

### 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

##### (1) 下水汚泥の発生と利用への影響要因

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の変化、CO2排出削減等が抽出された（図3.5.1）。

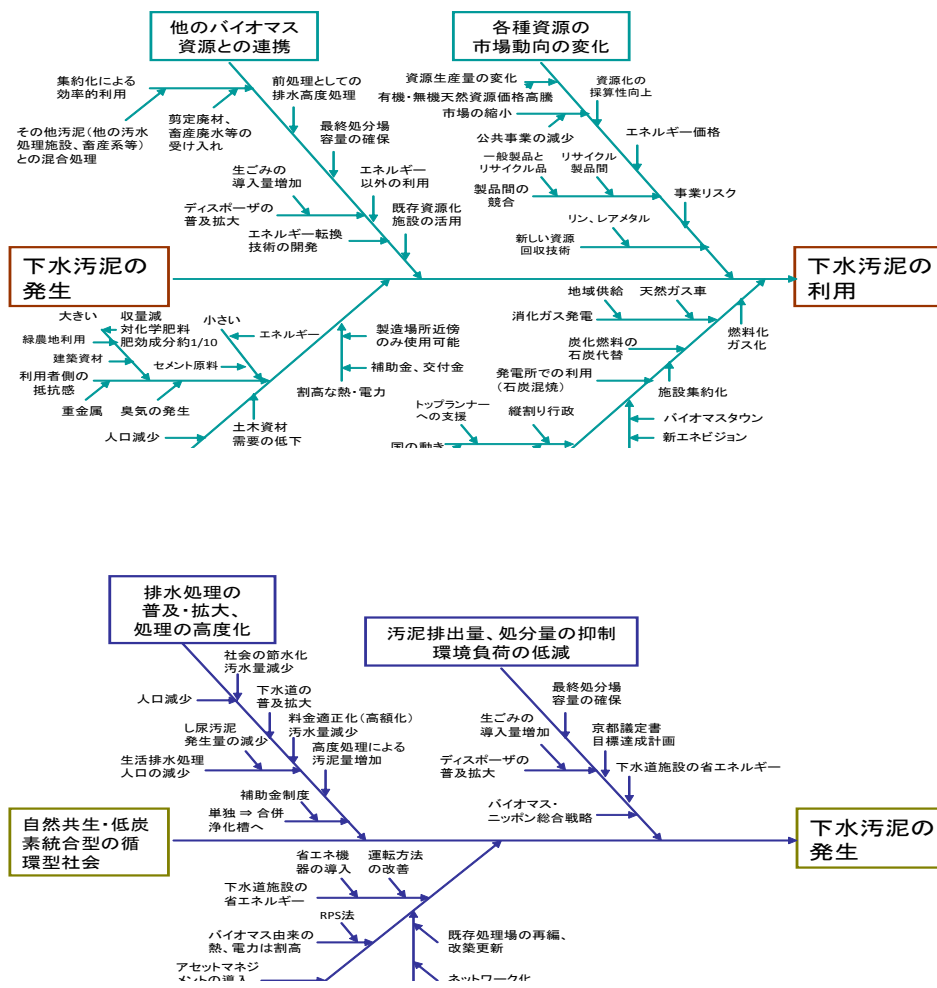


図 3.5.1 下水汚泥に関する特性要因図

## (2) 下水汚泥等発生量の推計と考察（全国）

下水汚泥等発生量の推定は、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概ね終了する年次別に、既存の統計資料等 ①、②、③、④、⑤、⑥をもとに、①2020年概成シナリオ、②2030年概成シナリオ、の2ケースについて推計を行った。汚泥発生量の推計は、次頁に示す仮定を適用して、各污水处理施設の発生汚泥量を算定している。算定基準年次(2007年)から概成年次(2020年または2030年)までの污水处理施設の整備は単純に一定ペースで行われると仮定しており、インフラ投資動向等の考慮は行っていない。

