる。結果、ローカルな政府の発展が牽引される。
高成長社会シナリオ
マーケットの利点が活用され、世界中がさらなる経済成長を遂げる。教育、技術、そして社会制度に大きな革新が生じる。環境問題はマーケットの動向に影響を受け、環境保全というより能動的な管理や想像の観点から解決が図られる。
持続発展型社会シナリオ
環境への高い関心に基づいて、地球公財としての環境保全と経済発展を地球規模で両立させ、バランスのとれた経済発展が図られる。資源利用の効率化(脱物質化)や、社会制度および環境保護対策に対し集中的に投資が発生するようになる。

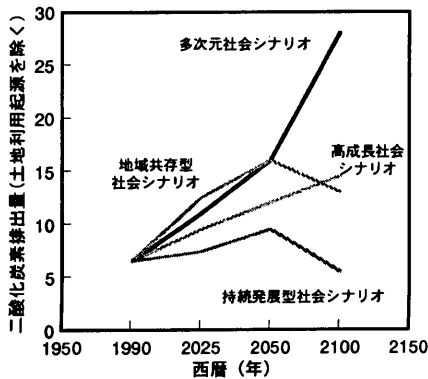


図 2.4.1 IPCC 報告書における社会発展シナリオと二酸化炭素の排出シミュレーション[165 参照]

表 2.4.1 地球温暖化防止に向けた IPCC の活動概要[165-168 参照]

気候変動に関する政府間パネル (IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change) は、気候変動に関する最新の科学的知見を評価する政府間機構である。設立経緯は、1979年に世界気象機構 (WMO : World Meteorological Organization) と国連環境計画 (UNEP : United Nations Environment Program) が気候変動に係わる研究を開始し、気候変動に関する科学的情報を包括的に提供する必要性が高まった結果、1988年に WMO と UNEP により設立された。これまで、1990年 1995年に気候変動に関する科学的知見をまとめた第一次および第二次報告書が公表されており、気候変動枠組条約の採択(1992年)、京都議定書の採択(1997年)など温室効果ガスの削減を世界各国で取り組むための契機・基礎的知見を提供し、2001年には、第三次評価報告書(TAR)が審議・採択された。第二次報告書までの公表により、地球温暖化問題に対し懐疑的であった各国政府に対して、気候変動枠組条約の必要性を認識させることが可能になり、第三次報告書ではこの現象の確定性の説明に加え、温暖化の原因が主に先進国にあるために、先進国と途上国の責任の差異を認めた上での「共通であるが、差異のある責任」原則を示した。また、気候変動枠組条約の究極的目的として、「大気中の温室効果ガスの濃度を安定させること」が打ち出されていることも踏まえると、将来における産業界の具体的な行動計画として温室効果ガスの排出量を抑制または削減することはその中心的目標となるとしている。

そのような状況下で、近い将来、化石エネルギーの過剰消費から脱却する脱炭素時代とするために、産業構造の変革なども見通しながら、着手可能な対策から先取りして実行することが必要になると考えられる。そして建設業のみならず、全産業系において地球温暖化対策を具体的に進めるためには、長期的視野による予測を正確に打ち出すことが重要であり、地球規模での社会全体の成長シナリオがどのように変化するかにより、二酸化炭素排出量や、増減の変化に大きな差が発生する可能性がある[165]としている。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)では、IPCC 第三次報告書(TAR)において、図 2.4.1 に示す社会発展の4つのシナリオに従い、二酸化炭素排出量の変化をシミュレーションし、その結果を明解に示している[165]。しかし、現状では結果に対して、どのような対策を取れば目標とするシナリオに移行できるかという点に関して、世界的に議論が不足しているという指摘[166]がなされており、更なる検討が必要になると思われる。表 2.4.1 に気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の活動概要を示す。

IPCC の第三次報告書では、温室効果ガスの排出量を、抑制または削減するための技術およびシステム構築のための目標を具体化するために、1997 年に京都議定書に採択された森林吸収源問題に関連する、森林、バイオマスの定義および森林シンクを取り巻く科学的問題および地球炭素収支について言及している。図 2.4.2 に地球の炭素収支推定値を示す。ここでは、主要な排出源として化石燃料の燃焼とセメント製造による二酸化炭素排出要因が大部分を占めていることが明確に示されており、建設業とくにセメント産業における取り組みが問題解決の鍵になることを明示している。ちなみに、ポルトランドセメントは 1825 年にイギリスにおいて本格的な製造が開始され、フランスでは 1848 年、ドイツでは 1875 年、アメリカでは 1871 年、そして日本では 1875 年というように 19 世紀後半にかけて世界的に製造されるようになってきた。

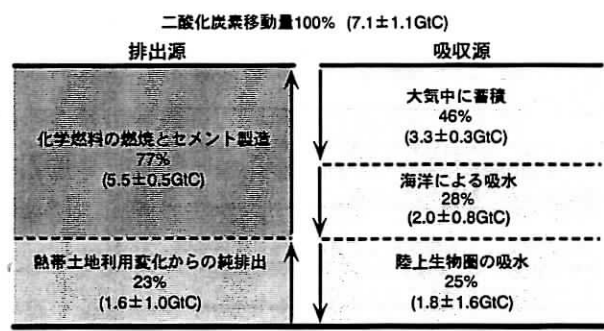


図 2.4.2 地球炭素収支の推定値[165 参照]

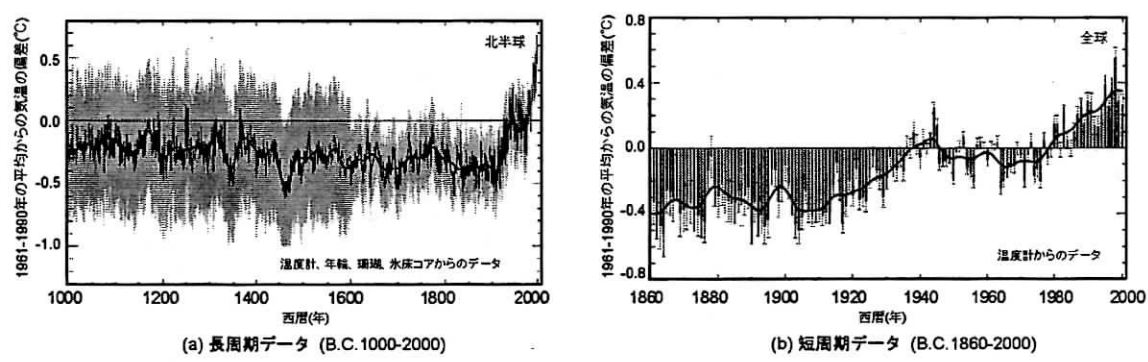


図 2.4.3 地球気温の変動[165 参照]

上記の内容を受けて、図 2.4.3 に過去 140 年と過去 1000 年における地球の地上気温の変動履歴の解析結果[165 参照]を示す。二酸化炭素排出量は世界でセメント製造が可能になった 1900 年初頭から漸進的に増加したことが確認できるが、この時期より地球全体における産業活動が大きく発展したために、二酸化炭素排出量も大きく増加したとする結論が示されている。なお、1990 年代は、過去 1000 年間で最も暖かい 10 年間であり、1998 年は過去 1000 年間で最も暖かい年であった可能性が高い[165]とされており、現在の地球温暖化問題の緊急性が再認識できよう。

以上の内容より、建設業の活動を通じて、地球環境のために具体的に講ずるべき対策は、二酸化炭素の発生抑制を可能にする技術の開発であり、とくにセメントを大量に使用する鉄筋コンクリート造建築物において二酸化炭素発生抑制を可能にする方法論の具現化に集約されると分析できる。

日本における、年間あたりの総資源投入量に占める建設業分の割合は、全体の 48%にも及び、その大部分は骨材とセメントにより占められる。コンクリートの結合材として大量使用されるセメントは、セメント生産量 1 トンあたり、750kg 程度の大量の二酸化炭素を排出し[170]、主にそれは、石灰石の脱炭酸化現象が主要因となっている。この問題は、セメント原料に常にバージンの天然石灰石を大量に使用する仕組みに依存するものと考えられる。解決の糸口として、解体コンクリートを再度粉砕し、その全量をセメント原料とする可能性が考えられるが、製造過程でコンクリートの体積の大部分を占める骨材成分の混入が不可避であるため、結果的に、セメント原料として不適切な成分となり、セメント原料として使用することは困難になる[169]としている。従って、骨材自身にセメント原料となる石灰石を予め使用する提案[171]がなされている。この場合、解体コンクリートを粉砕して得られる微粒分はセメント原料と同様になるため、一度使用したセメントの全量を再生セメントとして繰り返し使用することが可能になり、その投入量の割合に応じて石灰石の使用量を減じることができると分析できる。

一方、骨材資源に関しても、セメント原料と同様に、解体コンクリート塊から原骨材の回収が困難であるため、結果として、一度コンクリートに使用した骨材は、再び構造用コンクリートの材料としては、使用が困難であり、天然骨材を採取し続ける構図が定着している。この問題を解消するために、再生骨材製造装置の高度化が実施されてきたが、破碎技術のみに着目すると高度処理によるエネルギー増大化問題のするため、処理再生の観点から、総合的に環境負荷が低減可能な手法として定着させる必要性が指摘[8]されている。そして、この骨材問題の解決の糸口となるものとして、製造段階で予め骨材表面に力学的性質に大きく影響しない程度に界面処理を施し、解体・再生処理段階で容易に原骨材が回収でき、再びその再生骨材が構造用コンクリートに使用するという方法[8]が提案することができると考えられる。

