

## 循環型社会形成推進科学研究費補助金 総合研究報告書概要版

- ・研究課題名=循環型社会ビジョン実現に向けた技術システムの評価モデル構築と資源効率・環境効率の予測評価
- ・研究番号 =K2021, K2155, K22069
  
- ・国庫補助金精算所要額 (円) =74,515,000
  
- ・研究期間 (西暦) =2008-2010
  
- ・代表研究者名=大迫政浩 (独立行政法人国立環境研究所)
  
- ・共同研究者名=森口祐一 (独立行政法人国立環境研究所)、稲葉陸太 (独立行政法人国立環境研究所)、加用千裕 (独立行政法人国立環境研究所)、藤井実 (独立行政法人国立環境研究所)、岡本誠一郎 (独立行政法人土木研究所)、大木達也 (独立行政法人産業技術総合研究所)、荻野暁史 (畜産草地研究所)、中山裕文 (九州大学大学院)、八木美雄 (財団法人廃棄物研究財団)、立尾浩一 (財団法人日本環境衛生センター)、小林均 (株式会社エックス都市研究所)、山口直久 (株式会社エックス都市研究所)

### 1. 背景と研究目的

21世紀環境立国戦略、超長期ビジョン、循環基本計画の見直し等、短期から中長期的な循環型社会づくりの方向性が示され、低炭素社会や自然共生社会等との連携・協調を含めた循環型社会ビジョンが描出された。しかし、より具体的なシステムの設計やその意義の明確化はこれからの作業であり、ビジョン実現のための技術的なシステム設計とその効果の客観的な予測が必要である。そこで、主要な循環資源に焦点を絞り、モノの特性に応じた空間スケール(循環圏)の中で実現可能な具体的な循環技術システムを設計する。また、投入-産出(I-O)型のシステム評価モデルとしてプロセス関数を定義するための物質フローやコスト等の統合的な情報基盤を整備する。それによってシステム評価モデルを構築し、資源効率(脱物質化)や環境効率(脱温暖化)等の観点からシステム実現の効果を予測評価し、近未来ビジョンへの転換の意義を定量的に明らかにする。

3年間のにおいて、まず、各循環資源の近未来の資源循環システムについて、発生と循環利用に影響する要因の構造を分析し、近未来のビジョンを提示した。つぎに、近未来のビジョンとして二つのシナリオを設定し、循環資源の発生量、各種の廃棄物の処理・リサイクルのフロー、温室効果ガス排出量、一部技術導入コストの評価を行い、各循環資源について事例分析を行った。特にバイオマスについては、地域区分ごとのシナリオの特徴づけ、バイオマスの種類ごとの混合処理などについても考慮して、バイオマスの種類毎のシナリオ間の整合を図り分析を行った。

### 2. 研究方法

主要な循環資源として、家畜糞尿、下水汚泥、食品廃棄物等のバイオマスや廃プラ等の含炭素資源、各種産業系スラグ、石炭灰、建設発生土等の土石系の循環資源、電子・電気製品等に含まれるベースメタルやレアメタル等の金属系の循環資源を対象にする。

まず、近未来の循環資源の発生と循環利用に影響する要因を抽出整理し、フィッシュボーン図を使って構造化した。要因分析に基づいて、近未来の資源循環ビジョンを循環資源ごとに提示した。次に、各循環資源の近未来の資源循環システムビジョンについて二つのシナリオ(社会シナリオとして技術重視、ライフスタイル重視、対策シナリオとしてエネルギー回収重視、マテリアルリサイクル重視)を設定した。また、バイオマスについては、山間、農村、都市の三区別の地域類型を設定してシナリオ毎の物質フローを構築した。循環資源の発生量の予測を行うための基礎データを文献およびヒアリング等により収集するとともに、構成する技術プロセスに関する物質・エネルギーフローに関するデータの集積を図った。

収集したデータを用いて、シナリオ毎に、循環資源の発生量、温室効果ガス排出量等を推定し評価した。

### 3. バイオマスの循環技術システム

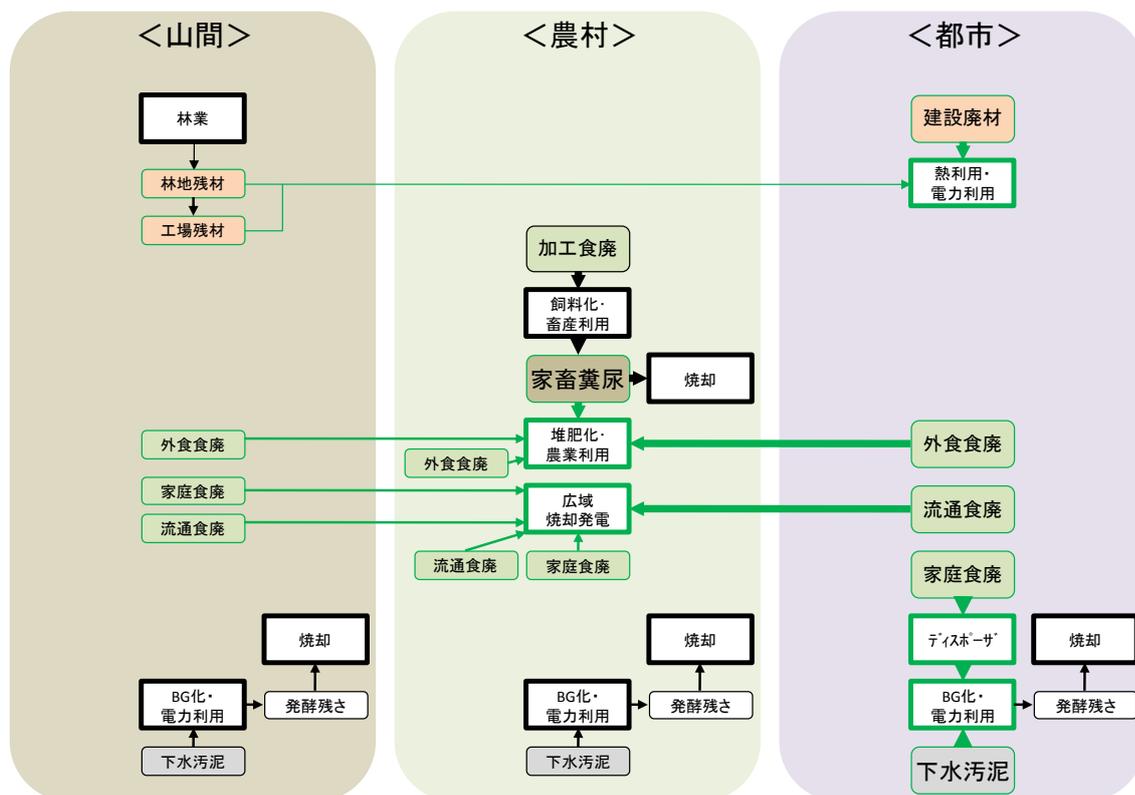
#### 3.1 背景となるシナリオと物質フローの検討項目

本研究事業では、循環利用を促進すべき廃棄物系バイオマスとして、「木質バイオマス」、「家畜ふん尿」、「食品廃棄物（食廃）」、および「下水汚泥」に着目し、2030年ごろの近未来における処理・利用形態や物質フローを検討した。その際、背景となる社会のシナリオを2つ想定した。一方は、循環資源を広域的に処理してエネルギー利用を優先する「シナリオA」、他方は、循環資源を地域的に処理してマテリアル利用を優先する「シナリオB」である。なお、循環利用の検討項目は下記のとおりである。

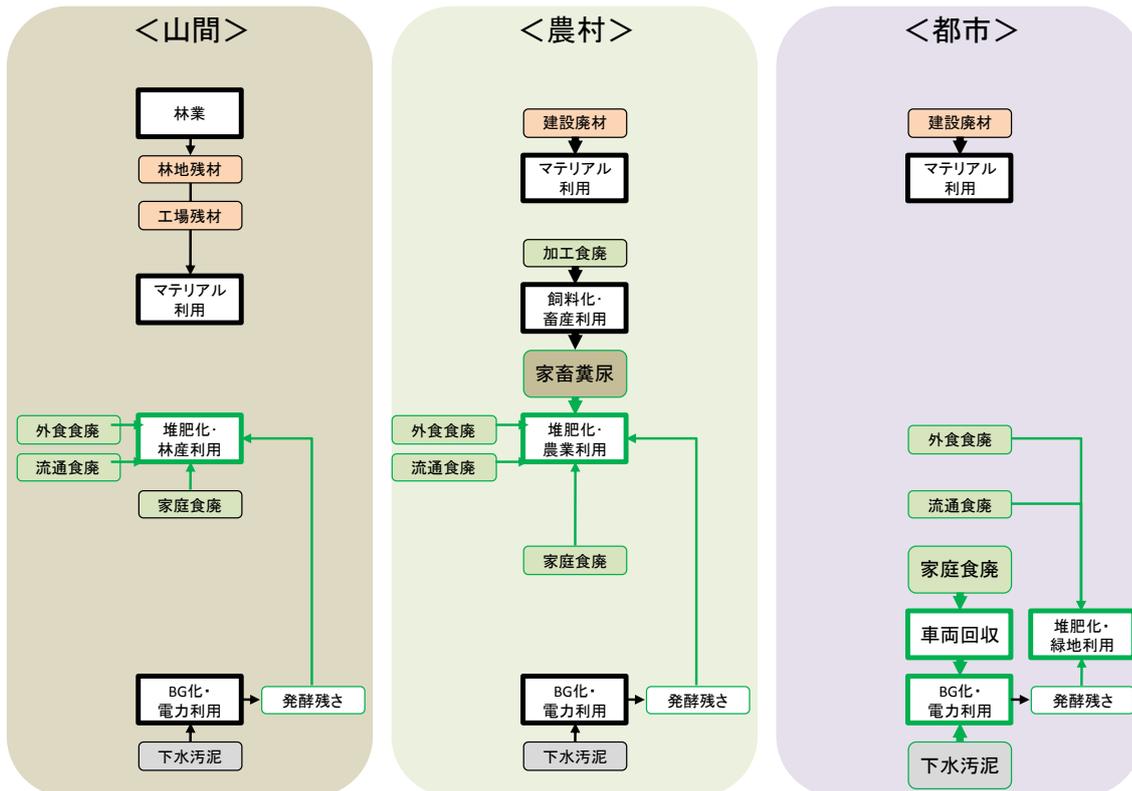
- ・ 処理形態
- ・ 利用形態（循環資源の変換後）
- ・ バイオマス間の共同利用・共処理の可能性
- ・ 地域別の特性（都市地域、農村地域、中山間地域）

