

廃棄物処理等科学研究費補助金 総合研究報告書概要版

・研究課題名＝近未来の循環型社会における技術システムビジョンと転換戦略に関する研究

・研究番号 ＝K1801、K1942

・国庫補助金精算所要額（円）＝39,877,000

・研究期間（西暦）＝2006－2007

・研究代表者名＝大迫 政浩（独立行政法人国立環境研究所）

・共同研究者名＝井上 雄三（独立行政法人国立環境研究所）、倉持 秀敏（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）、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) エックス都市研究所）、山口 直久（(株) エックス都市研究所）、藤井 崇（みずほ情報総研株）

1. 研究の背景と目的

循環基本法、循環基本計画における 2010 年の目標設定の下、様々な主体での循環型社会への転換戦略が必要とされている。また、ポスト 2010 年の 10～20 年後の近未来の将来ビジョンも描く必要があり、その場合には、脱温暖化や資源エネルギーセキュリティ、国土保全などの同時解決をも念頭に、持続可能な循環型社会の構築を目指さなくてはならない。そのために本研究は、主に近未来の技術システムづくりの観点から、将来ビジョンとそれに向けた転換戦略を提示することを目的とする。また、その検討の過程で得られる近未来の物質フローの予測手法、地域実証に繋がるビジネスモデル・産業モデルなどを具体的な技術システムの設計・評価に基づいて提示する。

2. 近未来の資源循環技術システムの設計フレームと循環型社会ビジョンに関する検討

2.1 循環型社会への転換戦略の概念設計

近未来の資源循環システムの設計を行った。まずシステム設計にあたり、循環型社会への転換戦略の概念として図 1 を作成し、それを基にシステム評価の視点として資源生産性を左右する技術システムを消費段階、生産段階、静脈での再生利用段階に分解し定式化することによって、資源生産性を上げるための技術システム設計の戦略を明確にした。まず、資源生産性は以下のように分解できる。

$$\begin{aligned} \text{資源生産性} &= \text{GDP} / \text{天然資源投入量} \\ &= (\text{GDP} / \text{効用}) \times (\text{効用} / \text{製品・サービスの量}) \\ &\times (\text{製品・サービスの量} / \text{資源投入量}) \\ &\times (\text{資源投入量} / \text{天然資源投入量}) \end{aligned}$$

ここで、(効用/製品・サービスの量) は、社会の価値基準やライフスタイルを変革することにより、少ない製品・サービスの量で必要な効用を得ることによって資源生産性を増大させることができる。3R 施策から言えば、主に発生抑制 (Reduce) が対応する。(製品・サービスの量/資源投入量) は、生産工程の見直しによる製品の軽量化や長寿命化などの技術的な取り

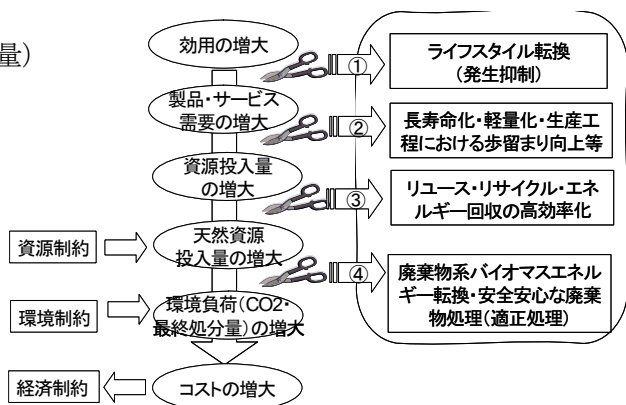


図 1 循環型社会への転換戦略の概念図

組みであり、これも 3 R の Reduce に対応する（長寿命化によって再使用が促進される側面もある）。最後の（資源投入量／天然資源投入量）は、資源投入量／（資源投入量－循環資源投入量）と書き換えることができ、循環資源投入量を多くすれば天然資源消費量を抑制できる。3 R 施策では再使用（Reuse）、再生利用（Recycle）が対応する。以上のように考えれば、資源生産性を増大させる上での各段階での戦略が明確になり、それらをどのように組み合わせれば最も効果的かを考えていかなければならないことが理解できる。

2.2 あるべき姿の描出の観点

資源循環技術システムのあるべき姿を考える場合は、価値基準が必要である。価値基準を整理する上では、システムによってどのような循環型社会（社会像）を実現しようとしているかがまず重要である。以下に考え得る循環型社会像を挙げる。

- (1) 天然資源の消費抑制を重視した循環型社会
- (2) 脱温暖化を重視した循環型社会（脱温暖化社会・低炭素社会）
- (3) 環境（化学物質）リスク低減を重視した循環型社会

循環型社会形成推進基本法によれば、法の目的は第一に天然資源消費抑制であり、同時に環境負荷低減を図ることであるが、環境負荷の要素には種々のものがあるので、それらを昨今の情勢を踏まえて二つの観点を挙げて、それぞれへの対策を重視する社会をまず挙げた。なお、上記において経済の持続可能性は確保されていることを前提にした。

上記は、最終的なアウトカムを価値基準と考えた場合の社会像であるが、システムづくりを行う上では、社会を構成する人間とその集まりとしての様々なスケールの社会が存在し、先の環境負荷の基準とは異なる人間社会のあり様としての社会的な価値基準で社会像が描くこともあり得る。社会的な価値基準を明確に分類、定義付けることは難しいが、循環型社会形成にとって昨今重要な視点を踏まえ、以下の社会像を挙げた。