全国ベースの2020年及び2030年概成シナリオによる発生汚泥量の算定結果を図3.5.2に示す。

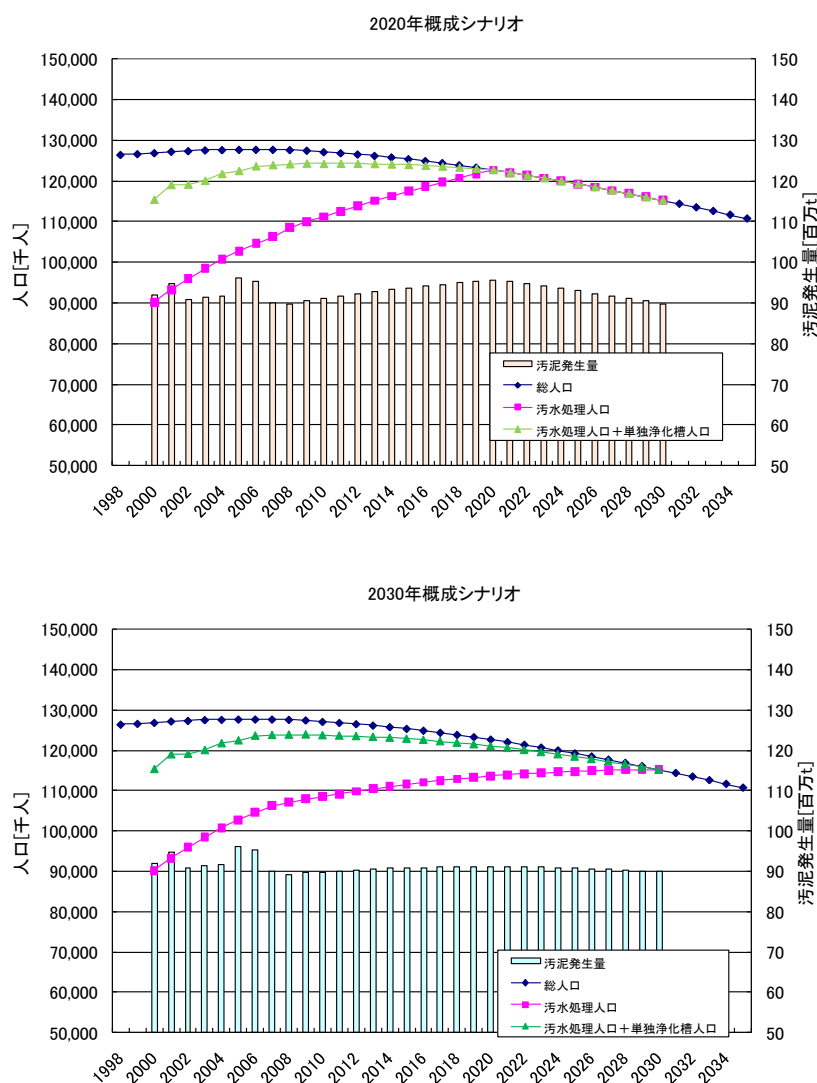


図 3.5.2 下水汚泥等の発生量予測(上図:2020年施設概成、下図:2030年施設概成)

(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)

#### 2020(2030)年概成シナリオにおける汚泥発生量推計上の仮定

##### ①普及率

- 汚水処理人口の普及率は2020(2030)年に100%となると仮定。
- 2007年から2020(2030)年まで汚水処理人口普及率が直線近似となるように、2008～2019(2029)年の普及率を仮定。

##### ②汚水処理人口

- ①で仮定した普及率から汚水処理人口を算出。
- 下水道、集排、コミプラ、浄化槽の各処理人口は、2007年の比率を固定して汚水処理人口を按分。
- 合併処理浄化槽と単独し尿浄化槽  
2020(2030)年には単独槽が0になると仮定。2007年の単独槽と合併槽の比率から、2020(2030)年の比率まで、直線近似となるように2008～2019(2029)年の比率を仮定。上記で按分した浄化槽処理人口を、各年の単独・浄化槽比率で按分。