#### 3.1.2 シナリオ別の物質フローの予測

シナリオAおよびBにおける物質フローを各々図表1および図表2に示す。図表1および図表2では前述の都市地域を「都市」、農村地域を「農村」、中山間地域を「山間」と表している。



図表1 シナリオAと物質フロー



図表 2 シナリオ B と物質フロー

各種廃棄物系バイオマスの発生量は、国立環境研究所で開発した物質フロー分析モデル（NIES モデル）で推定した種類別発生量と、各シナリオと各地域類型における人口変化の推計に基づいて推定した。その結果を図表 3 に示す。

図表 3 廃棄物系バイオマス発生量の一覧（単位：千t/年（含水ベース））

|       |    | 食廃     |       |       |       | 下水汚泥   | 家畜ふん尿   |
|-------|----|--------|-------|-------|-------|--------|---------|
|       |    | 家庭食廃   | 流通食廃  | 外食食廃  | 加工食廃  |        |         |
| シナリオA | 都市 | 5,542  | 2,215 | 4,689 | 0     | 74,682 | 0       |
|       | 農村 | 522    | 209   | 442   | 3,989 | 7,035  | 102,002 |
|       | 山間 | 742    | 296   | 627   | 0     | 9,993  | 0       |
| シナリオB | 都市 | 10,056 | 1,490 | 1,079 | 0     | 72,916 | 0       |
|       | 農村 | 1,028  | 152   | 110   | 2,748 | 7,454  | 67,437  |
|       | 山間 | 1,564  | 232   | 168   | 0     | 11,340 | 0       |

注記：

家庭・流通・外食食廃：人口比で各地域類型に按分

加工食廃：農村のみで発生と仮定

家畜ふん尿：農村のみで発生と仮定

下水汚泥：人口比で各地域類型に按分

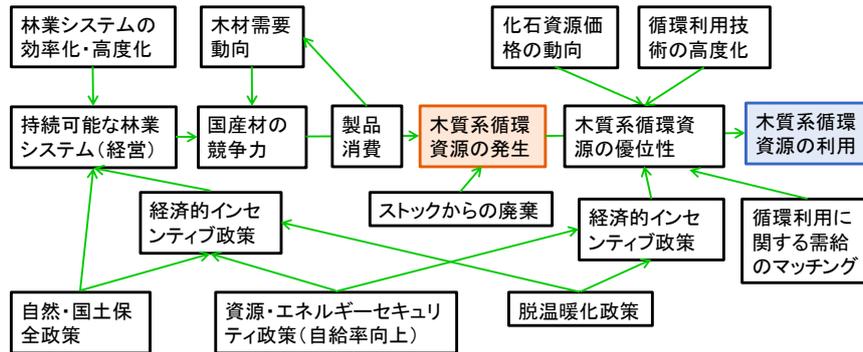
最終年度では、バイオマス毎の分析において図表 3 の発生量を用いた（後述）。

## 3.2 木質系循環資源

### 3.2.1 近未来における木質系循環資源の循環利用ビジョン

近未来（2030年）における木質系循環資源の利用技術システムの導入を検討するにあたり、木質系循環資源の発生と利用に影響する要因を網羅的に抽出し、主要因の構造化を行った（図表 4）。さらに、それらの要因に関する現状や将来動向の分析に基づいて、近未来における木質系循環資源の循環利用ビジョンを描出した。循環資源の発生に関しては、木材需要システムにおいて化石資源由来の各種製品を木質系資源で代替し木造化を推進すること、木材供給システムにおいて国産材の需給拡大と

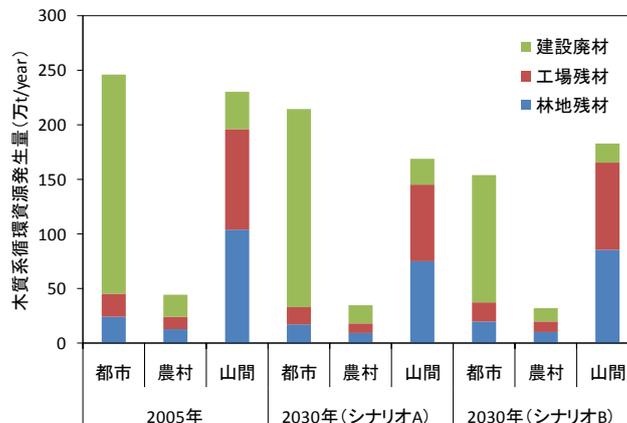
高性能機械化、大規模化を進めること、循環資源の利用に関しては、マテリアル利用とエネルギー利用の適正なバランスを図り、電力・熱供給などのエネルギー利用による化石燃料代替を推進すること等のビジョンを提示した。



図表 4 木質系循環資源の発生と利用に影響する主要因構造

### 3.2.2 地域における木質系循環資源発生量

木質系循環資源の発生に影響する主要因として特に建築・土木用木材需要に着目し、国立環境研究所で開発した近未来物質フローモデルを用いて、2030年までの建築・土木用木材需要量とそのうちの国産木材需要量を解析した。その際、近未来の社会像として、技術進展重視（シナリオ A）とライフスタイル重視（シナリオ B）の2つのシナリオを検討した。それらのシナリオ分析をもとに、2030年までの都市、農村、山間地域における建設廃材、工場残材、林地残材の発生量を推算した（図表 5）。シナリオ A では、都市地域に 51%、農村地域に 8%、山間地域に 41%の発生量が分布しており、都市地域の発生量が最も大きくなった。シナリオ B では、都市地域に 41%、農村地域に 9%、山間地域に 50%の発生量が分布し、農村地域の発生量が最も大きかった。また、どちらのシナリオにおいても、都市地域では建設廃材が発生量全体の約 8 割を占め、山間地域では林地残材が発生量全体の約 5 割を占めた。

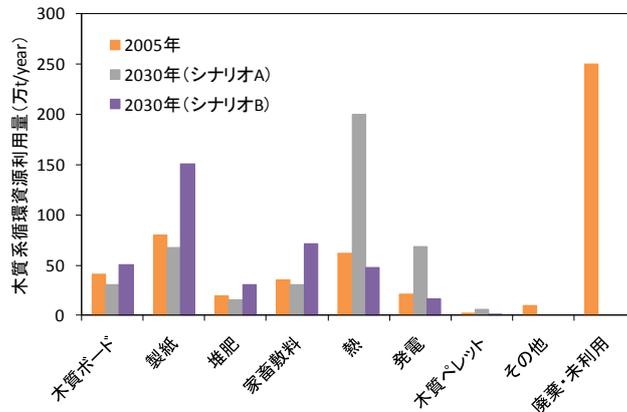


図表 5 各地域における木質系循環資源発生量の推計結果

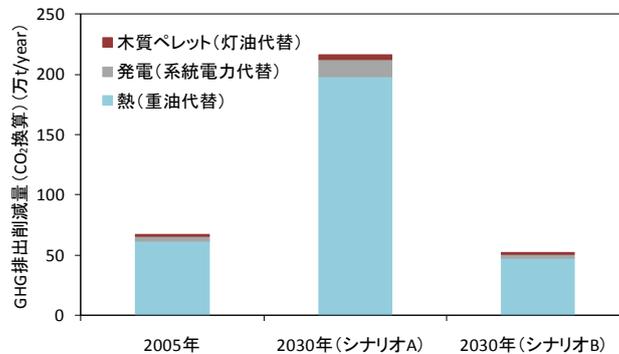
### 3.2.3 循環利用技術システムの導入効果

各地域で発生する木質系循環資源に対して、シナリオ A でエネルギー利用重視、シナリオ B でマテリアル利用重視の2つの循環利用ビジョンを検討した。2005年と比べて、シナリオ A は熱、発電、木質ペレットへの利用率が増加し、シナリオ B は木質ボード、製紙、堆肥、家畜敷料への利用率が増加すると想定し、各種用途への循環利用量を推計した（図表 6）。それらの技術システム導入による天然資源消費抑制効果、GHG 排出削減効果、導入費用を評価した。シナリオ A では、熱、発電、木質ペレットへの利用による重油、系統電力、灯油の代替に伴い、2030年に約 217 万 t-CO<sub>2</sub>/year の GHG 排出削減効果があることが分かった（図表 7）。各種技術システムの導入費用では、熱利用は重油ボイラーの 3 割（最小値は工場残材）～1.3 倍（最大値は林地残材）、発電利用は石炭発電の 3 倍～11 倍、太陽光発電の 4 割～1.4 倍、木質ペレット利用は灯油ストーブの 1.2 倍～2.2 倍となった。熱利用は代替対象との市場競争力が期待できるが、発電や木質ペレット利用は政策的・経済的インセンティブが必要と考えられる。また、シナリオ B では、木質ボード、製紙、堆肥、家畜敷料への利用増加に

