

# 建設材料の資源循環に関する 現状・指針・提言

## — 建設リサイクルの是非と理想 —

---

東京大学大学院工学系研究科 野口貴文

# 話題

---

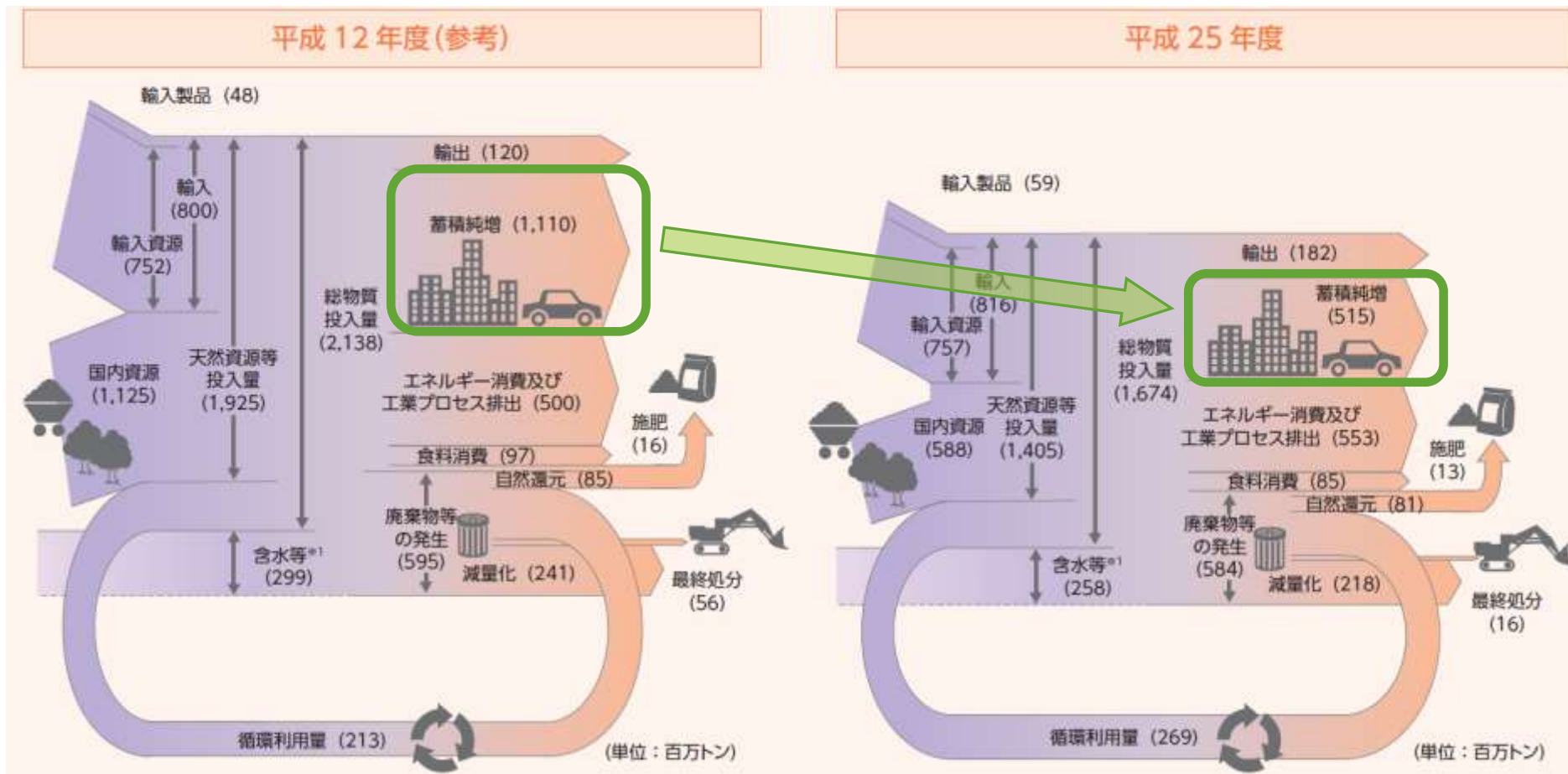
- 各種建設材料の資源循環の現状
- 資源・建設材料の空間移動
- 資源枯渇の定義と評価
- 他産業の資源循環の現状
- 建設材料の資源循環に関する指針・提言



# 各種建設材料の資源循環の現状

# 日本全体の物質フロー

(出展:環境省「平成27年度・環境白書／循環型社会白書／生物多様性白書」)



# マテリアルフロー把握の意義



## ■環境問題

□大量のマテリアルフローが、自然環境のもつ資源の再生能力や廃物の浄化能力を大きく超えてしまったことに起因

## ■先進工業国における生産と消費の形態は持続不可能

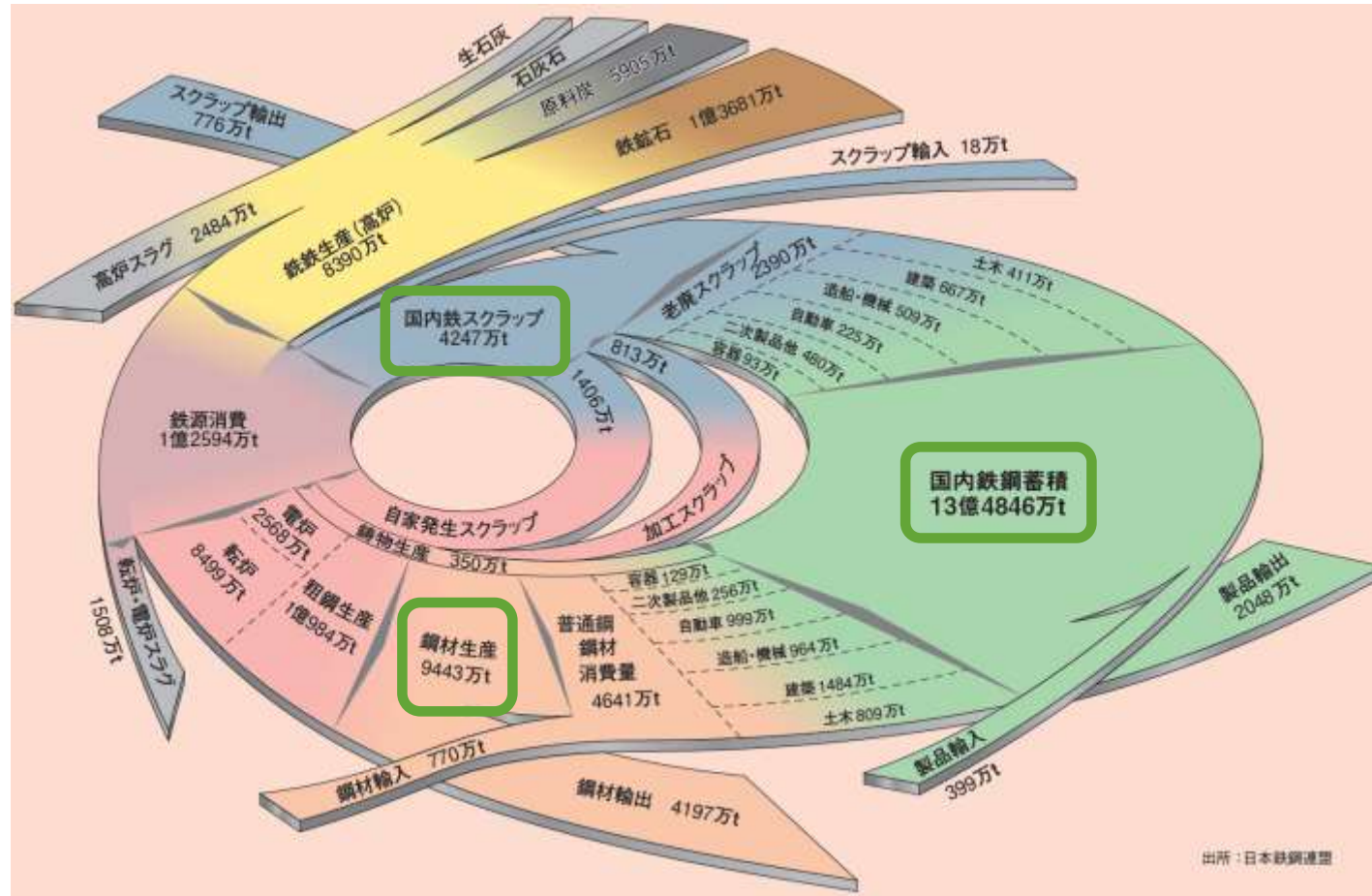
## ■大量のマテリアルフローに特徴づけられた人間社会と環境問題の関わり分析

□マテリアルフローの把握は不可欠

□マテリアルフロー分析／勘定は有益

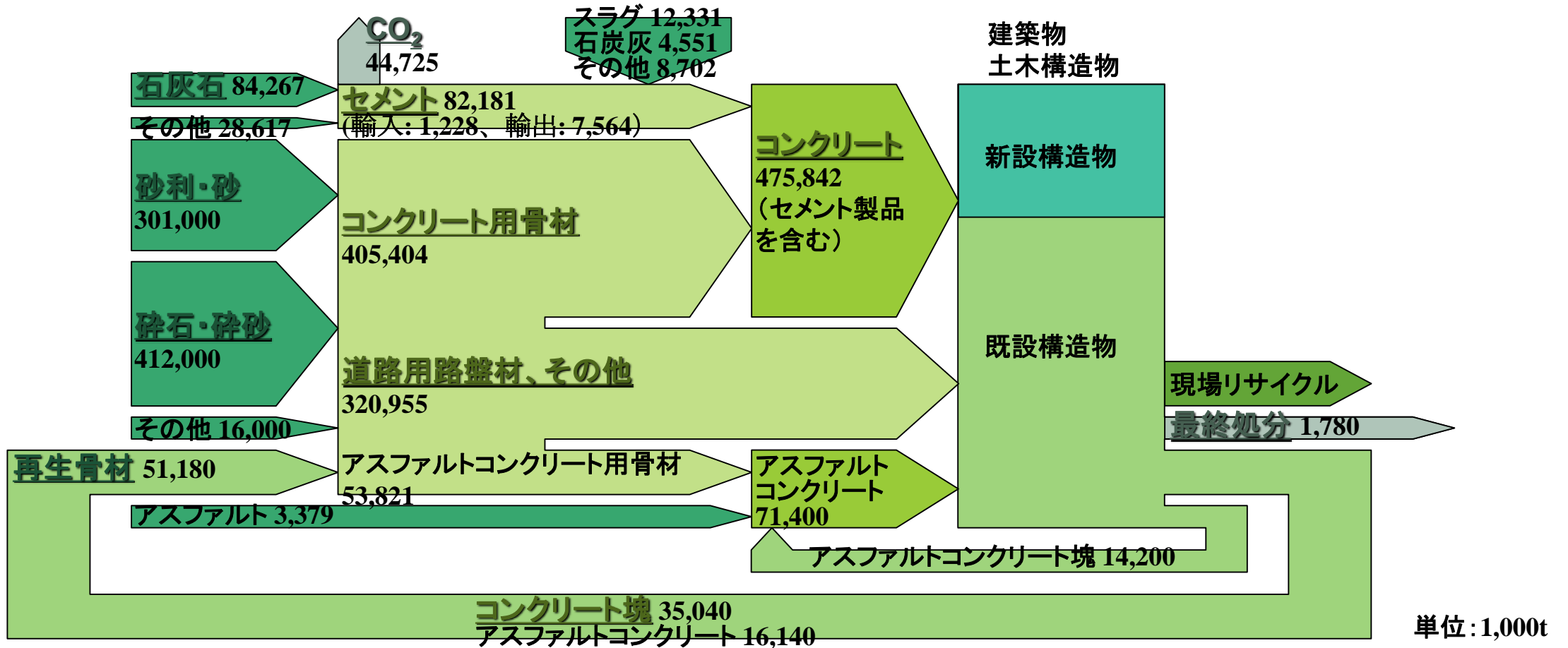
# 鋼材の循環図

(出典: 日本鉄鋼連盟「鉄の輪がつなぐ人と地球」2016)



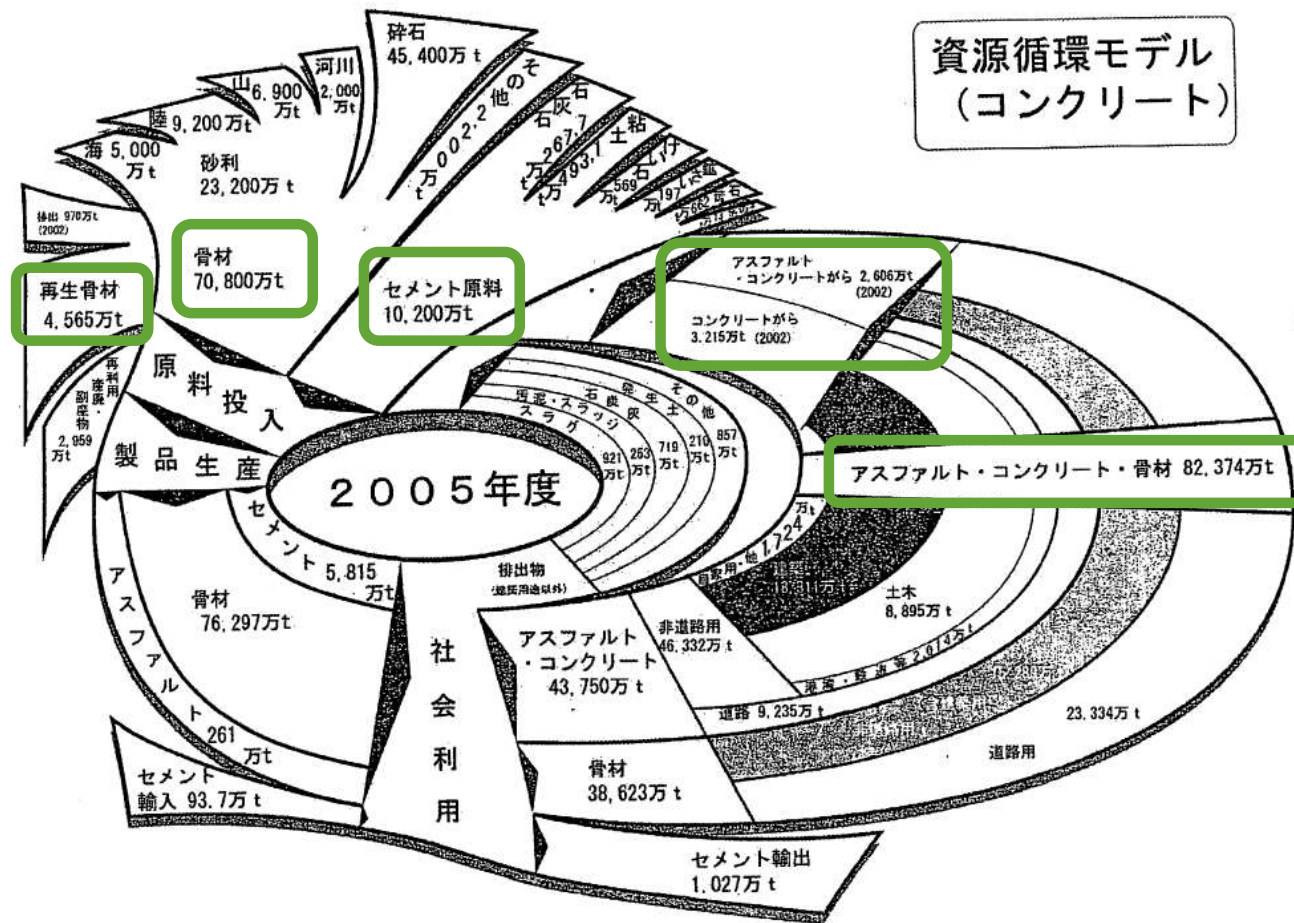
# コンクリートのマテリアルフロー

(日本建築学会「建築材料のマテリアルフロート資源利用の課題」2008を元に作成)



# コンクリートの循環図

(出展: 日本建築学会「建築材料のマテリアルフロート資源利用の課題」2008)





# 木材のマテリアルフロー

(出典: 日本建築学会「建築資材の炭素収支を考慮したマテリアルフローと資源利用の課題」)

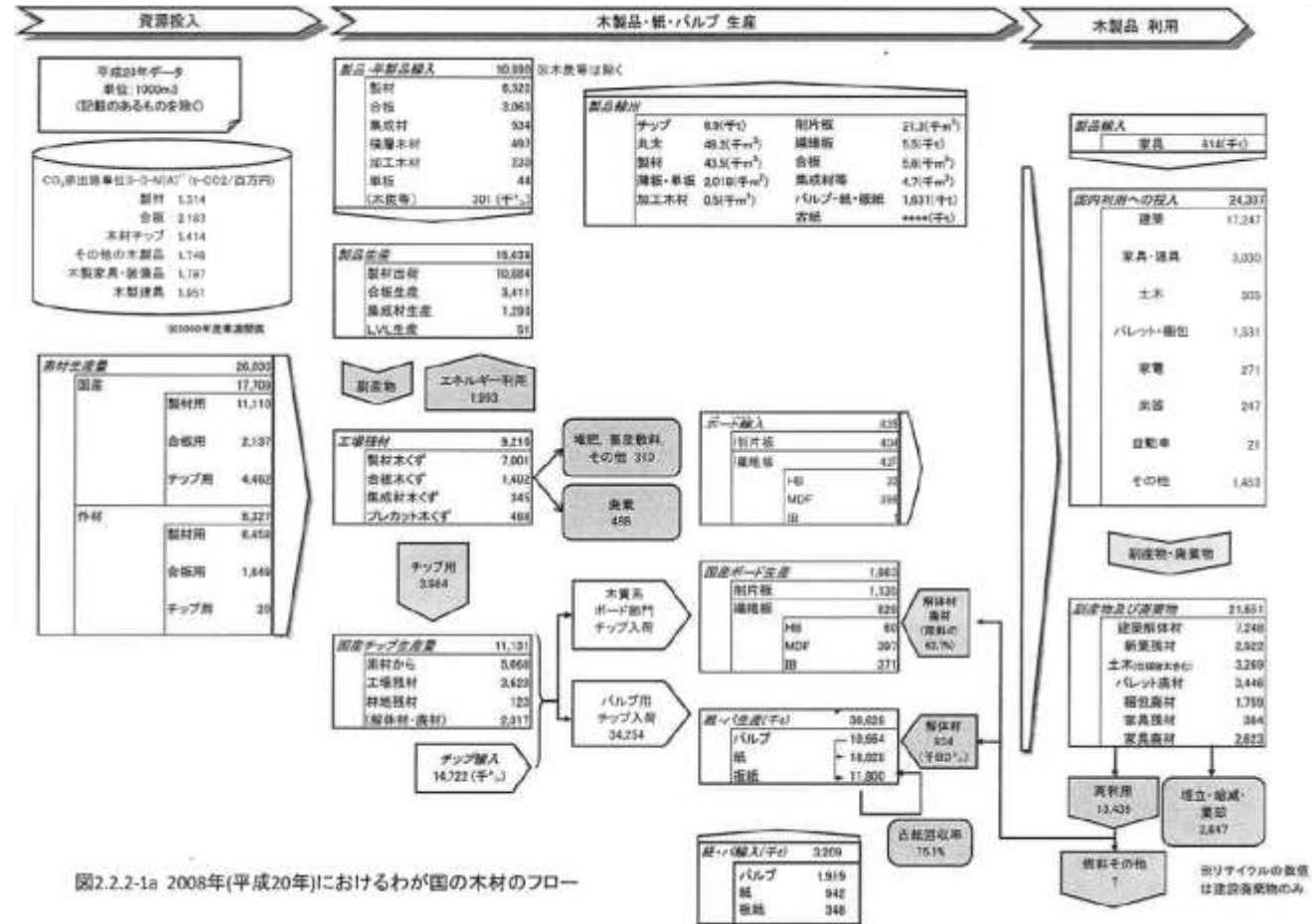
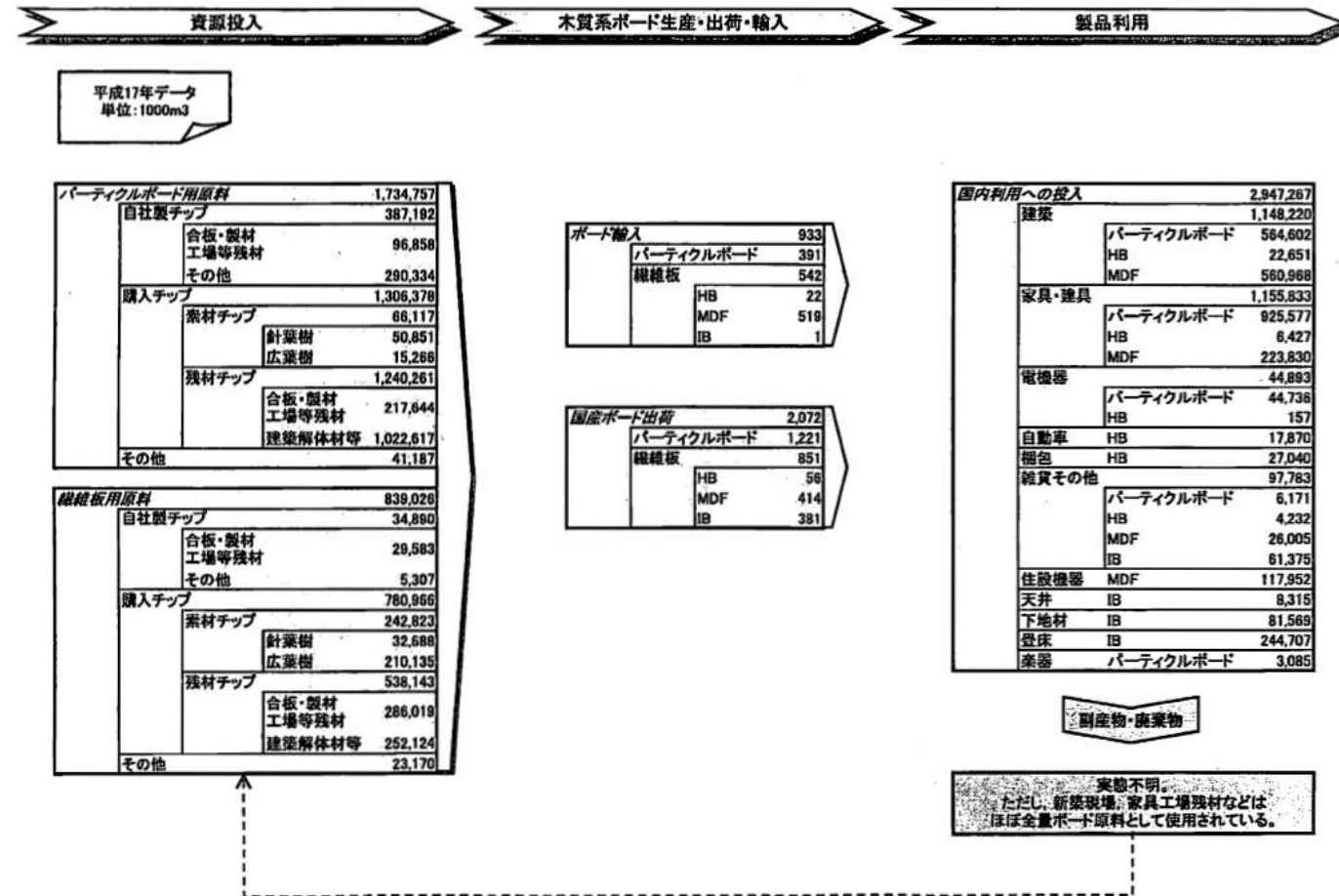