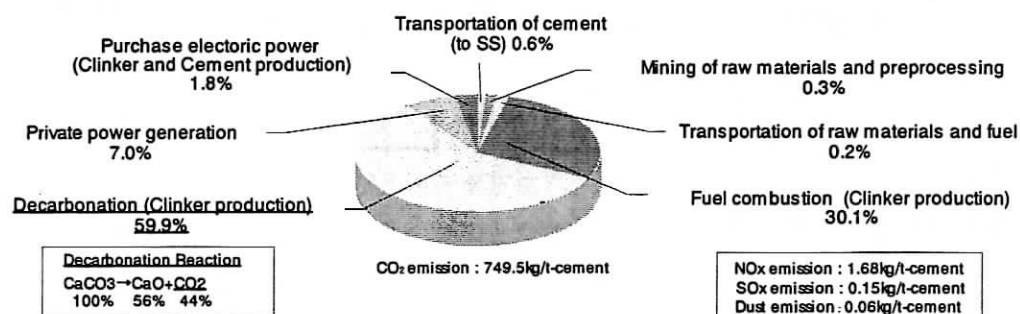


図 2.4.4 セメント製造における二酸化炭素排出割合[170 参照]

2.4.2 結合材回収型モデル

鉄筋コンクリート造構造物に使用されたセメントを再び結合材として使用することで、天然の石灰石使用量を低減し、結果的に二酸化炭素排出量の抑制が期待できる方法について、その概要を示す。

コンクリートの構成材料をセメントおよびセメント原料となる物質から製造し、使用後に再び全ての材料がセメント原料および再生骨材として利用可能となるとを要求するような基準・指針類は現在のところ存在しない。技術面に関しては、実証化されているが、一般的にはしていないというのが現状である。その理由は、過去において「環境の価値」がほとんど認識されず、構造用コンクリートに対しては構造安全性の確保が要求性能として集約されてきたためである。しかしながら近年は、地球環境に影響を与える環境インパクトが、長期的に見れば、人的災害をもたらす可能性が多分にあることが認識され始めたため、構造物とする時点で、環境負荷を低減可能な仕組みを有していることが重要な性質として認識され始めたといえる。従って、コンクリート塊が廃棄物とならずに、セメント原料として再利用が可能になる技術に価値を見出すことも十分に可能になってきたと分析できる。

コンクリートから結合材が回収できるコンクリートとして、完全リサイクルコンクリートプロトタイプ[171]が提案されている。図 2.4.5 に基本コンセプトを示す。完全リサイクルコンクリートは、「セメントおよびセメント原料となる物質のみがコンクリートの結合材、混合材および骨材として用いられ、硬化後、再度全ての材料がセメント原料および再生骨材として利用可能であるコンクリート」と定義されるコンクリートであり、表 2.4.2 に示すように石灰石骨材を中心にセメントに必要な成分を有する各種材料により構成される点が特徴である。これらの材料を適宜組み合わせることで、表 2.4.3 に示すような完全リサイクルコンクリートの製造が可能になる。

表 2.4.2 に、完全リサイクルコンクリートプロトタイプのリサイクル結果を表 2.4.4 に示す。再生セメントは、コンクリート粉砕物の全量に対し、成分調整、電気炉焼成、石膏添加および再粉砕などの工程を経て製造されており、一般的な普通ポルトランドセメントを同等の品質を保持することが実証されている。再生セメントを用いて製造したコンクリートも、一般的な普通強度および高強度のコンクリートとすることが可能であり、結合材回収型のコンクリートとして、循環使用することが技術的に可能となることを示している。

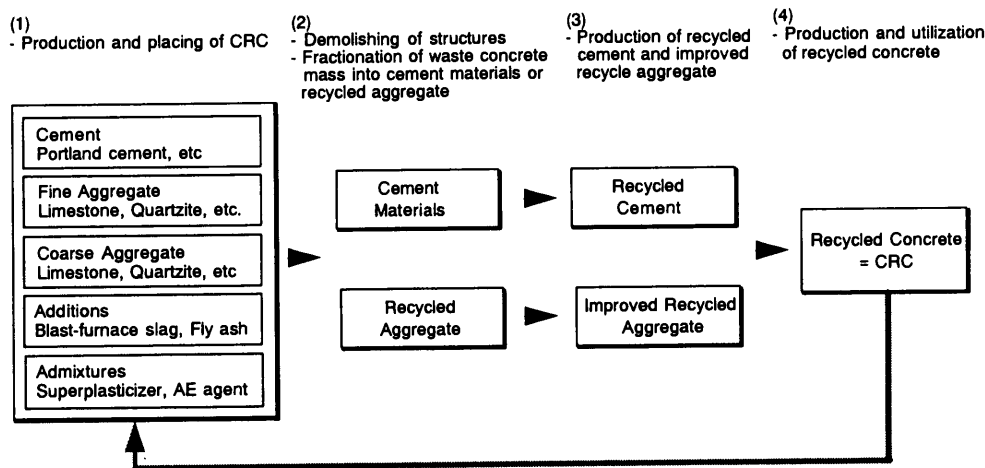


図2.4.5 完全リサイクルコンクリートの基本コンセプト[172]

表 2.4.2 完全リサイクルコンクリートに使用できる材料[173]

分類	材料
粉体	セメント、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカ質微粉末、シリカフェーム、石灰石微粉末
細骨材	石灰石砕砂、珪酸質岩石砕砂、珪砂、高炉スラグ細骨材、膨張頁岩系人工軽量骨材、フライアッシュ焼成細骨材、銅スラグ砕砂、フェロニッケルスラグ細骨材
粗骨材	石灰石砕石、珪酸質岩石の砕石または砂利、粘板岩の砕石または砂利、高炉スラグ粗骨材、膨張頁岩系人工軽量骨材、フライアッシュ焼成粗骨材

表 2.4.3 完全リサイクルコンクリートの調合例[173]

(単位: kg/m³)

種類	水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材
普通コンクリートa	180	320	0	石灰石砕砂 785	石灰石砕石 1050
普通コンクリートb	180	190	高炉スラグ 130	珪酸質岩石砕砂 755	石灰石砕石 1050
高流動コンクリート	180	305	フライアッシュ244	石灰石砕砂 770	石灰石砕石 770
軽量コンクリート	180	360	---	石灰石砕砂 880	膨張頁岩系人工軽量骨材 443

表 2.4.4 セメント回収型－完全リサイクル性の実証結果[173]

種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結		フロー値 (mm)	圧縮強度(N/mm ²)		
			始発	終結		3 日	7 日	28 日
再生セメント	3.13	3340	2h-00m	2h-50m	233	15.0	25.0	43.0
種類	W/C	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	種類	W/C	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	
通常強度 コンクリート	原	0.58	31.6	高強度 コンクリート	原	0.30	67.6	48.0
	再生	0.58	35.2		再生	0.30	66.8	46.5

完全リサイクルコンクリートの主構成材料である石灰石に関する概要を示す。コンクリート用骨材の品質にも地域差が存在するように、世界的に分布する石灰岩に関しても、採取地による品質に大きな差が存在する。日本は環太平洋造山帯上にあり、長期に渡り活発な造陸・造山運動が展開され、地中の岩石層は変成作用を受け続けたため、一般的に弱点部が少ない強固な岩石となっている。全国的に分布する石灰石岩層から採取される石灰石骨材に関しても、全体的には緻密で物理化学的に安定な組織が形成されたものであり[174]、コンクリート用骨材としても十分に使用が可能であることが確かめられている[175]。また石灰岩の現在の採鉱量は、岩石鉱石量の 64%程度にも及び、他産業のみならず建設業においても一般的に使用される材料となっている。国内で採取される石灰石骨材は、アルカリ炭酸塩反応を起こしやすいマグネシウムを含有したドロマイト系石灰石は少ない様子であり[175]、大部分が純粋な炭酸カルシウムからなるカルサイト系石灰石であり、灰白色、細粒均質の岩石となることが特徴である。カルサイト系石灰石骨材の物理的な特徴として、組織が均質で緻密であるため圧縮力が作用した際の力学的抵抗性は大きい、すりへり抵抗性が若干小さくなる傾向を示している[175]。そのため、石灰石細骨材は通常の砕砂よりも微粉が多く発生し、粒度分布は若干の偏りを示す傾向があり、コンクリートのコンシステンシーに何らかの影響を与える可能性が指摘されている[175]。従って、石灰石砕砂がコンクリートの物理的性質に及ぼす影響に関する調査[176]が行われたが、その結果、多くの骨材において微粉量が 10%前後発生しているが、中には微粉量の発生が少なく、粒度分布も JIS A 5004 の基準を充足する骨材もいくつか存在することが確かめられている。この場合、コンクリートの状態も一般的なコンクリートと同等となる[176]ことが示されている。

その他、石灰石骨材に関する特徴としては、その成分にマグネシウムを含有する場合、脱ドロマイト反応により、セメント中の C-S-H ゲルと化学反応し、シリカゲルを生成して硬化したセメントペースト部分に膨張圧を与え、ひび割れ発生の原因となる可能性がある。また、不溶残分、シリカ質、アルミ分が一定量含まれる場合も、アルカリ炭酸塩反応を起こし、同様の現象を引き起こす場合があるようである。ちなみに、国内では、アルカリ炭酸塩岩反応については、JIS A 5308 により反応性の有

無を確認する仕組みが確立しており、コンクリート用骨材として使用を認められた骨材は、コンクリートの物性に影響を及ぼすアルカリ炭酸塩岩反応性は示さないこととなっている。また、石灰石に代表される炭酸塩岩は、本来は化学的反応性を有していることから、セメントペーストに接触し、アルカリと特有の反応性を示すものであるという捉え方は適当ではないと考えられる。つまり、カルサイト含有率が高く、一般的に品質が優れると認められる骨材の場合でも、化学反応性は有しており、その結果として、アルカリと接触することで骨材表面に、カルシウムシリケート水和物、モノカーボアルミネート、カルシウムカーボアルミネート等の水和物が生成することが確かめられている。しかしこれらは、内部組織の硬化体に対し膨張圧を与えることはなく、一般的に遷移帯に水和物が生成することで、骨材－ペースト界面の付着力を増進する作用[177]を発現する。