##### ③下水処理水量

- 2007年の下水処理水量原単位を算出し、この原単位と各年の下水道処理人口から下水処理水量を算出。

##### ④下水汚泥発生量

- 2007年の下水汚泥発生量原単位を算出し、この原単位と各年の下水道処理人口から下水汚泥発生量を算出。

##### ⑤浄化槽汚泥発生量

- 2007年の合併槽及び単独槽の汚泥発生量原単位をそれぞれ算出し、この原単位と各年の合併槽及び単独槽処理人口から汚泥発生量を算出。

わが国はすでに本格的な人口減少社会に突入しており、地域の条件に応じて下水道、浄化槽等の整備が進んでも、ある時点では処理水量や発生汚泥量は頭打ちとなり、以後は次第に減少傾向に転ずることが予想される。2020年概成と2030年概成の各シナリオでは、整備スピードの違いから、概成までの期間に処理人口に差が生じる。例えば2020年時点には汚水処理人口に約900万人の開きが発生し、最も乖離が大きくなる。推定した発生汚泥量も、この汚水処理人口の違いに対応して、発生ピーク年次とピーク発生量にそれぞれ違いが生じる結果となった。2020年概成シナリオでは、整備が概成する2020年度に汚泥発生量のピークを向かえ、その後は汚水処理人口(=総人口)の減少に対応して汚泥発生量も減少傾向に転じる。一方、2030年概成シナリオでは、同じく2020年ころに緩やかに汚泥発生量がピークとなるが、その量は現状(2007年)とそれほど大きな違いはない。下水道事業主体である地方公共団体の厳しい財政状況等を考慮すれば、今後の整備動向は2030年概成に近い傾向を示すと考えられる。

### (3) 下水汚泥等発生量の推計と考察(地域別)

全国ベースの推計結果の違いからも理解できるように、汚泥発生量の動向は、汚水処理施設の整備状況と処理区域内人口の動向により大きく左右される。この状況を地域別に把握するために、都道府県別の人口予測結果等をもとに県別の汚泥発生量を予測した。人口動態、汚水処理施設整備水準は概ね次の4つのパターンに分類されるが、このうち①と③の典型例である北海道と徳島県の汚泥量推計結果(いずれも2030年概成シナリオの試算結果)を図3.5.3、3.5.4に示す。

- ① 人口減少、高普及率 …… 北海道 (汚水処理人口普及率 93.1%(2008))
- ② 人口横ばい、高普及率
- ③ 人口減少、低普及率 …… 徳島県 (同 45.8%)
- ④ 人口横ばい、普及途上

これらの結果から、上記のパターンの違いによって、基準年(2007年)以降の汚泥発生量の推移は大きく異なることが明らかである。既に汚水処理施設が高普及の場合であれば、汚泥発生量は必然的に地域の人口動態に影響される傾向となる。一方、低普及あるいは整備途上の場合、整備が概成するまでの間は汚泥発生量が急速に増加するが、整備概成後は人口動態に支配されることとなる。このため、人口減少地域の場合は、より慎重な施設整備や、他分野バイオマスの受入れなどの施設の有効利用方策が検討されるべきである。

また、地方部など人口減少が顕著で、比較的下水道の普及が早かった都市では、下水汚泥処理施設に余裕が生ずる可能性が高いことから、生ゴミ等の他のバイオマスを受入れるポテンシャルが高いと考えられる。

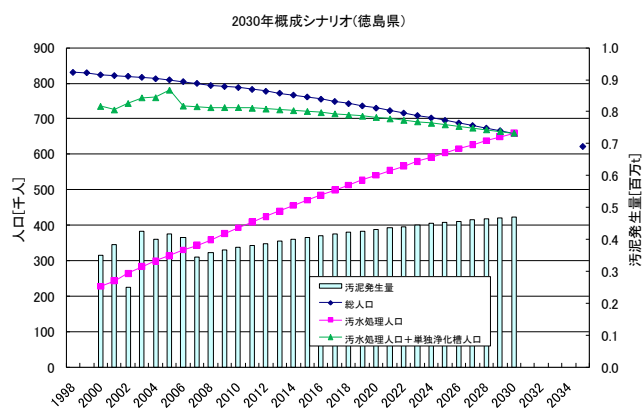
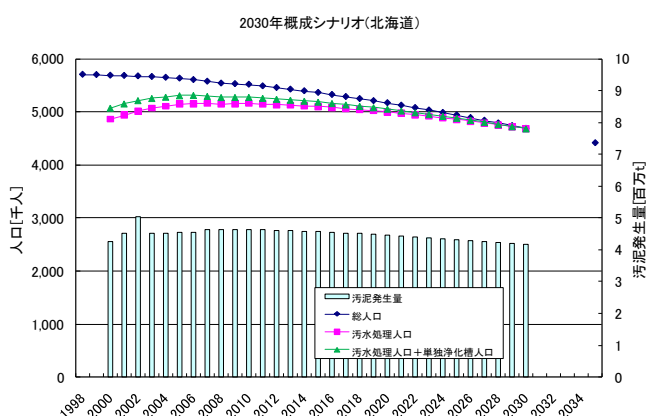


図 3.5.3 人口減少・高普及ケース(北海道)

図 3.5.4 人口横ばい・減少・低普及ケース(徳島県)