図2.2.2-1a 2008年(平成20年)におけるわが国の木材のフロー



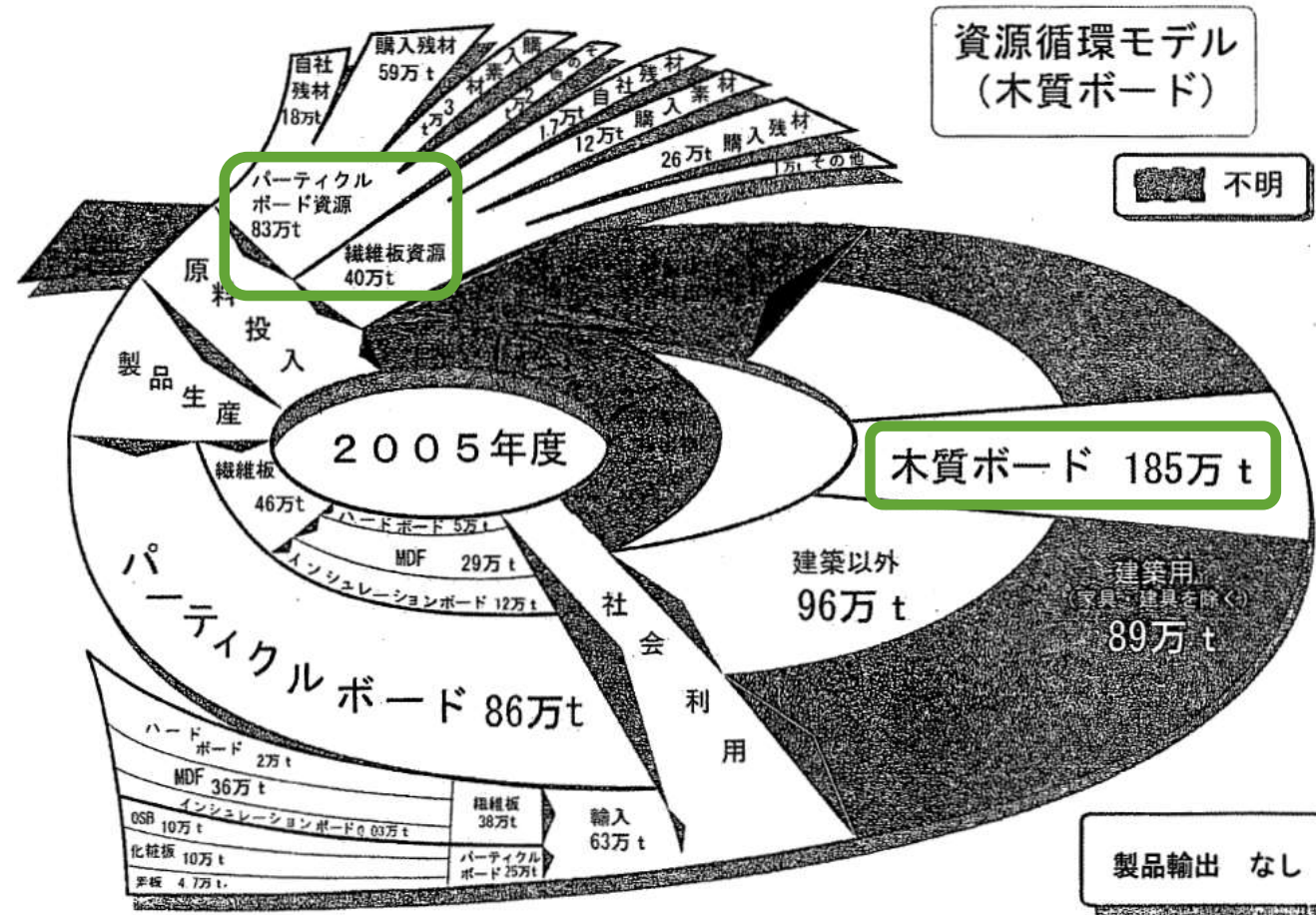
# 木質ボードのマテリアルフロー

(出展: 日本建築学会「建築材料のマテリアルフロート資源利用の課題」2008)

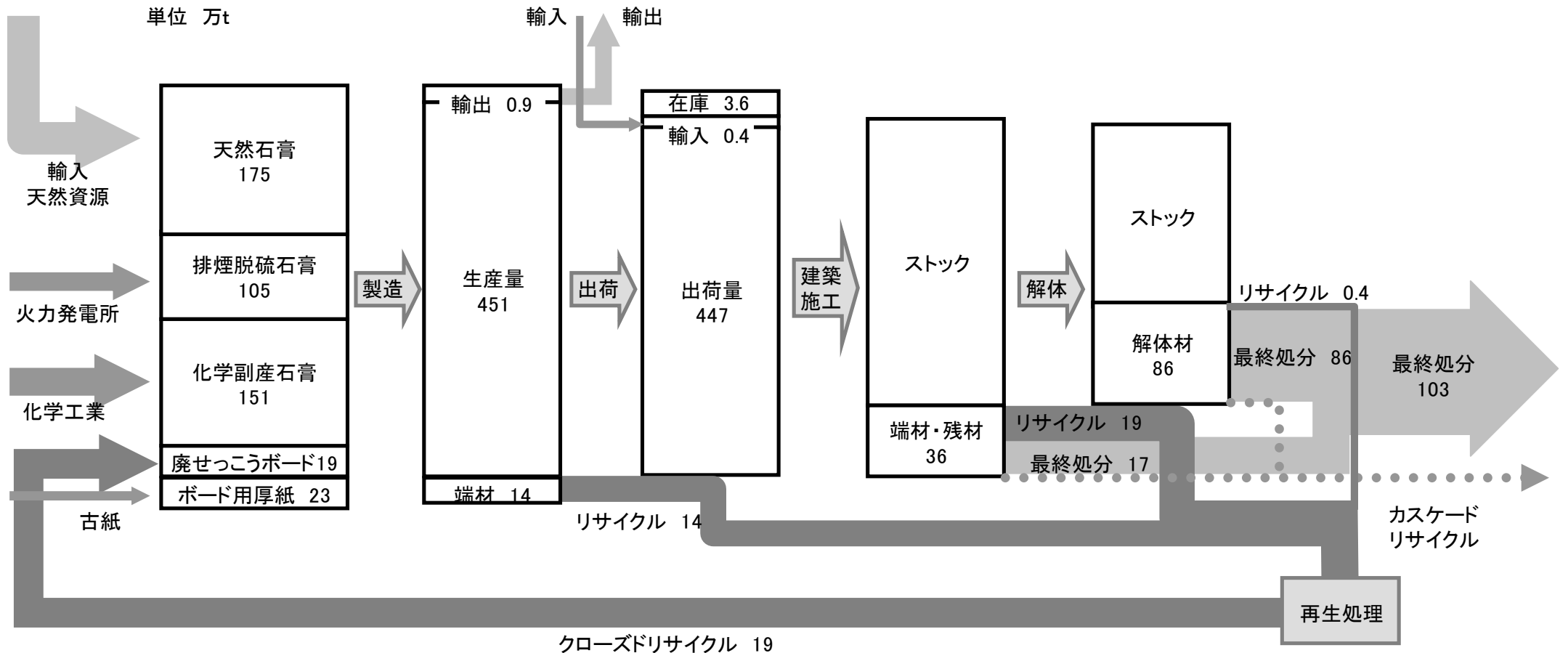


# 木質ボードの資源循環図

(出展: 日本建築学会「建築材料のマテリアルフロート資源利用の課題」2008)

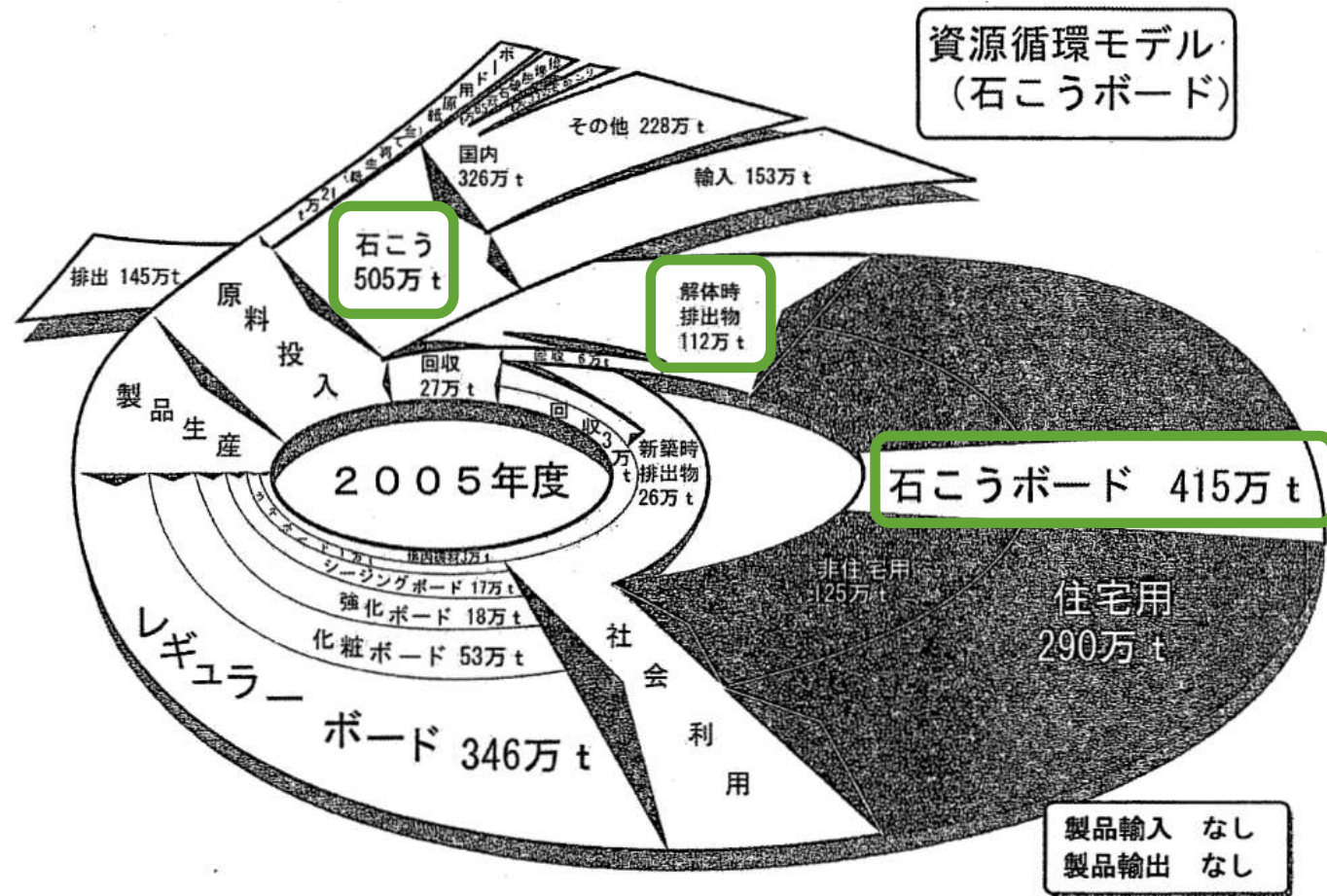


# 石膏ボードのマテリアルフロー



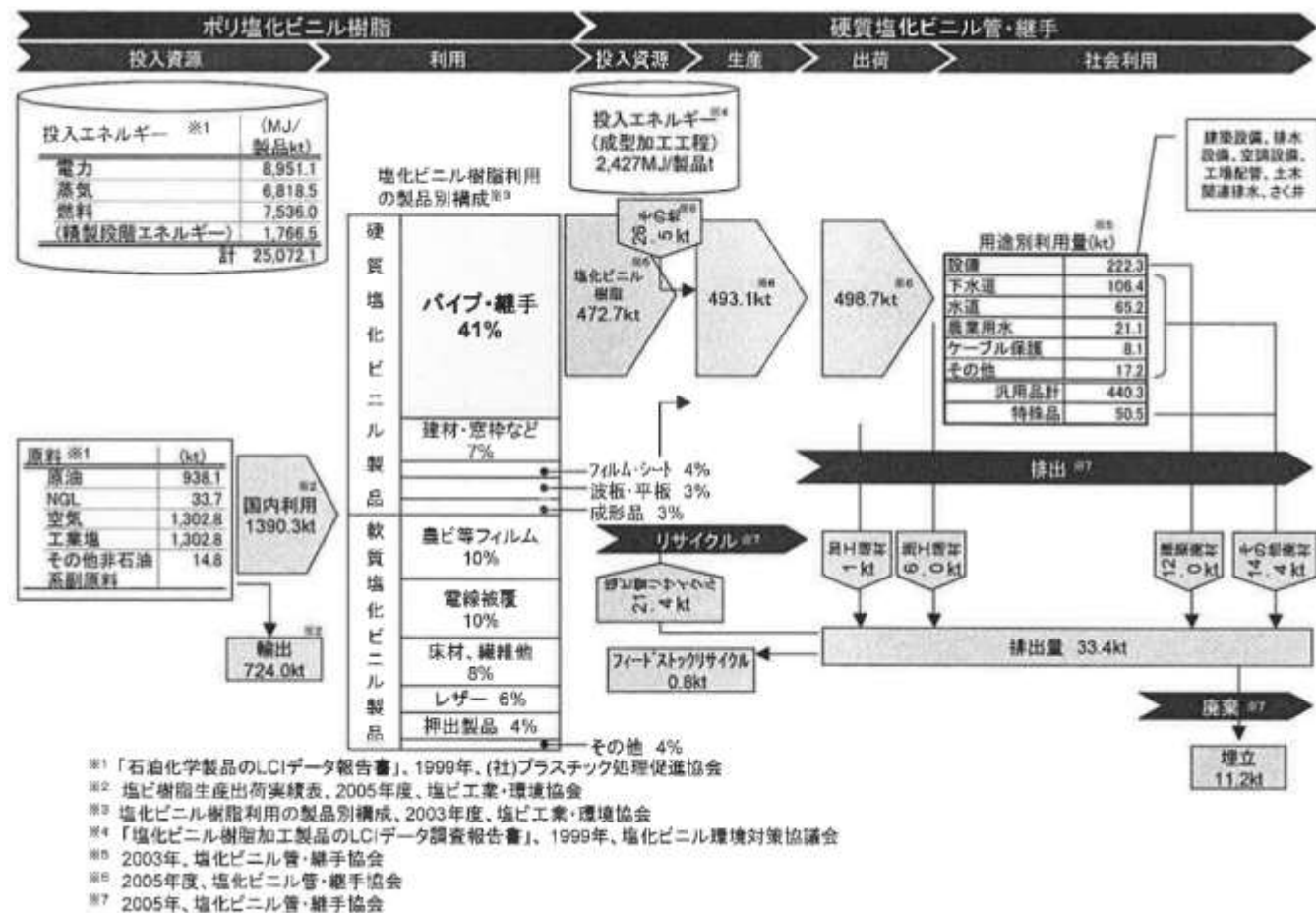
# 石膏ボードの資源循環図

(出展: 日本建築学会「建築材料のマテリアルフロート資源利用の課題」2008)



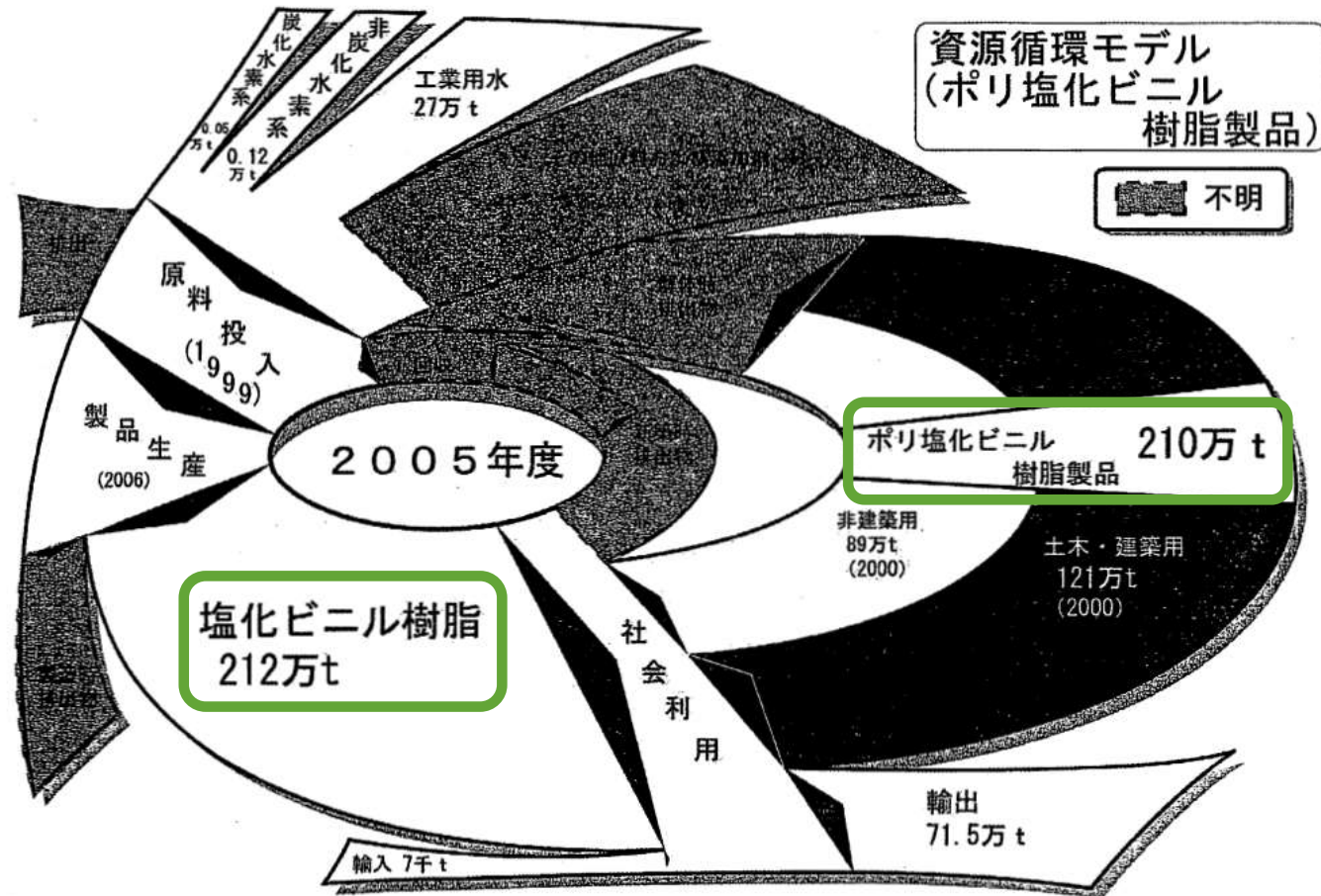
# 塩化ビニル樹脂製品のマテリアルフロー

(出典: 日本建築学会「建築資材の炭素収支を考慮したマテリアルフローと資源利用の課題」)