より、2030年に約303万t/yearの新規木材消費抑制効果があることが確認され、2005年の日本全体における木材消費量の約9%に相当した。導入費用では、各種循環利用の原料となる木材チップ製造費用は市場チップ価格の5割～2.2倍となり、工場残材を利用する場合は市場競争力が見込まれるが、林地残材の場合は政策的・経済的補助が必要であることが分かった。



図表6 循環利用ビジョンに基づく各技術への利用量の推計結果 (全国集計)

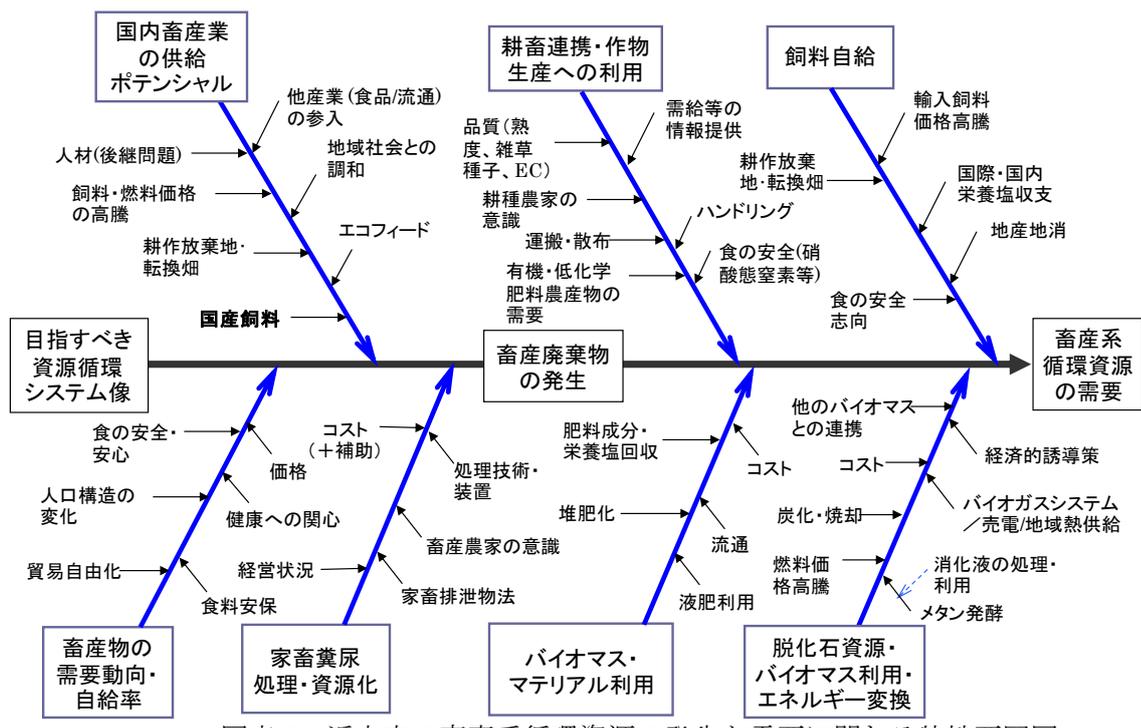


図表7 エネルギー利用による温室効果ガス排出削減量の評価結果 (全国集計)

### 3.3. 畜産系循環資源

#### 3.3.1. 畜産系循環資源に関する要因構造の把握

畜産系循環資源である家畜ふん尿およびその供給主体である畜産業をとりまく現状の分析を行い、畜産系循環資源を取りまく諸要因の関連を明らかにし、近未来の循環資源の発生と需要について特性要因図の形にまとめた。図表8に主要な要因のみで構造化した特性要因図を示す。さらに、特性要因図をもとに、畜産、家畜ふん尿処理、作物・飼料生産、都市・地域社会をつなぐ循環の姿とそれを実現するためのキーとなる要因・施策を概略化した近未来の畜産系資源循環システムビジョンを作成した。



図表 8 近未来の畜産系循環資源の発生と需要に関わる特性要因図

3.3.2. 畜産循環資源の物質フローの作成

上で作成した近未来畜産系資源循環システムビジョンに基づき、その物質フローを定量化するため、具体的なプロセスツリー図を作成した。また、比較対象となる現状の循環システムについても同様にプロセスフロー図を作成し、まずはこれの定量化を試みた。統計データおよび文献値を基に、家畜排せつ物の発生量、各処理方法向け家畜排せつ物量、得られる畜産系資源量、農作物・飼料作物生産量を都道府県レベルで定量化した。

3.3.3. 近未来畜産系資源循環システムにおける温室効果ガス発生量の解析

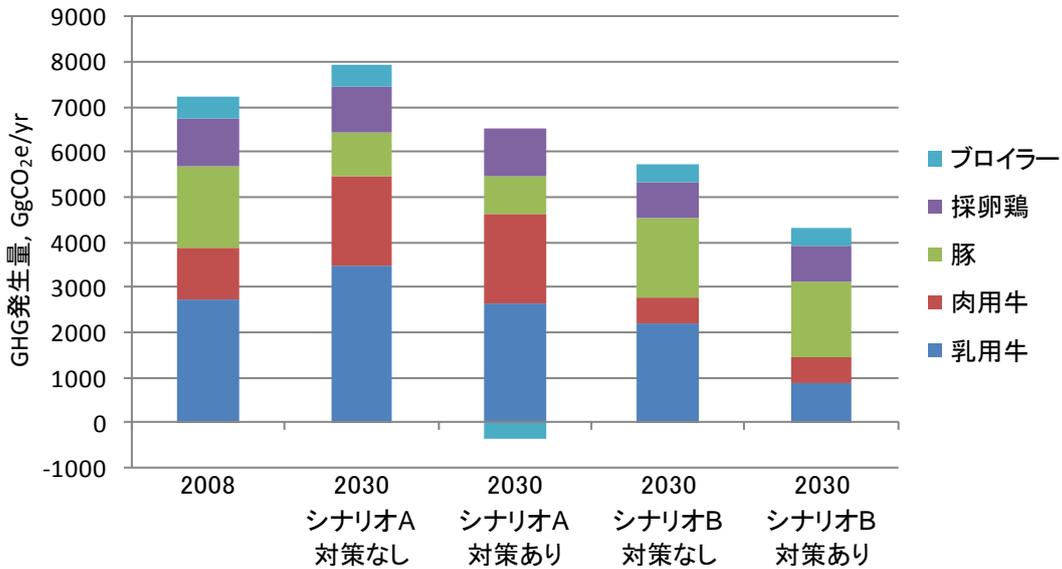
家畜ふん尿は、想定したシナリオごとに2030年における発生量が大きく異なっていた。すなわち、シナリオ A では食生活における洋食の割合が増加すると想定されていることから家畜の飼養頭数が増加し、従って家畜ふん尿発生量も増加する。逆にシナリオ B では、食生活における和食の割合が増加すると想定されていることから、家畜飼養頭数および家畜ふん尿発生量も減少する。このようにして推定された家畜ふん尿発生量は、シナリオ A で 10,200 万 t、シナリオ B で 6,744 万 t であった。

続いて、各シナリオについて現状と同様の家畜ふん尿処理体系、および資源循環型の処理体系を想定した。資源循環型処理体系では、シナリオ A はエネルギー利用を優先する想定であるため、乳牛および豚のふん尿処理においてメタン発酵の、またブロイラーふん尿処理において焼却熱利用の割合が高くなるものとした。一方、シナリオ B はマテリアル利用を優先する想定であるため、堆肥化過程で大気中に揮散する窒素を回収し肥料として利用可能な吸引通気型堆肥化、また污水处理においてリンを回収し化学肥料と同様に利用可能な MAP リン除去・回収技術を導入するものとした。そして、これらの家畜ふん尿処理体系における温室効果ガス (GHG) 発生量を解析した。解析した GHG には、ふん尿処理過程で発生する CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O、燃料・電力の使用および投入される資材の生産過程で発生する CO<sub>2</sub>、処理後に得られる熱・電力等のエネルギーや堆肥等の肥料がそれぞれ化石燃料・電力・化学肥料を代替することによる GHG 低減効果を含めた。