- (4) サーバサイジングを重視した循環型社会（脱物質化社会）
- (5) 拡大生産者責任を徹底させた循環型社会
- (6) 地域コミュニティが自立した循環型社会
- (7) 国内資源セキュリティを重視した循環型社会
- (8) 国際資源循環促進を重視した循環型社会
- (9) 負の遺産解消を重視した循環型社会

2.3 近未来の社会シナリオと循環型社会ビジョン

近未来の技術ビジョンづくりにおいて、前提となる社会自体がどのように変化するかで相性の良い対策は異なると考えられ、社会シナリオと整合性をもった対策シナリオを描きビジョンを設定する必要がある。そこで、近未来の社会シナリオを描き、その上で昨年度提示した対策の思想（ビジョン）との整合性、位置づけを明確にすることにした。環境省の「超長期ビジョン」や「低炭素社会 2050」等で提示されている社会シナリオ等も参考にしながら根源的な社会の分岐点となる軸を設定し、軸で構成される座標面を社会の変動幅と捉え、社会シナリオとしての設定を行った。その座標面上に、前節で提示した対策の思想（あるべき姿：ビジョン）を位置づけることを試みる。

従来のビジョン・シナリオ研究における成果をレビューした結果、社会の分岐点となる外的因子は、「ライフスタイル・価値観」、「技術」、「国際関係」であると考えられた。そこで、前二者を横軸に、後者を縦軸に配置し、2軸で構成される座標面を図2のように設定した。横軸は、低炭素社会 2050 における「ドラえもん」、「サツキとメイ」の社会シナリオに対応し、循環白書や新循環基本計画の中に記載されている中長期的な循環型社会への道筋のイメージとも合致した。また縦軸は、超長期ビジョンにおける感度解析因子にも対応した。したがって、本座標面の設定は循環型社会ビジョンを議論する上でも妥当性があるとみなした。

2軸で構成される座標面には4象限が存在するが、各象限ごとに近未来の物質フローの状況を想定した社会像を図2のように暫定的に設定し、「地産地消」「国内囲い込み」「国際格差・資源大循環」「融和的国際分業」と象徴的に名付けた。そこに、昨年度提示した対策の思想のキーワードをある程度主観的に配置すると図2のようになる。社会シナリオごとに対策思想とは相性があり、社会シナリオと対策シナリオはセットで検討し、ビジョンを検討する必要性が示唆される。

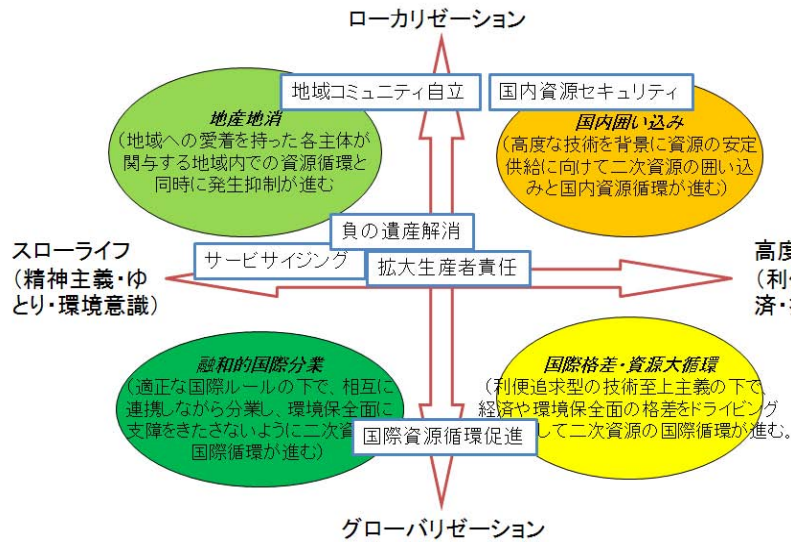


図2 社会シナリオ軸上の社会像と対策思想（あるべき姿）の配置

3. 近未来の資源循環技術システムへのニーズとシーズに関する調査

3.1 目的および研究方法

近未来の資源循環技術システムづくりの戦略を考える場合に、将来の社会像やその中で求められる技術像（これらをまとめて技術ニーズとする）を描き、技術システムを構成可能な要素技術（これを技術シーズとする）を抽出整理することが必要である。また、循環技術システムの位置づけは対象となる循環資源の発生動向によっても変化することから、循環資源の発生量の変動要因を把握することも重要となる。

そこで、まず近未来における技術ニーズの全体像を把握するために、将来に向けた技術開発戦略づくりを行う際の方法についてレビューし、いつかの方法の中から因果関係モデルを選択し適用を試みた。また、変動要因の把握と物質フローの近未来予測を行うことを目的に、木質系循環資源を例として物質フローモデルの構築を行い、外生変数である製品需要を現状推移ケースで設定することで将来予測を実施した。モデル化および将来予測は、①製品需要から循環資源の発生、利用及び天然資源の投入に至る因果関係を整理、②関連した統計データの収集・整理、③上記の作業を踏まえモデルを構築、④構築したモデルの外生変数を設定することで将来予測を実施、の手順に沿って行った。また、近未来に適用可能な技術システムの技術シーズを把握・整理するために、近年注目を集めているバイオマス系循環資源を対象にし、主にエネルギー回収に関係する各種技術に対する特許出願件数の推移、及び日欧米間比較を行った（技術シーズ調査）。

3.2 研究成果（結果と考察）

物質フローに特に関係する要因として、「少子高齢化」、「IT化の進展」、「安全・安心な生活」、「安全・安心な生活」、「産業構造の変化」、「持続可能なエネルギーシステム」、「地域社会の自立」、「グローバル化」を選定し、これらの要因と物質フローの因果関係の大まかな整理を行うことで、近未来においてターゲットとすべき循環資源や必要となる技術群を整理することができた。