# 塩化ビニル樹脂製品の資源循環図

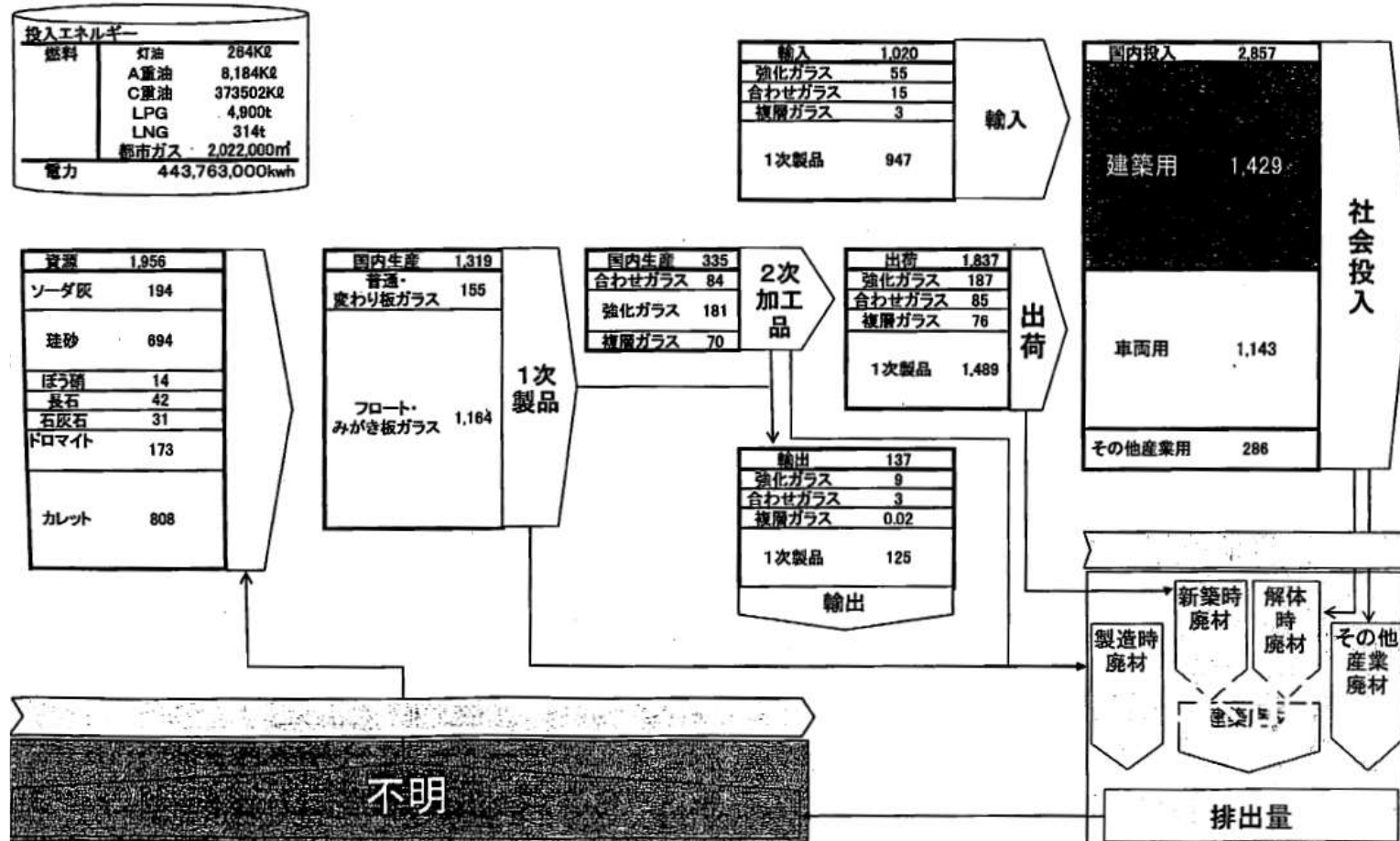
(出展: 日本建築学会「建築材料のマテリアルフロート資源利用の課題」2008)





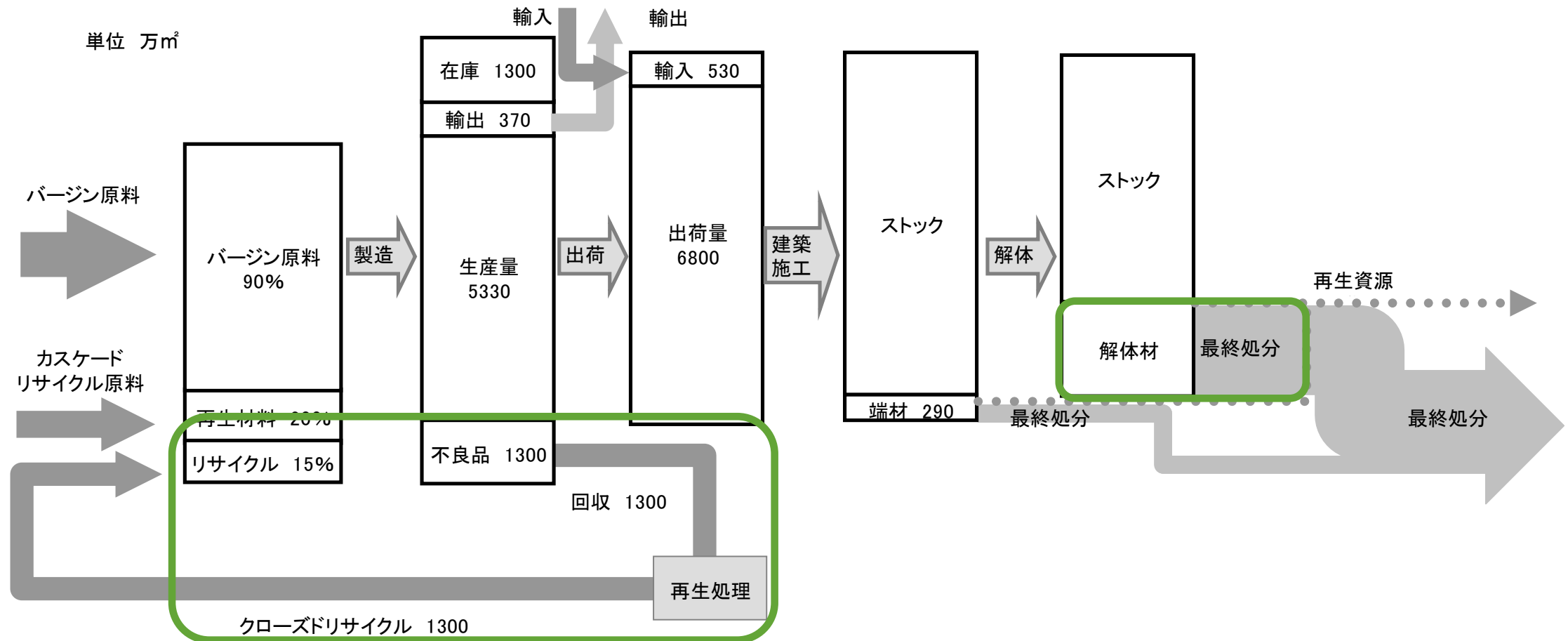
# 板ガラスのマテリアルフロー

(出展: 日本建築学会「建築材料のマテリアルフロート資源利用の課題」2008)





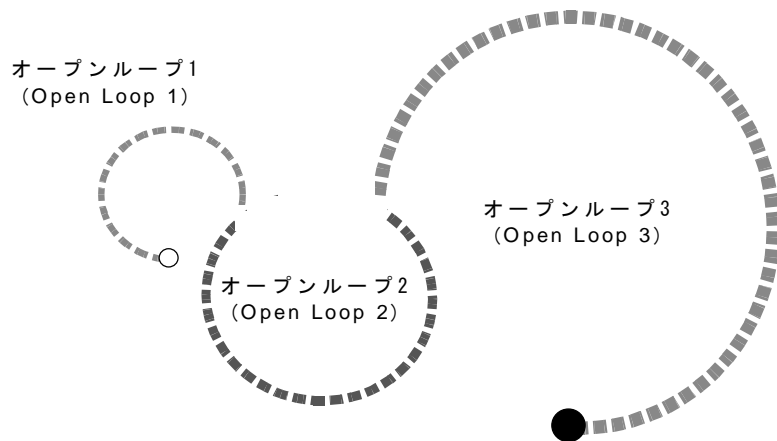
# タイルのマテリアルフロー



# 資源循環(リサイクル)の形態

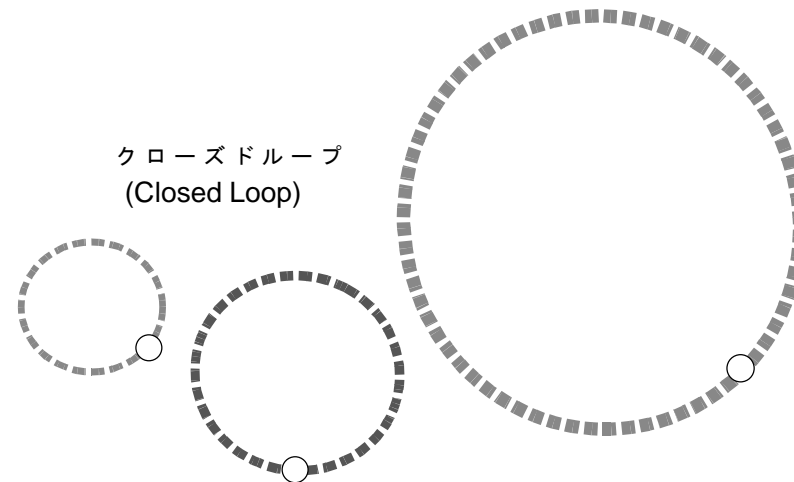
## オープンループ

- 製品が使用限度に到達し、製品自身もしくは部品の更新を行なう場合に、廃棄要素もしくは新規投入要素が発生し、循環領域が拡大するような循環の形態



## クローズドループ

- 製品が使用限度に到達し、製品自身もしくは部品の更新を行なう場合に、廃棄要素もしくは新規投入要素の発生がなく、循環領域が拡大しないような循環の形態

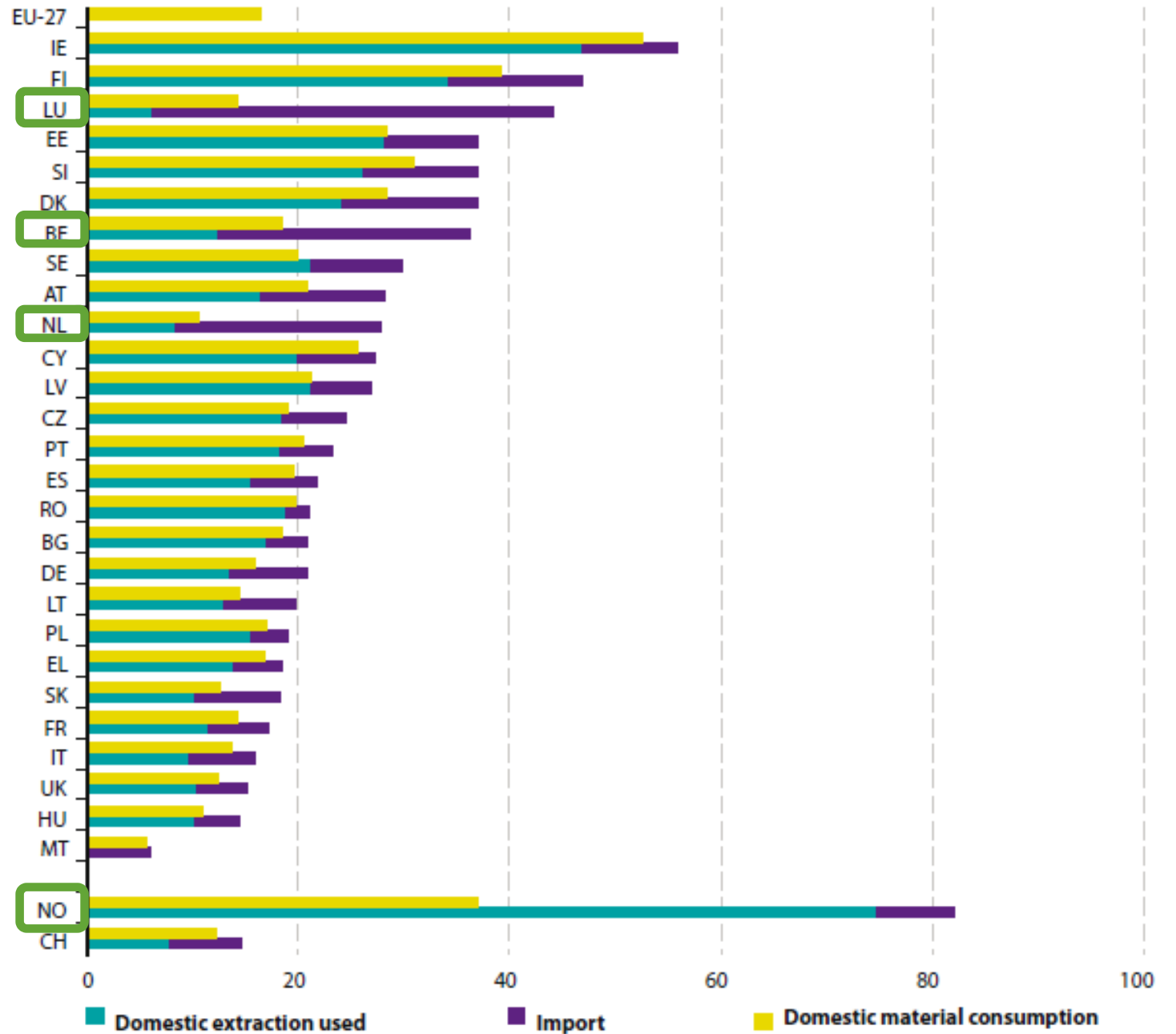




# 資源・建設材料の空間移動

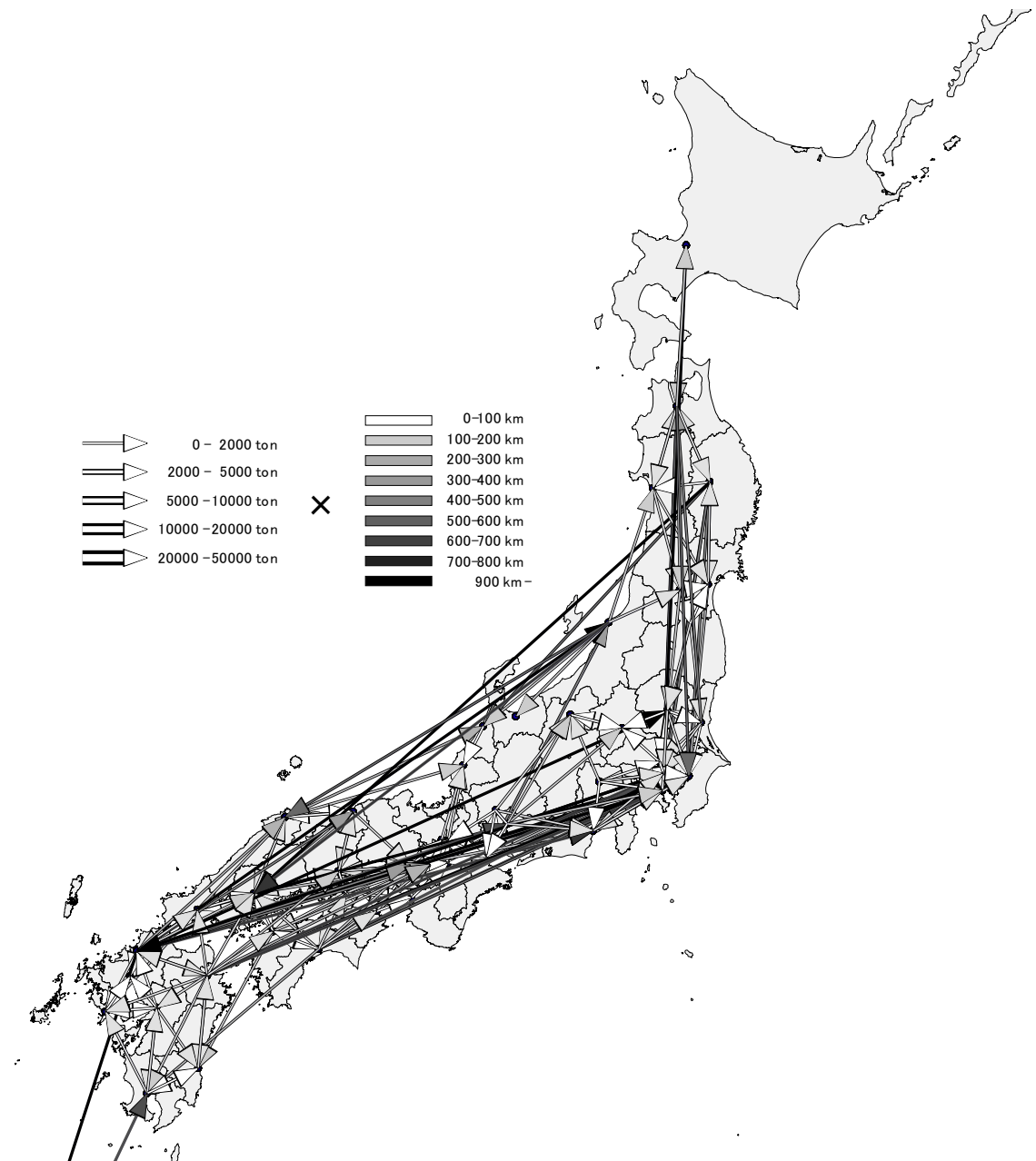
# EU国内の 資源投入・ 資源消費

(出展: Eurostat)



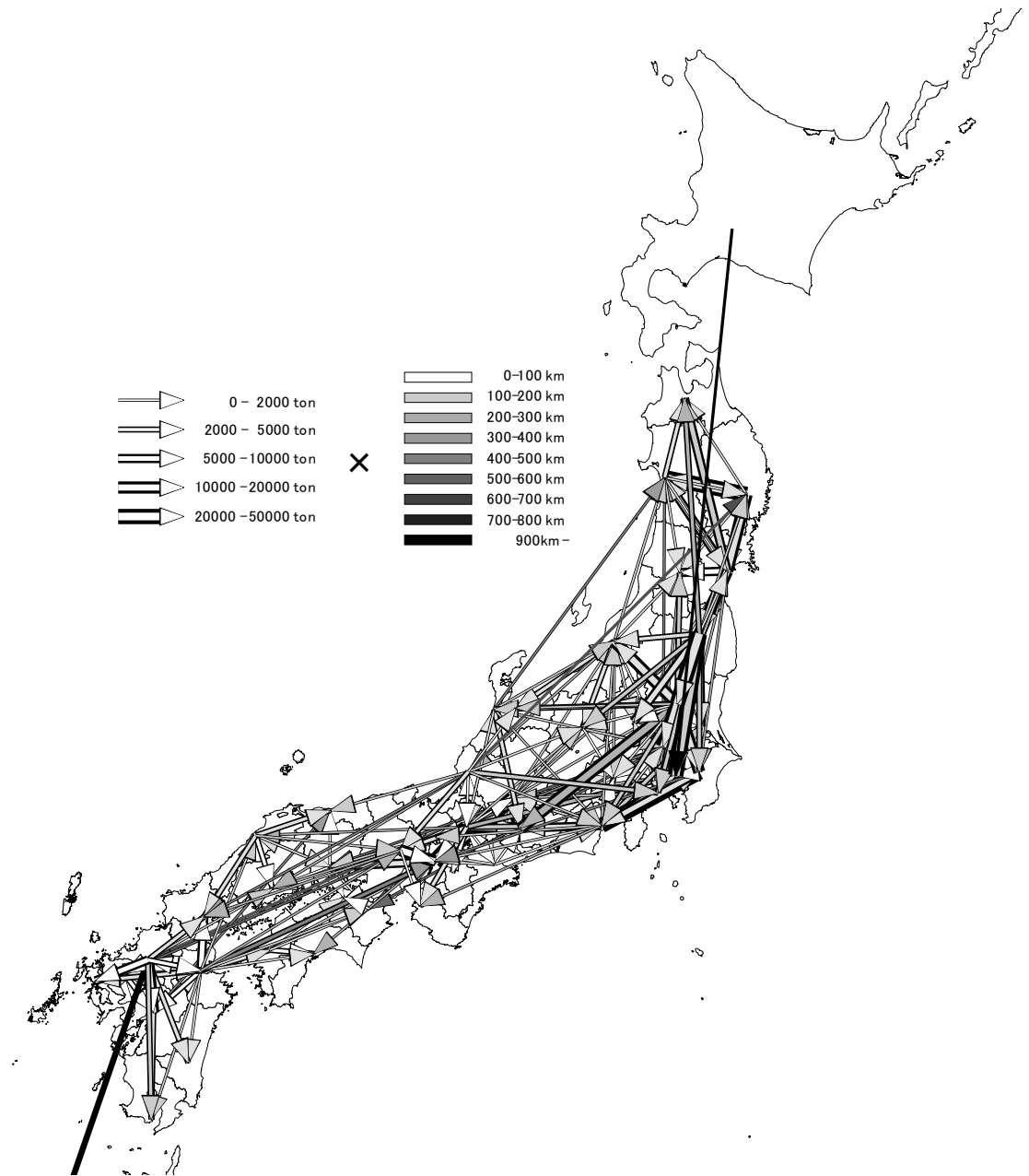
# 碎石の調達

(出展: 日本コンクリート工学会  
「コンクリートセクターにおける  
地球温暖化物質・廃棄物の最  
小化に関する研究委員会報告  
書」)