3.3.2. 各シナリオにおける家畜ふん尿処理からの温室効果ガス発生量

2030年の各シナリオにおける資源循環対策の有り無しの場合、そして現状における GHG 発生量を解析した結果を図表 9 に示す。資源循環対策なしの場合については、家畜飼養頭数が増加するシナリオ A における 2030 年の GHG 発生量は 2008 年のそれと比較して増加していた。一方、家畜飼養頭数が減少するシナリオ B の GHG 発生量は 2008 年のそれと比較して減少しており、家畜ふん尿処理における GHG 発生量は家畜ふん尿自体の量に大きく影響されることが分かる。続いて資源循環対策あ

りの場合については、シナリオ A および B の内容に応じた資源循環技術システムをそれぞれ導入することにより、いずれのシナリオにおいても 20%以上の低減が可能であった。

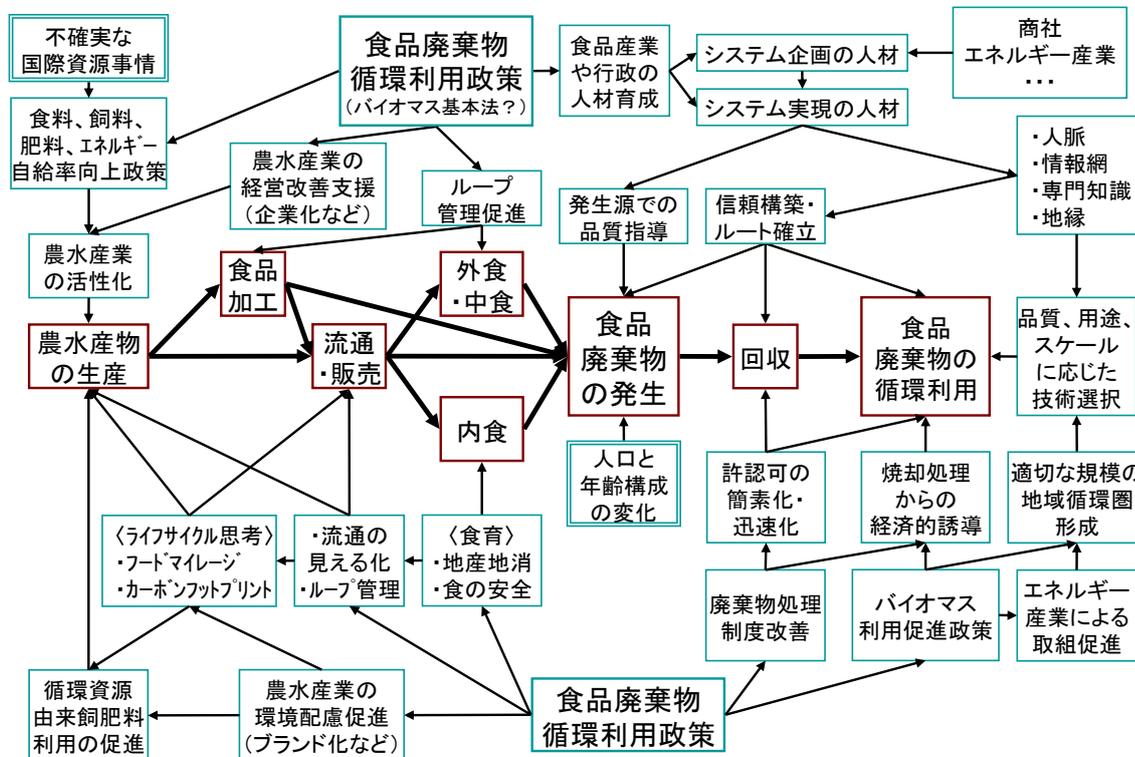


図表 9 家畜ふん尿処理システムにおける GHG 発生量

### 3.4 食品廃棄物の循環技術システム

#### 3.4.1 近未来における食品廃棄物の循環ビジョン

ここでは、食品廃棄物（食廃）の循環利用について近未来のビジョンを検討した内容を述べる。食廃の発生と利用に影響する要因を抽出し、それらの関連性を図表 10 にまとめた。



図表 10 食品廃棄物の循環利用を促す要因と政策の関係

上記の要因構造に基づき「製品需要」「資源供給」「循環利用」というシステム毎にビジョンを検討した。製品需要システムにおいては、経済的格差拡大と食品嗜好の二極化が予想され、格差是正と

食育を進めながら、地産地消を含めた食文化再構築が必要である。資源供給システムでは、農業・漁業の経営改善（会社化による後継者問題解消と生産者地位向上等）、流通構造の改善を進めるべきである。循環利用システムでは、システムを企画・実現する人材の育成、直接説明による信頼関係醸成、原料品質向上、回収ルート確立、焼却処理からの誘導、および柔軟な制度によるシステム効率化を進めるべきである。

### 3.4.2 ビジョンに関連する循環技術システムの提案

提案した循環ビジョンに関連する技術システムを検討・提案した。食品廃棄物は排出源によって質が大きく異なる。それは、生産できる再生製品の種類も異なることを意味する。そこで、排出源毎に適用される再生技術と製品を決めた循環技術システムを提案した。

### 3.4.3 地域・技術データの収集・整理

食品廃棄物は、都道府県等の規模で回収・再生・流通させるのが得策と予想される。そこで、これらの地域規模での原料供給と製品需要を検討すべく、統計データ等を収集した。また、食品廃棄物の循環に伴う環境負荷排出量等を評価すべく、技術データも収集した。

### 3.4.4 バイオマス相互利用を考慮したシナリオ検討とその結果

食品廃棄物（食廃）は、発生源で品質が異なると考え、食品加工工場、流通業、外食産業、および家庭で発生したものを区別した。また、循環利用について2つの近未来シナリオを想定した。シナリオ A では広域的処理とエネルギー利用が優先され、シナリオ B では地域的処理とマテリアル利用が優先される。これらの具体的なフローは3.1の図表1に示されている。以上のシナリオ毎の各種食廃の発生から受入へのフローを図表11に示す。

図表 11 シナリオ毎の各種食廃の発生から受入へのフロー（単位：千 t-w/年）

| シナリオ         | 受入           |      | 発生     |       | フロー   |
|--------------|--------------|------|--------|-------|-------|
|              | プロセス         | 地域   | 食廃区分   | 地域    |       |
| A            | 広域焼却<br>発電   | 農村   | 流通食廃   | 都市    | 2,215 |
|              |              |      |        | 農村    | 522   |
|              |              |      |        | 山間    | 296   |
|              |              |      | 家庭食廃   | 農村    | 522   |
|              | 山間           | 742  |        |       |       |
| 飼料化・<br>畜産利用 | 農村           | 加工食廃 | 農村     | 3,989 |       |
| B            | 堆肥化・<br>緑地利用 | 都市   | 流通食廃   | 都市    | 1,490 |
|              |              |      | 外食食廃   | 都市    | 1,079 |
|              |              |      | 汚泥発酵残さ | 都市    | 6,106 |
|              | 飼料化・<br>畜産利用 | 農村   | 加工食廃   | 農村    | 2,748 |
|              | 堆肥化・<br>林産利用 | 山間   | 家庭食廃   | 山間    | 1,564 |
|              |              |      | 流通食廃   | 山間    | 232   |
|              |              |      | 外食食廃   | 山間    | 168   |
| 汚泥発酵残さ       |              |      | 山間     | 8,141 |       |

### 3.4.5 食品廃棄物の循環利用に伴う GHG 排出量

図表 11 に示す食廃の処理フローに技術毎の GHG 排出原単位を乗じて GHG 排出量を推定した結果を図表 12 に示す。食廃に限定してもシナリオ B の GHG 排出量がシナリオ A のそれより顕著に大きくなると推定された。これは、シナリオ B で採用される堆肥化の GHG 排出原単位が、シナリオ A で採用される焼却発電のそれと比べて大きいことに起因している。

図表 12 シナリオ毎の GHG 排出量 (単位：千 t-CO<sub>2</sub>eq/年)

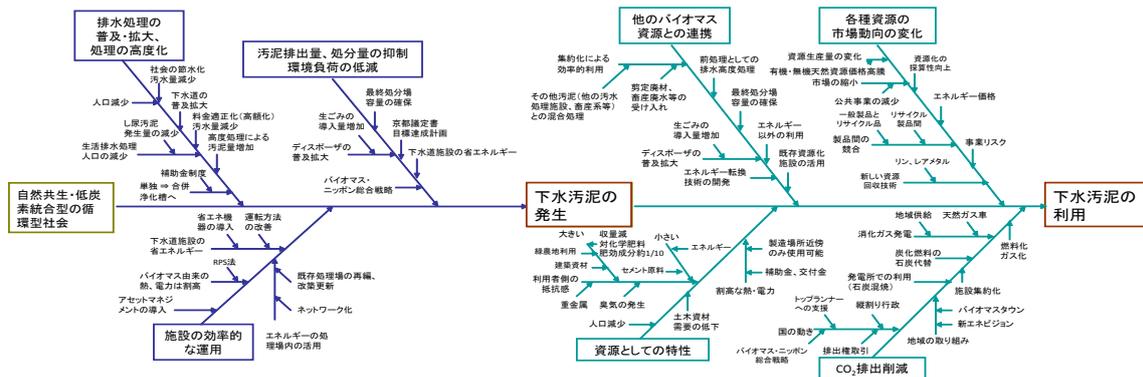
|   |         | 食廃    | 汚泥残さ | 合計    |
|---|---------|-------|------|-------|
| A | A(乾燥飼料) | 460   | 0    | 460   |
|   | A(液状飼料) | 30    | 0    | 30    |
| B | B(乾燥飼料) | 1,379 | 604  | 1,983 |
|   | B(液状飼料) | 1,083 | 604  | 1,686 |