また、木質系循環資源の物質フローモデルを構築し、更にモデルの外生変数を設定することにより、近未来における循環資源の発生量の将来予測を行うことができた(図3～図6)。これらの研究成果を活用することにより、近未来における循環資源の発生状況を定量的に踏まえた循環技術システムの検討を行うことが期待できる。

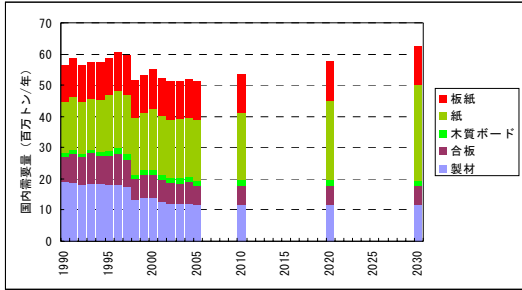


図3 製品の国内需要量の推移(推移実績及び将来想定)

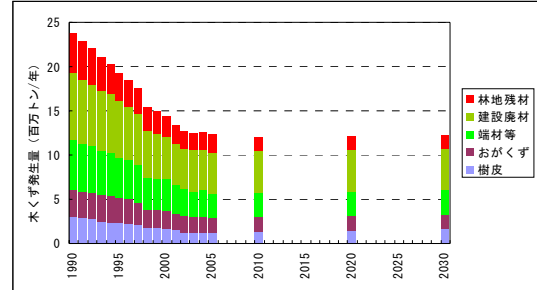


図5 木くず等の発生量の推移(推計実績及び将来値)

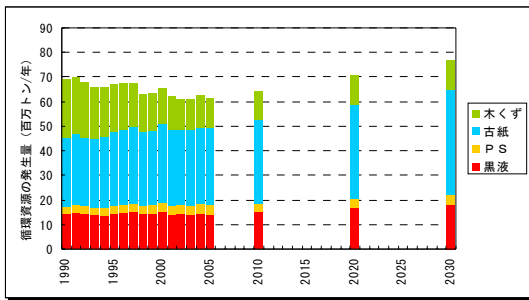


図4 木質バイオマス系循環資源の発生量の推移(推計実績及び将来値)

(注) 古紙の発生量は紙・板紙の国内需要量と同じとして計算している。

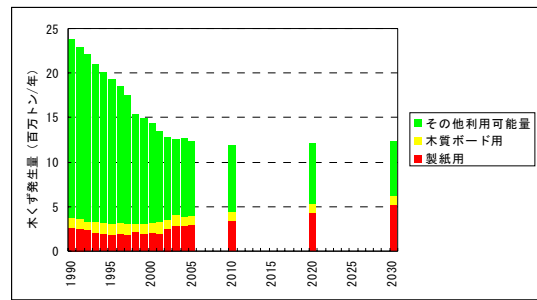


図6 木くず等の利用量の推移(推計実績及び将来値)

(注) 「その他利用可能量」は発生量から製紙用と木質ボード用を除いた量で、燃料や家畜敷料などとして既に利用されている量を含む

特許調査によっては、バイオマス系循環資源のエネルギー回収技術として、「熱分解」や「炭化」などの技術は日本の特許出願件数が多く国際的な競争力があることが見込まれた。また、個別のエネルギー回収技術を時系列で見ると、日本ではバイオマスを燃焼、ガス化、水素変換、炭化、熱分解によってエネルギー利用する技術の出願が急増しており、近未来において利活用される可能性の高い技術であることが分かった。

4. 素材産業を活用した動脈・静脈連携システムの設計と評価

4.1 研究の概要

すでに副産物・廃棄物を活用し我が国の資源循環に大きく貢献している鉄鋼業、非鉄製錬業、セメント産業(以下、「素材産業」という。)に着目し、業界へのヒアリングや各種統計資料及び文献資料などを基に、既存の生産プロセスにおける天然資源の消費構造と具体的に活用されている副産物・廃棄物の活用による天然消費抑制構造を整理した。

この結果から、副産物・廃棄物利用素材産業を活用した動脈・静脈連携システムの設計と評価を定量的な視点で行った。

4.2 方法

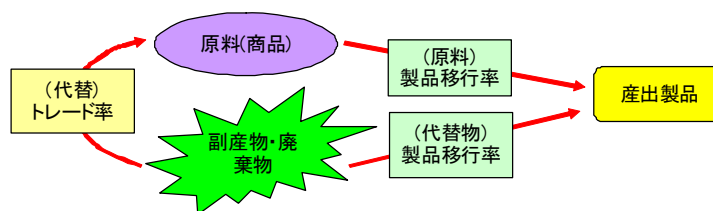
業界へのヒアリングや各種統計資料及び文献資料などを基にデータの整備を行い、現時点で収集整理した諸数値を用いて、天然資源消費抑制、二酸化炭素排出量の抑制、最終処分量の低減効果を評価指標として整理した(表1)。なお、ここでいう付加価値額とは、工業統計調査における付加価値額であり、生産額から製造品出荷額に含まれている内国消費税額、原材料使用等、減価償却額を減じた額である。

表1 システムの評価指標

指標	算出方法
①資源生産性1	付加価値額/天然資源消費量
②資源生産性2	製品生産量/天然資源消費量
③環境効率1	付加価値額/CO ₂ 排出量
④環境効率2	製品生産量/CO ₂ 排出量
⑤環境効率3	付加価値額/最終処分量
⑥環境効率4	製品生産量/最終処分量