以上より、国内において完全リサイクルコンクリートプロトタイプや石灰石骨材コンクリートを使用して結合材循環のモデルを構築することは可能であると分析される。但し、その場合においても適用条件を明確にする必要があると考えられ、それは完全リサイクルコンクリートプロトタイプの場合にも該当する。その内容としては、完全リサイクルコンクリートプロトタイプの場合、製造システムと適用地域に関するバウンダリーがあると考えられ、前者に関しては、製造の初期段階で一定量の石灰石骨材を必要とすること、セメント資源となる構造物ストックが一定量形成された後は製造の必要性がなくなることである。後者についてはセメント製造起源の二酸化炭素排出量の削減効果を期待するには一定量のプロトタイプコンクリートを再資源化する必要があることであり、コンクリート構造物の生産量が多く最終処分に制約がありコンクリート塊の集約的な発生が見込まれる地域であることが条件となり、それに該当しない地域は環境負荷低減効果は得難くなると分析できる。

2.4.3 製品－骨材回収型モデル

鉄筋コンクリート造構造物に使用された骨材を再び骨材原料として使用することで、天然骨材使用量を低減し、最終的に、二酸化炭素排出量の抑制が期待できる、骨材回収モデルとなるコンクリートについて概要を示す。

現在、コンクリートの力学的特性の過度の低下が生じない程度に骨材表面に改質処理を施して、骨材マトリックス間の付着力を低減し、原骨材を容易に回収し、資源循環性能を高めることを目的とした研究はほとんど実施されていないといえる。それは、結合材回収モデルで示された内容と同様に、過去における構造用コンクリートへの主要な要求性能が構造安全性を確保することに集約されてきたためである。しかし現在は、コンクリートから原骨材を容易に回収する技術により得られる資源循環性能の価値を構造安全性と同程度のレベルで位置づけ評価することが十分に可能な状況にあると考えられる。コンクリートから原骨材を簡便に回収する手法を検討するにおいて、骨材とペーストとの付着を低減することの逆の作用にあたるコンクリートを高強度化するために付着力を強固にすることを目的とした研究が有効な知見を示すものと捉え、その概要を把握することは重要であると考えられる。関連する研究は数多くあり[178]、その中で具体的に界面付着力が低下する条件を明確にしている事例もある。その内容は、骨材とペーストとの間に介在する微細界面における化学的および物理的な性質に起因する界面付着力低下現象のメカニズムを説明したものであり、その観点から検討することで、骨材回収型モデルにおいて必要となる各種性質を見いだすことが可能になると考えられる。

コンクリートにおける骨材とペーストとの付着特性について概要を示す。コンクリートは、組織内部に欠陥がなく、原子間結合のみで破壊すると仮定した場合、その理想強度は材料におけるヤング率の10%程度となるため、コンクリートの材料強度は、現在一般的に認識されている強度の100から1000倍程度となるとされるが、実際には内部欠陥に起因する強度低下が必ず発生するため、現状の製造法により作られるコンクリートの大部分には、強度発現の限界性が存在するという考え[179]が示されている。その内部欠陥に起因する強度低下現象[180]はGriffithにより既に理論づけられている。

コンクリートの応力ひずみ関係に現れる内部欠陥を原因とした様々な特徴的な力学特性は、荷重の増加に伴って破壊進展領域に発生する微少クラックの累積により起こりうる現象として捉えられ、その仕組みの解明に向けての数多くの研究[181]がなされてきたといえる。そして、ひび割れ初期の破壊は、混入した骨材種、更には量・径の増大に比例して顕著になる[182-183]との報告もあるため、コンクリート中での占有容積が大きい粗骨材に着目して、コンクリートの力学特性と荷重を受けた際の内部構造の変化の仕組みに着目した研究[184-185]が国内外を問わず展開されるようになった。

コンクリートの内部組織とひび割れ発生の関係を整理する。まずコンクリートの力学特性を評価するために、コンクリートの内部組織を骨材とセメントにより構成される二相の複合状態として捉えて、分散層である骨材と連続相であるマトリックス間のひび割れ発生進展の仕組みとして分析する方法が有効となることは多くの理解が得られるところである。そして、分析の基本方針は、コンクリート内部に発生するひび割れを確認する手法を確立することであり、具体的な方法として、コンクリート内部のひび割れの直接観察法、理想骨材を用いたモデルコンクリートにより、そこに発生する現象を単純化して因子別に破壊挙動を捉える方法、AE法のようにコンクリート内部のひび割れ発生・進展状況をクラックの発生音等により探知し、間接的に破壊挙動を捉える方法などが挙げられ、分析方法に関する明確な分類[186]も示されている。

コンクリート内部のひび割れ発生・進展状況は、普通コンクリートの場合、ブリージングなどによりコンクリート内部の骨材下面に発生する脆弱部の破壊に起因する潜在クラックが、荷重により骨材とセメントペーストとの界面に発生するボンドクラックに変化し、やがてはクラックが骨材周囲に発生するようになる。またボンドクラックが成長すると、セメントペースト部分にも進展してモルタルクラックを形成し、更には使用する骨材が脆弱である場合は、骨材クラックとなり、最終的にそれらのクラックが連結することで、拡大した連続クラックとなり、荷重方向に対して大きなひび割れ面を形成するひび割れメカニズムとして、具体的に明らかにされている[186]。

以上より、潜在クラックやボンドクラックに起因して、最終的にコンクリートにひび割れ面が形成されるまでの過程において、骨材とペースト界面の付着強度に影響を与える骨材側の要因として、鉱物的特性、界面粗さ、含水量および寸法などが、ペースト側の要因として、セメント種類、水セメント比などが具体的に挙げられ、結果的にこれらの要素が複雑に影響しあうことで、ひび割れの発端となる骨材界面近傍の微細なクラックの発生現象を引き起こしている[187-188]と捉えられるのである。

骨材表面とセメントマトリックスと付着力は、機械的かみ合い、剪断すれが生じた際に発生する表面摩擦力、化学的結合力、van del Waals 力などの付着の支配因子が複雑に作用して抵抗力になるもの[195]とされている。そして、骨材界面とペーストの付着に関係する諸特性は、大別すると物理的特性および化学的特性という区別が可能と考えられる。物理的特性としては、ブリーディングの影響により、コンクリート中の粗骨材下面部分が多孔質となり、破壊に対するマクロな弱点部となる点[189]、骨材表面の微細界面の粗さが、硬化ペーストとの機械的かみあわせ力となり、ミクロな影響因子となる点[190]などが挙げられる。化学的特性としては、骨材界面の遷移帯は水酸化カルシウムを主成分とするセメント水和物付着膜と被着物の結合力が発生し、その引張付着強度が物質同士の化学的結合力として影響を受ける点[191-192]などが挙げられる。そして、これらの特性を基に、コンクリートの圧縮強度と関係として捉えると、付着力は圧縮ひび割れを生じさせる応力には敏感に影響するが、圧縮強度自身には著しい影響は及ぼさないという説[193]が示されている。これらの現象は、球形のガラス骨材や表面をパラフィン処理を施した処理骨材によりペーストとの付着をできるだけ低減したコンクリートにおける検討[194-195]においても検証されており、界面付着力を極力低減した場合においても、一定の圧縮強度は保持され、構造用コンクリートとして全く使用できなくなるような現象は発生しにくいとしている。つまり、界面付着力が圧縮強度の支配要因となるものではないことを示している。

続いて、骨材の形状に起因する物理的特性が付着に及ぼす影響について更に具体的に整理する。一般に骨材の石質、粒形、表面性状はコンクリートの強度に影響するが、粗骨材種類およびコンクリート構成材料の配合などによりその影響の度合いは更に複雑に影響する[196]とされている。骨材の粒形は、外径寸法を利用した容積係数・細長率・方形率・偏平率・球形率などの形状係数として定量化することが可能であり、また骨材粒形を判定するための一般化した指標として粒形判定実積率があり、粗骨材に関しては、川砂利および人工軽量骨材は 61～63%程度、玉石碎石は 59.4%、山碎石・石灰石碎石は 57～58%程度というように形状の特性を表現することが可能である。なお、高強度コンクリートに関する検討では、骨材形状が力学特性に及ぼす影響について詳細な研究[197]が行われている。ここで、形状係数の差が一般的に砂利と比較して大きくなる碎石は、一般に粒形判定実積率により示されるようなマクロ的に鋭角とされる形状特性に加え、100 μ m 程度の表面凹凸が骨材表面に数多く存在するため、この微細な表面粗さがセメントマトリックスとの摩擦力の増加を引き起こし、コンクリートの流動性が低下したり[198]、硬化後のコンクリート強度が増大したりする傾向がある[199]。一方、

堆積岩系の砂利に代表される平滑面が形成される粗骨材の場合、ペーストとの接触距離が短い平滑面における局所的破壊により、低圧縮応力でクラックが骨材界面に発生し、圧縮強度は碎石を使用した場合より小さくなる場合がある[199]といえる。なお、終局圧縮強度はクラックが発生した後の、骨材とマトリックスによる機械的な噛み合わせ力が大きく影響することからも、火成岩および堆積岩系の硬質碎石、石灰石碎石などによるコンクリートの曲げ強度および圧縮強度は、砂利骨材に対して、同一水セメント比で10～30%程度増大すると考えられており、骨材界面の機械的噛み合わせ力の影響は大きいものと認められる[199-200]。図 2.4.6 に粗骨材種類と付着強度の関係を示す。各種骨材に対し、1 μ m 程度の凹凸のある平滑面のシリーズおよび割面のシリーズを設定し、付着強度を測定したところ、割面シリーズは均等に付着強度が増大しており、機械的噛み合わせ力が作用していることが実証されている。また微細界面の表面粗さが大きい場合の方が、ペーストと骨材の付着強度を増加させるという点に関しては、セメントペーストに接触する骨材表面積が増大することで、結果的に噛み合わせ部分の接触長さが増加し、付着強度が大きくなるものと捉えられている[200]。