# 土木系コンクリート製品の移出入

(出展: 日本コンクリート工学会  
「コンクリートセクターにおける  
地球温暖化物質・廃棄物の最  
小化に関する研究委員会報告  
書」)



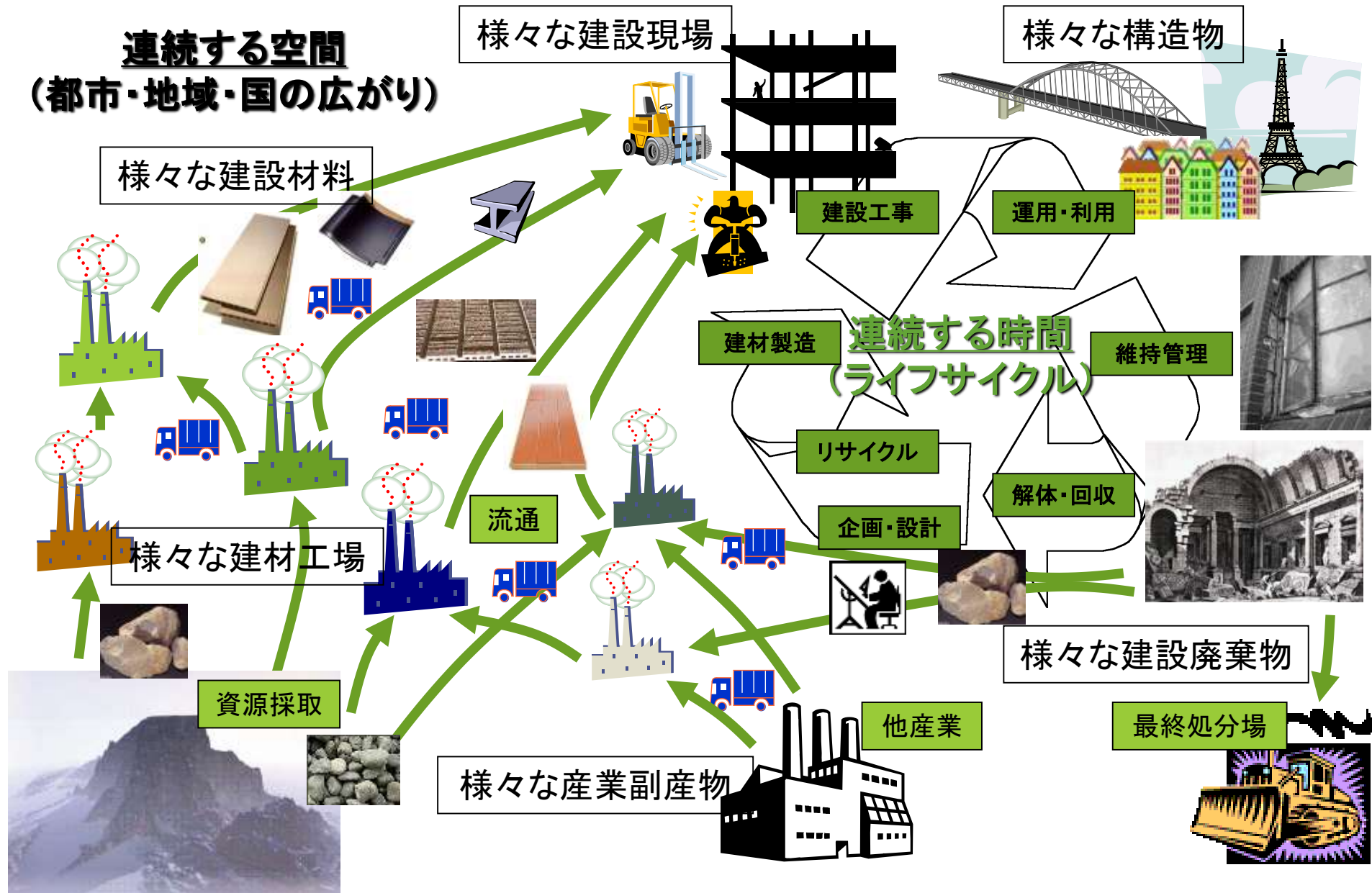


# 建築系コンクリート製品の移出入

(出展: 日本コンクリート工学会  
「コンクリートセクターにおける  
地球温暖化物質・廃棄物の最  
小化に関する研究委員会報告  
書」)



# 連続する空間 (都市・地域・国の広がり)





# 資源枯渇の定義と評価

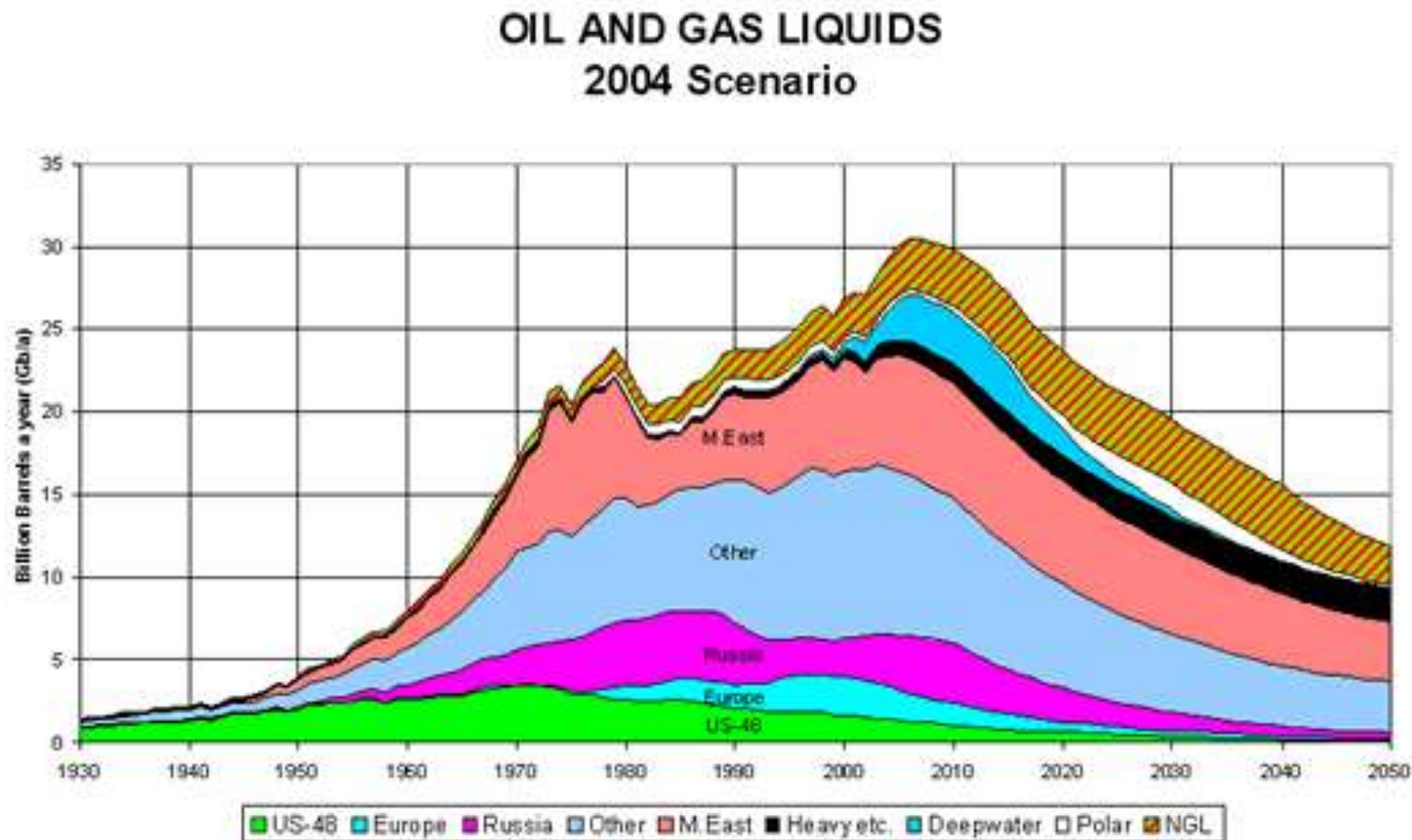
# 資源枯渇とは？

---

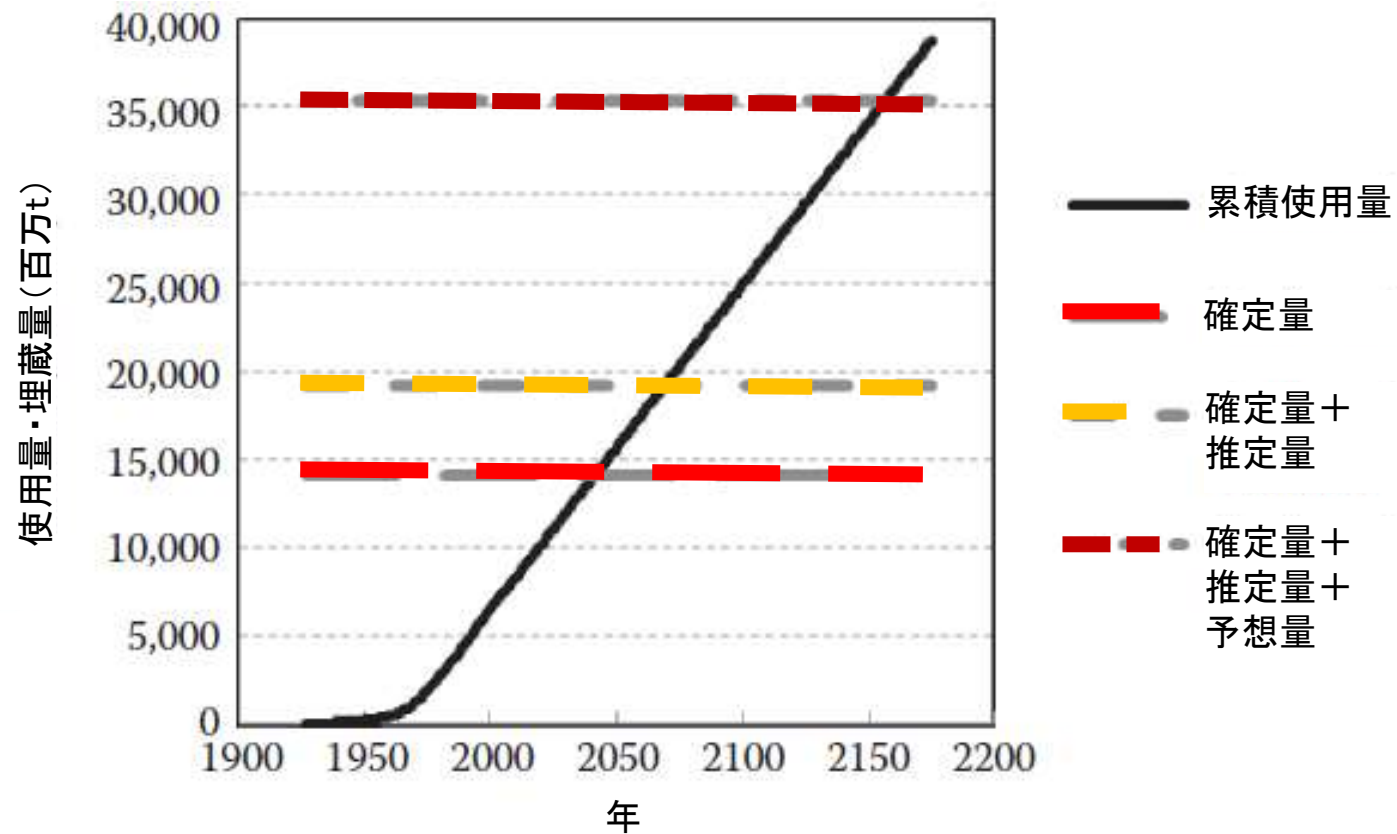
- 将来世代の利用可能な資源量が著しく減少すること
- 資源獲得に大量のエネルギー等の投入が必要になり、資源獲得が困難になること
- 資源に依存した生産活動が困難になること
- 資源価格が著しく高騰すること
- 資源獲得のための環境破壊が増大すること
- 資源を利用する経済的メリットが喪失すること
- コンクリートの原料：主として土石資源
  - 化石燃料や鉱物資源と比較して埋蔵量が豊富
  - しかし、自然保護等の法的規制により採取可能量は事実上制約

# 原油生産量の将来予測

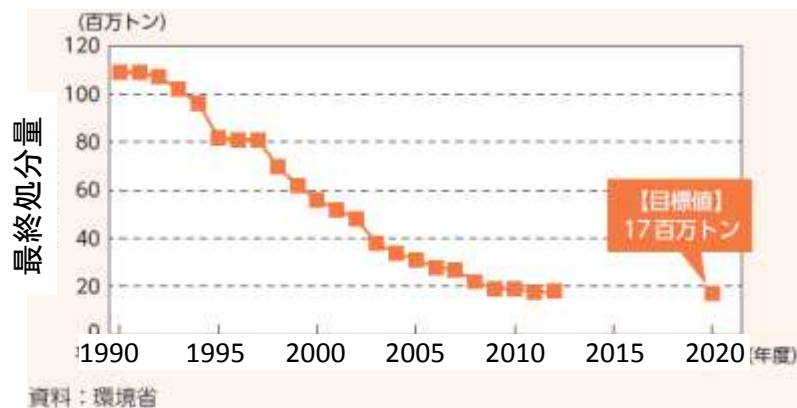
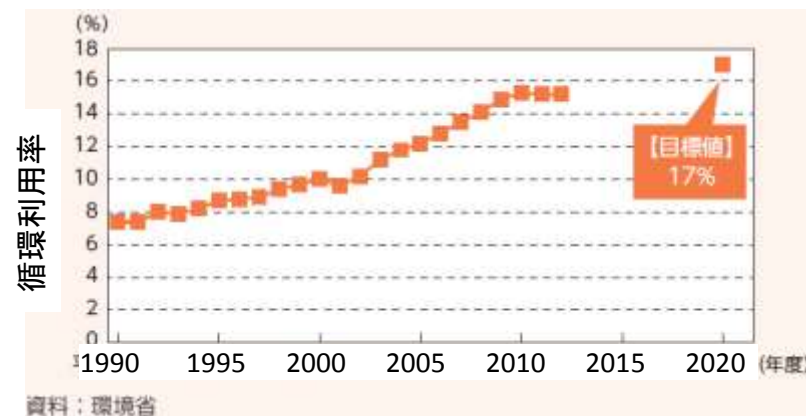
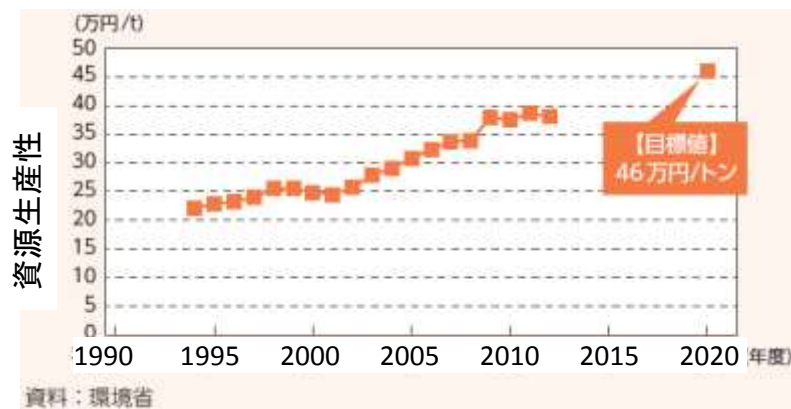
(出典: The Coming Global Oil Crisis website)



# 石灰石資源の枯渇の将来予測



# 資源生産性・資源利用率・最終処分量



- 資源生産性  
= GDP/天然資源等投入量
- 循環利用率  
= 循環利用量/(循環利用量+天然資源等投入量)
- 最終処分量  
= 廃棄物の埋立量

# 生物起源資源と非生物起源資源

---

## BIOTIC(生物起源)

### ■ 非枯渇性・再生可能

- 植物
- 動物
- 茸
- バクテリア

## ABIOTIC(非生物起源)

### ■ 枯渇性・再生不可能

- 土壌
- 水
- 日光
- 空気
- 温度



# 枯渇性資源の評価

---

## ■埋蔵量・耐用年数の逆数

- 可採埋蔵量の逆数

- 耐用年数(可採埋蔵量を年間消費量で割ったもの)の逆数

## ■超過エネルギー

- 天然資源の品位が将来低下することにより、入手に必要なエネルギーの増加量

## ■鉱物のエクセルギー

- 資源が消費されたときに失われるエネルギーの質

## ■関与物質総量(TMR)

- 対象とする資源を入手するために関与した物質の総量

## ■持続可能性の概念に基づいた係数

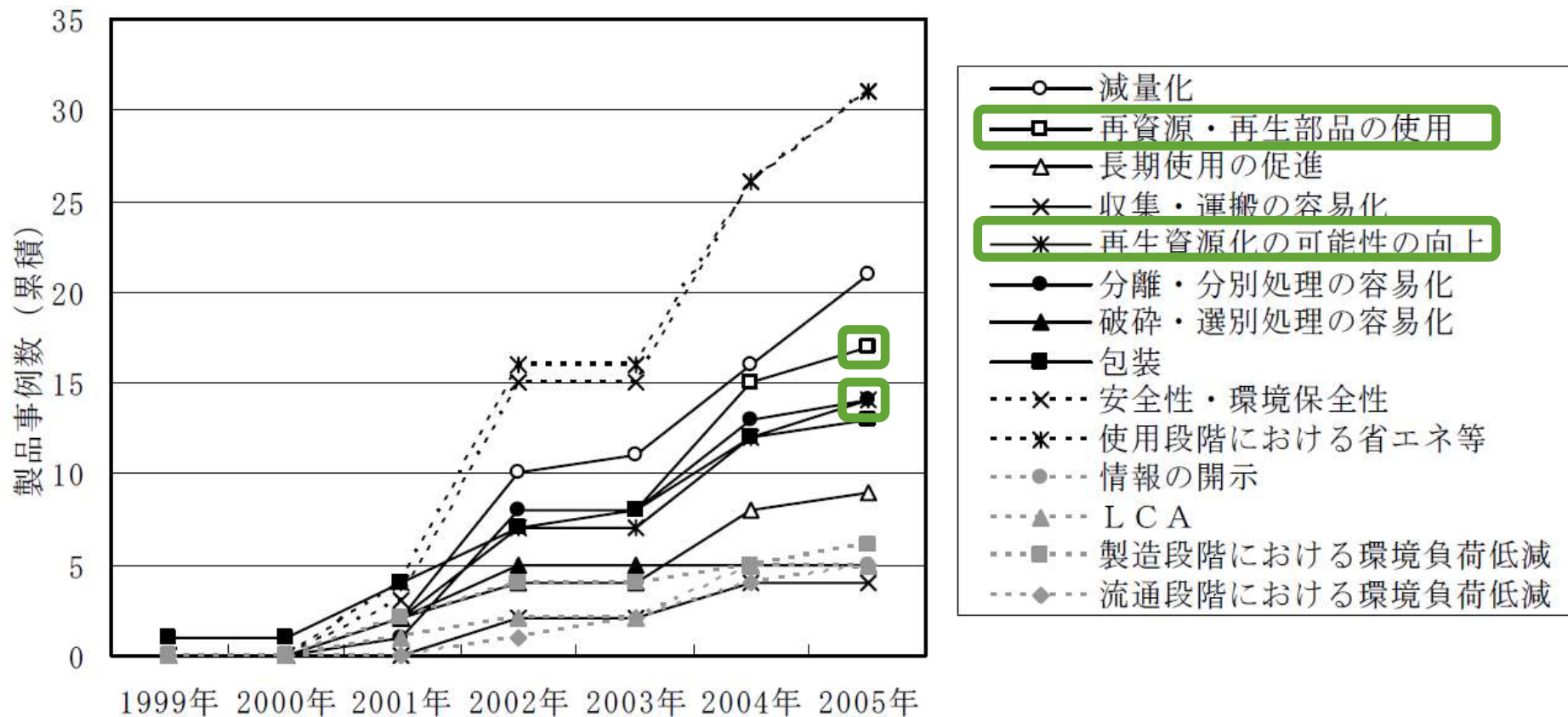
- 持続可能性を考慮したときに利用される代替資源を予め想定しておき、当該資源を入手する際のコストと代替資源を使用したときに発生する環境影響の和