つぎに、素材産業において、生産プロセスに投入される天然資源の各種組成を整理し、各組成がどの程度製品へ移行((原料)製品移行率)するのかを求めた。また、素材産業で活用されている副産物・廃棄物の投入プロセスを整理し、副産物・廃棄物の製品移行率を求めた。

この2つの関係から、活用される副産物・廃棄物が天然資源をどの程度代替できるのか(トレード率)を試算した。なお、投入プロセスは鉄鋼業ではコークス炉、高炉、転炉、電炉、非鉄製錬業では銅製錬、亜鉛・鉛製錬、セメント産業では焼成の7つのプロセスを対象とした。



以上の試算結果を基に、既存の素材産業における副産物・廃棄物活用による天然資源の消費抑制効果の観測を行った。

図7 天然資源と副産物・廃棄物の活用による代替構造の試算概念図

4.3 研究結果

2000年を基準として2004年までの短い期間であるが設定指標に基づき試算した。なお、エネルギー消費量は天然原料として計上した。鉄鋼業では、天然原料の消費抑制、付加価値額の増大、最終処分量の低減により、2004年の指標は2000年と比較してすべての指標が向上した。非鉄製錬業では、2004年で付加価値額が大幅に増加したことで、資源生産性1(付加価値額/天然資源消費量)、環境効率1(付加価値額/CO₂排出量)、環境効率3(付加価値額/最終処分量)の指標が、2000年と比較して向上した。鉄鋼業や非鉄製錬業では、鉄や非鉄の需要増加により付加価値額も増加しており、付加価値額を指標に取り入れた資源生産性1、環境効率1、環境効率3の向上への影響も伺えた。セメント産業では、生産量及び付加価値額の減少に伴い、資源生産性1、環境効率1が2000年に対して2004年が減少となった。

表2 評価指標算定に必要な諸数値

項目	業種	鉄鋼業		非鉄製錬業		セメント産業	
		2000年度	2004年度	2000年度	2004年度	2000年度	2004年度
投入量	天然原料 (万ト)	21,664	22,225	575	570	8,528	7,343
	副産物 (万ト)	4,386	4,711	43	49	2,736	2,878
	廃棄物 (万ト)	15	41	100	149		
	エネルギー消費量 (万kL)	6,004	6,117	220	216	745	630
産出量	生産量 (万ト)	10,690	11,290	275	266	8,237	7,168
	副産物等 (万ト)	4,320	4,611	331	318	0	0
	最終処分量 (万ト)	81	79	66	44	0	0
	CO ₂ 排出量 (万ト-co ₂)	18,227	18,472	506	510	2,474	2,108
付加価値額 (億円)		23,056	27,064	2,132	2,846	2,317	1,716

また、我が国の天然資源等投入量1,912百万トンのうち、素材産業は20%を占めている。2000年で見ると図8の素材産業におけるプロセスでの副産物・廃棄物の活用量は48百トンであり、製品移行率からほぼ同量の天然資源等を抑制していることがわかった。なお、セメント産業では天然資源等から製品へ移行する割合より副産物・廃棄物から製品へ移行する割合が高いため、天然資源等換算投入量

は多くなっている。また、鉄鋼業の転炉、電炉では鉄くずの代替物は銑鉄としているため、製品移行率は1対1で試算している。

副産物・廃棄物が活用されなかった場合では、我が国の資源生産性（2000年基準）は28万円/トンから27万円/トンへ減少することがわかった。

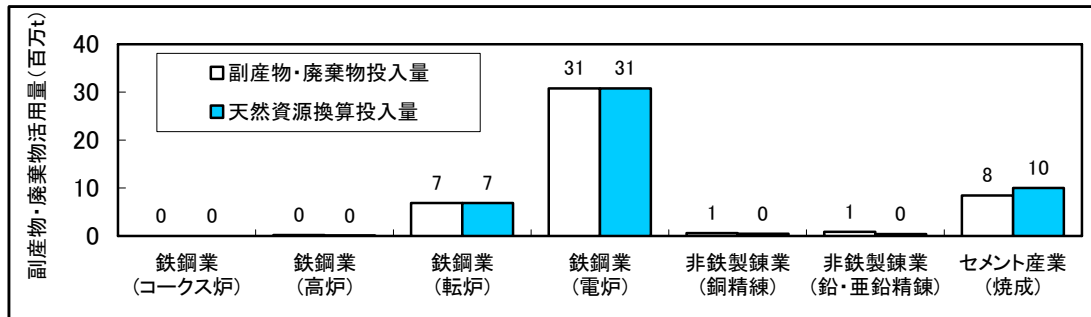


図8 天然資源と副産物・廃棄物の活用による代替構造の試算

5. 都市ごみ溶融飛灰を対象とした山元還元システムの評価

5.1 目的

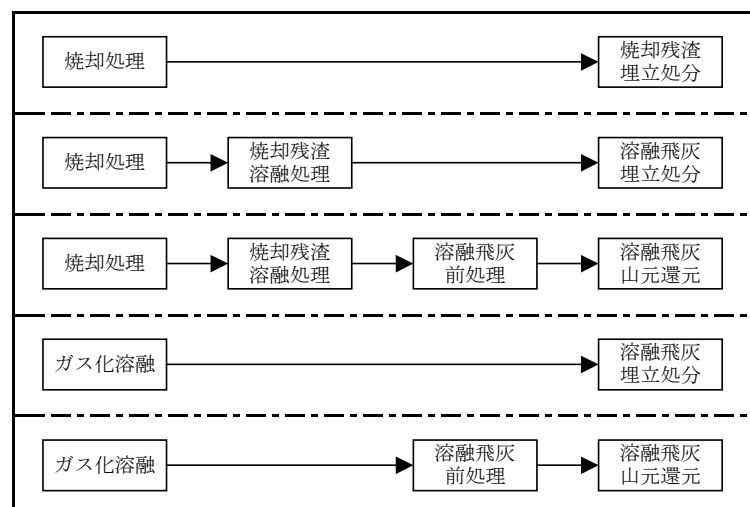
都市ごみの溶融処理の進展に伴い溶融処理プロセスから発生する溶融飛灰については、不溶化処理後の埋立処分過程における重金属等の溶出など環境影響がもたらされる可能性が指摘される一方で、非鉄製錬プロセスへの溶融飛灰の山元還元による金属資源の回収と埋立回避の実績が増加しつつある。