その他、粒形に関連する別の特徴として、石灰石骨材は他の碎石に比べて、すりへり減量が大であるにも関わらずコンクリートとしての強度は大きくなる場合があるが、これはすりへり減量が大である場合、界面の平滑度は小さく、表面粗さが大きくなると想定されるため、ペーストとの付着が良好になり、比較的安定して高い圧縮強度を示すことが可能になるというものである[202]。一方、骨材表面が粗面で、セメントマトリックスとの接触面積が増加する場合は、アルカリ反応性を有する骨材である場合、反応性が促進され、ひび割れが発生しやすくなる[203]という逆の効果を導く可能性もある。

以上より、骨材表面が平滑である場合の方が、骨材とペーストとの剥離性は向上し、結果的に骨材回収性が大きくなることが期待されるが、骨材種類、化学反応性、粒形および表面粗さ等の性質が複雑に関係することが明らかであるため、そのような性質を付着に影響を及ぼす骨材の物理的特性として捉える必要があるといえる。

物理的特性に引き続き、水和に伴う化学的性質が付着に及ぼす影響について具体的に整理する。セメントの水和が進行した骨材界面にはポーラスで結合力の弱い遷移帯が形成されるため、水セメント比が大きく、コンクリート内部の弱点部が遷移帯近傍に限られる場合、コンクリートの力学特性は、遷移帯組織を含む空隙構造の影響を大きく受けると考えられている[204]。また、コンクリート中に、水和に必要な有効水量に対する余剰水が存在する場合、一般的には水セメント比の増加に比例して、セメントマトリックス自身に加え、界面組織もポーラスになり、圧縮強度が低下する傾向があるため、骨材界面の付着に影響する化学的特性は、セメントの水和反応程度に深く関与するものと考えられる。

骨材種による化学反応性に着目する。骨材の化学組成にシリカ含有量が多く、組織が均質である岩石（石英質で均質なチャートなど）の場合、付着強度は大きくなる傾向があり、逆に、シリカ含有量が少なく組織も不均質な岩石（安山岩など）は付着強度は小さくなる傾向がある。また、石灰石碎石は、堆積岩系で化学反応性に乏しい砂岩系碎石などの骨材などに比べて、コンクリートの圧縮強度と同様に付着強度に関しても、大きい値を示す傾向があるが、砂岩系碎石の場合、骨材表面に直接カルシウムシリケート水和物が主に生成するのに対し、石灰石碎石の場合は界面に水酸化カルシウムの薄膜を通して、組織が密で、結晶性が良好である分厚い水酸化カルシウムあるいはカルシウムシリケート水和物が生成することが確認されており[177]、それが原因で骨材界面の付着強度が増加する場合がある[205]とされている。石灰石骨材は300℃で加熱処理を施し、表面活性度を高めた場合についても、セメントペーストとの付着強度が増加する場合があることが確認されている[207]。その他、骨材の乾

燥状態と湿潤状態の差によるコンクリート強度を比較した場合、乾燥状態条件の方が、強度発現が優れる傾向があり、それは水分の離脱による表面エネルギーの向上が主要因であるとされているが、逆に骨材近傍における化学反応性は低下すると考えられている。逆に湿潤条件である場合、骨材に圧力が加わると、結晶粒子間に滑り現象が生じてひずみが卓越するようになり、骨材界面物質の強度低下に伴い、破壊が進行する要因、吸水により骨材粒子間の van der Waals 力が低下する要因[207]などの影響も考えられるため、界面における水分の遮断、つまり骨材の乾湿状態は付着強度に大きく影響するものと捉えられる。以上、化学的結合力に関しては、骨材種類とその乾湿状態が顕著に影響することが想定される。しかしながら、実際にはコンクリート用骨材の大半は化学的に不活性であり、微細構造的なセメントペーストとの接着はほとんどは van der Waals 力に起因するものとされているため、化学的結合力が付着強度へ及ぼす影響はそれほど大きくはないと考えられている[207]。また、骨材とマトリックスとの付着強度は圧縮ひび割れを発生させる応力には敏感に反応するが、コンクリート強度には直接影響を及ぼさないという説[193]もあることから、化学反応性に起因する付着力の低減はコンクリートの圧縮強度には大きく影響しないものと分析できる。従って、界面における水分移動を遮断し、付着強度の増進に寄与する骨材界面の水和物の生成を抑制し、更には van der Waals 力を低下させられるような表面エネルギーの相違する被膜による膜層を確保することができれば、力学的特性に過度に影響しない付着強度の低減を図ることが可能になり、骨材回収が容易にすることが期待できるのである。

以上より、次のことが想定できる。近年および将来は、コンクリートは更に高強度化されて構造物に使用される。コンクリートが高強度である場合、骨材とマトリックスに対する界面部分の相対強度は低下し、コンクリート強度に及ぼす界面処理状態の影響は増大する[208]。これは、一般的に骨材の品質が悪い場合、水セメント比の低下に伴うコンクリートの圧縮強度の増加は頭打ちとなる傾向と同様の現象である。従って、高強度コンクリートの場合、骨材界面を改質処理し、骨材界面剥離硬化を発現させることで、骨材回収を容易にする条件は具体化しやすくなる。

続いて、骨材界面の付着力を低減した場合におけるひび割れ発生メカニズムへの影響について破壊力学的な観点から整理を行う。コンクリートのひび割れを引き起こす本質的な破壊現象は、引張応力下でのひび割れメカニズムが関与しているといえるが、コンクリートは安定した引張荷重を受けた場合、引張強度到達後もひび割れ面の形成に従って、ある程度の抵抗性を示しながら破壊に至るという特徴がある。それは、コンクリート自身がセラミックスなどの脆性材料と比較すると、ダクタイルな性質を示し、コンクリートの破壊形態が非線形性を有することに起因する現象であるといえる。そしてこれらの現象が発生する原因は骨材にあると考えられており、具体的には、クラック進展方向にある

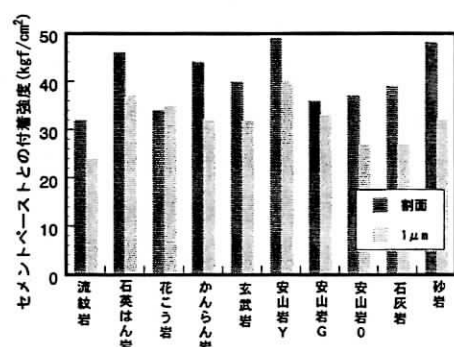


図 2.4.6 岩種とセメントペースト付着強度 [201]

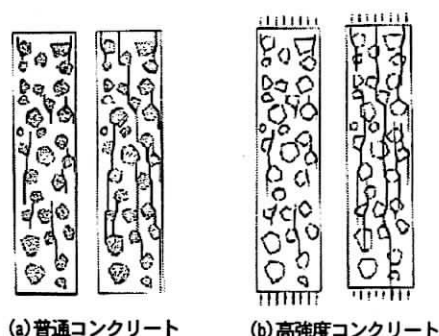


図 2.4.7 ひび割れ進展シミュレーション[211]

骨材の存在により、ひび割れのアレスター効果、偏向効果、分散効果などが複合的に作用しながらフラクチャープロセスゾーンが形成される[209]。このような条件下での破壊形態は、クラック進展の駆動力を減少させる場合もあり、破壊時のエネルギー吸収の観点からは有利に作用し、靱性能向上に寄与するとも考えられるが、それは、一般的には粗骨材強度がモルタル強度よりも十分に大きな場合に起こりうる現象と考えられている。従って、超高強度コンクリートのように、モルタルが骨材強度を上回るような場合には、ひび割れは骨材貫通モードに移行し、先に述べた骨材の存在によるひび割れ進展を抑制する効果は低下する傾向がある[210]としている。図 2.4.7 における空隙界面ひび割れ、骨材ブロックによるマトリックス割裂ひび割れ、骨材おしつけによるマトリックス割裂ひび割れのひび割れパターンを考慮したひび割れ進展シュミレーションからも示される傾向である。

続いて、骨材種を区別した場合における高強度コンクリートの破壊エネルギー G_f を検討した結果[212-213]によると、粗骨材強度が影響しながら、水セメント比の低下に比例して、 G_f は増加するが、高強度域では G_f の増加が頭打ちになる様子である。これは、コンクリートのエネルギー吸収能に限界があることを示しており、骨材の性質が影響する現象であると分析できる。またこの現象は、骨材とマトリックスの強度条件により、ひび割れの進展が一時的に停止するトラッピング効果[214]、骨材が相対的にモルタルよりも強度が大きい場合、ひび割れは粒子界面で折れ曲がりながら進展するクラックディフレクション効果[215]、その結果、ひび割れ進展の駆動力が減少し、破壊靱性は高まる効果[216-217]などの仕組みが影響するものといえる。なお、トラッピング効果に伴い、ひび割れが湾曲し、吸収エネルギーが増大する仕組みに関しては、ひび割れが進展する直前のマトリックス強度と骨材までの距離で説明する事例[218]も存在する。このような破壊力学的な視点から、骨材界面の付着力を低減した場合におけるひび割れ発生メカニズムの仕組みを明らかにすることは有効であると思われる。