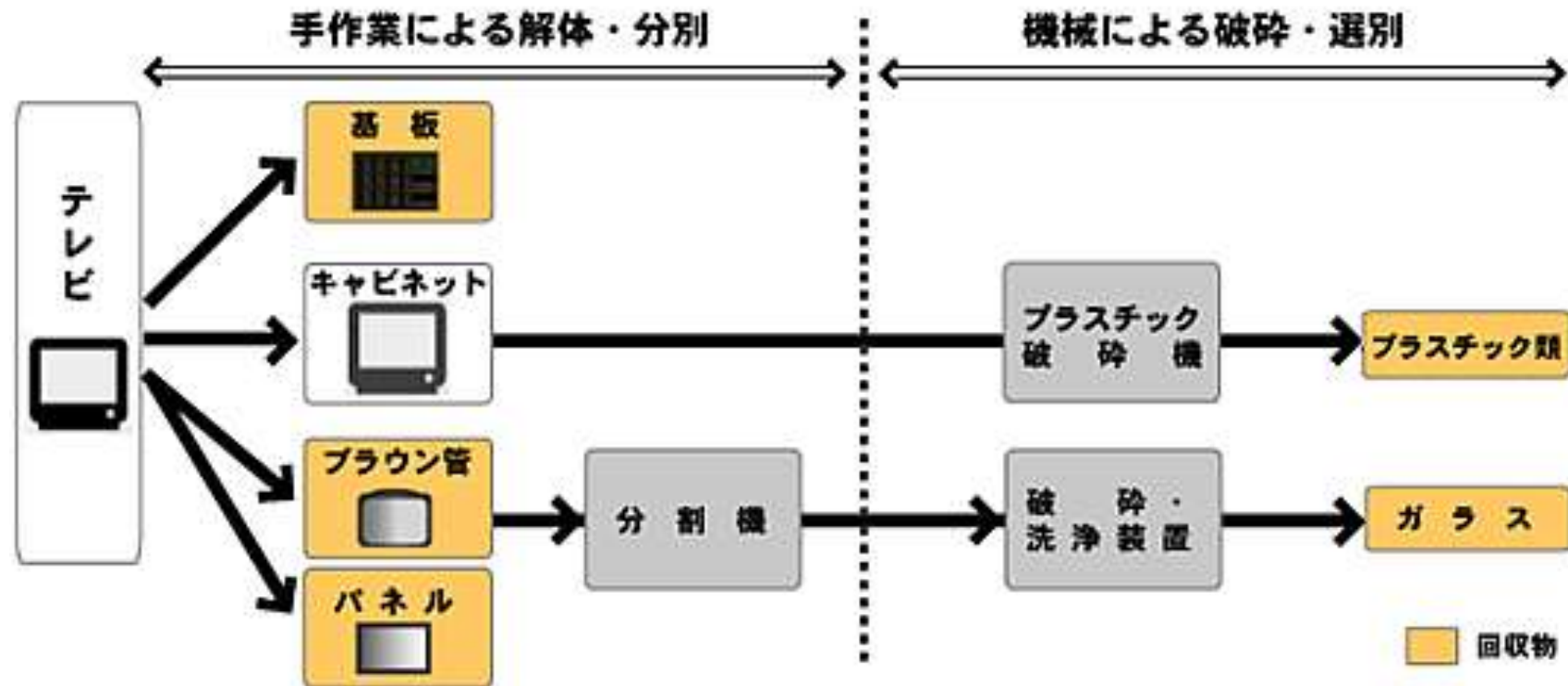
# 他産業の資源循環の現状

# 家電4品目の環境配慮設計

(出典: 国立環境研究所「家電リサイクル法の実態効力の評価」)

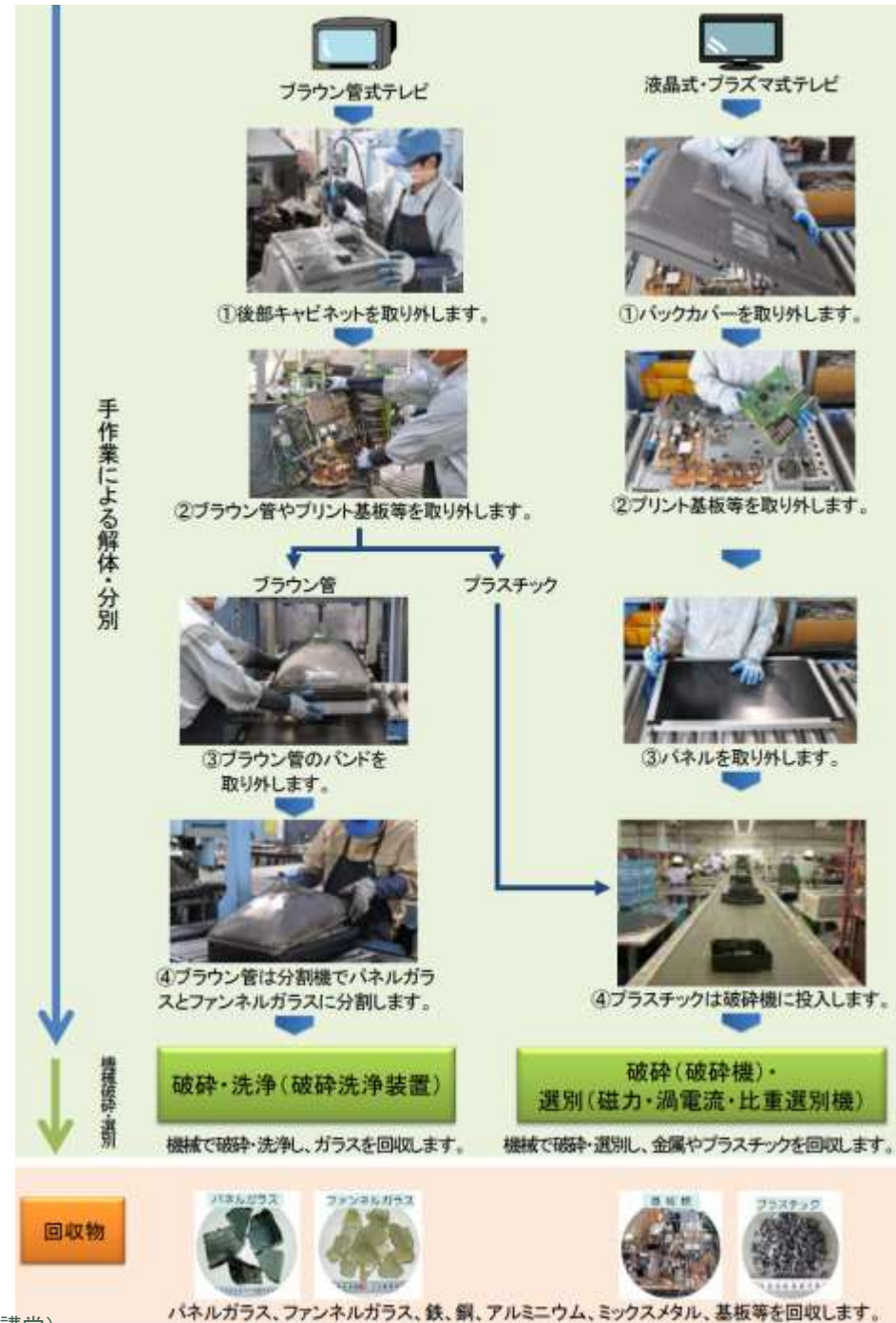


# テレビの処理工程

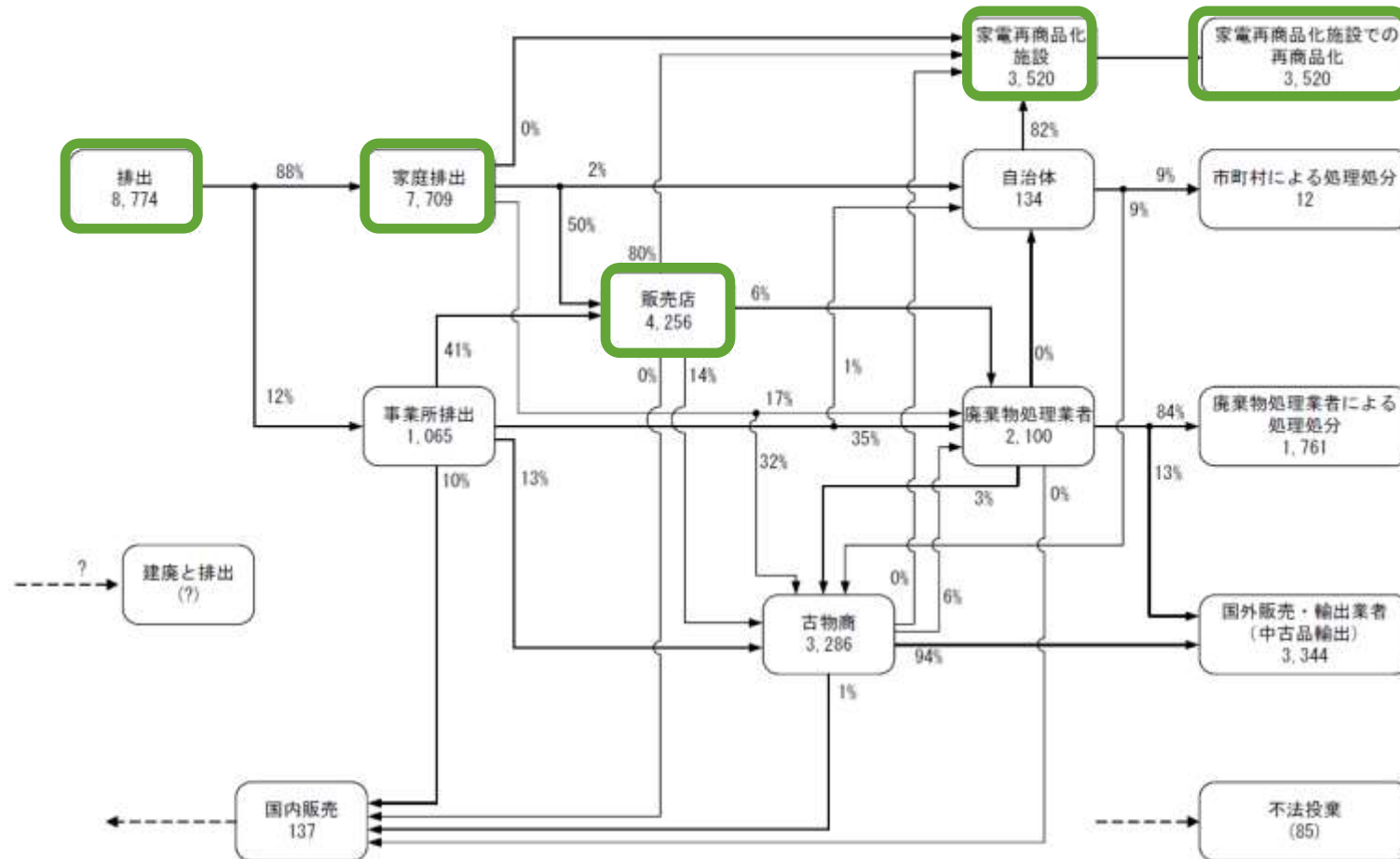


# テレビのリサイクル処理の流れ

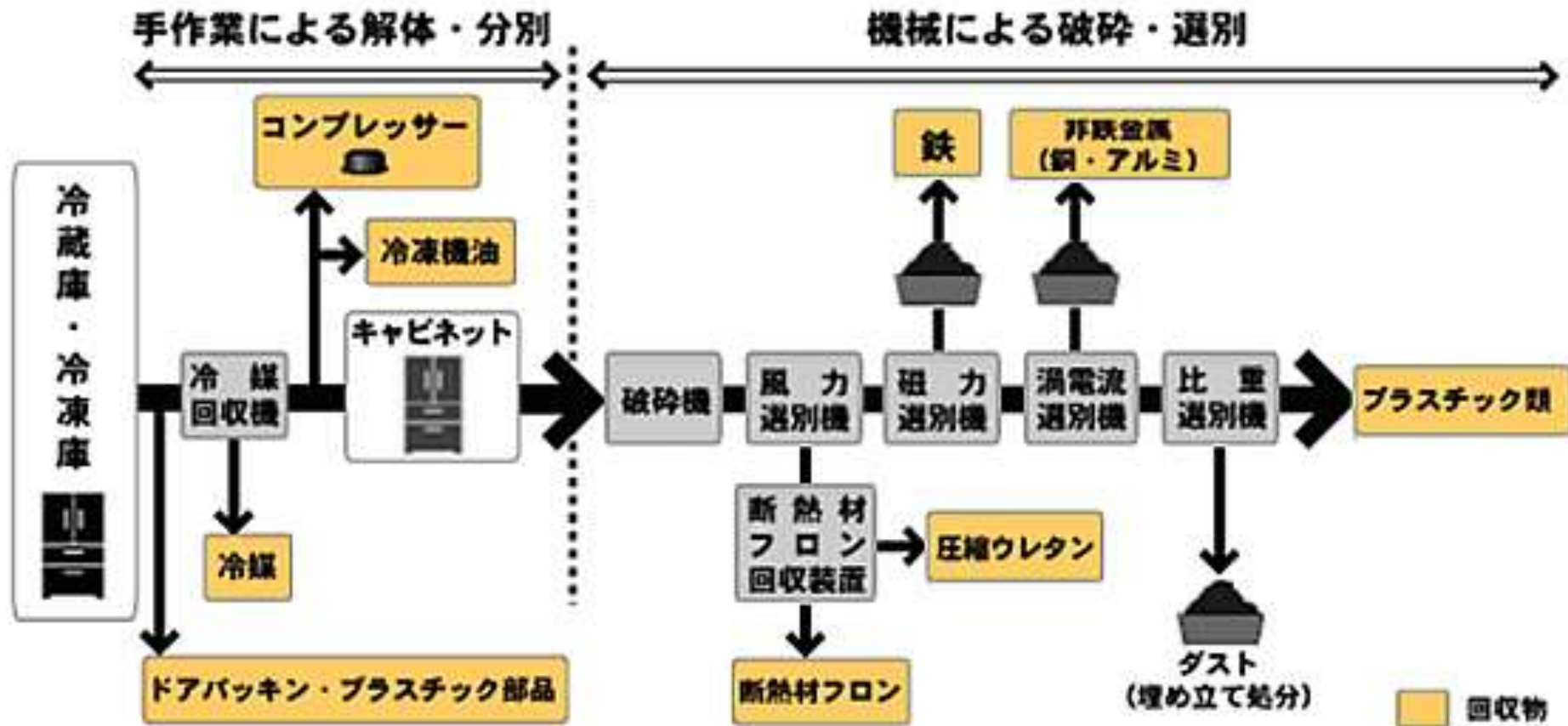
(出展:家電製品協会「写真で見る品目別処理フロー<27年度版>」)



# 家電リサイクル法施行後における 使用済みテレビのフロー

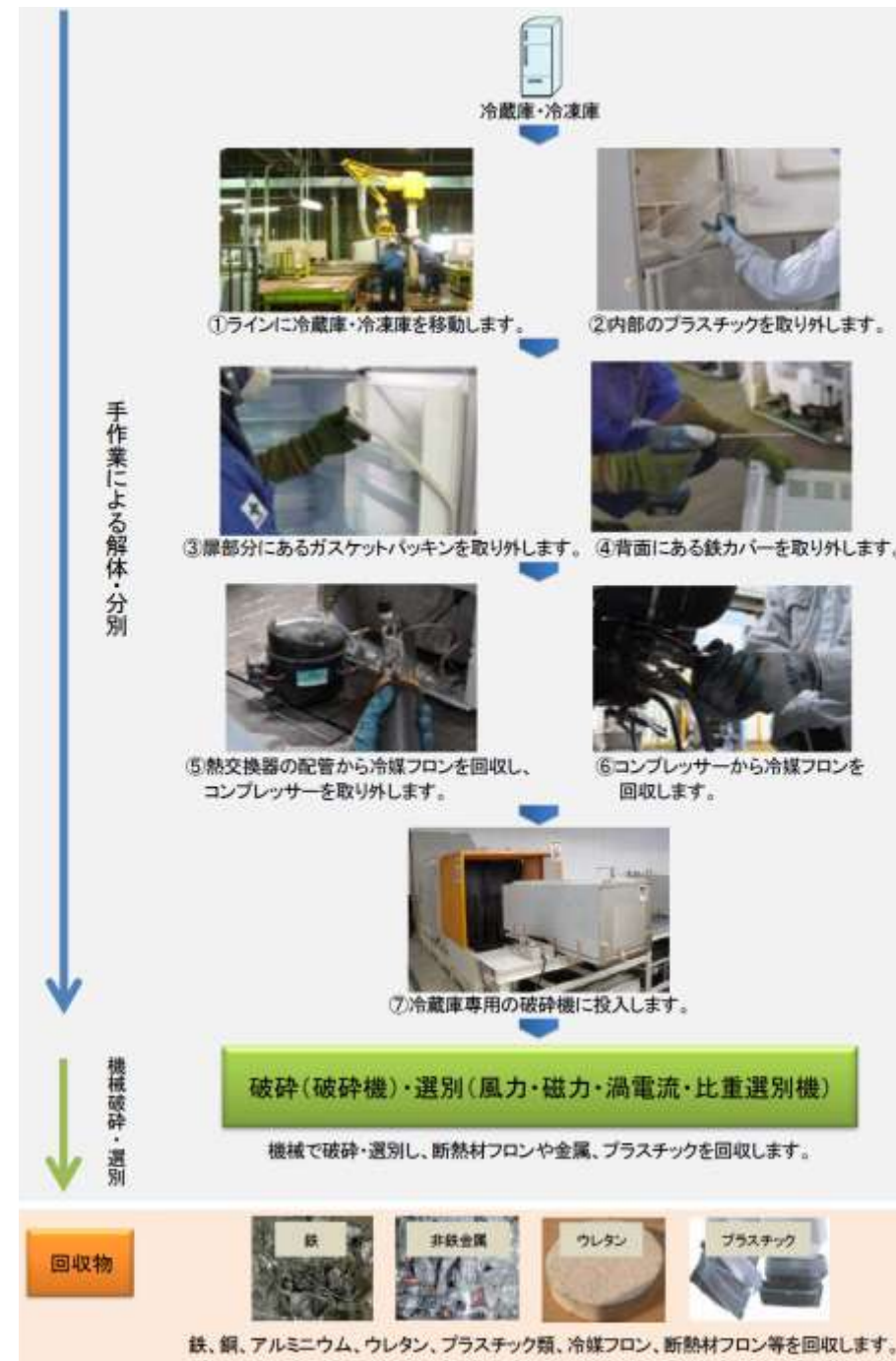


# 冷蔵庫・冷凍庫の処理工程



# 冷蔵庫のリサイクル処理の流れ

(出展:家電製品協会「写真で見る品目別処理フロー<27年度版>」)

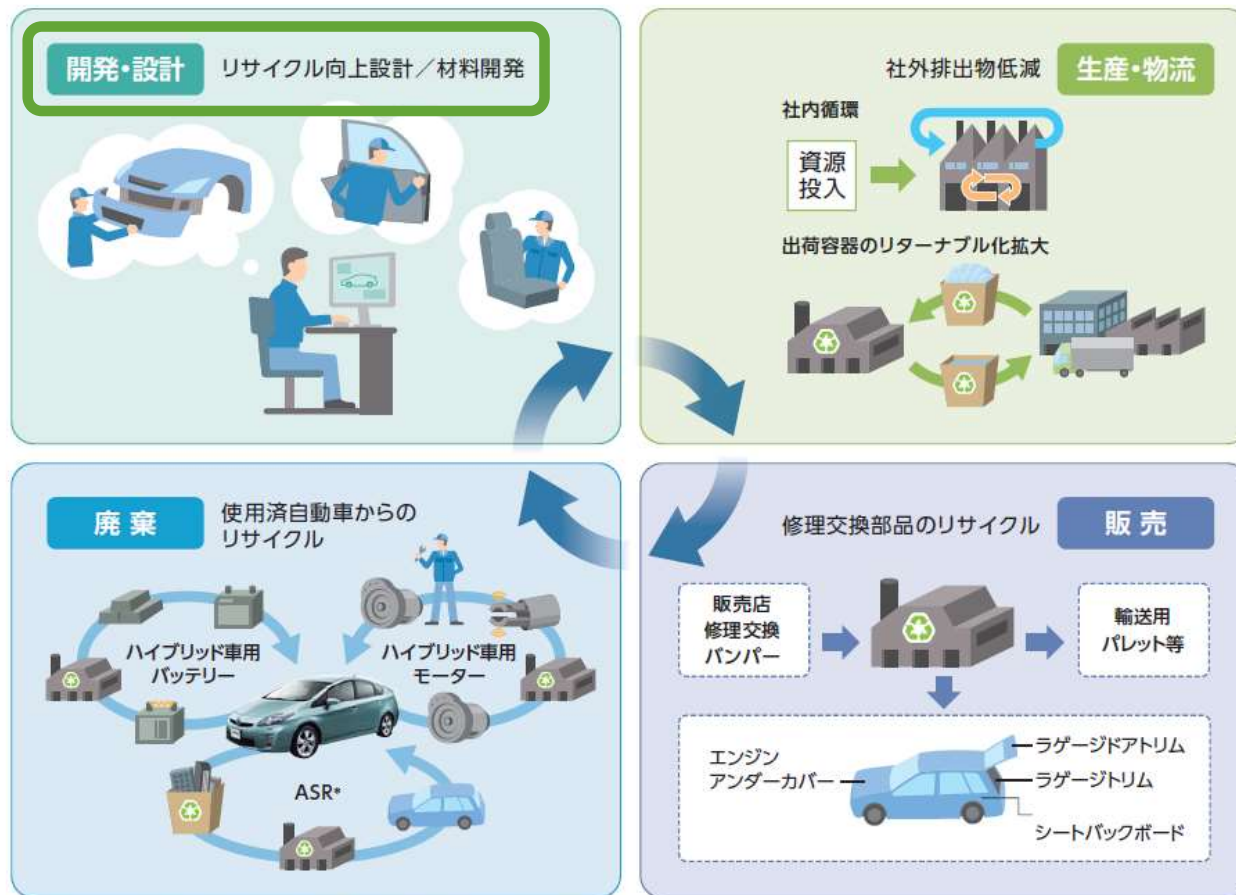






# 自動車のライフサイクル

(出典:トヨタ自動車・環境部「クルマとリサイクル」)