(算定データは、各シナリオとも 2007 年まで(単独浄化槽のみ 2006 年まで)は実測値である)

### 3.5.2 下水汚泥循環ビジョンを支える技術システム

3.5.1(1)における分析結果をもとに、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技術を選定した。

各技術に係る循環ビジョンシナリオとして、①では、家庭食品廃棄物の一部が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設定した(表3.5.1)。②については、現行の焼却処理やセメント原料化の一部が燃料化に移行すると想定した(表3.5.2~3.5.3)。③では、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を表3.5.2~3.5.3の通り設定した。なお、表3.5.3中の現況の各処理方式割合については、下水道統計<sup>7)</sup>に記載されている汚泥処理量及び処理方法データを元に、代表的な処理方式の組み合わせを整理し、汚泥処理方法と利用・処分方法を関連づけ、全国ベースでの割合を整理することで算出した。また、2030年時点における下水汚泥発生量は、他のバイオマスシナリオとの整合を考慮し、NIESモデルによる試算値を用いてGHGの排出量算定を行っている。なお、NIESモデル試算値は表3.5.1に示すとおりであり、これは図3.5.2に示した2030年概成シナリオの予測値とほぼ同様の発生量となっている。

さらに、シナリオA（広域処理・利活用、エネルギー利用優先）、シナリオB（地域処理・利活用、マテリアル利用優先）に対応した2030年時点での有効利用状況を設定し、これと下水汚泥処理方法を現況と同様に関連付けた。その上で、汚泥処理プロセスで排出される温室効果ガス（GHG）等を算定し、GHG削減効果を評価した。

表 3.5.1 シナリオ毎の下水汚泥の発生及び他バイオマス受入のフロー

シナリオ	プロセス		バイオマス		発生量 (千t/年-wet)	備考
	種類	存在地域	種類	発生地域		
A	汚泥燃料化、 バイオガス化 に重点	都市	下水汚泥	都市	73,750	
			家庭食廃	都市	5,473	ディスボーズ経由
		農村	下水汚泥	農村	6,947	
		山間	下水汚泥	山間	9,868	
B	緑農地利用、リン 資源回収に 重点 建設資材利用 も維持	都市	下水汚泥	都市	74,308	
			家庭食廃	都市	10,248	車両回収
		農村	下水汚泥	農村	7,596	
		山間	下水汚泥	山間	11,557	

表 3.5.2 2030年における下水汚泥利用状況

用途	現況(%)	シナリオA (広域・エネルギー優先)	シナリオB (地域・マテリアル優先)
緑農地利用	14.5	微減 10%	増加(農村部)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	—	—

表 3.5.3 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

#### (1) 温室効果ガス排出量

3.5.2 で設定したシナリオ 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。具体的な算定フローは図 3.5.1 に示す通りであり、具体的な算定方法は以下の通りである。

#### ① 汚泥処理プロセスエネルギー収支モデルの整備

処理施設の容量計算の際に用いられる計算式をベースにした汚泥処理プロセスエネルギー収支モデルを別途構築し、本モデルを活用して試算を行った。各汚泥処理プロセスには、対応する CO<sub>2</sub> 排出原単位式<sup>8)</sup>が組み込まれており、処理水量及び濃縮汚泥量を入力することで、各処理プロセスにおける汚泥量・濃度が決定され、CO<sub>2</sub> 排出量の算出が可能である。但し、乾燥工程については、モデルに組み込まれていないため、別途、下水道統計に記載されている乾燥機の燃料消費量を元に、CO<sub>2</sub> 排出原単位を算定した。

#### ② 各処理方式における CO<sub>2</sub> 排出量の算定

国内で採用されている代表的な処理方式 (例：濃縮→消化→脱水→焼却) を設定し、下水道統計から算出した 1 プラント当たり平均処理水量、及び表 3.5.1 に示した汚泥発生量より算出した 1 プラント当たり平均濃縮汚泥量をモデルにインプットすることで、処理過程での燃料・電力消費量を算出し、最終的に CO<sub>2</sub> 排出原単位、プラント数、平均稼働日数を乗じることで、その処理方式における CO<sub>2</sub> 排出量を推定した。その処理方式を採用しているプラント数については、表 3.5.3 の値を利用して算出した。以上の作業を、代表的な処理方式全てに適用した。