### 3.5 下水汚泥の循環技術システム

#### 3.5.1 下水汚泥循環資源システムのビジョン

国内の下水汚泥発生量は、下水道の普及拡大に伴い次第に増加しており、その量は乾燥重量ベースで 221 万トン/年 (2008 年度) となっている。これまで、埋立処分地の逼迫に対応するため、下水汚泥の減量化や有効利用の取り組みが進められているが、近年は燃料化等のエネルギー利用技術の導入も進められている。

近未来の下水汚泥循環資源の発生と利用に影響する要因について、有識者ヒアリング等をもとに、網羅的に抽出して構造化を行った。発生側の主な要因としては、排水処理の普及拡大および処理の高度化、汚泥排出量・処分量の抑制、処理施設の効率的な運用等が抽出され、需要側の要因としては、他のバイオマス資源との連携、各種資源の市場動向、資源としての特性、CO<sub>2</sub> 排出削減等が抽出された (図表 13)。



図表 13 下水汚泥に関する特性要因図

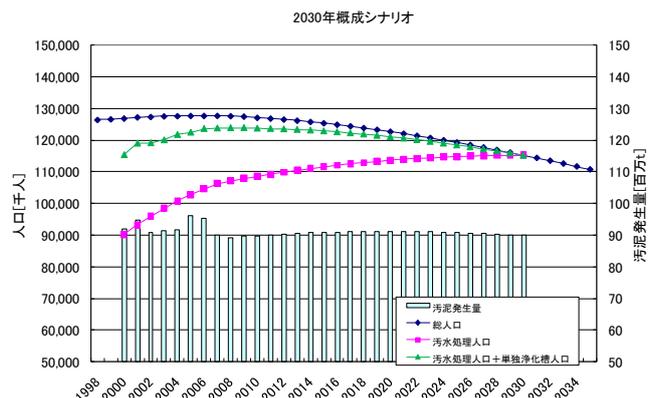
2030 年における下水汚泥 (浄化槽汚泥等を含む) の発生量を予測した結果、下水道、農業集落排水、コミュニティプラント、合併処理浄化槽による生活排水対策が 2030 年には概ね終了すると仮定すれば、2020 年ころに下水汚泥発生量(浄化槽、集落排水等汚泥を含む)のピークとなり、2030 年には微減傾向となる結果となった (図表 14)。

#### 3.5.2 下水汚泥循環ビジョンを支える技術システム

以上の分析結果をもとに、今後の循環ビジョンを支える主要な技術システムとして、現在実施されているセメント化等の建設資材利用、コンポスト等の緑農地利用、嫌気性消化 (メタン発酵) によるバイオガス利用等に加えて、①下水汚泥と他バイオマスの混合メタン発酵、②下水汚泥の燃料化 (炭化、乾燥)、③下水汚泥と草木廃材の混合焼却、の 3 つの技術を選定した。

2030 年時点における下水汚泥の循環ビジ

図表 14 下水汚泥等の発生量予測 (2030 年施設概成(全国))  
(上図のデータは、2007 年まで(単独浄化槽のみ 2006 年まで)は実績値である)



シナリオとして、家庭食品廃棄物の一部をディスポーザー普及により下水道受け入れ（シナリオ A）、家庭食廃の一部を車両で下水処理場に搬入・混合処理（シナリオ B）の二つのシナリオを想定するとともに、公共施設由来の木質廃棄物を補助燃料として使用する（シナリオ A,B）こととした。また、既に全国の下水道普及率が7割を超えており、汚泥の有効利用率も7割を超えるなかで、今後の地方公共団体の財政状況などを勘案すれば、基本的には既存の下水処理施設を活用しながら施設の機能改善や資源利用施設の追加投資が行われ、現況の下水汚泥利用方式や処理プロセスが大幅に変化する可能性は少ないと想定して、2030年における下水汚泥の利用とこれに対応した処理プロセスの選択シナリオを図表15~16の通り設定した。

図表 15 2030年における下水汚泥利用状況

| 用途            | 現況(%) | シナリオA<br>(広域・エネルギー優先) | シナリオB<br>(地域・マテリアル優先) |
|---------------|-------|-----------------------|-----------------------|
| 緑農地利用         | 14.5  | 微減 10%                | 増加(農政部)20%            |
| 建設資材(セメント化)   | 38.5  | 減少 25%                | 微減 30%                |
| 建設資材(セメント化以外) | 22.7  | 現況維持 25%              | 現況維持 25%              |
| 燃料化           | 0.7   | 大幅増 35%               | 増加 15%                |
| 埋立            | 23.2  | 若干残存 5%               | 残存(リン回収)10%           |
| その他           | 0.5   | -                     | -                     |

図表 16 2030年における処理方式

| 処理方式 | 現況 (%) | 有効利用・処分方法との対応関係  | シナリオA (%) | シナリオB (%) |
|------|--------|------------------|-----------|-----------|
| 焼却   | 54.1   | 埋立、建材化(セメント、その他) | 35        | 40        |
| 炭化   | 0.3    | 全量燃料化            | 30        | 10        |
| 乾燥   | 5.6    | 燃料化、一部緑農地        | 8         | 10        |
| 脱水   | 40     | セメント化、緑農地        | 27        | 40        |
| 消化   | 37     | (他の処理と並立)        | 50        | 40        |

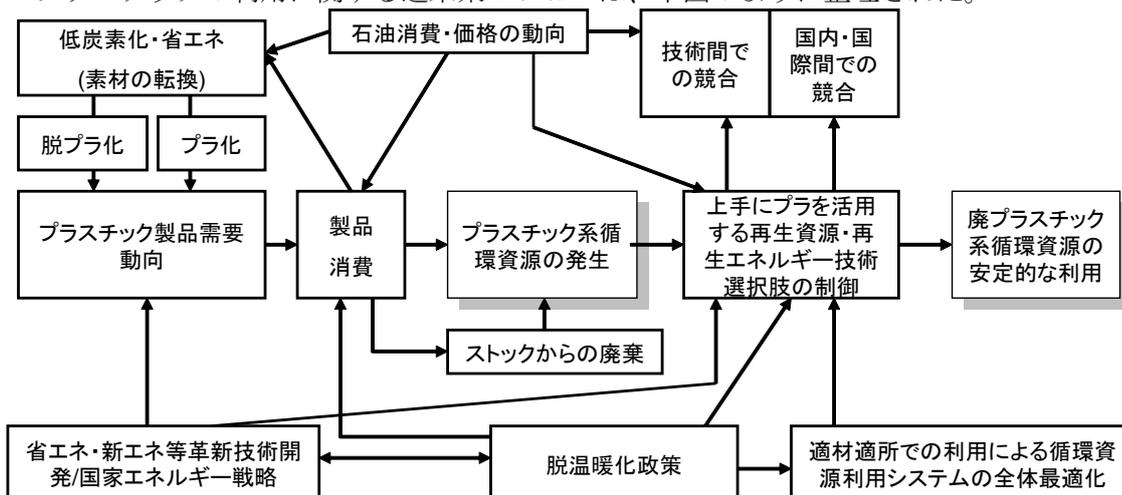
### 3.5.3 ケーススタディによる定量的分析結果

以上の設定シナリオ A,B に基づき、下水汚泥処理プロセスで排出される温室効果ガス (GHG) 及び汚泥有効利用により得られる再生可能エネルギー量を算定し、循環型システムの構築による GHG 削減効果の算定とコスト分析を行った。この結果、2030年において対策なしのケース（汚泥利用状況や処理方式の構成比は現況どおり。下水汚泥量のみ2030年予測値に変化した場合）と比較して、シナリオ A では年間約 163 万トン-CO<sub>2</sub>、シナリオ B では約 194 万トン-CO<sub>2</sub> が削減される（全国の施設における合計値）結果となった。GHG 抑制に特に大きな影響を及ぼす要因は、食品廃棄物の受け入れによるバイオガス利用だった。

## 3.6 プラスチック系資源循環システム

### 3.6.1 プラスチックの利用に関する近未来ビジョン

プラスチックの利用に関する近未来ビジョンは、下図のように整理された。



図表 17 プラスチックの利用に関する近未来ビジョン

### 3.6.2 プラスチック分野の低炭素・省資源化

プラスチックの製造に伴う枯渇性資源（石油）の投入量は、以下の恒等式で表現することができる。

$$\text{枯渇性資源投入量} = \text{機能量} \times \frac{\text{新規製品量}}{\text{機能量}} \times \frac{\text{原燃料使用量}}{\text{新規製品量}} \times \frac{\text{枯渇性資源投入量}}{\text{原燃料使用量}}$$

①                      ②                      ③                      ④

枯渇性資源の投入量は、提供される機能量(①)に、機能量当たり製造(購入)する新規製品量(②)、新規製品量当たり使用する原燃料量(③)、原燃料に占める枯渇性資源の割合(④)が掛け合わされたものとなる。本研究では、機能量を一定値に維持しながら②～④の各要素を向上させる(数値を低下させる)ことで、枯渇性資源投入量をどの程度削減可能であるか、あるいはその妥当な削減量はどの程度であるかを検討した。