\* ASR:Automobile Shredder Residueの略。使用済自動車のシュレッダーダスト

# 解体しやすい 車両構造

(出典:トヨタ自動車・環境部「クルマとリサイクル」)

## ■ワイヤーハーネス ブルタブ式アース端子部採用

組み付け状態

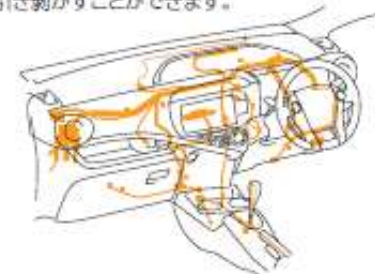


解体時



## ■ワイヤーハーネス配置の工夫

ワイヤーハーネスが他部品に干渉することなく引き剥がすことができます。



## ■「解体性向上マーク」 の採用

解体作業のきっかけとなるポイントに「解体性向上マーク」を付けました。



## ■インストルメントパネルの取外し

V字ミゾの設置によりインパネ部分を強く引っ張ると容易に取り外せるようにしています。



# 自動車のリサイクル率

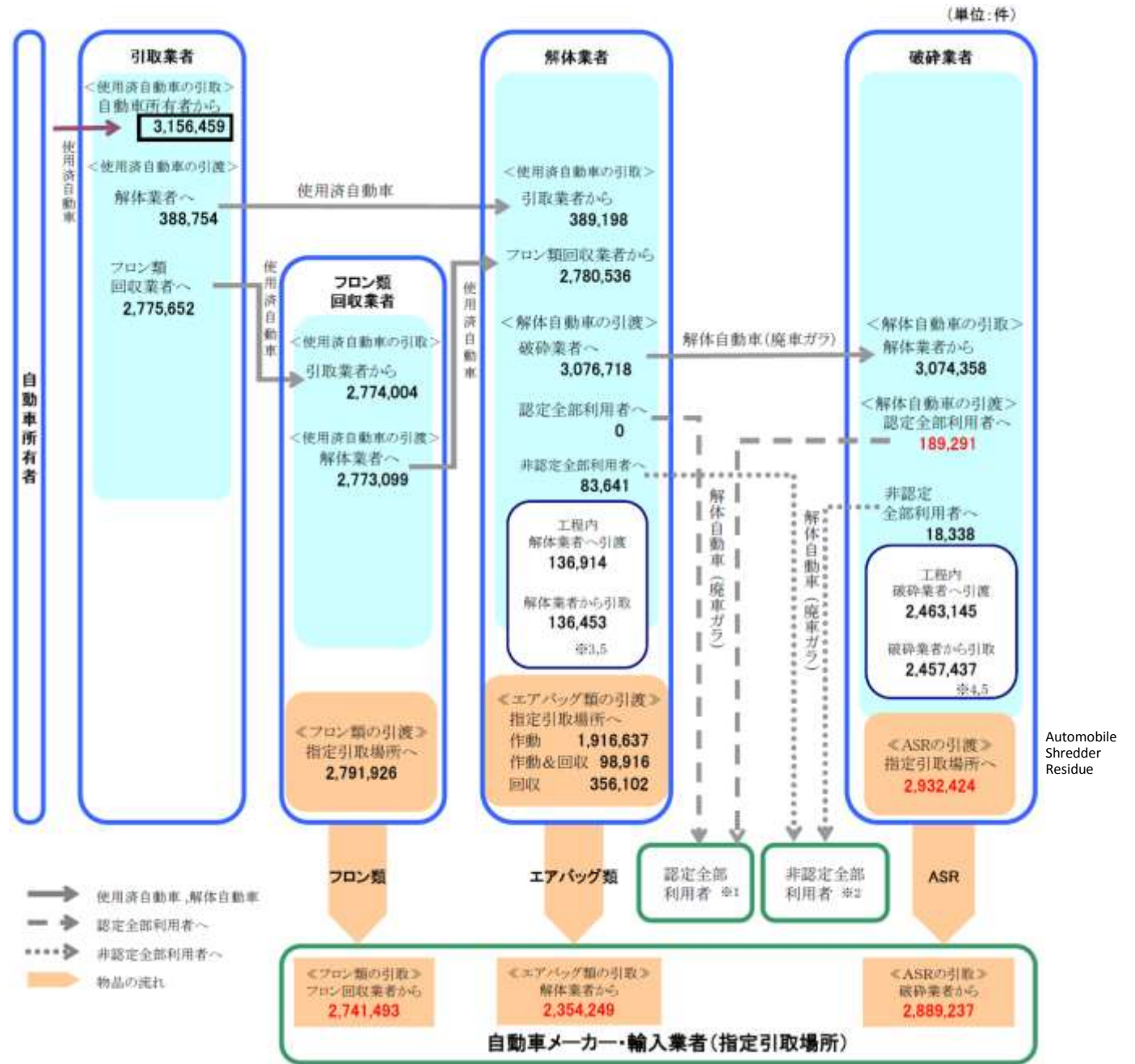
(出典:自動車リサイクル促進センターHP、<http://www.jarc.or.jp/automobile/manage/>)

自動車リサイクル法で適正処理されたクルマのリサイクル率は**約99%**です。

部品・資源としてリサイクル	自動車リサイクル法の対象物品 お支払いいただいた <b>リサイクル料金</b> で処理		
 <p>エンジン・ボディ等</p>	<p>埋立地に余裕なし</p>  <p>シュレッダーダスト (廃車くず)</p>	<p>処理に専門技術が必要</p>  <p>エアバッグ類</p>	<p>地球温暖化等防止</p>  <p>フロン類</p>
<p><b>中古部品として</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●エンジン</li> <li>●トランスミッション等</li> </ul> <p><b>原材料として</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●タイヤ(燃料)</li> <li>●ボディ(鉄)等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ウレタン・繊維 →熱エネルギーとしてリサイクル</li> <li>●ガラス等 →舗装材などにリサイクル</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●安全に適正処理</li> <li>●金属部分は資源としてリサイクル</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●無害化</li> </ul>

# 使用済自動車、解体自動車及び特定再資源化等物品の引取り及び引渡し状況

(出典: 経済産業大臣・環境大臣「平成27年度使用済自動車、解体自動車及び特定再資源化等物品の引取り及び引渡し状況の公表について」)



Automobile Shredder Residue



# 建設材料の資源循環に関する指針・提言

# 再生骨材の品質基準の変遷

年	基準制定機関・団体 基準名		粗骨材		細骨材	
			密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)
1977	建築業協会 再生骨材および再生コンクリートの使用基準(案)・同解説		2.2 以上	7 以下	2.0 以上	13 以下
1986	建設省 再生粗骨材品質基準 再生粗骨材を用いるコンクリートの使用基準					
1994	建設省 コンクリート副産物の再利用に関する用途別暫定基準	1種	—	3 以下	—	5 以下
		2種	—	5 以下	—	10 以下
		3種	—	7 以下	—	
1999	日本建築センター 建築構造用再生骨材の品質基準		2.5 以上	3.0 以下	2.5 以上	3.5 以下
2000	日本コンクリート工学協会 TR A 0006(再生骨材を用いたコンクリート)		—	7 以下	—	10 以下
2005	日本コンクリート工学協会 コンクリート用再生骨材	JIS A 5021 (Class H)	2.5 以上	3.0 以下	2.5 以上	3.5 以下
2006		JIS A 5022 (Class M)	2.3 以上	5.0 以下	2.2 以上	7.0 以下
2007		JIS A 5023 (Class L)	—	7.0 以下	—	13.0 以下

# 諸外国の再生骨材コンクリート事情

## ■韓国 (KS F 2573)

圧縮強度	骨材		適用範囲
	粗骨材	細骨材	
21~27 N/mm <sup>2</sup>	天然粗骨材: 70%以上 再生粗骨材: 30%以下	天然細骨材	柱、梁、床スラブ、耐力壁など
<21 N/mm <sup>2</sup>	天然粗骨材: 70%以上 再生粗骨材: 30%以下	天然細骨材: 70%以上 再生細骨材: 30%以下	ブロック、路盤など

## ■ベルギー

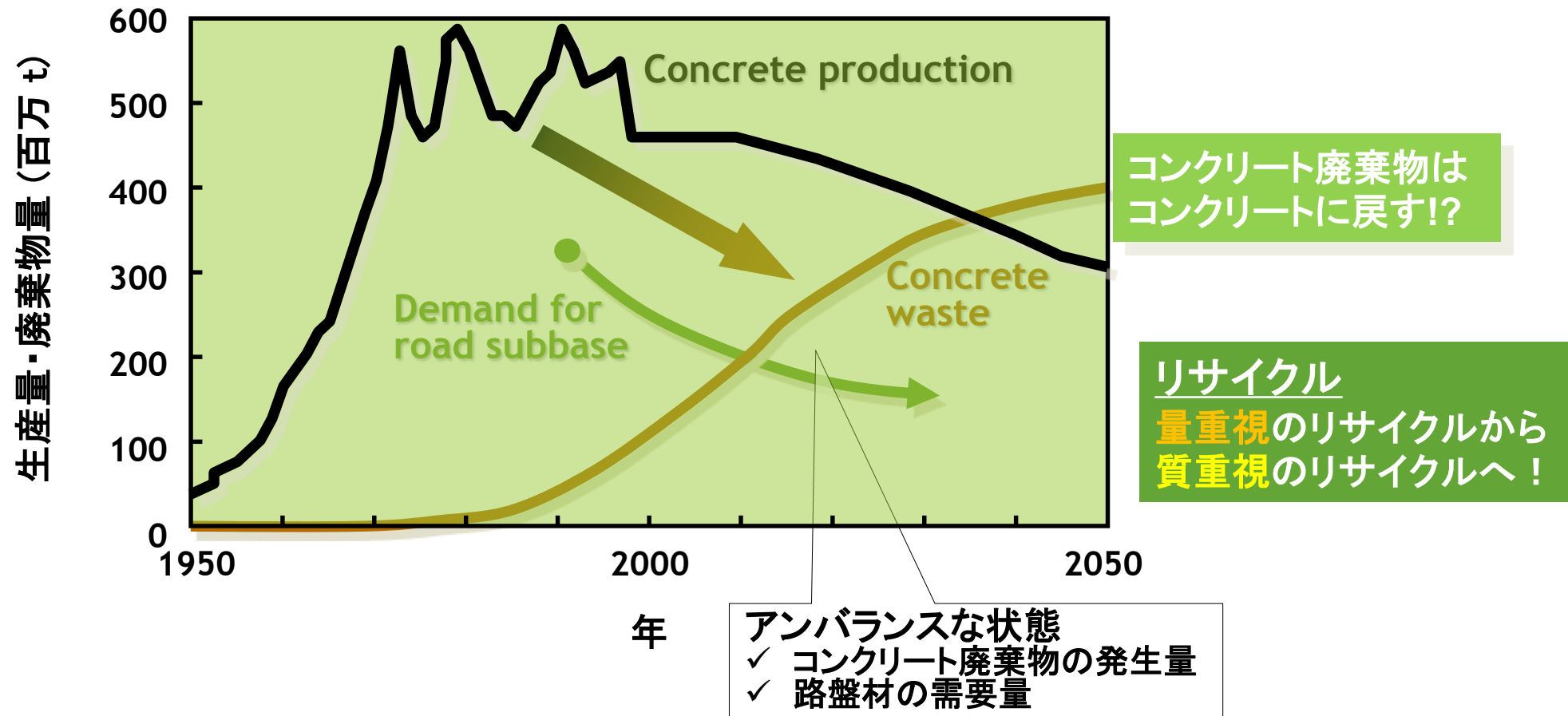
□再生骨材の使用: 全骨材の20%まで



# 再生骨材・再生骨材コンクリートに関する諸規定の改正検討

- 異なる種類の再生骨材(再生骨材L+天然骨材)を混合した場合の扱い
- 再生骨材Lコンクリートの区分の簡素化
- 試験検査頻度の低減
  - 再生骨材Lコンクリートのスランプ試験
  - 再生骨材Mコンクリートの塩化物含有量試験
- 原骨材・原コンクリートの特定方法の多様化
  - コンクリート塊受入時における特定方法
- 再生骨材Mコンクリートのアルカリシリカ反応抑制対策に関わる規制の緩和
- 異なる工場で製造されたコンクリートから得られた回収骨材の扱い

# 将来のコンクリート廃棄物量

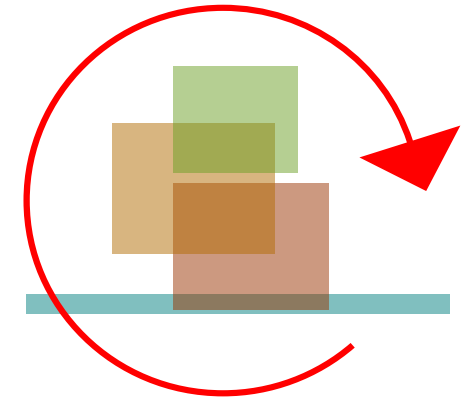


# 従来の構造物生産システム

## ■ 順工程生産システム

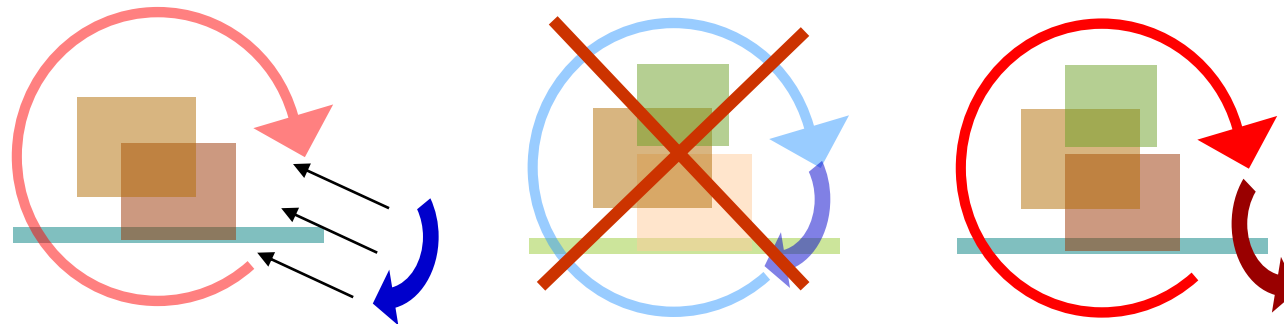
- 生産の順工程における合理化と低コスト化を追求したシステム
- 製品および構成材料の易分解性を考慮せず、生産におけるコスト低減および効率に重点を置いたシステム

問題点	内容
品質低下	再生コンクリートは、一般的に原コンクリートよりも性能低下する。材料設計時に製品の逆工程を考慮しないため、骨材の性能が自然に低下するからである。その再生システムは、廃棄物発生を低減する効果はあるが、再生コンクリートの性能・価値まで回復できない。
供給不安定	再生コンクリートは、既存構造物から発生した再生骨材を原料とし、メンテナンス用に備蓄した再生骨材を原料としないため、必然的に、原料回収量が変動し、再生コンクリートの供給量も不安定になる。
価格不安定	再生コンクリートの市場価格は、原コンクリートとの比較により決定されるため、それ自身の処理コストの増減に関わらず、原コンクリートのコスト変動の影響を大きく受ける。また上記のような品質低下のため、必然的に価格が低下する傾向にある。
流通不安定	品質、供給、価格の不安定性が存在する再生コンクリートを継続的に需給し、安定的な循環生産を実現するためには、根本な問題の解決が不可欠である。従って、現時点では、再生コンクリートによる閉じた循環系を構築することは困難を極める。
環境負荷増加	順工程生産システムを維持したまま、逆工程システムの整備およびリサイクル品の合理的運用を実行する場合、多大な環境負荷が発生する。地球環境的な持続性を考慮した場合、リサイクルよりもエネルギー的に有利な廃棄処分が適当であるという見解が頻発するようになる。



# 現在のリサイクル(逆工程付加型)

- 順工程生産システムに逆工程を付加する→普通ではうまくいかない
- 組立性と分解性を導く仕組みが共存していない(=分離している)
- 結果
  - 再生砕石もしくは低品質再生骨材として再資源化される
    - ◆ 要求される性能が低く、需要が続く限りは有効
    - ◆ 道路用路盤材に関しては、今後は需要が急速に低下
    - ◆ 30年経過しても問題が解消されない事態は想定外



# リサイクラブル製品（循環戦略）

---

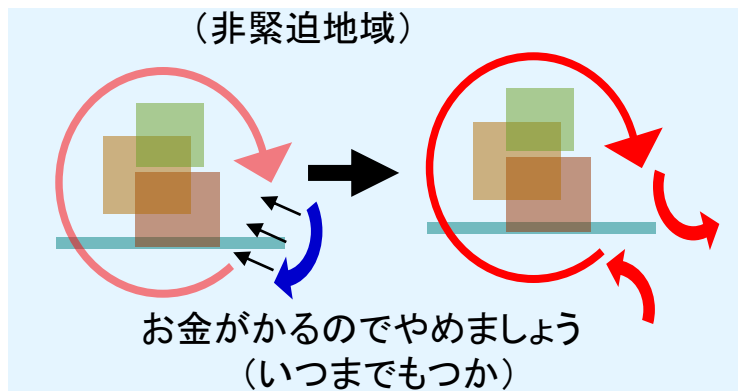
- **IMS** インテリジェント・マニュファクチャリング・システム
- **IM** インバース・マニュファクチャリング
  - 戦略たてて、設計し、組立、使用し、解体し、再生する
- **GM** ジェネティック・マニュファクチャリング
  - 環境条件に最適な成長を目的とした組立手法
- **UM** ユビキタス・マニュファクチャリング
  - どのような条件においても長く生き続けられる組立手法
- **ADD** アセンブリ・ディスアセンブリ・デザイン（組立性分解性設計）
  - 分解と組立が同一プロセスで行われる組立分解手法

参考) 山際康之:組立性と分解性が共存するための設計法の研究

# リサイクルスタンダード

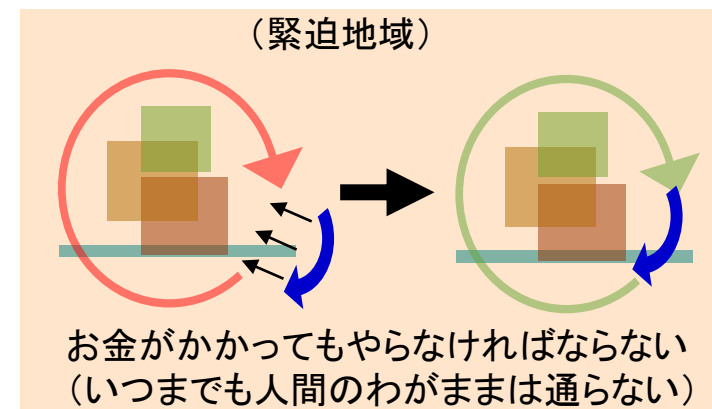
## 従前(非緊迫地域)