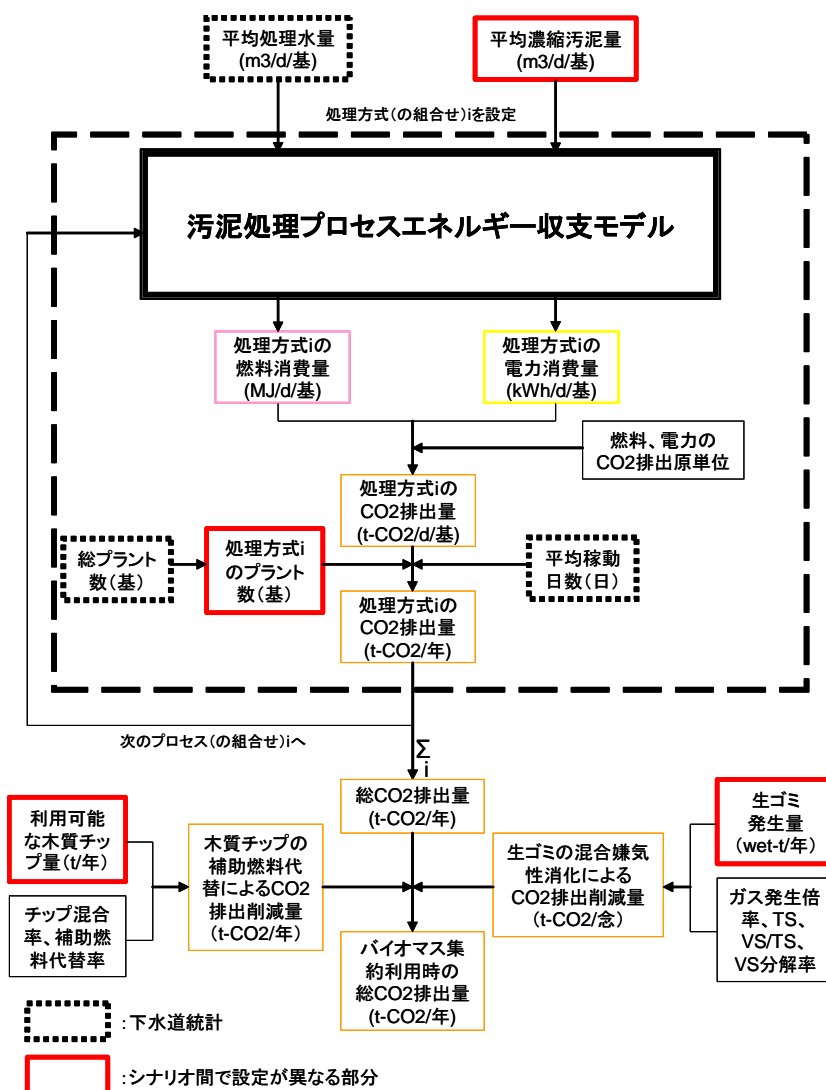
#### ③ 全国ベースでの汚泥処理過程における CO<sub>2</sub> 排出量の算定

②で得られた CO<sub>2</sub> 排出量の総和をとることで、全国ベースでの汚泥処理過程における CO<sub>2</sub> 排出量を推定した。

#### ④ バイオマス集約利用時の汚泥処理過程における CO<sub>2</sub> 排出量の算定

表 3.4.1 に示した生ゴミ発生量、生ゴミからのガス発生倍率(981.0L/kg-分解 VS)、TS(15%)、VS/TS(0.9)、VS 分解率(80%)を元に、生ゴミの嫌気性消化による消化ガス発生量を算出した。また、混焼に利用可能な木質チップ量、チップ混合率(脱水汚泥 wet-t 当たり 6.65%<sup>8)</sup>)、補助燃料削減率(70%<sup>8)</sup>)より、木質チップ混焼時の補助燃料削減量を算出した。混焼に利用

可能な木質チップ量については、公共緑地で発生した剪定枝（全国の発生量の推定は、直轄事業としての管理量<sup>9)</sup>の3倍相当と仮定）のうち、1/3がエネルギー利用され、更に1/2が下水汚泥焼却炉に投入されるものとした。最終的に、③の推定結果と併せることで、バイオマス集約利用時の汚泥処理過程におけるCO<sub>2</sub>排出量を推定した。