### 3.6.3 新規製品量/機能量(②)

同じ製品を繰り返し使うことや長期間使用することによって、機能量当たりの新規製品製造(購入)量を削減することができる。

図表 18 繰り返し利用・長期使用によるプラスチック消費削減ポテンシャル(例)

| 対策           | 消費量<br>[万t/年] | 消費割合*1<br>[%] | 既削減量<br>[万t/年] | 追加削減量<br>[万t/年] | 追加削減<br>寄与[%] | 備考      |
|--------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|---------|
| レジ袋→マイバック    | 39.5          | 4.7           | 7.3            | 11.9            | 1.4           | 辞退率30%増 |
| 長期使用(電気電子機器) | 142.0         | 16.8          | -              | 56.8            | 6.7           | 寿命1.4倍  |
| 長期使用(建材)     | 100.0         | 11.9          | -              | 20.2            | 2.4           | 寿命1.4倍  |
| 長期使用(輸送機械)   | 85.0          | 10.1          | -              | 34.0            | 4.0           | 寿命1.4倍  |

\*1 日本のプラスチック総消費量に対する割合

### 3.6.4 原燃料使用量/新規製品量(③)

(1)製品の軽量化による削減

容器の軽量化は既に対策が進んでいる。

図表 19 軽量化によるプラスチック消費削減ポテンシャル(例)

| 対策               | 消費量<br>[万t/年] | 消費割合*1<br>[%] | 既削減量<br>[万t/年] | 追加削減量<br>[万t/年] | 追加削減<br>寄与[%] | 備考          |
|------------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|-------------|
| PET容器(清涼飲料、醤油、酒) | 54.7          | 6.5           | -              | 0.21            | 0.0           | 8割以上の容器が対策済 |
| PE洗剤容器           | 4.9           | 0.6           | -              | 0.2             | 0.0           | 7割以上の容器が対策済 |

(2)製造エネルギーの節減

製造エネルギーの原単位は近年頭打ち傾向にあり、大幅な削減は難しいと考えられる。

### 3.6.5 枯渇性資源投入量/原燃料使用量(④)

(1)再生可能資源の活用

○バイオプラスチックへの代替

バイオエタノールを原料とするポリエチレンなどのプラスチックが製造されており、低炭素化の効果が報告されている。分子構造が変わらないため、石油から製造したプラスチックと同じように利用することができる。

○紙による代替

図表 20 紙化によるプラスチック消費削減ポテンシャル(例)

| 対策        | 消費量<br>[万t/年] | 消費割合*1<br>[%] | 既削減量<br>[万t/年] | 追加削減量<br>[万t/年] | 追加削減<br>寄与[%] | 備考 |
|-----------|---------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|----|
| カップ麺容器の紙化 | 2.0           | 0.2           | 0.2            | 1.8             | 0.2           |    |

これらによる省資源、低炭素化は可能であるが、問題となるのは、バイオマスの面積当たりの生産性の低さにより、土地利用に与える影響が極めて大きい点であり、太陽光発電など、面積効率の高い対策との適切な役割分担が求められる。

(2)リサイクル

廃プラスチックのマテリアルリサイクルと、ケミカル・サーマルリサイクルの化石資源消費削減効果の理論最大値の比は3:2程度(CO<sub>2</sub>削減量も同様)である。マテリアルリサイクルは200万t/年程度実施されているが、良質の廃プラスチックのリサイクルは既に進んでおり、品質面で優れた(最大効率に近い)マテリアルリサイクル量を大幅に増やすことは難しい。一方、動脈産業施設を利用したリサイクルは、理論最大値からそれほど遜色ないリサイクルが実施されている。現在焼却発電、熱利用焼却または単純焼却されているプラスチックの70%(約400万t/年)を分別回収して高効率利用し

た場合、石炭換算で 380 万 t/年程度の化石資源消費と 940 万 t/年程度の CO<sub>2</sub> 排出の削減に繋がる可能性がある。

### 3.7 土石系廃棄物の循環技術システム

#### 3.7.1 土石系資源循環に影響を及ぼす要因

土石系廃棄物の発生源は、産業全般の生産活動に伴い発生するものと、土木構造物や建築物等の既存ストック解体由来のものに分類することができる。主な排出業種は建設業であるが、鉄鋼スラグを排出する鉄鋼業、石炭灰を排出する電力業など、建設業以外からも排出される。近未来の土石系循環資源の利用、供給システムに影響を及ぼすと考えられる要因を整理した結果を図表 21 のようになる。

#### 3.7.2 近未来の土石系フローの推定

##### (1) 分析対象と分析手法

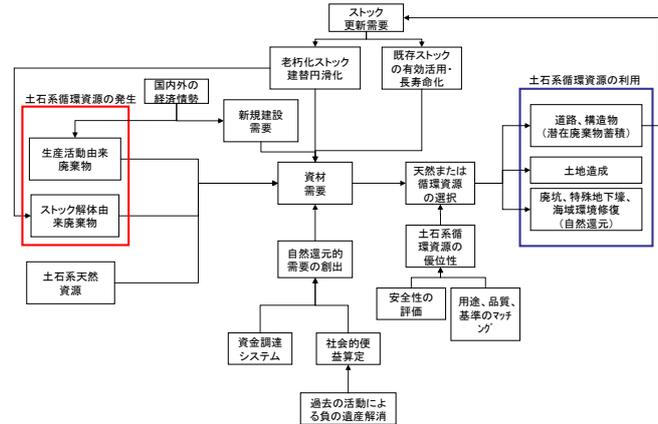
近未来（2030 年度）の土石系廃棄物の最終処分量の削減目標を設定し、あわせて CO<sub>2</sub> 排出量の削減を考慮した土石系廃棄物フローについて検討した。土石系廃棄物のうち、①コンクリート塊、②アスファルト・コンクリート塊、③鉄鋼スラグ、④石炭灰を対象とした。利用用途は、道路用砕石、コンクリート用骨材、その他の砕石、アスファルト合材、セメント（原料、混合材）とした。混和材としての利用は、現状のセメント代替率のままとするシナリオ 1 と、代替率を向上させるシナリオ 2 の 2 種類を設定した。分析手法としては、土石系廃棄物等と土石系循環資源の物質フロー、関連する産業間の金銭フロー、CO<sub>2</sub> 排出量を把握するために土石系資源分析用産業連関表を作成し、線形計画法を用いて、将来の物質フローを検討した。

##### (2) CO<sub>2</sub> 排出量の推定結果

図表 22 に対象とした土石系関連産業の CO<sub>2</sub> 排出量の内訳を示す。計算の結果、2030 年の土石系関連産業の CO<sub>2</sub> 排出量は 50.4 千百万 t-CO<sub>2</sub> へと 5.2% の減少（シナリオ 1）、42.3 百万 t-CO<sub>2</sub> へと 20.4% の減少（シナリオ 2）という結果が得られた。土石系関連産業の CO<sub>2</sub> 排出量のほとんどがセメント産業からの排出であるため、シナリオによる結果の差はセメント混和剤としてのスラグの利用量の設定条件の違いと考えてよい。一方、砕石・骨材系の製造からの排出量の内訳をみると、路盤用砕石およびコンクリート骨材においては、新材製造からの CO<sub>2</sub> 排出量が減少し、再生材製造では逆に増加した。

##### (3) 土石系廃棄物のフロー推定結果

図表 23 に 2005 年、2030 年（シナリオ 1）、2030 年（シナリオ 2）の土石系の物質フローを示す。シナリオ 1 において、2030 年にはコンクリート塊の発生量が 5,478 万 t へと増加し、再生路盤用砕石への利用 4,508 万 t に加え、再生コンクリート骨材への利用が 520 万 t へと拡大するという結果となった。鉄鋼スラグは、コンクリート骨材への投入量が 337 万 t から 1,986 万 t へと増加し、アスファルト合材への投入も 23 万 t から 1,230 万 t へと増加する。一方、セメントへの投入は 1,725 万 t から 1,621 万 t へと減少しているが、これは建設業の縮小に伴うセメント需要の減少によるものである。石炭灰については、2005 年から 2030 年において発生量が変化しないと設定しているため、フローにおいても大きく変化しなかった。一方、シナリオ 2 では、鉄鋼スラグのセメントへの利用が増大し、2005 年の 1,725 万 t から 2030 年には 2,378 万 t へと変化している。その分、砕石へと流れていた量が減少するという結果が得られた。