以上の内容により、資源循環化を可能とする骨材回収型モデルとなるコンクリートに関して、次のことが想定できる。骨材回収を目的に、骨材に改質処理を施した場合、骨材種、水セメント比等の条件によって、ひび割れが骨材界面に優先的に回り込み、コンクリートの破壊が延性的になる可能性がある。またこの際、骨材界面剥離が増大し、骨材の分離採取に寄与する効果の発現が期待できる。そのようなコンクリートは、最終的に、簡便な破碎技術で付着ペーストの少ない高品質の再生骨材を回収可能になることが期待できる。

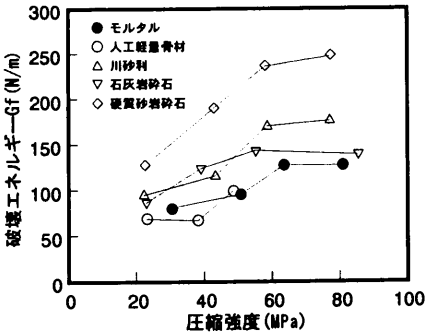


図 2.4.8 粗骨材種類と破壊エネルギー[212]

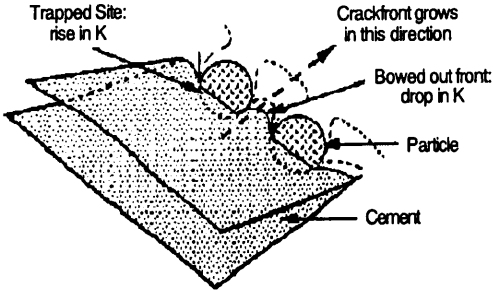


図 2.4.9 骨材によるトラッピング効果[218]

2.5 資源循環を実行可能にする目標の設定と展開

本章では、既存コンクリートおよびその生産システムに潜在する問題点を考慮した上で、他産業分野で導入されている資源循環手法の性質を新たに製造するコンクリートに反映させて、リサイクラブルコンクリートとなる条件を見出すことを目的に既往の研究を整理した。以下に、得られた知見および、本論を展開する上で重要となる資源循環を実行可能にするための目標の設定と展開について示す。

- 1) 既存コンクリートの資源循環を促進するためには、廃棄物発生量データの明確化が必要条件となる。しかしながら、世界的な問題として、コンクリート構造物から発生する廃棄物の定義が不明瞭であることが原因となり結果的に廃棄物発生量のデータベースが完備できない状況となっている。コンクリート構成材料の生涯を「ゆりかごから墓場まで」を前提とはしないで「循環」を前提とした上で、廃棄物の全ての状態を包含する体系化・定義化が必要である。
- 2) 既存コンクリートの資源循環化には、適用地域における社会的ニーズを正確に捉えることが優先される。社会的ニーズは適用地域における廃棄物発生量データ、再資源化に関連する基準・指針および運用方策の習熟度等によりある程度の推測が可能となる。その上で再資源化处理装置を中心とした技術レベルの適用性評価により、目標とする資源循環の達成可能性を検討することが可能になる。
- 3) リサイクラブル製品の資源循環手法は、製品を循環させる基本原則として、製品構成材料の最もエネルギー的負荷の大きいマテリアルリサイクルの実行可能性を検討した上でその段階に至らないようにする仕組みを合理的に導入する仕組みで設計を行う傾向がある。コンクリート構造物における資源投入量、生産工程のエネルギー消費および廃棄物発生量を考慮すると、同様の仕組みを適用して環境負荷低減を図る方法を具体的に検討する意義がある。
- 4) リサイクラブル製品とはその製造段階で部分的かつ一時的にエネルギー負荷が増大する可能性があるが、大域的・長期的には環境負荷が低減できることを条件とする。この場合、製品循環系の規模に応じて合理的な運用を補助するための社会的方策を積極導入することが不可欠となる。社会的方策による効果を含めた製品自身の経済的価値さらには環境的価値を定量化することで今後の地球環境時代における生産システムに相応しい合理化が図られると考えられる。
- 5) 日本におけるコンクリートの資源循環の目標レベルを、資源賦存量、最終処分場残余容量、廃棄物発生量データ、再資源化に関連する基準、指針、運用の方策の習熟度ならびに、破碎装置の技術レベルおよび普及度等の条件を基にした絶対的な評価値および世界各国の同一条件を基にした相対評価にを基に設定すると、マテリアルリサイクルを前提とした構造物の設計手法を導入することが必要であり、そのことが社会的ニーズになっていると考えられる。同目標を実行可能にするコンクリートは骨材とセメントを解体後に容易に回収可能にするコンクリートであり、構造物のライフサイクルを考慮した設計法が導入されていることが重要となる。

第2章の参考文献

- [1] 厚生省：産業廃棄物基礎データ,1999
- [2] 建設省建設技術総合開発プロジェクト「建設副産物の発生抑制・再生利用技術の開発」平成5度報告書:建設省, (財) 国土開発技術研究センター,1994
- [3] 建設副産物リサイクル広報推進会議編：総合的建設副産物対策,平成2度建設副産物実態調査結果,1990
- [4] 建設副産物リサイクル広報推進会議編：総合的建設副産物対策,平成7度建設副産物実態調査結果,1995
- [5] 建設副産物リサイクル広報推進会議編：総合的建設副産物対策,平成12度建設副産物実態調査結果,2000
- [6] Henrichen, A.: Use of Recycled Aggregates in Europe, in Proceedings of International Workshop on Recycled Concrete, pp. 1-8, JSPS 76 Committee on Construction Materials, Tokyo, 2000
- [7] F. Tomosawa, T. Noguchi and M. Tamura: Towards Zero-Emissions in Concrete Industry: Advanced Technologies for Concrete Recycling, ACI Council for the Organization of CANMET/ACI Conferences, Three-Day CANMET/ACI Int. Symp. Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry, CANADA, pp.147-160, 1998
- [8] 飯田一彦：解体コンクリートのリサイクルに関する研究,新潟大学学位請求論文, pp.21-42, 2000
- [9] 社団法人セメント協会：セメント協会50年のあゆみ, 1998
- [10] 工藤勝弘：骨材産業の現状と今後の課題, セメントコンクリート, No.618, pp.14-25, 1998
- [11] 経済産業省：生コン統計年報, 2001
- [12] 国立社会保障・人口問題研究所：日本の将来推計人口, 1997
- [13] 小松幸夫, 加藤裕久, 吉田倬郎, 野城智也：わが国における各種住宅の寿命分析に関する調査報告, 日本建築学会計画系論文報告集, No.439, pp.101-110, 1992
- [14] 土手裕, 丸山俊朗, 岡田久美子：宮崎県における道路用橋解体コンクリートの発生予測に関する研究, 第9回廃棄物学会研究講演論文集, pp.39-41, 1998
- [15] European Environment Agency Environmental Agreements: Environmental Effectiveness, Copenhagen EEA
- [16] Report to DGXI, Construction and Demolition Waste Management Practices, and their Economic Impacts, Report to Symonds Group, ARGUS, COWI Consulting Engineers and Planners, PRC Bouwcentrum, 1999
- [17] Henrichen, A.: Use of Recycled Aggregate in Europe, Proc. of Int. Workshop on Recycled Concrete, pp.1-8, JSPS 76 Committee on Construction Materials, Tokyo, 2000
- [18] Final Guidance Document for Distinguish Waste from Non-Waste 1998, Available through OECD's Website (<http://www.oecd.org>)
- [19] Demolition and Re-use of Concrete and Masonry Volume 1-Demolition Method and Practice and Volume 2 -Re-use of Demolition Waste, in Proceedings of the Second Int. Symp. held by RILEM in Tokyo, Japan, pp.7-11, 1997
- [20] Use of Recycled Materials as Aggregates in the Construction Industry -State-of-the-Art in Europe 1997, Report on Brite-EuRam 3 Industrial and Materials Technologies Contract BRRT-CT-0048, CUR, CSTC and Eerland Recycling, 1997
- [21] Recommendation Concrete with Recycled Aggregate, RILEM Technical Committee TC-121, 1994
- [22] Hendriks, Ch. F. and Pietersen, H. S.: Sustainable Raw Materials, Construction and Demolition Waste, RILEM Report 22, 2000
- [23] Hendriks, Ch. F. and Schulz R. R.: Recycled masonry rubble as an aggregate for concrete State-of-the-art Report, developments 1945-1985, Material and Structures, 1986
- [24] Gr'ble, P. and R'hl, M: German Committee for Reinforced Concrete: Concrete with Recycled Aggregates. Proc. of the Int. Symp., Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate, pp. 409-418, London, 1998
- [25] The Environmental Costs and Benefits of the Supply of Aggregate-Executive Summary, London Economics in association with Mining and Environment Research Group, 1998
- [26] Construction and Demolition Waste Project in the Framework of the Priority Waste Streams Program of the European Commission Part 1 -Information Document, Part 2 -strategy Document, Part 3 -Recommendation Project Group, Symonds Travers Morgan/Argus for Project Group to European Commission, 1995
- [27] Waste Minimization in Construction-Site Guide, Guthrie P. M., Woolveridge A.C. and Patel V.S., CIRIA Special Publication p.133, 1997
- [28] Alternatives Materials of Road Construction -A Guide to the Use of Waste, Recycled Materials and By-products, Shearwood P T, Tohmas Telford Services Ltd., 1995