### 仮定

#### ① バウンダリの設定

汚泥の有効利用（セメント、堆肥、燃料利用等）時のGHG排出については、評価が複雑となり、また、処理場外での排出となるため、考慮しないものとし、評価対象は、汚泥濃縮、消化、脱水、乾燥、焼却、炭化とした。また、同様の理由から、炭化物から得られる熱量についても考慮しないものとした。

表 3.4.1 より、対策無しの場合と比較して、シナリオ A,B ではセメント化・埋立が減少し、燃料化が増加することから、上記のバウンダリ設定方法は、シナリオ A,B のGHG削減量を少なめに評価する方向となる。

#### ② 消化ガス利用

発生した消化ガスは、加温用の燃料(A 重油)代替とした上で、余剰分についても焼却プロセスの熱源等として有効利用するものとした。

図 3.5.1 各シナリオにおけるCO<sub>2</sub>排出量算定フロー

以上より、現状、2030年において対策なしのケース（BAUシナリオ）、及びシナリオA,BのCO2排出量を比較すると、図3.5.2の通りになる。

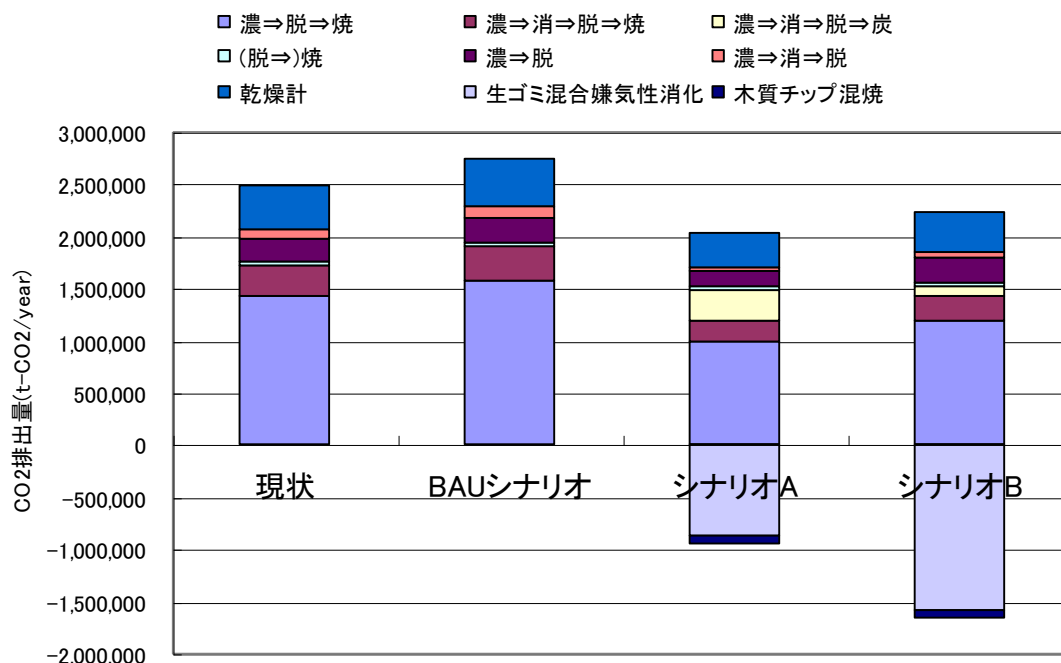


図 3.5.2 各シナリオにおけるCO2排出量の試算結果

（「乾燥計」は、乾燥プロセスを採用している処理場を対象とし、乾燥以外にも含めた汚泥処理プロセス全体のコストを記載している）

この結果、表3.5.4に示す通り、現状と比較して、シナリオAでは年間約139万トン-CO<sub>2</sub>、シナリオBでは約190万トン-CO<sub>2</sub>が削減され、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165万トン-CO<sub>2</sub>、シナリオBでは約216万トン-CO<sub>2</sub>が削減される結果となった（全国の合計値）。GHG抑制に特に大きな影響を及ぼした要因は、食品廃棄物の受け入れによるバイオガス生成とその利用によるものだった。

表 3.5.4 現状及びBAUシナリオと比較したシナリオA,BのCO2削減量(単位:t-CO2/年)