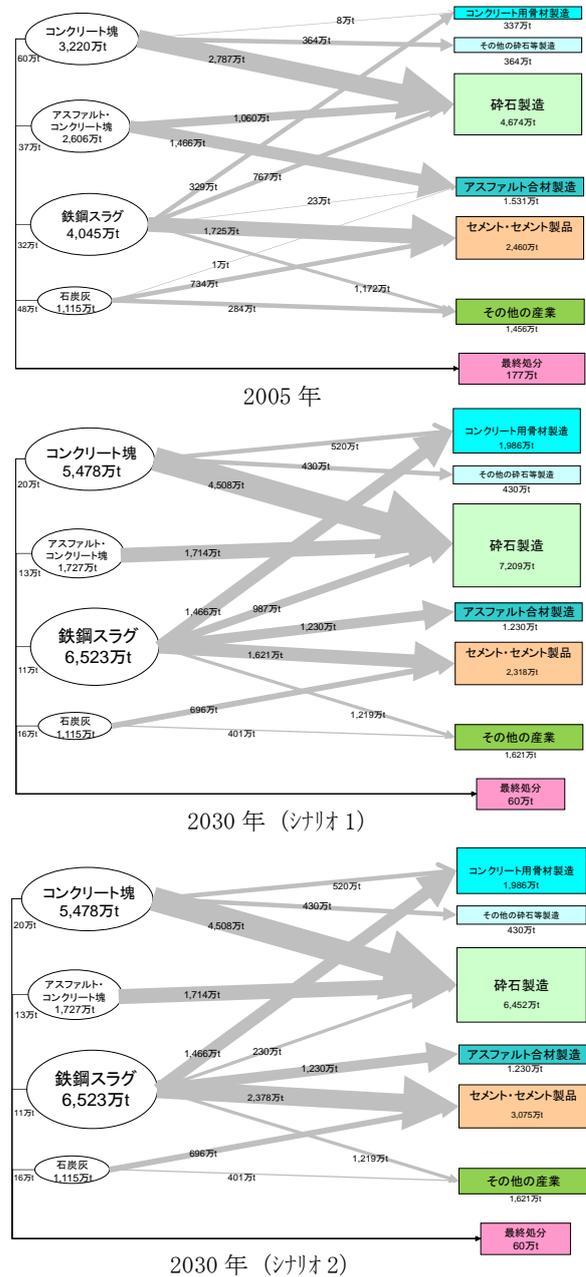
図表 21 近未来の土石系資源循環システムに影響する主要因構造

図表 22 土石系資源循環のフローおよび CO<sub>2</sub> 排出量の算定範囲

| 土石系関連産業 |            | 2005            | 2030<br>シナリオ1   | 2030<br>シナリオ2   |
|---------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 砕石・骨材   | 天然路盤用砕石    | 112 (0.21)      | 57 (0.11)       | 65 (0.15)       |
|         | 再生路盤用砕石    | 64 (0.14)       | 99 (0.22)       | 89 (0.22)       |
|         | 天然コンクリート骨材 | 141 (0.27)      | 105 (0.21)      | 105 (0.25)      |
|         | 再生コンクリート骨材 | 5 (0.02)        | 65 (0.17)       | 65 (0.20)       |
|         | 天然アスファルト合材 | 60 (0.11)       | 60 (0.12)       | 60 (0.14)       |
|         | 再生アスファルト合材 | 360 (0.69)      | 284 (1.13)      | 284 (1.34)      |
|         | その他の砕石等    | 30 (0.06)       | 25 (0.05)       | 25 (0.06)       |
|         | その他の再生砕石等  | 4 (0.01)        | 5 (0.01)        | 5 (0.01)        |
| 小計      | 777 (1.46) | 702 (1.39)      | 700 (1.66)      |                 |
| セメント    | セメント       | 50,355 (94.83)  | 47,818 (94.97)  | 39,722 (94.01)  |
|         | 生コン・セメント製品 | 1,943 (3.66)    | 1,824 (3.62)    | 1,824 (4.32)    |
|         | 小計         | 52,299 (98.49)  | 49,642 (98.59)  | 41,547 (98.33)  |
| 埋立処分    |            | 23 (0.04)       | 8 (0.02)        | 8 (0.02)        |
| 合計      |            | 53,099 (100.00) | 50,352 (100.00) | 42,254 (100.00) |

#### (4) 建設需要と土石系資材の需給バランス

2030年における建設業の最終需要を変化させた場合の土石系資材の利用量の推移について分析した。本分析では、2030年における建設業の最終需要を2005年比で15%以上減少させて計算した場合、線形計画法による解が得られなかった。この場合、土石系資材の需給バランスを保つことができないことになる。このような状況を回避し、今後の土石系循環資源の需給バランスを安定させるために、これまででなされていなかった新規の需要先の開拓と考えられる。現在、浚渫深堀跡の埋め戻し、人工干潟の造成等の海洋環境の修復事業や、亜炭廃坑、特殊地下壕の埋め戻しといった利用先の検討が始まっている。これらの事業は、いずれも投入された資材が将来の廃棄物として蓄積されることは無く、むしろ土石系循環資源を自然に還元するものとして考えることができる。ただし、事業自体は社会的便益を生み出すものであるが、現状では投資費用を回収することが困難であるため、低コストのリサイクル技術の開発だけでなく、円滑に事業をすすめるための制度やシステムづくりが必要である。再生利用認定制度や経済特区等のさらなる活用のための基準作りとともに、資金調達システムの確立が必要である。



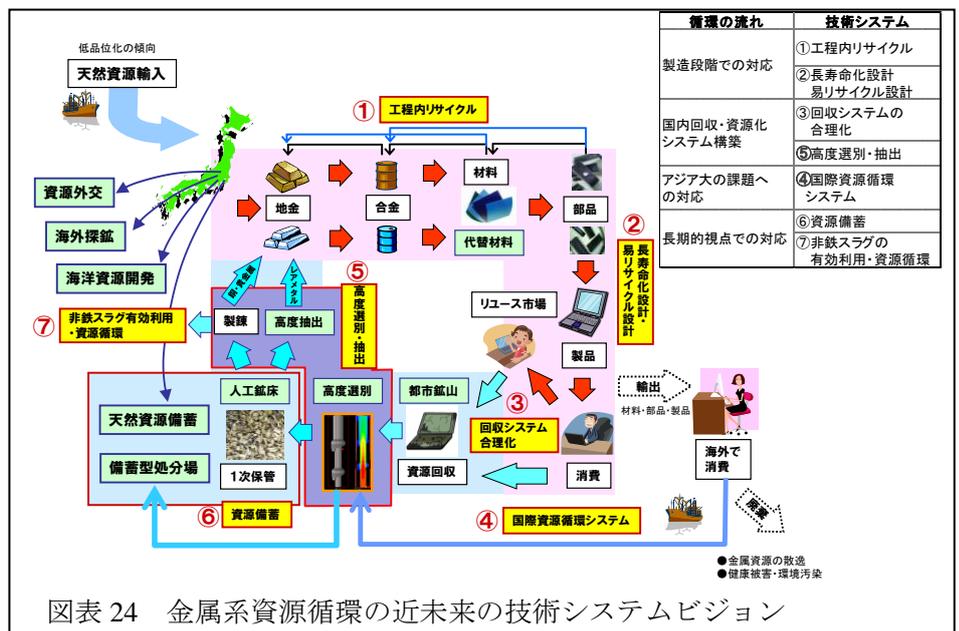
図表 23 土石系物質フローの推定結果

### 3.8 金属系

#### 3.8.1 金属系循環資源の消費と利用に関する要因構造

金属系資源は比較的循環利用が進んでいるため、「廃棄」を起点とするよりも、「消費（利用）」を起点と考えるほうが妥当と考えられる。そこで、供給から消費にいたるまでの詳細構造および消費後から再資源化にいたる詳細構造を整理し、それを踏まえて主要因構造を図表 24 のように整理した。

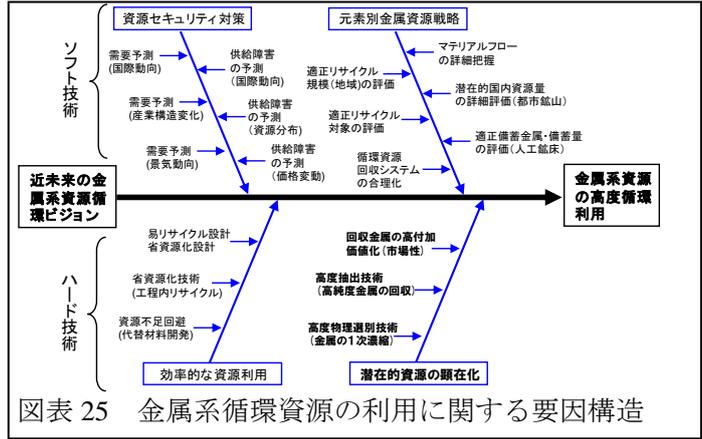
#### 3.8.2 金属系資源循環の近未来の技術システムビジョン概



図表 24 金属系資源循環の近未来の技術システムビジョン

### 要と「資源循環インターフェース」

金属系資源の技術システムビジョンとしては、図表 25 のような包括的な技術システムビジョンを想定し、使用済み品の廃棄あるいは再利用というそれぞれの段階に応じて、7つの技術要素（①工程内リサイクル、②長寿命化・易リサイクル設計、③回収システムの合理化、④高度選別・抽出、⑤国際資源循環システム、⑥資源備蓄、⑦非鉄スラグの有効利用・資源循環）から成り立っている。これらの技術要素について、行為の担い手に基づいて3つのグループに整理し、「生産現場」と「生活現場」を結ぶ「資源循環インターフェース」が、近未来の金属資源循環が効果的に行われるうえで促進が必要な技術要素であると考えた。