そこで近未来の資源回収システムとして、このような非鉄製錬プロセスを活用した溶融飛灰の山元還元システムを対象とし、環境負荷等を試算することを目的として、試行的なLCAを実施する。

5.2 評価の方法

表3に示す比較検討ケースについて、焼却施設から後段の中間処理、残渣の最終処分、溶融スラグの利用、および溶融スラグ相当の資材製造工程、溶融飛灰からの金属資源（銅、鉛、亜鉛）回収分相当の天然資源からの非鉄製錬過程を検討の範囲内とし、既存文献およびヒアリング等によって収集した投入・産出データ等を基にして各ケースの最終処分量および二酸化炭素排出量等を試算した。また、焼却残渣溶融処理システムや溶融飛灰前処理システムはそれぞれ複数のシステムを検討の対象とした。

表3 比較検討ケース



評価の対象とする機能は、可燃ごみ1トン処理を基本的な機能単位とし、機能統一のために、溶融スラグを生産する場合は相当量の天然材料の生産による環境負荷を差し引き、溶融飛灰の山元還元を行う場合は、金属資源回収分に相当する天然資源からの非鉄製造過程の環境負荷を差し引いた。

5.3 結果

①最終処分量：焼却残渣を溶融処理

する場合（特にガス化溶融処理を行う場合）は、最終処分量を大きく削減できる。ただし、溶融飛灰の山元還元による埋立処分量の削減効果は大きくはない。

②天然資源代替効果：溶融処理量の7～9割が溶融スラグ製品として砕砂等の天然資源を代替。灰溶

融処理量の0.7%程度が金属資源（銅、鉛、亜鉛）として回収され、これら金属資源の製錬原料となる精鉱が削減される。

③二酸化炭素排出量：焼却残渣を熔融処理する場合は、焼却施設における発電電力を灰熔融施設に給電するため売電電力量が少なくなる。結果としては、焼却残渣を埋立処分する場合と比べて二酸化炭素排出量は多くなるが、熔融処理の方式によって用役使用量の違い等により二酸化炭素排出量は大きく異なる。熔融飛灰の山元還元する場合は相当する鉱石の採掘等を回避することができるが、全体から見ればその効果は非常に小さい。また、ガス化熔融の熔融飛灰を山元還元する場合は、熔融飛灰量が多いため熔融飛灰の前処理における二酸化炭素排出量が大きくなる。

5.4 考察

上記の二酸化炭素排出量試算においては埋立終了後の管理期間を15年としているが、飛灰処理物等の埋立終了後管理期間が長くなる場合は、その期間に応じて熔融飛灰の山元還元ケースが優位になる。

熔融飛灰の山元還元による最終処分量削減効果は大きくはないが、非鉄金属や貴金属の回収に伴う関与物質総量（TMR）は非常に大きい。

6. 土石系資源循環システムの構築に向けた検討

6.1 循環利用の現状と近未来動向—土石系循環資源を中心に—

各種統計資料及び業界団体等へのヒアリング調査に基づいて、土石系循環資源の発生と利用の現状把握及び近未来の予測を行った。表4で種類毎の状況を見ると、建設副産物の発生量が圧倒的に多いが、処分率からみると焼却残渣が高く、有効利用が十分に進んでいない現状が理解できる。また、表5の利用用途からみた各種循環資源の利用量をみると、建設廃棄物の有効利用先は道路舗装が圧倒的に多く、他の土木資材利用が建設発生土、浚渫土砂などの大きな受入先となっている。セメント利用は、スラグ系産業副産物の大きな需要先となっている。今後の建設系廃棄物の既存インフラにおけるストックから発生量増加や、公共事業縮小による需要縮小が考えられ、建設廃棄物、鉄鋼スラグや石炭灰の再生利用量の確保自体が今後困難になってくることも予想される。

表4 土石系循環資源の発生と利用・処分状況（暫定推定値）

(単位:千t)

		発生・排出量	再生利用量	処理処分量	処分率	備考
産業副産物	鉄鋼スラグ	37,477	40,327	317	0.8%	輸出の伸びが顕著
	非鉄スラグ	2,660	2,430	230	8.6%	銅・鉛・亜鉛スラグ
	石炭灰	7,240	6,970	270	3.7%	土地造成材利用が増加
焼却残渣	焼却残渣	5,415	547	4,868	89.9%	再生利用が増加
建設副産物	建設廃棄物	65,738	60,839	2,895	4.4%	コンクリート、アスコン、汚泥
	建設発生土	312,288	93,797	218,491	70.0%	残土処分場等で処分
その他	浚渫土砂	40,000	35,900	4,100	10.3%	
合計		470,818	240,810	231,171	49.1%	

※統計年度にはばらつきがある。建設発生土の単位体積重量は1.6t/m³とした。

表5 利用用途からみた各土石系循環資源の利用状況（暫定推定値）

(単位:千t)