- オープンループ型の生産システム
  - 循環領域が広いから可能
  - 最終処分・路盤材化すればいい
  - 緊迫地域では通じないロジック



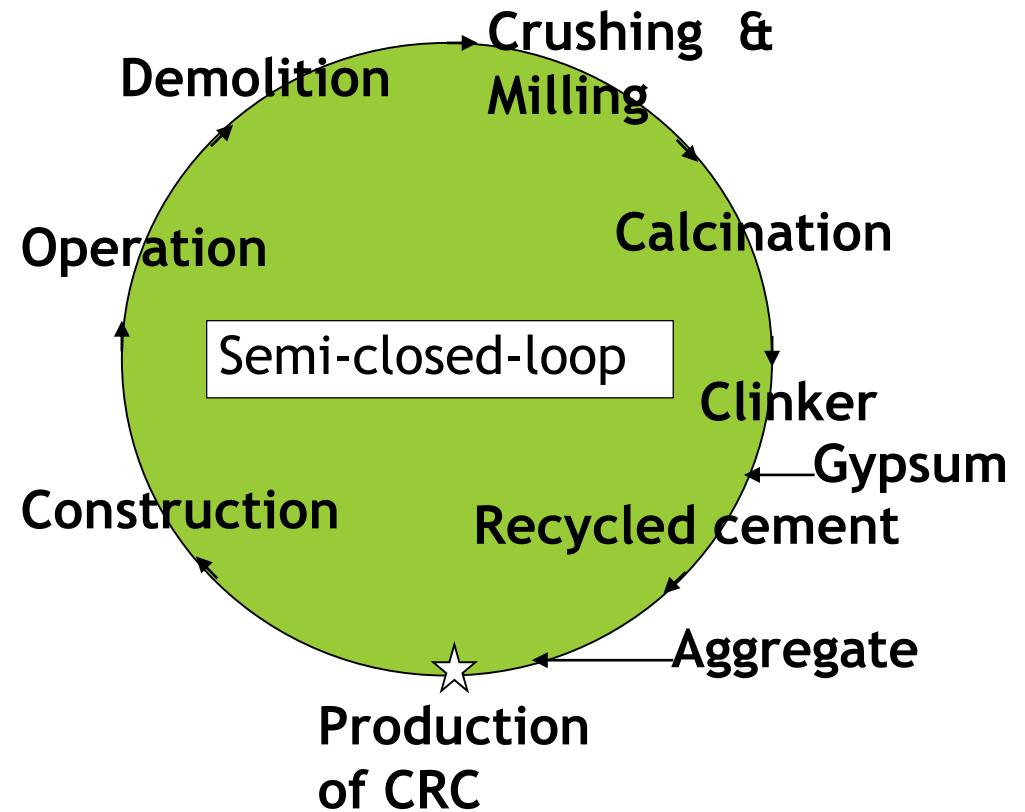
## 今後(緊迫地域、特に都市部)

- クローズドループ型の生産システム
  - 資源は保存されやすい
  - バージン材を使用した場合よりコストアップ



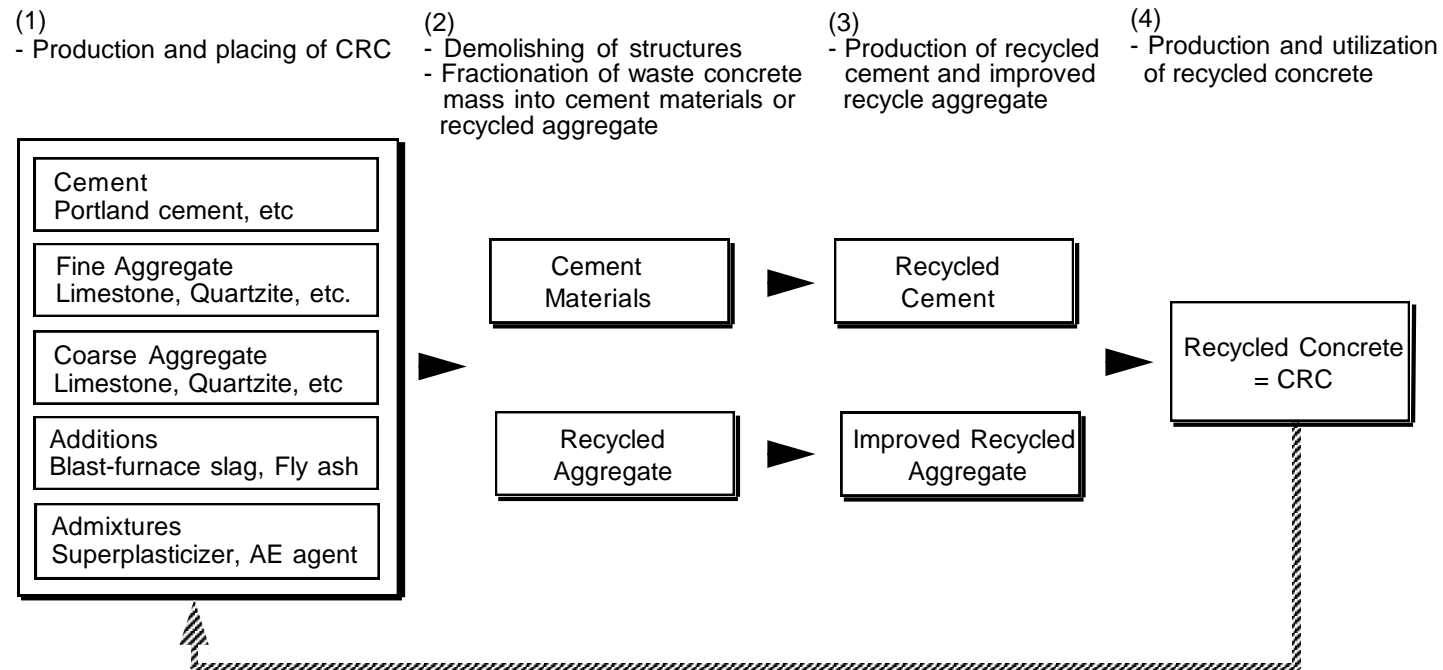
# セメント回収型完全リサイクルコンクリート

■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



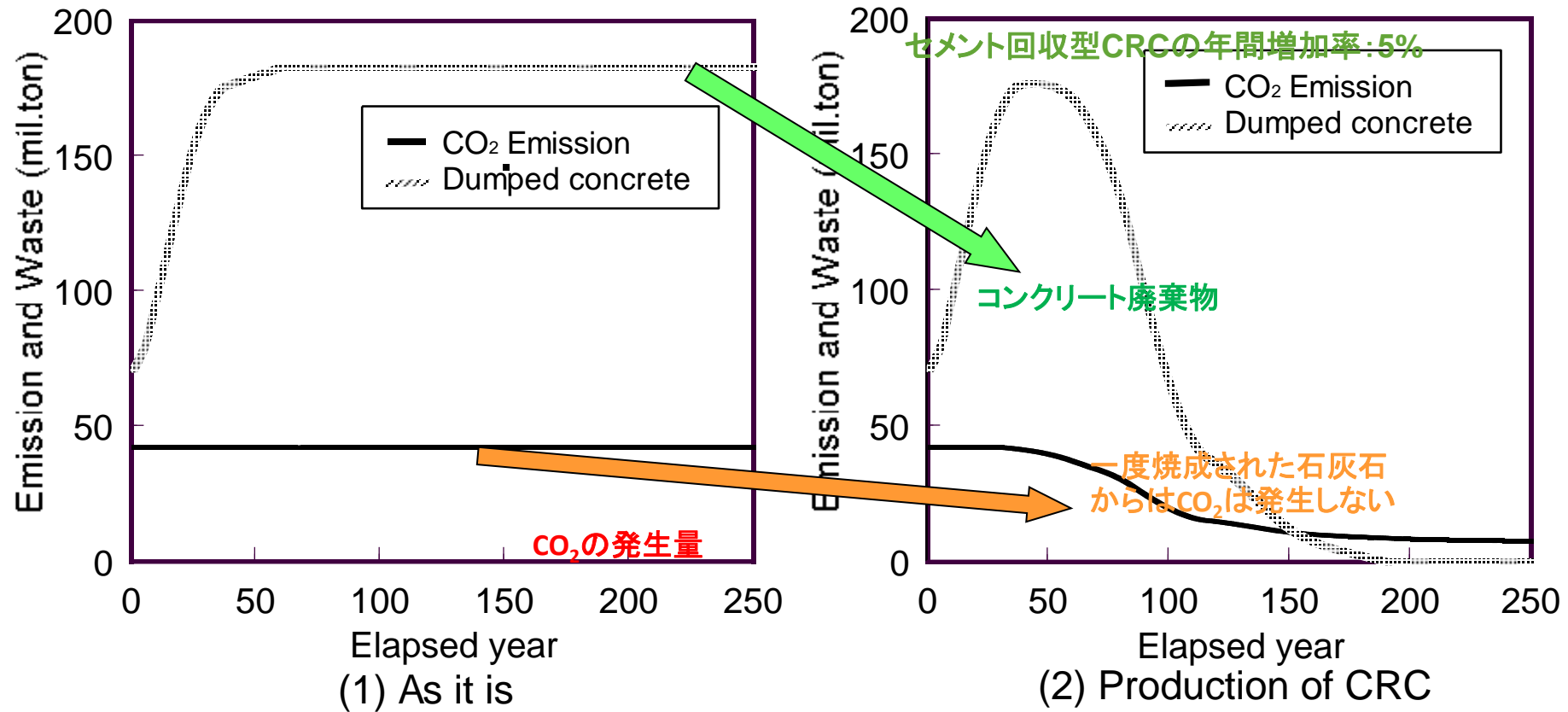
# セメント回収型CRC(プロトタイプ)

- 石灰石骨材の使用によりコンクリート全量がセメント原料となるコンクリート構造物がセメント供給基地となり、需要地と供給地の近接が成立する。
- セメント原料供給用として生産されるため、一定量生産後は骨材回収用が必要になる。





# セメント回収型CRC(プロトタイプ)の利用による最終処分量および排出CO<sub>2</sub>の削減



# セメント回収型CRCの実用化(1)



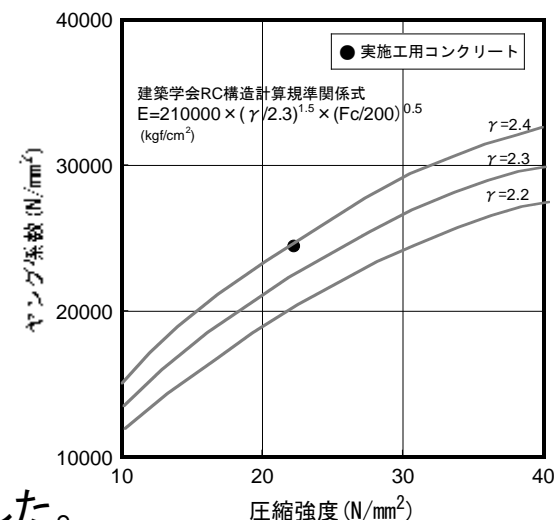
図-9 コンクリートボールのライフサイクル

# セメント回収型CRCの実用化(2)

コンクリート荷卸時の状態				
段階	スランプ (cm)	空気量(%)	塩分量(kg/m <sup>3</sup> )	コンクリート温度
混練直後	20.0	5.5	---	30.0
荷卸時(1台目)	19.0	6.0	0.06	30.2
荷卸時(2台目)	19.5	5.0	0.06	30.0

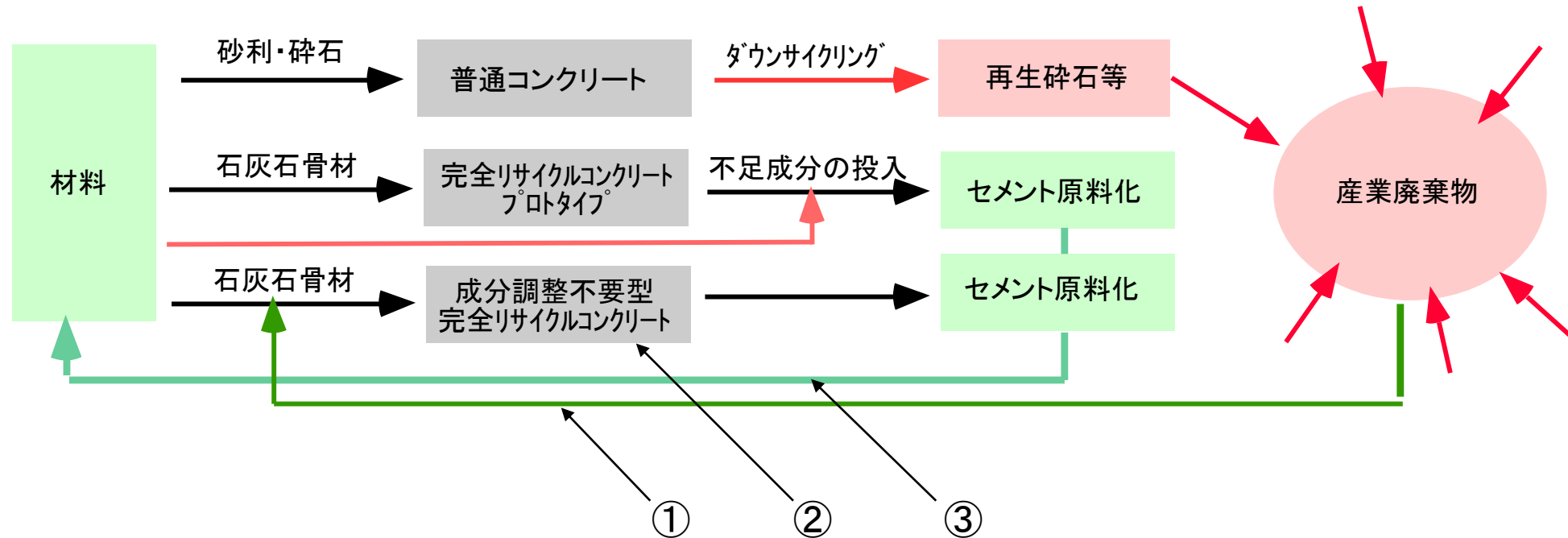
  

コンクリートの基本的性質					
設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量(kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
21	19.0	6.0	2320	22.3	24400



■完全リサイクルコンクリートの施工状態・力学特性に問題はないことを確認した。

# セメント回収型CRC(成分調整不要タイプ)



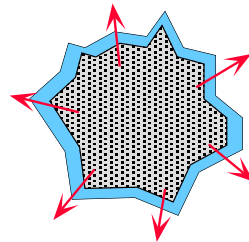
- ① 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートによる廃棄物削減効果
- ② 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの基礎的物性
- ③ 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートのリサイクル性

# 骨材回収型完全リサイクルコンクリート

## 化学改質処理

名称：水溶性剥離剤  
 化学名：混合体  
 成分：鉱物油，乳化剤，ラリル脂肪酸，脂肪酸石けん等  
 密度：1.0 (g/cm<sup>3</sup>)  
 特性：表面エネルギーの差に基づく非接触状態の形成、アルカリ条件の加水分解によるアルカリ金属塩の生成の影響により、骨材界面におけるセメント水和物生成は抑制され、付着力を化学的に低減する

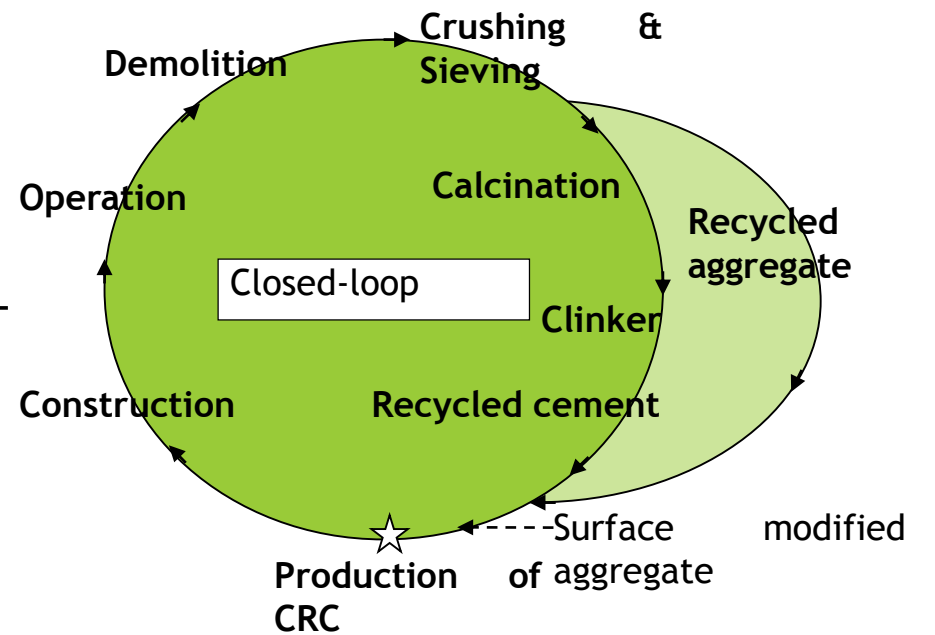
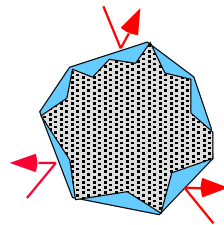
Inhibition of cement hydrate formation on the aggregate-paste interface



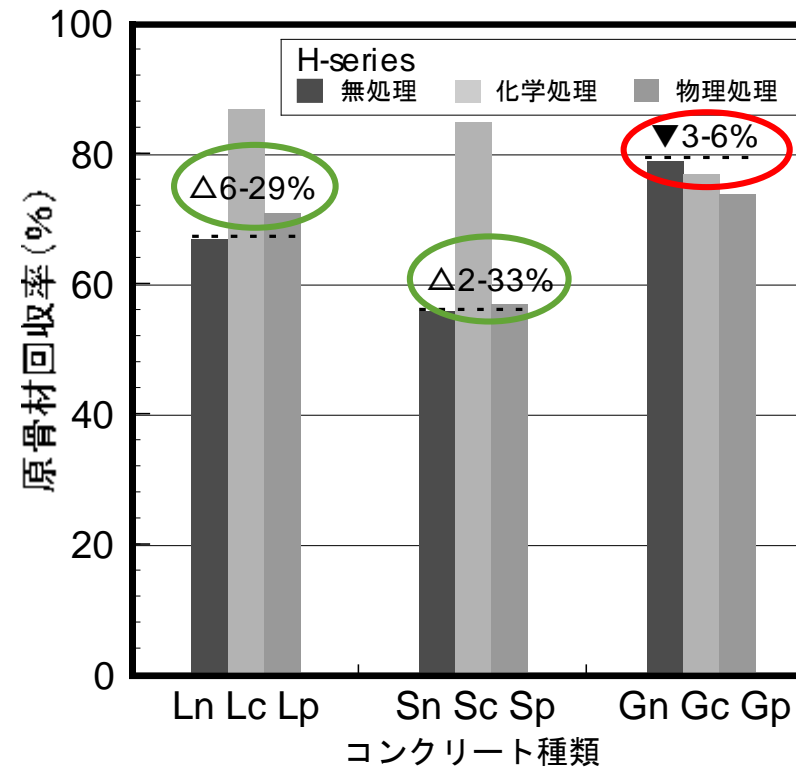
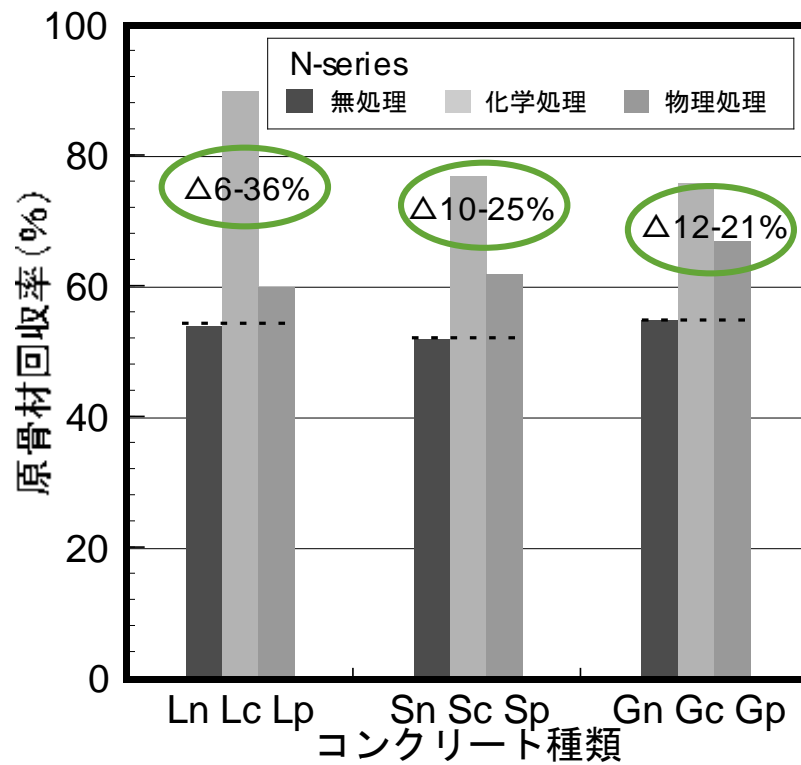
## 物理改質処理

名称：合成樹脂エマルジョン溶液  
 化学名：アクリル変性スチレン-ブタジエン共重合体  
 成分：SBR, 界面活性剤など  
 密度：1.0 (g/cm<sup>3</sup>)  
 特性：セメント水和物中で安定であり、骨材界面の凹凸面、微細空隙に対し、骨材形状に影響しない程度の薄膜を形成し、骨材界面を平滑化する。骨材-ペースト間の機械的な付着力を物理的に低減する

Reduction mechanical friction by forming a membrane on the aggregate-paste interfaces