- [29] D'Amico, C. and Garano, C.: Recycling of Demolition Waste to Produce Durable Concrete - Experiment in Order to Diffuse Use. Proc. of Int. Symp. Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate, pp. 205-211, London, 1998
- [30] Architectural and Environmental Teaching, UPC, Junta de Residus, 1997
- [31] Barra, M. and V'zquez, E.: Properties of Concretes with Recycled Aggregates: Influence of Properties of the Aggregates and their Interpretation. Proc. of the Int. Symp. Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate, pp. 19-30, London, 1998
- [32] V'zquez, E.: Recycling of Aggregates in Spain, Proc. of Int. Workshop on Recycled Concrete, pp.27-42, JSPS 76 Committee on Construction Materials, Tokyo, 2000
- [33] Hendriks, Ch. F. and Pietersen, H. S.: Sustainable Raw Materials, Construction and Demolition Waste, RILEM Report 22, 2000
- [34] Concrete and Masonry Rubble as Coarse Aggregate in Concrete, CUR-Report 125.
- [35] Hendriks, C., Pietersen, H.S. and Fraay, A.F.A.: Recycling of Building and Demolition Waste - An Integrated Approach. Proc. of the Int. Symp., Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate, pp. 419-431, London, 1998
- [36] Ravindrarajah, R. S., Stewart, M. and Greco, D.: Variability of Recycled Concrete Aggregate and Its Effects on Concrete Properties- A Case Study in Australia, Proc. of Int. Workshop on Recycled Concrete, pp.27-42, JSPS 76 Committee on Construction Materials, Tokyo, 2000
- [37] Gavind, M. and Haugaard, M.: Future Aspects for the Use of Recycled Concrete Aggregate in Denmark. Proc. of the Int. Symp., Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate, pp. 401-407, London, 1998
- [38] The U.S. Environmental Protection Agency Municipal and Industrial Solid Waste Division Office of Solid Waste, Characterization of Building-related Construction and Demolition Debris in the United States, 1998
- [39] The U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Characterization of Municipal Solid Waste in United States 1960 to 2000, 1986
- [40] NAHB Research Center, Inc. Deconstruction-Building Disassembly and Material Salvage: The Riverdale Case Study, 1997
- [41] Eastern Research Group, Inc. List of Industrial Waste landfills and Construction and Demolition Waste Landfills, Prepared for U.S. Environmental Protection Agency, 1994
- [42] 長岡茂徳：再生骨材製造装置,コンクリート工学,vol.35,No.35, pp.61-64,1997
- [43] 長岡茂徳：再生骨材の製造技術の現状と今後の展望,骨材資源工学会,1996
- [44] 石倉武,友澤史紀,他：高品質再生骨材の製造技術に関する開発,日本建築学会学術講演集, pp.1094-1096,1995
- [45] 島裕和,立屋敷久志,橋本光一,西村祐介：加熱すりもみ法によるコンクリート塊からの高品質骨材回収の LCA 評価,コンクリート工学年次論文集,Vo.23,No.2,pp.67-72,2001
- [46] 柳橋邦生,小島正朗,神山行男,米沢敏男：高品質再生コンクリートの研究－フレッシュコンクリートの経時変化と実構造物への適用－,日本建築学会学術講演梗概集 A-1,pp.1043-1044,2000
- [47] 阿部道彦：再生骨材の粒子構成,第 49 回セメント技術大会講演集,pp.383-387,1995
- [48] 阿部道彦：コンクリート用再生骨材,コンクリート工学,vol.35,No.7,pp.42-47,1997
- [49] 菊池雅史,大田泰博,他：原コンクリートの品質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響に関する基礎的研究,日本建築学会学術講演梗概集,pp.863-864,1995
- [50] 公共建設工事における再生資源活用の当面の運用について,旧建設省技調発第 267 号,営計発第 97 号,1991
- [51] 財団法人横浜市廃棄物資源公社活動報告書資料,1998
- [52] 全国道路利用者会議,道路統計年報,2001
- [53] アスファルト舗装要綱,社団法人日本道路協会,1997
- [54] セメントコンクリート舗装要綱,社団法人日本道路協会,1997
- [55] 建設副産物リサイクル広報推進会議編：総合的建設副産物対策,2002
- [56] 武田邦彦：リサイクル汚染列島－環境にも身体にも悪いリサイクル社会の危険性とは－,青春出版社,2000
- [57] 政府経済財政諮問会議：循環型社会に関する専門委員会中間報告書,2001
- [58] 笠井芳夫,依田彰彦,他：コンクリート破碎骨材を用いたコンクリートの研究（その 1 研究概要）日本建築学会学術講演梗概集,pp.325-326,1985
- [59] 阿部道彦,南波篤志：再生骨材の収率と品質に及ぼす製造方法の影響,第 49 回セメント技術大会講演集,pp.377-381,1995
- [60] 阿部道彦：コンクリート用再生骨材,コンクリート工学,vol.35,No.7,pp.42-47,1997

- [61] 杉山一弥,内山則行,他: 解体コンクリートのコンクリート用骨材への適用性に関する研究,コンクリート工学論文
文集,pp.91-101,1996
- [62] 阿部道彦,南波篤志: 各種製造方法による再生粗骨材の品質と生産比率について,第 50 回セメント技術大会講演
要旨,pp.344-345,1996
- [63] 西尾篤志,田村博: 再生粗骨材を用いた真空ミキシングコート,日本建築学会学術講演梗概集,pp.1047-1048,1997
- [64] 辻正哲,澤本武博ほか: コロイダルシリカを用いた再生骨材コンクリートの強度改善効果,日本材料学会第 49 期
学術講演会講演論文集,pp.241-242,2000
- [65] 辻大二郎,田村雅紀,野口貴文: 低品質再生骨材の表面改質処理による構造躯体への適用に関する研究,コンクリ
ート工学論文集,pp.1251-1256,2002
- [66] 平成 8-12 度日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業報告書: ライフサイクルを考慮した建設材料の新しい
リサイクル方法の開発(代表 長滝重義),2001
- [67] 建設省建設技術総合開発プロジェクト,建設副産物の発生抑制・再生利用技術の開発概要報告書,建設省,(財)
国土開発技術研究センター,1999
- [68] コンクリートへのリサイクル資材活用技術の標準化に関する調査研究委員会: エコセメントの標準情報 TR お
よび再生骨材を用いたコンクリートの TR の概要,コンクリート工学,Vol.39,No.11,pp.53-59,2001
- [69] 財団法人日本建築センター: 新建築技術認定事業,建築構造用再生骨材認定基準,1999
- [70] 厚生省: 厚生省環境衛生局長通達自治体通知,1971
- [71] 特集-最後の改革廃棄物の定義,区分の見直し-,月刊いんだすと 9 月号,社団法人全国産業廃棄物連合会,2001
- [72] OECD, Extended and Shared Producer Responsibility Phase2 ,Executive Summary ENV/EPOC/PPC/Rev.2,1998
- [73] 佐野敦彦,七田佳代子: 拡大する企業の環境責任-Extended Producer Responsibility ドイツ循環経済法から日米欧
の異なる 3 つの EPR 政策へ-,環境新聞社,2000
- [74] 経済産業省産業技術環境局: 拡大型製造者環境責任について,2001
- [75] 田中勝: OECD の拡大生産者責任(EPR)戦略と日本の取り組み,エコ・インダストリー,Vol.3 No.9,1998
- [76] 吉川弘之: テクノグローブ,工業調査会,1993
- [77] CAM-I/Japan:生物志向型生産システム,1988
- [78] FFS 調査委員会: フューチャーファクトリーシステムに関する調査報告書,1991
- [79] (財)製造科学技術センターIMS センターWeb Site,<http://www.ims.mstc.or.jp/index.html>
- [80] 上田完次: A-Life とジェネティックマニュファクチャリングシステム,精密工学春季大会講演論文集 pp.311-
312,1992
- [81] 上田完次,大倉和博: Genetic Manufacturing System のモデリングに関する研究,精密工学春季大会講演論文集
pp.35-36,1993
- [82] 上田完次: 自然・生命からの発想 生物志向型生産システム,工業調査会,1994
- [83] J.Holland: Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan,1975
- [84] A.Lindenmayer: Mathematical Models for Cellular Interactions in Development, J.Theor.Biol.18,1968
- [85] C.Langton: Studying Artificial Life with Cellular Automata, Physica, 22D, 1986
- [86] 梅田靖: インバースマニュファクチャリング-ライフサイクル戦略への挑戦-,工業調査会,1998.
- [87] 梅田靖: インバースマニュファクチャリングフォーラム・ライフサイクル設計委員会: インバースマニュファ
クチャリングのためのライフサイクル設計ガイドライン(第 1 報)-ライフサイクル・オプションに対する基本的な
考え方-,エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム論文集,pp.13-16,2000
- [88] 梅田靖,下林基樹ほか: 制御型自己修復機械の構築,精密工学会誌,Vo.60,No.10,1994
- [89] 小野里雅彦: ユビキタス生産による循環型社会の可能性,エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム論文集,
pp.230-231, 2000
- [90] Ernst Ulrich von Weizsaecker and others : Factor Four. Doubling Wealth, Halving Resource Use. The New Report to the
Club of Rome, Earthscan, London,1997
- [91] Kobayashi H. and others : A Framework of Eco-Design Support, Proc. First Int. Symp. On Environmentally Conscious
Design and inverse Manufacturing, pp.680-684, 1999
- [92] 本宮明典ほか: エコデザイン支援システムの開発事例,エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム論文集,
pp.46-47, 2000
- [93] 杉本徹雄: 消費者のための心理学, 福村出版, 1997