	産業副産物			焼却残渣	建設副産物		その他 浚渫土砂	合計
	鉄鋼スラグ	非鉄スラグ	石炭灰		建設廃棄物	建設発生土		
道路	7,996				53,610			61,606
セメント	10,899	2,015	5,000					17,914
コンクリート骨材	3,207	20			3,640			6,867
土木資材	8,393		1,000		3,599	93,797	31,000	137,789
海洋環境修復							4,900	4,900
その他	3,478	395	1,000	547				4,873
輸出	6,354		少量					6,354
合計	40,327	2,430	6,970	547	60,839	93,797	35,900	240,838

※統計年度にはばらつきがある。建設発生土の単位体積重量は1.6t/m³とした。

6.2 需要拡大のための事業の類型化とケーススタディ

土石系循環資源の広義の循環利用(廃棄物処分事業であっても土地造成の位置づけのものは含める)に関する複数のプロジェクト事例を収集し、タイプ分類した。いずれも、事業形態をどのように成立させていくかが鍵であり、法制度、ステークホルダーとの合意形成などの社会的側面や経済合理性のある利用技術の開発、システムを支える周辺技術として流通システムやトレーサビリティシステムなども含めて技術的側面からの検討が必要である。

そこで土石系循環資源の需要事業のケーススタディとして、愛知県と岐阜県を対象に、①亜炭廃坑の埋戻し事業、②浚渫深掘り跡埋戻し事業のモデル設計と、費用と便益に関する評価を行った。

亜炭坑跡地埋戻し事業については、具体的に、陥没の危険性が高い15m以深の坑道のある公共施設20施設の地下埋戻し事業費用(石炭灰等を利用)を陥没等の回避被害額として算出し、再取得が必要となる被害額と比較してみた結果、純便益は石炭灰利用時(逆有償)において42億7千6百万円と最も大きくなった。一方、地震被害を想定せず、通常の被害確率に基づき純便益を計算した場合、62年が最短であった。つまり、期間経過とともに陥没の発生確率が高まることや、地震等災害による甚大な被害を考慮した場合には、埋戻し事業の効果が高いといえる。

浚渫深掘り跡埋戻し事業については、伊勢湾の浚渫土砂と三河湾の浚渫土砂を埋戻しに利用する場合、埋戻しを行わない場合より3億3千4百万円の費用が削減できる結果が得られた。今後、浚渫土砂と高炉スラグの混合方法など技術システムとしての検証は必要となるが、購入費の極小化が図れば事業化の可能性があるとこの結果が得られた。

さらに、事業規模(数量)による検討を行った結果、循環資源を亜炭廃坑や浚渫深掘り跡の埋戻し事業に活用した場合には、特に浚渫深掘り跡の埋戻し事業において、需要先の確保の効果が高いことがわかった。

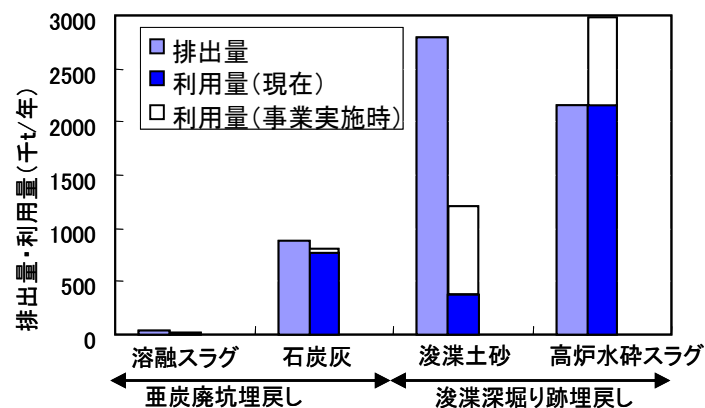


図9 亜炭廃坑および浚渫深掘り跡の埋戻し事業実施による循環資源有効利用量の拡大効果

ケーススタディの結論としては、新規事業先として亜炭廃坑の埋戻し事業を実施する際には循環資源として石炭灰を利用することで費用削減面、循環資利用量の面の両方において効果が得られ、浚渫深掘り跡埋戻し事業においては、伊勢湾の浚渫土砂を用いる際に費用削減面、循環資利用量の面の両方において効果が得られた。

6.3 利用事業創出の必要性および利用システムの検討

土石系資源循環の推進に向けては、様々な製品技術や、利用技術の開発が進められているものの、その量の膨大さから、引き続き産業原料利用システムの推進を図るとともに、外部環境への影響を考慮しつつも、例えば環境修復事業などの用材として用いるなど、利用事業の創出と合わせた利用システムの構築が必要となっている。

今後は、民間あるいは公共から資金を調達し、土石系循環資源を有償の原料として利用した事業化(タイプV)のように、経済的な財の生産行為そのものを志向する具体的な事業化を進めることも含

めて利用事業の創出の具体化のための施策の検討が重要であると考えられる。

7. 動脈・静脈連携バイオマスエネルギーシステムの設計と評価

7.1 目的

バイオマス系の循環資源の循環利用においては、従来から飼肥料化などのマテリアルリサイクルも存在しているが、近年では原油価格高騰等の影響や温暖化対策の面からエネルギー利用が拡大している。しかしながら、合理的な戦略性をもって進められているとは言えず、近未来に向けてのバイオマスエネルギーシステムの在り方について方向性を示す必要がある。そこでバイオマス系の循環資源の発生側である静脈系とエネルギーの需要側である動脈系、そしてその間をつなぐエネルギー転換技術をマッチングさせて、効率的かつ安定的な動脈・静脈連携システムを設計し評価することによって、地域の需給特性に応じた近未来のシステム形成の方向性を提示することを目的とした。