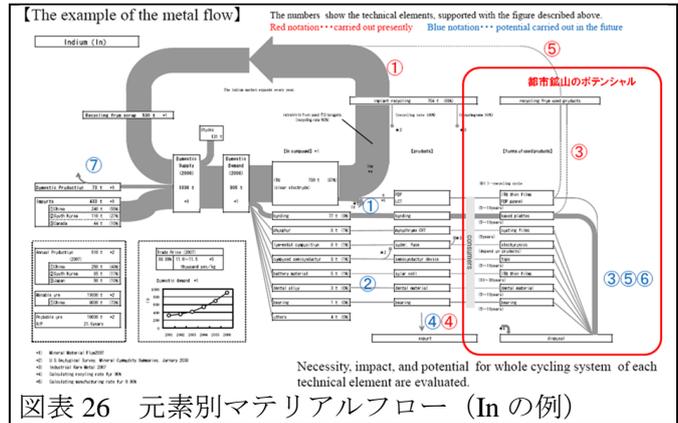


図表 25 金属系循環資源の利用に関する要因構造

### 3.8.3 我が国の金属系資源循環ポテンシャル

ベースメタル、レアメタル等は我が国の産業政策上、非常に重要な物質である。資源価格上昇と輸入依存から、資源リスクも大きい。ただし、将来的には、①高機能化による高付加価値金属の使用量増加、②技術進歩（省資源化）による高付加価値金属の使用量減少という、相反するベクトルがあり、廃電気電子機器等に含まれる金属資源量がどのように推移するかは予測が難しい。

各種資料、資源状況を俯瞰した結果、廃電気電子機器の回収を進めることは、銅、金、銀、タンタルなどについては一定程度は有効と考えられた。特に、廃電気電子製品を全般的に対象とするような資源循環システムの構築は金属資源の資源セキュリティの面からも十分に意義がある。小型電気電子機器のみを対象としたリサイクルは、少量の廃棄物から効率的に貴金属類を回収するのであれば有効であるが、資源セキュリティ面からはその効果は限定的と考えられた。電気電子機器以外の用途に対しても相当量の金属資源が使用されており、金属資源ごとに資源循環効率を高めるための対象分野を見定めていく必要がある。



図表 26 元素別マテリアルフロー (In の例)

金属系資源は総体として扱うことが難しく、その種類によってマテリアルフローや都市鉱山としてのポテンシャルも異なる（図表 26）。そこで各工程における各種金属の資源循環ポテンシャルを整理（図表 27）するとともに、都市鉱山開発より工程内リサイクルの量的インパクト（A/B が大）や現状でのリサイクル（都市鉱山開発）の進捗状況（C/B）の指標化を提案し、定量的に示した。

金属系資源は総体として扱うことが難しく、その種類によってマテリアルフローや都市鉱山としてのポテンシャルも異なる（図表 26）。そこで各工程における各種金属の資源循環ポテンシャルを整理（図表 27）するとともに、都市鉱山開発より工程内リサイクルの量的インパクト（A/B が大）や現状でのリサイクル（都市鉱山開発）の進捗状況（C/B）の指標化を提案し、定量的に示した。

### 3.8.4 都市鉱山開発技術

廃電気電子機器等を都市鉱山として利用するには、市場流通性のある原料として、生産現場に安定供給することが必要である。これを実現する技術が、廃棄物を固体状で粉碎・選別する中間処理技術である。現状では、非鉄製錬で回収できるレアメタルは限定的であるた

|        | 日本の金属生産規模（製錬所能力） | 資源循環ポテンシャル |                |             |          |         |       |                  |              |
|--------|------------------|------------|----------------|-------------|----------|---------|-------|------------------|--------------|
|        |                  | ①工程内リサイクル  | ②長寿命化・易リサイクル設計 | ③回収システムの合理化 | ④高度選別・抽出 | ⑤国際資源循環 | ⑥資源備蓄 | ⑦非鉄スラグの有効利用・資源循環 | 資源自給率 (2008) |
|        |                  | A          | B              | C           |          |         |       |                  |              |
| 銅      | 1.00             | 1.07       | 1.07           | -           | 0.96     | -       | 0.12  | 0.49             |              |
| 鉛      | 1.00             | 1.13       | 1.11           | -           | 0.62     | -       | 0.49  | 0.83             |              |
| 亜鉛     | 1.00             | 0.96       | 0.80           | -           | 0.74     | -       | 0.06  | 0.06             |              |
| 金      | 1.00             | 1.43       | 1.04           | -           | 0.51     | -       | 0.53  | 0.54             |              |
| 銀      | 1.00             | 1.63       | 1.73           | -           | 1.50     | -       | 0.23  | 0.28             |              |
| タングステン | 1.00             | 0.85       | 0.53           | -           | 0.38     | -       | 0.15  | 0.19             |              |
| タンタル   | 1.00             | 1.31       | 0.71           | -           | 0.71     | -       | 0.00  | 0.00             |              |
| リチウム   | 1.00             | 1.01       | 0.67           | -           | 0.67     | -       | 0.00  | 0.00             |              |
| インジウム  | 1.00             | 1.46       | 0.19           | -           | 0.19     | -       | 0.00  | 0.00             |              |

図表 27 各工程における各種金属の資源循環ポテンシャル

め、中間処理工程で事前にレアメタルを分離しておくことが必要となる。しかし、不特定多数の廃製品からレアメタルを精密に選別するプロセスの開発が立ち遅れており、レアメタルの量的な確保と共に中間処理技術の高度化が不可欠な課題であることを示した。

また、備蓄技術について、その考え方を整理するとともに、具体的な備蓄方法を試行的に提案し、備蓄場所やメリット・デメリット、備蓄費用を検討・整理した。備蓄方法によって費用は大きな幅があり、備蓄の目的や対象を吟味した上で金属資源循環の戦略の中に備蓄を適切に位置づけていく必要があることが示唆された。

### 3.8.5 有害物質管理面からの検討

鉛など金属資源は有害物質の側面を有し、廃棄物として処理されると非常に長期間をかけて最終的には環境中に広く薄く拡散される。既存研究によると焼却処理される鉛の量は全国で数百～数千-tであり、環境中に拡散させないために相応の対策費用が生じている。金属資源循環の促進により、廃棄物処理施設への有害物質投入削減を図ることは環境安全上の観点からも有効となる。

### 3.8.6 まとめ

本研究では金属系循環資源について、要因構造-システムビジョン-担い手に基づく循環構造と展開して「資源循環インターフェース」を定義した。また、廃製品から回収が有効な金属種の限定、その安定的な資源化に資する中間処理技術、備蓄技術あるいは有害物質管理の面からの重要性等について検討し、近未来の金属系資源循環の全体像を明確にするとともに、その実現のための課題をまとめた。

## 4. まとめ

7種類の循環資源について、近未来の発生と循環利用に関係する要因を抽出し構造化して分析した。その結果を踏まえ、近未来のビジョンを描出した。ビジョンについて、二つのシナリオ（特に4種類のバイオマス系循環資源について、社会シナリオとしての技術重視とライフスタイル重視、対策シナリオとしてのエネルギー回収・広域連携重視とマテリアルリサイクル・地域内重視）を設定し、循環資源の発生量、各種の廃棄物の処理・リサイクルのフロー、温室効果ガス排出量、一部技術導入コストの評価を行い、各循環資源について事例分析を行った。特にバイオマスについては、地域区分ごとのシナリオの特徴づけ、バイオマスの種類ごとの混合処理などについても考慮した。

その結果、それぞれの循環資源について得られた成果は異なるが、2030年頃のシナリオ毎の発生量の予測、地域類型ごとの発生量、温室効果ガスの発生量予測などの結果が得られ、対策の導入によるコストや環境負荷低減効果が明確になった。

## 英語概要

・研究課題名 = Establishment of assessment model and projection and assessment of resource/environmental efficiency for technological systems forward a sound material cycle society

・研究代表者名及び所属 = Masahiro Osako (National Institute for Environmental Studies), Yuichi Moriguchi (National Institute for Environmental Studies), Minoru Fujii (National Institute for Environmental Studies), Rokuta Inaba (National Institute for Environmental Studies), Seichiro Okamoto (Public Works Research Institute), Tatsuya Oki (Advanced Industrial Science and Technology), Akifumi Ogino (National Institute Of Livestock and Grassland Science), Hirofumi Nakayama (Kyusyu University), Yoshio Yagi (Japan Waste Research Foundation), Kouichi Tachio (Japan Environmental Sanitation Center), Hitoshi Kobayashi (EX corporation), Naohisa Yamaguchi (EX corporation)

・要旨 (200語以内) = We first the near future vision of a sound material cycle society for each recyclable resource based on structural analyses on social and technological factors which could affect generation and material cycles of the recyclable resources. We next set two scenarios such as a technology-oriented and a lifestyle-oriented one in terms of social change in the future as well as technological response forwarding a sound material cycle society. In the each scenario, we designed a numerical material flow model including various material cycle processes. We also collect data to project the generation amount for each recyclable resource. We piled up input-output data of material, energy and cost in the related technological processes. Based on the data we estimated resource recycling potential, amounts of resource consumption, landfill disposal and GHG emission in the future scenario.

As a result, we identified reduction effects in the environmental load brought from countermeasure response associated with the material cycle technology.

- キーワード (5 語以内) = Material Flow Analysis, Recyclable Resource, Resource Efficiency, Environmental Efficiency, Future Projection