- [94] 横山浩司ほか：階層構造モデルによるボトムアップ的資源循環システムのシュミレーション，エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム論文集，pp.192-195, 2000
- [95] ISO, International Standard ISO 14043, 1998
- [96] Goedkoop M., at al. : The ECO-Indicator 98 Explained, Int. J. LCA, 3-6pp.352-360, 1998
- [97] M. Frei and R. Zust, The ECO-Effective Product Design-The Systematic Inclusion of Environmental Aspects in Defining Requirements, F.L.Krause and G.Seliger, Life Cycle Networks, Chapman & Hall, pp.163-173, 1997
- [98] 小林英樹, 春木和仁：製品ライフサイクル計画支援システムの開発，エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム論文集，pp.26-28, 2000
- [99] D.Clausing : Total Quality Development, ASME, 1993
- [100] 芝池成人, 浅野隆宏, M.F.Ashby : 性能指標の自動創出機能を有する環境調和性を考慮した材料選択方法論, エコデザイン 1999 ジャパンシンポジウム論文集, pp.104-107, 1999
- [101] M.F.Ashby, Materials Selection in Mechanical Design, Pergamon Press, 1992
- [102] Cambroge Materials Sector Ver.2.0, Granta Design Ltd., 1994
- [103] 弘重雄三, 西隆之, 大橋敏二郎：リサイクル性評価法(REM), エコデザイン 1999 ジャパンシンポジウム論文集, pp.104-107, 1999
- [104] 弘重雄三, 大橋敏二郎ほか：分解性評価法(DEM)の開発, 日本機械学会第5回環境工学総合シンポジウム講演論文集 No.95-23, pp.159-162, 1995
- [105] 堺孝司：コンクリート構造物の新しい設計体系ー環境設計, コンクリート工学, Vol.40, No.5, pp.53-58, 2002
- [106] 日本建築学会：地球温暖化への建築分野での対応, 建築雑誌, Vol.113, No.1417, pp.90-91, 1998
- [107] 日本建築学会：鉄筋コンクリート工事標準仕様書 JASS5, 1997
- [108] 建設省住宅局：必携住宅の品質確保の促進等に関する法律, (財)ベターリビング, 2000
- [109] 平野吉信：海外の「性能指向の建築基準」の動向, 建築研究成果撰あらか第12集, 1994
- [110] 野口貴文：性能規定型 JASS5 のイメージ, 日本建築学会大会（中国）材料施工部門パネルディスカッション「施工標準の国際調和」資料, 日本建築学会材料施工委員会, pp.33-39, 1999
- [111] 野口貴文：鉄筋コンクリート造建築物の性能検証型耐久設計, コンクリート工学 Vol.40, No.5, pp.59-66, 2002
- [112] 日本建築学会地球環境委員会編：建築物の総合的環境性能評価とラベリング, 日本建築学会大会（北陸）地球環境部門部門パネルディスカッション資料, 2002
- [113] Song S. : Intelligent Decision Support System for Continuous Improvement of Resource-Saving and Recycling-Conscious Manufacturing, Proceeding of the EcoDesign99, IEEE, Tokyo, pp.723-728, 1999
- [114] 宋相載：製品ライフサイクル・モデリングの継続的改善の環境情報支援システム構築，エコデザイン 1999 ジャパンシンポジウム論文集，pp.80-83, 1999
- [115] T.Tomiyama : The Post Mass Production Paradigm, In H.Yoshikawa, R.Yamamoto, F.Kimura, T.Suga, and Y Umeda, editors, Proceedings of Eco Design99. IEEE, 1999
- [116] 梅田靖, 今川晴紀, 下村芳樹, 吉岡真治, 富山哲男：アップグレード設計方法論の提案, エコデザイン 1999 ジャパンシンポジウム論文集, pp.88-91, 1999
- [117] 梅田靖, 富山哲男, 吉川弘之：機能設計支援のための FBS モデリングの提案, 精密工学会誌 Vol.63, No.6, 1997
- [118] Rapoza, B., Harjula, T., Knight, W.A. and Boothroyd, G : Product Design for Disassembly and Environment, Annals of CIRP, pp.109-112, 1996.
- [119] Jean, P., Coulon, R., and Timmons, D : Building EcoDesign Toolkit for the Electronics Industry, First Int. Sym.on Environmental Conscious Design and Inverse Manufacturing, pp.701-706
- [120] 赤尾洋二：品質展開入門, 日科技連出版社, 1990
- [121] 増井慶次郎ほか：ライフサイクル戦略に基づいた製品設計のための QFD, 精密機械工学会誌, Vol.66, No.4, pp.567-571, 2000
- [122] Zhang, Y., Wang, H.P. and Zhang, C. : Product Concept Evaluation Using GQFD- II and AHP, International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing, Vol.7, No.3, pp.1-15, 1998
- [123] 中條澄：プラスチック, 1997-5月号, 1997
- [124] 野村孝夫, ナノオーダーで高速構造が制御されたスーパーオレフィンポリマーの開発, 名古屋大学学位論文, 1995
- [125] 佐藤寛樹ほか：プラスチック, 1996-9月号, 1996

- [126] 日経エコロジー,環境で変わる素材選択,日経 BP 社,1999-10,1999
- [127] 尾島俊雄:「環境革命時代の建築」,「日本建築学会学術講演梗概集 D-1」,pp.855-856,1998
- [128] 中島裕輔:特集ー再生・リサイクルーパーフェクトリサイクルハウス,建築と社会,日本建築協会,No.959,2002
- [129] 山際康之,岩田修一,桐山孝司:分解性と組立性が共存するための設計法の研究,エコデザイン 1999 ジャパンシンポジウム論文集,pp.92-95,1999
- [130] 山際康之,岩田修一,沼田潤:環境調和型製品ののための組立性と分解性の両立化設計原理,エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム論文集,pp.63-65,2000
- [131] H.Surinivasan, R.Figureoa and R.Gadh: Selective Disassembly for Virtual Prototyping as Applied to De-manufacturing Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol.15, pp.231-245, 1999
- [132] T.Murayama, Y.Yamaichi and F.Oba: Automatic Generation of Disassembly Sequence for Recycling Products, Proceedings of International Conference on manufacturing Milestones toward the 21st Century, pp.433-438, 1997
- [133] T.Murayama, K.Kagawa and F.Oba: Computer Aided Redesign for Improving Recyclability, Proceedings of EcoDesign99 -1st. Int. Symp.on Environmentally Conscious Design and -Inverse Manufacturing, pp.746-751, 1999
- [134] 村山長, 安部重毅, 山通曲征, 大場史憲: エントロピーとヒューリスティクスによる部品交換のための分解順序の自動生成, エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム論文集, pp.74-77, 2000
- [135] 村山長, 大場史憲: 設計変更における効率的組立順序アルゴリズム, 精密工学会誌, Vol.60, No.11, pp.1663-1668, 1994
- [136] 細田直江,富田誠,須賀唯知: 可逆的インターコネクションー界面での分離をデザインした接合方法の開発ーエコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム論文集, pp.70-71, 2000
- [137] T.Suga: Bull.Japan. Inst. Metal, Vo.29, No.11, pp. 944-947, 1990
- [138] 須賀唯知: スマートディスアセンブリ,エコデザイン 1999 ジャパンシンポジウム論文集,pp.108-109,1999
- [139] S.Miyamoto, T.Tamura and J.Fujimoto, ECO-fusion, integrated software for environmentally-conscious production, Proc. Of IEEE Int. Symp. Electronics and the Environment, pp.179-184, 1996
- [140] T.Murayama, K.Kagawa and F.Oba, Computer-Aided design for improving recyclability. Proc. of IEEE First Int. Symp. Environmental Conscious Design and Inverse Manufacturing, pp.746-751, 1999
- [141] K.Feldmann and O.Meedt, Recycling and disassembly of electronic devices, Life Cycle Modeling for Innovative Products and Processes, Chapman & Hall, pp.233-245, 1996
- [142] 宮川正威: 作りやすさ,分解しやすさの評価方法,日本機械学会誌, Vo..101, No.954, pp.357-359, 1998
- [143] G. Boothroyd: 製造性,組立性,分解性評価法ー欧米における研究動向ー, 日本機械学会誌, Vol.101, No.954, pp.360-363, 1998
- [144] 金井理,岸浪健史,佐々木亮太: 家電品を対象とする破碎・選別作業を含むリサイクル・リユース計画システム, エコデザイン 1999 ジャパンシンポジウム論文集 pp124-125, 2000
- [145] E. Zussman, A.Kriwet and G.Seliger: Disassembly-oriented assessment methodology to support design for recycling, Annals of the CIRP, 43(1), pp.9-14, 1994
- [146] D.Spath and C.Tritsch, Information management to support economical disassembly of technical products, Life Cycle Modeling for Innovative Products and Processes, Chapman & Hall, pp.246-255, 1996
- [147] International Organization for Standardization, International Standard ISO14001,(1996).
- [148] 京都環境マネジメントシステム・スタンダード(KES): <http://web.kyoto-inet.or.jp/org/ma21f/kes/kes.html>
- [149] 建設廃棄物の経済学的側面,廃棄物学会誌,第 11 巻,第 2 号,pp.105-116,2000
- [150] Material cycle, waste disposal, and recycling in a Leontief-Sraffa-von Neumann economy, Journal of Material Cycles and Waste Management, Vol.2, pp.105-116, 2000
- [151] 細田衛士: グッズとバツズの経済学ー循環型社会の基本原則ー,東洋経済新報社,1999。
- [152] 佐和隆光: 地球温暖化を防ぐ,岩波新書,1997
- [153] 三橋規宏,日本経済グリーン国富論,ワールドウォッチ研究所,東洋経済新報社 2000
- [154] 佐和隆光: 温暖化防止には炭素税が有効,日経エコロジー10月号,p.164-167,2000
- [155] レスター・R・ブラウン編: ワールドウォッチ地球白書 1999-2000,2000
- [156] 環境省: 環境政策における経済的手法活用検討会報告書,2001
- [157] 環境省: 事業者の環境パフォーマンス指標ー2000 度版ー,2001
- [158] 経済産業省: ステークホルダー重視による環境レポートガイドライン,2001