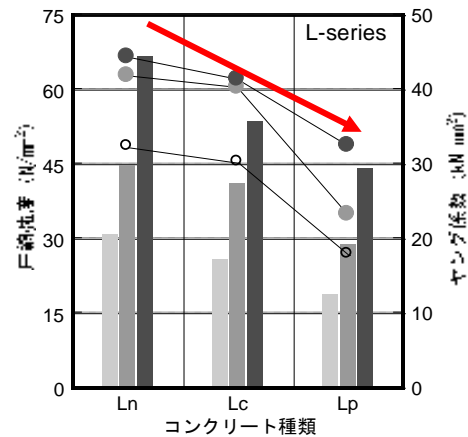


# 骨材回収型CRCの原骨材回収率

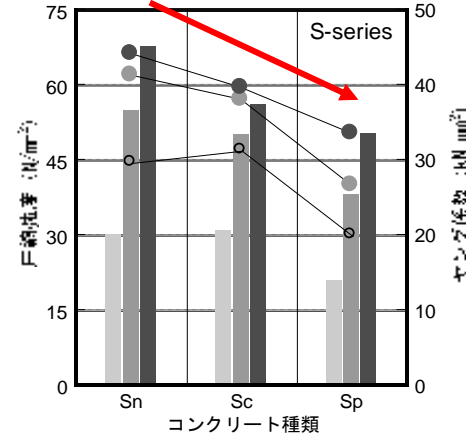


# 骨材回収型CRCの力学特性

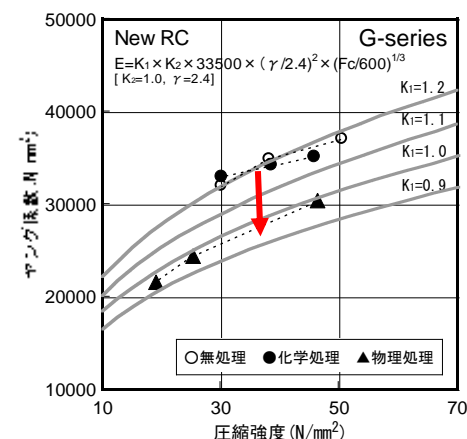
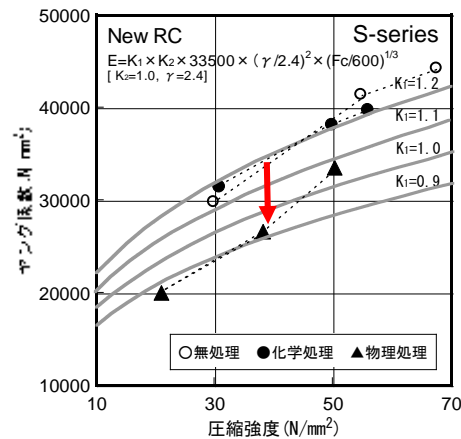
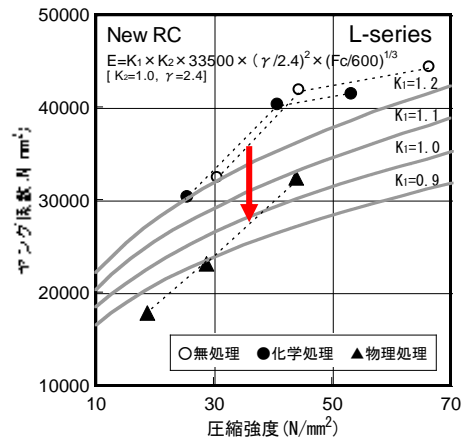
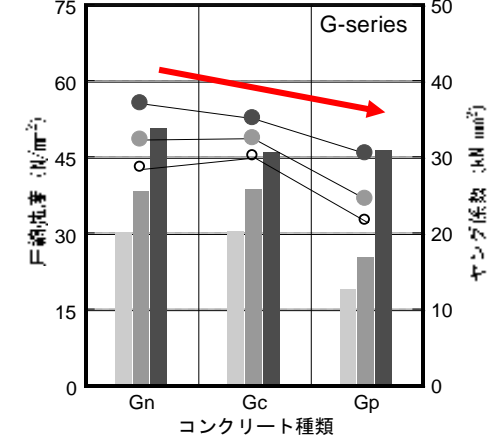
石灰石碎石



砂岩碎石



砂利

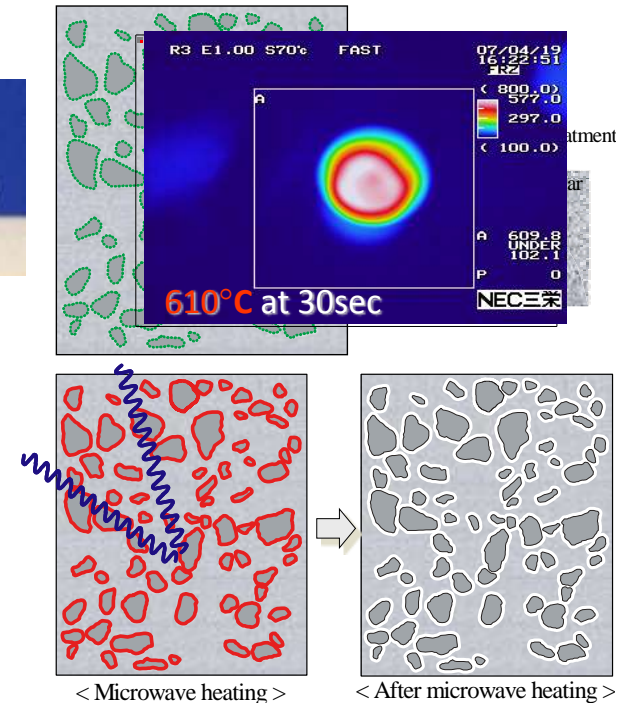


# 骨材回収型CRC(マイクロ波照射タイプ)

## ■コンクリートの強度向上

### □粗骨材の表面処理による粗骨材とモルタルとの付着力増大

- ◆シリカフェーム:ポゾラン反応による付着力増大
- ◆副産微粉末:機械的摩擦力の増大

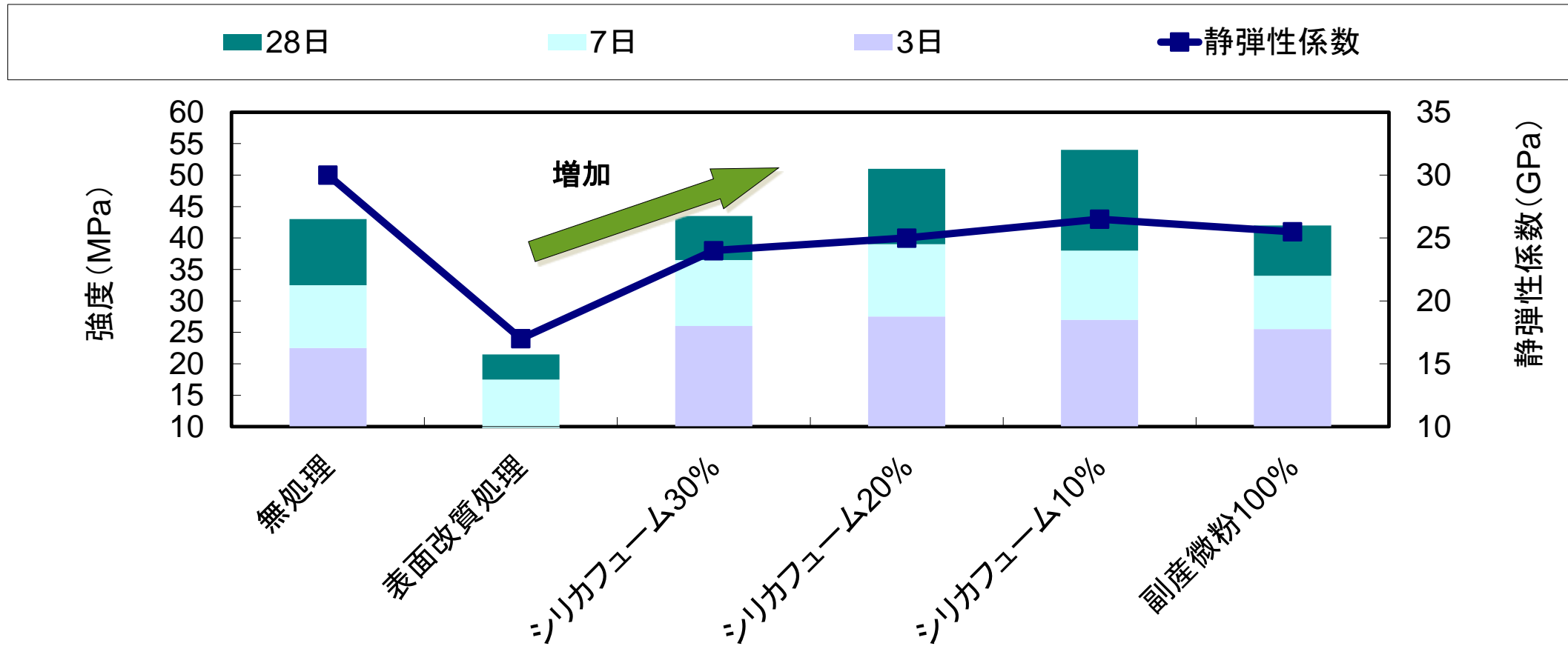


## ■原粗骨材の回収性

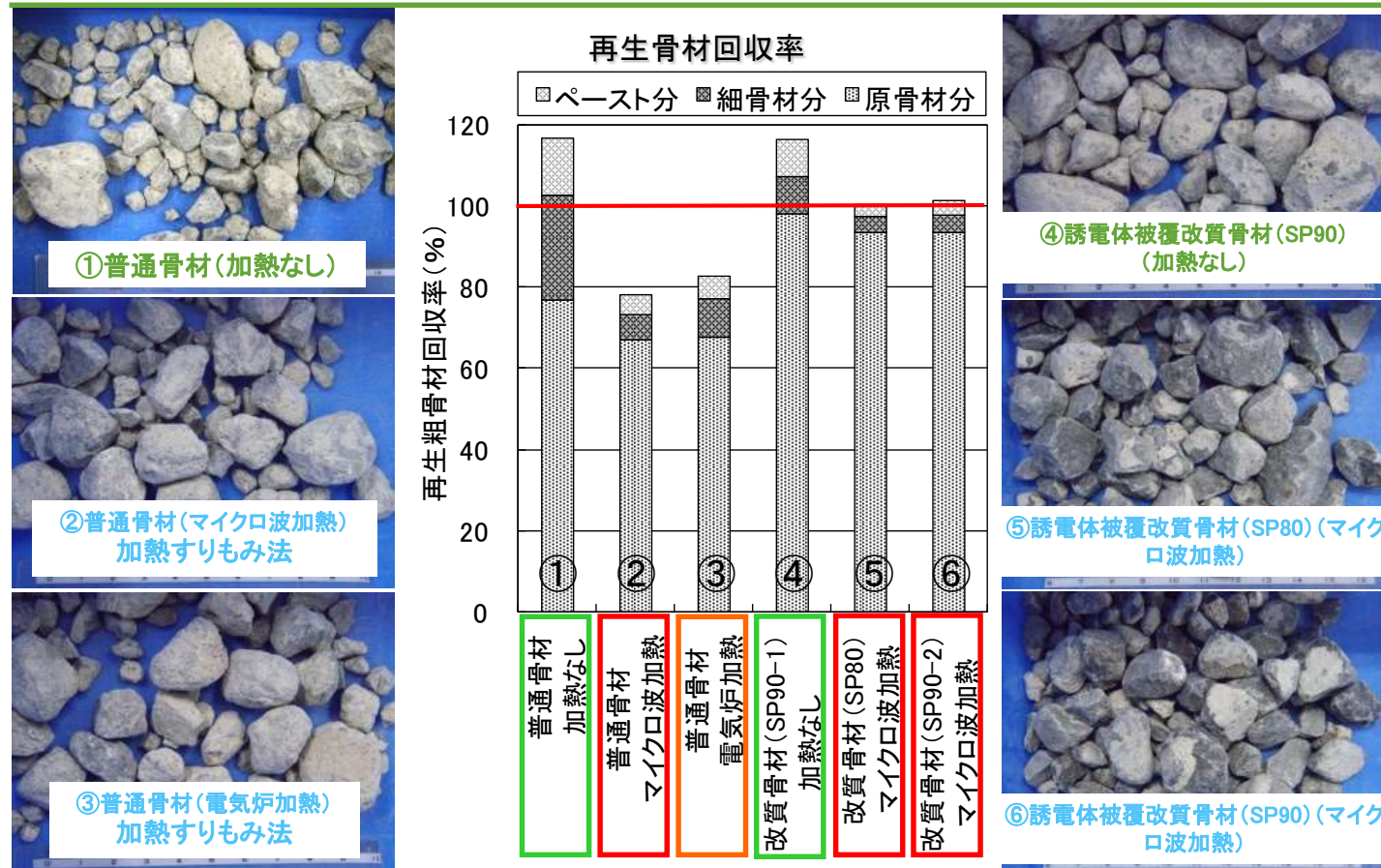
- 誘電材料による選択的マイクロ波照射加熱
- 原粗骨材表面の脆弱化
- 低エネルギーでの粗骨材回収



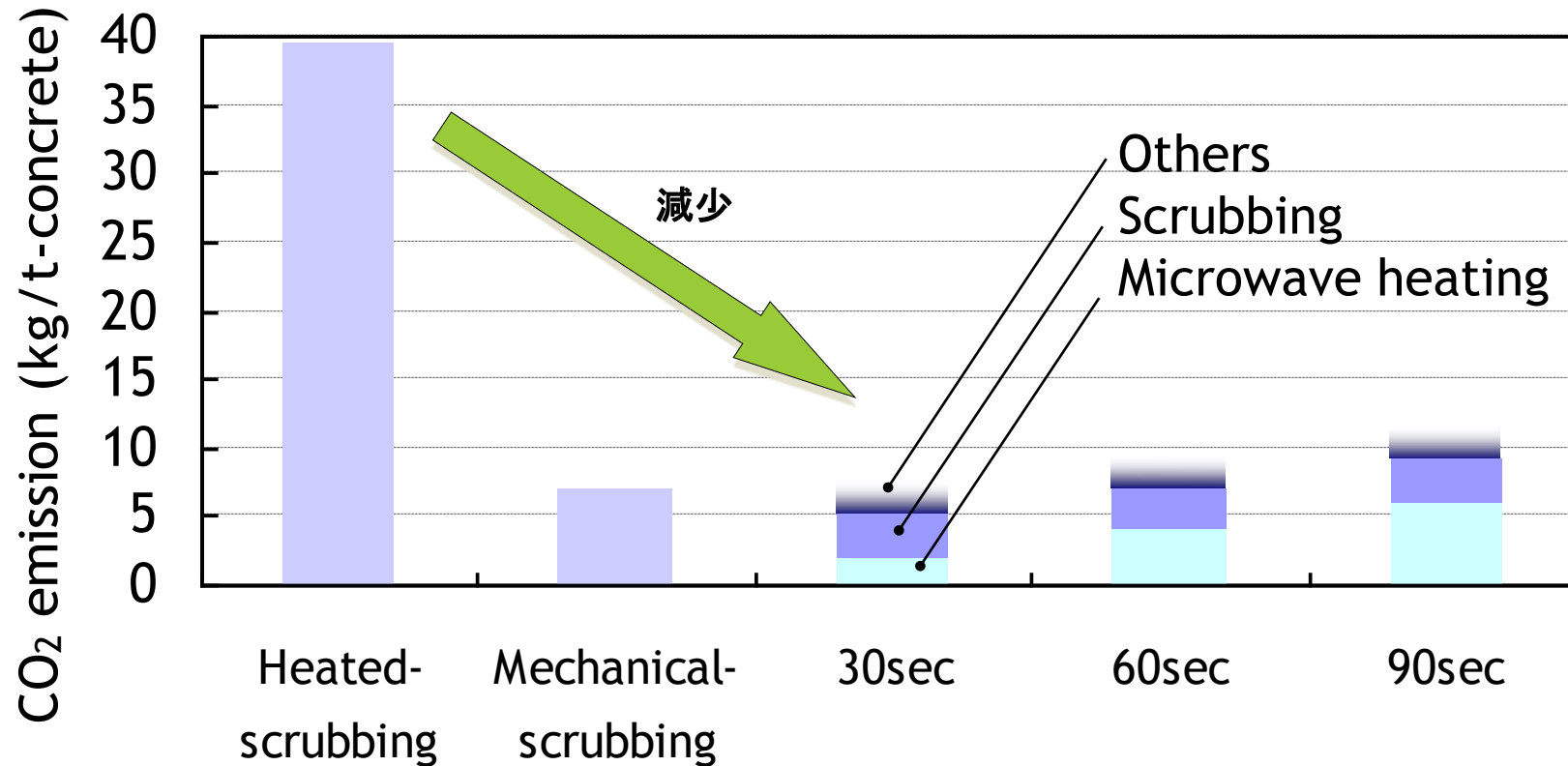
# 骨材回収型CRC(マイクロ波照射タイプ)の力学特性



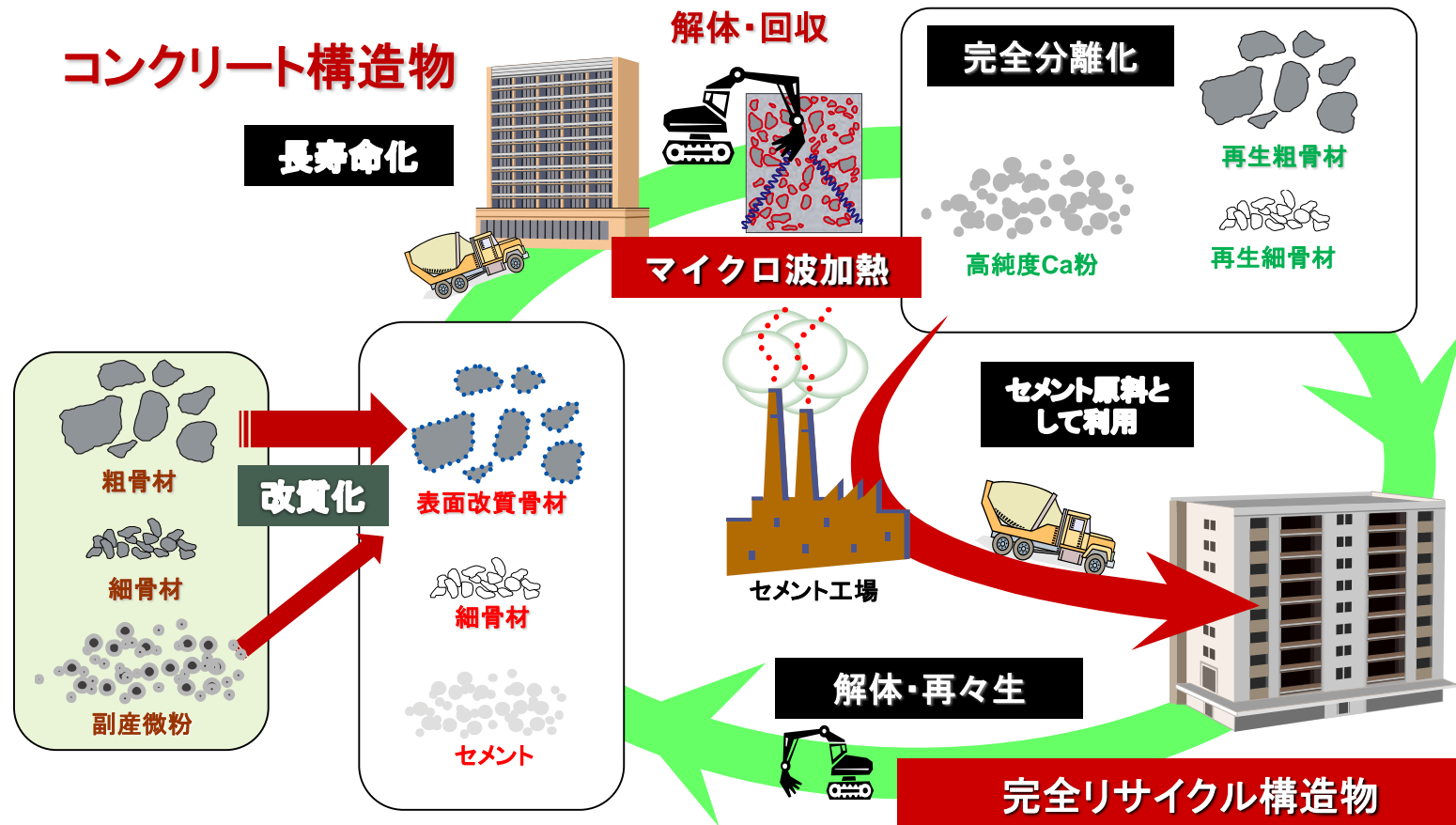
# 骨材回収型CRC(マイクロ波照射タイプ)の粗骨材回収性



# 骨材回収型CRC(マイクロ波照射タイプ)のリサイクル時のCO<sub>2</sub>排出量



# 完全リサイクルコンクリート構造物



# おわりに

---

- 資源循環型社会とは、
  - 自然界から一度取り出した資源を、それが環境負荷を発生させない限り、自然界に戻すことなく利用し続ける社会である
- 資源循環型社会では、
  - 自然からの資源採取は最少化し、
  - 繰返しリサイクルできない材料・製品を排除し、
  - 設計時には、資源保存性を高める技術を採用しなければならない
- リサイクル技術は、次の要件を満たさなければならない
  - リサイクル製品は、高品質でなければならない
    - ◆ 消費者を満足させられないリサイクル製品は、市場価値が乏しい
  - リサイクルは繰返しできなければならない
    - ◆ 使用後に再度リサイクルされることなく最終処分されるようなリサイクル製品は、次世代にとっては廃棄物以外の何物でもない



ご静聴ありがとうございました。

[noguchi@bme.arch.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:noguchi@bme.arch.t.u-tokyo.ac.jp)