7.2 検討内容

まず、国レベルでのバイオマス資源の発生とエネルギー需要に関する状況を整理、俯瞰し、国内バイオマスのエネルギー供給上の位置づけを明確にする。また、バイオマスの発生・利用特性について検討整理し、需給を成立させる上での留意点を整理した。

次に、国内における事業化の事例を収集、解析整理し、動脈・静脈連携システムとしていくつかに類型化することによって、技術的、社会経済的な成立条件を明確化した。その上で、下水汚泥を対象とした複数の動脈・静脈連携システムを設計し、ライフサイクルアセスメントの手法を用いて評価するとともに、個別の構成プロセスの適用上の留意点を検討整理した。

7.3 結果と考察

(1) 動脈・静脈連携システムにおける需給特性と類型化

日本の主要な動脈系産業のエネルギー需要は膨大であり、それに対してバイオマスのエネルギーポテンシャルは最大で見積もってもそれらの数パーセントに過ぎない。鉄鋼やセメント等の産業プロセスか所で、ある種類のバイオマスは受け入れ可能な規模を有している。その意味では、量的な需給バランスの意味では、静脈と連携した場合においても大きな問題は起きづらいことが示唆された。したがって、どの様に静脈エネルギーを活用するかが重要であり、また、エネルギー転換（利用）効率が悪くなりやすい静脈エネルギーを効率的に利用するための手段として、積極的な連携が必要であると考えられる。

動脈・静脈の連携パターンを類型化すると、①静脈エネルギー自家消費システム、静脈エネルギー系統連係、静脈・動脈エネルギー系統連係、静脈への「低質」動脈エネルギー投入、静脈への「高品位」動脈エネルギー投入、静脈・動脈相互依存型、が想定できる。わが国における現状の連携の方式としては、基本的に電気をつくることが中心的であった。これは、バイオマスエネルギーの利用に対する価値が、電気中心に議論されてきた側面があること、また北欧のような熱需要があるわけではないため熱に対する相対的な価値観が低いこと等に由来すると考えられる。一方で、電力への転換効率は熱への転換効率と比較すると低くなるため、様々な形態（気体・液体・固体）での利用が可能なバイオマスに関しては、積極的な熱利用により GHG の削減につなげることも重要であると示唆される。

(2) システム評価に関するモデル事例を用いた考察

①下水汚泥のセメント製造プロセスにおける燃料利用に関する評価

下水汚泥の燃料利用としては、炭化による火力発電所への受入プロジェクトが 2007 年度から東京都と東京電力の連携によりスタートするが、消化ガスの利用以外に下水汚泥自体を固形燃料として利用する事業化は現状ではほとんど行われていない。一方、下水汚泥のセメントキルンへの受入量はかなりの量に達しているが、水分を多く含む脱水汚泥の受入は燃料利用としての位置づけにはない。近年、先に示した炭化以外でも乾燥や水熱処理などによる固形燃料化の検討が行われていることから、本研究では近未来技術として下水汚泥の固形燃料を石炭代替としてセメント製造プロセスに利用するシステムについて、その効果を評価した。比較シナリオとして、下水汚泥を単純焼却する場合をベー

スシナリオとして、炭化処理あるいは水熱処理による燃料化とそれらの石炭代替利用シナリオについて、エネルギー消費と温室効果ガス排出の観点からLCAの手法により評価した。結果を図10に示す。下水汚泥の焼却・埋立は、温暖化係数の高い亜酸化窒素の排出を伴うため、それを回避できる水熱処理、炭化ともに温室効果ガス排出削減に大きな効果が見込める。また、水熱処理による燃料化技術は、処理に要するエネルギーも少なく石炭代替による正味のエネルギー消費、二酸化炭素排出削減の効果が見込めるが、炭化は処理に要するエネルギー消費が若干多く、炭化プロセスの省エネルギー化が課題である。

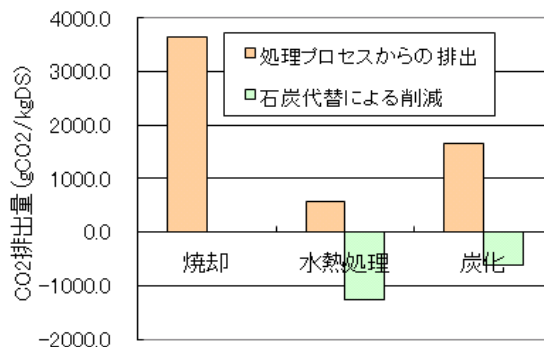


図10 下水汚泥燃料化によるセメント製造利用における石炭代替効果（二酸化炭素排出量）

②動脈系統との連携システム

そこでエネルギー利用が十分に進んでいない下水汚泥を対象として表6のようなシステムオプションを設計し、ライフサイクルインベントリー分析を行った。結果を図11に示す。「下水汚泥のメタン発酵処理」および「バイオガスの販売と残さの炭化物燃料化」はGHG削減という目的のためには非常に重要な選択肢であることが示された。ただし、ガス供給に関しては現時点では制約が多いため、実施は限定的と考えられる。特に現状ではガス工場と下水汚泥処理施設の立地が最も制約になっている、ただし、導管への直接供給が可能となれば、距離という制約は無くなるため、飛躍的に導入が進む可能性がある。したがって、下水道関連セクターとエネルギー（ガス）のセクターが連携を進め、導入を図ることが望まれる。また、汚泥炭化燃料については、ユーザーのニーズにあった燃料が経済的に製造できれば、需要はあると見込まれることから、拡大を引き続き推進すべきであろう。ただし、個別のインフラ整備は施設の2重投資にもつながりかねないため、既存の設備を有効利用することを前提にすべきである。