- [159] 環境庁・環境保全コストの把握に関する検討会：環境保全コストの把握及び公表に関するガイドラインー環境会計の確立に向けてー,1999
- [160] 森口祐一：持続可能な発展の計測手法,持続可能な発展の指標の事例,持続可能な発展の指標に関する課題と展望,『持続可能な社会システム』,pp.97～126,岩波講座地球環境学第 10 巻,岩波書店,1998
- [161] ノーマン・マイアーズ：地球（ガイア）の危機 人類生存のための青地図 その管理と可能性,産調出版,2002
- [162] 栗山浩一：図解環境評価と環境会計,日本評論社,2000
- [163] 栗山浩一、國部克彦：企業の環境対策が投資家に及ぼす影響の経済的評価ー投資家対象コンジョイント分析と環境会計への応用ー環境経済・政策学会（2001 大会）
- [164] 信夫隆司編：環境と開発の国際政治,南窓社,1999
- [165] IPCC Third Assessment Report(TAR), Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001
- [166] Morita Tsuneyuki: IPCC Special Report on Emission Scenarios, Cambridge University Press, 2000
- [167] IPCC Assessment Report, Intergovernmental Panel on Climate Change, 1990
- [168] IPCC Second Assessment Report(SAR), Intergovernmental Panel on Climate Change, 1995
- [169] 飯田一彦,佐伯竜彦,長滝重義：セメントを含めたコンクリートのリサイクル,コンクリート工学論文集,Vol.11, No.3, pp.139-144, 2000
- [170] S.Sano and Japan Cement Association, Proceeding of the Fourth International Conference on Ecobalance, p.497,2000
- [171] 友澤史紀,野口貴文,横田紀男,本田優,高橋茂：完全リサイクルコンクリート（エココンクリート）の研究,日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1,pp.341-342,1994
- [172] F.Tomosawa and T.Noguchi :Towards Completely Recyclable Concrete, Concrete Technology Towards the Century of Environment, Proceeding of International Workshop Hakodate, Integrated Design and Environmental Issues in Concrete Technology, E & FN SPON, pp.263-272, 1996
- [173] 友澤史紀,野口貴文,大塩明,榮井建二：完全リサイクルコンクリートの実用化に関する研究（その 1：全体計画および各種完全リサイクルコンクリート）,日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1,pp.393-394,1996
- [174] 石灰石鉱業協会：石灰石の用途と特性,1980
- [175] 石灰石鉱業協会：石灰石骨材コンクリート,1989
- [176] 野口貴文,友澤史紀,大塩明,五十畑達夫,村田芳樹：完全リサイクルコンクリートの実用化に関する研究（その 2：石灰石砕砂の実用化）,日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1,pp.395-396,1996
- [177] セメント協会コンクリート専門委員会：石灰石骨材コンクリートに関する研究,コンクリート専門委員会報告 F-46,社団法人セメント協会,1992
- [178] 例えば,Aitcin,P.C., and Mehta,P.K., Effect of Coarse Aggregate on Mechanical Properties of High Strength Concrete, ACI Materials Journal, Proceedings, Vol.87, No.2, pp.103-107, 1990
- [179] 藤田嘉夫,佐伯昇：コンクリートのひびわれ発生・伝播について,コンクリート工学,Vol.16,No.11,1978
- [180] A.A.Griffith : The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Phil. Trans. Roy. Soc. Of London, A221, 1921
- [181] 例えば,S.Popovics : Fracture Mechanism in Concrete, Proceedings of ASCE. EM3, 1969
- [182] Alexander,K.M.:Strength of the Cement-Aggregate Bond, ACI Journal, Proc.V.56, No.5, pp.377-380,1959
- [183] Gilkey,H.J.: Water-Cement Ratio Versus Strength-Another Look, ACI Journal, Proc.V.57, No.10, pp.1287-1312, 1961
- [184] 和泉正哲,三橋博三,佐々木達夫:コンクリートの圧縮強度破壊発生機構に関する基礎的研究,日本建築学会論文報告集,第 289 号,pp.11-23,1980
- [185] 小阪義夫,谷川恭雄,太田福男：コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響ー第 1 報モデル解析法による検討,日本建築学会論文報告集,第 228 号,pp.1-11,1975
- [186] 小阪義夫,谷川恭雄：コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響ー第 2 報マイクロクラック観察法による検討,日本建築学会論文報告集,第 231 号,pp.1-11,1975
- [187] Hansen, T.C. and Nielsen, K.E.C.:Influence of Aggregate Properties on Concrete Shrinkage, ACI Journal, Proc.V.62, No.7, pp.783-794, 1965
- [188] Hsu,T.C. and Slate, F.O.: Tensile Bond Strength Between Aggregate and Cement Paste or Mortar, ACI Journal , Proc.V.60, No.4, pp.465-486, 1963
- [189] 小林正凡：骨材とセメントペースト硬化体との付着性状について,セメントコンクリート,No.319,1973
- [190] 藤田嘉夫,佐伯昇ほか：コンクリートのひび割れ発生機構について,セメント技術報 No.30,1976
- [191] 鈴木夙也,水上国男：骨材とセメントペーストの付着強度について,セメント技術報 No.29,1975

- [192] 岩崎訓明,富山泰全:セメントペースト-骨材界面結合・破壊機構と強度,セメント技術報 No.29,1975
- [193] R.Jones and M.F.Kaplan: The Effects of Coarse Aggregate on the Mode of Failure of Concrete in Compression and Flexure, Magazine of Concrete Research, Vol.9, No.26, 1957
- [194] 小阪義夫,谷川恭雄,太田福男:コンクリートの引張強度におよぼす骨材の影響,セメント技術報,No.24,1970
- [195] 川上英男:粗骨材とコンクリート強度に関する基礎的研究(その1),日本建築学会論文報告集,第166号,1969
- [196] 山本泰彦:コンクリートのワークアビリティおよび強度におよぼす粗骨材粒の特質,コンクリートジャーナル,vol.7,No.11,pp.11-21,1969
- [197] 国府勝郎,飛坂基夫:高強度コンクリートと骨材,コンクリート工学,vol.2,No.2,p.17,1990.2
- [198] M.F.Kaplan:"The Effect of the Properties of Coarse Aggregates on the Workability of Concrete", Magazine of Concrete Research,1958
- [199] M.F.Kaplan:Strain and Stress of Concrete at Initiation of Cracking and Near failure, Journal of ACI,V.60No.7,1963
- [200] 山本泰彦:粗骨材の形状ならびに表面性状がコンクリートの強度におよぼす影響,セメント技術報 No.22,pp.239-243,1968
- [201] 森野奎二,他:各種岩石骨材とセメントペーストとの付着性状,コンクリート工学講演会論文集, pp.93-96,1980
- [202] M.F.Kaplan: Flexural and Compressive Strength of Concrete Affected by the Properties of Coarse Aggregates, Journal of ACI,1959
- [203] 飛坂基夫:高強度コンクリートの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,No.394,pp.30-33,1979
- [204] 水上国男,他:骨材とセメントペーストの付着強度について,セメント技術報 No.29,pp.139-142,1975
- [205] 岩崎訓明:セメントペーストと骨材の付着機構,コンクリート工学,vol.19,No.11,1981
- [206] 小林正几,曾根徳明:芳香族系減水剤を用いたコンクリートの強度特性について,セメント技術報,Vol.28,pp.260-263,1974
- [207] 嶋谷宏文,他:コンクリート用骨材の破砕強度に及ぼす含水量と軟石の影響について,セメントコンクリート,No.21,pp.316,1967
- [208] 迫田恵三:骨材の品質がコンクリートの性質に及ぼす影響,第8回コンクリート工学次講演会論文集,pp.233-236,1986
- [209] Otsuka, K.: Detection of fracture process zone in concrete by means of X-ray with contrast medium, Fracture mechanics of concrete structures, Proc. of the First Int. Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures pp.485-490, 1992,
- [210] 野村希晶,三橋博三ほか:非線形破壊力学手法に基づく高強度コンクリートの脆性化機構の考察,日本建築学会構造系論文報告集,第416号, pp.9-16,1990
- [211] Zaitsev, Y.V.:Inelastic Properties of Solids with Random Cracks, Mechanics of Geomaterials, Rocks, Concrete, Soils, Edited by Bazant, A., John Wiley & Sons Ltd, pp.89-128,1985
- [212] 橋高義典,上村克郎,高瀬憲克:高強度コンクリートのボルト引抜き耐力に及ぼす粗骨材種類の影響,コンクリート工学次論文報告集,Vol.13, No.1, pp245-250,1991
- [213] Nakamura, S., Kitsutaka, Y. and Kamimura, K., "Influence of Aggregate Properties on Fracture Energy of High Strength Concrete", ACI SP-149, pp.701-710, 1994
- [214] Huang, Q.J. :Micromechanical Modeling of the Fracture Behavior of Second-Phase Reinforced Cementitious Materials, thesis MIT, 1990
- [215] Faber, K.T. and Evans, A.G., "Crack Deflection Processes - I. Theory", Acta Metal, Vol.31, No.4, pp.565-576, 1983
- [216] Evans, A.G.: Perspective on the Development of High-toughness ceramics, J.Am.Ceramic Soc., Vol.73, pp.187-206,1990
- [217] Green, L.D. and Nicholson, P.S., "Fracture of Brittle Particulate Composite", Fracture Mechanics of Ceramics, Vol.4, Crack Growth and Microstructure, Edited by Bradt, R.C., pp.945-960,1978
- [218] Lange, F.E., "The Interaction of a Crack Front with a Second-Phase Dispersion", Philosophical Magazine,Vol.22, pp.983-992, 1970