表2 下水汚泥のエネルギー利用に関する比較ケース

No.	Case名	下水処理システム			
		下水処理	余熱*	消化ガス処理	脱水汚泥処理
1	好炭	好気性発酵		なし	炭化
2	好焼				焼却
3	好埋				埋立
4	嫌熱炭	嫌気性発酵	余熱なし	熱回収	炭化
5	嫌熱焼				焼却
6	嫌熱埋				埋立
7	嫌C炭			CGS	炭化
8	嫌C焼				焼却
9	嫌C埋				埋立
10	嫌力炭			精製	炭化
11	嫌力焼				焼却
12	嫌力埋				埋立
13	嫌熱炭2			嫌気性発酵	余熱あり
14	嫌熱焼2	焼却			
15	嫌熱埋2	埋立			
16	嫌C炭2	CGS	炭化		
17	嫌C焼2		焼却		
18	嫌C埋2		埋立		
19	嫌力炭2	精製	炭化		
20	嫌力焼2		焼却		
21	嫌力埋2		埋立		

* 近隣に大量の余熱があってそれが使える場合=余熱あり

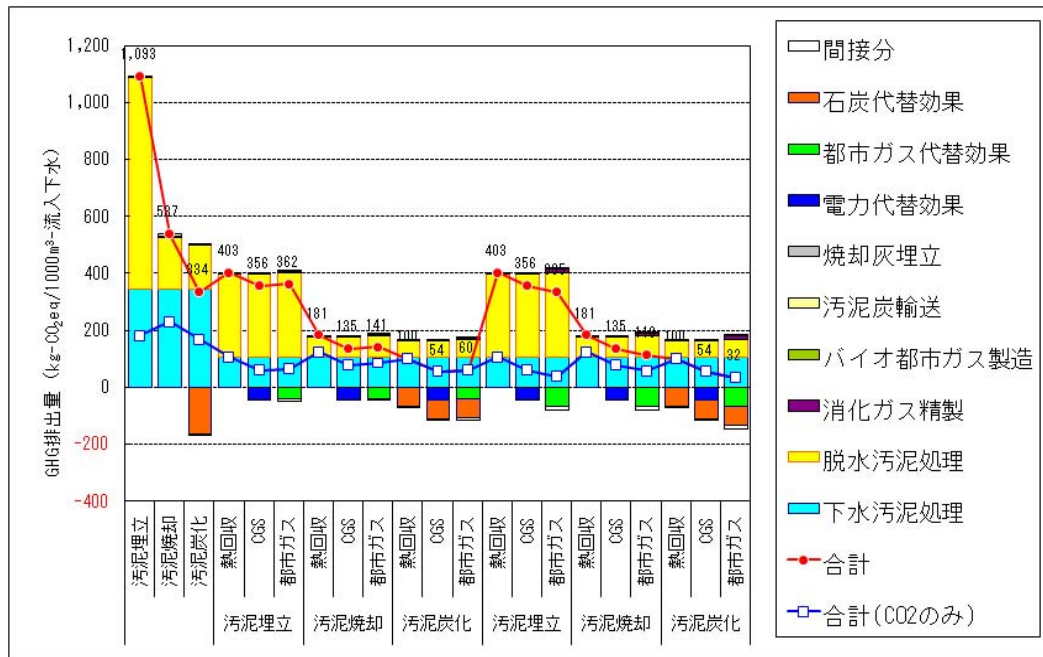


図 13 下水汚泥の各種動脈・静脈連携エネルギーシステムの LCI 分析結果

英語概要

- ・ 研究課題名 = Transition strategies toward the technology system realizing a material-sound cycles society in the near future
- ・ 研究代表者名及び所属 = Masahiro Osako (National Institute for Environmental Studies)
- ・ 共同研究者名及び所属 = Yuzo Inoue (National Institute for Environmental Studies), Hidetoshi Kuramochi (National Institute for Environmental Studies), Rokuta Inaba (National Institute for Environmental Studies), Yoshio Yagi (Japan Waste Research Foundation), Kouichi Tachio (Japan Environmental Sanitation Center), Hitoshi Kobayashi (EX corporation), Naohisa Yamaguchi (EX corporation), Takashi Fujii (Mizuho Information & Research Institute)
- ・ 要旨 (200 語以内) =

A final purpose of this study is to design the technological systems in the near future to establish a sound material- cycles society (SMS), through evaluating the systems in terms of not only constraint of natural resource consumption but also reduction of environmental loads. Moreover this study proposes a technological system vision in the near future as well as roads maps toward it.

In these two years, first, we investigated cause-effect relationships between change of material flows and that of social basis conditions such as population and industry structure, environmental and energy problems, lifestyle, etc. in the near future to predict not only which kinds of material would become targets for circulation but also what kinds of technology would be needed for the material-cycle. And also preliminary patent survey to collect technological seeds was carried out. We established an analytical model to project material flows in the near future. It was applied to a case study focusing on woody resources and its applicability was validated.

Next, a framework for the system design was proposed which has a matrix structure consisting of the target

material and the technological system feature as a measure to realize a SMS. Several social scenarios were tentatively set up based on a review study for previous vision/scenario researches. Control measures including technological systems to convert to SMS were distributed onto their social scenarios.

Finally some systems such as utilization of mineral recyclable resources and sewage sludge as a biomass waste as model cases were designed and preliminary evaluated using LCA methodology, etc. from viewpoints of natural resources consumption as well as environmental load reduction.

- キーワード (5 語以内) = sound material-cycles society, technology system design, recyclable resource, material flow model, LCA