	現状との比較	BAUシナリオとの比較
シナリオA	1,386,995	1,649,548
シナリオB	1,900,761	2,163,314

## (2)コスト分析

(1)と同様に、現状、BAUシナリオ、シナリオA,Bについて、処理方式別に、費用関数



10,11)を元にコスト分析を行った。コストには、建設費、運転経費、補修費、人件費が含まれている。また、シナリオ A,B については、消化施設を有する全ての処理場で生ゴミの受入れを行うと仮定し、それに伴い発生する施設建設・運転に要するコストについても考慮した。結果を図 3.5.3 に示す。表 3.5.3 に示した処理方式の割合の変化に対応する形で、シナリオによってコストが変化していることが分かる。また、表 3.5.5 より、生ゴミの受け入れに伴う汚泥量増加や新規施設の建設の影響から、シナリオ A,B では、現状や BAU シナリオと比較して、コストが 1,000～1,600 億円程度大きくなる結果となった。これは、BAU シナリオでの年間の下水汚泥処理コスト（建設費、運転経費、補修費、人件費が含まれる）のそれぞれ約 32%（シナリオ A）、約 26%（シナリオ B）に該当する。

図 3.5.3 から分かるように、コスト増加要因のほとんどは食品廃棄物の受け入れに起因するものであるが、ここでは食品廃棄物の収集・処理に対するコスト削減効果は見込んでおらず、コスト増加要因のみをカウントしているので注意が必要である。

現在、下水汚泥消化施設は比較的低負荷で運転されている施設が多いこと、さらに 3.5.1(3)で検討したように、今後は下水汚泥処理施設に他のバイオマスを受け入れるポテンシャルが高まることが想定される。このため、今回は処理量の増加分は全て施設の新設で対応すると仮定して試算を行ったが、既存施設の有効活用によってさらに効率的な処理・利用システムの構築が可能と考えられる。

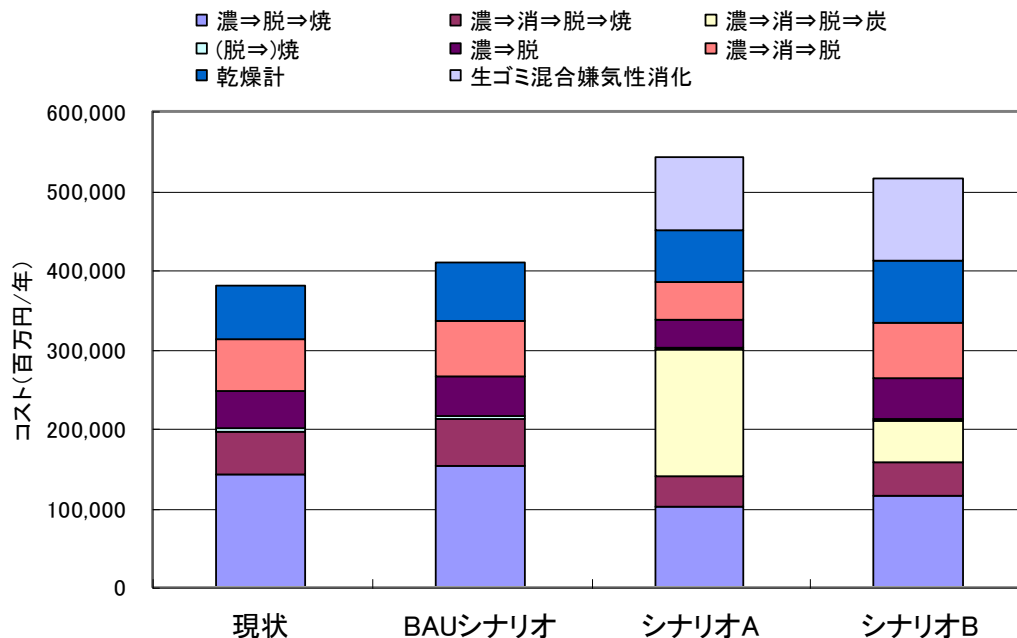


図 3.5.3 各シナリオにおけるコストの試算結果

(「乾燥計」は、乾燥プロセスを採用している処理場を対象とし、乾燥以外にも含めた汚泥処理プロセス全体のコストを記載している)

表 3.5.5 現状及び BAU シナリオと比較したシナリオ A,B のコスト増加量(単位:百万円/年)

	現状との比較	BAUシナリオとの比較
シナリオA	160,744	132,023
シナリオB	134,382	105,662

### 参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部(建設省都市局下水道部)：下水道事業関係予算概要（平成 12 年度～平成 21 年度）
- 2) 下水道統計行政編(平成 10 年度～19 年度版)、社団法人日本下水道協会編
- 3) 総務省統計局：平成 17 年国勢調査  
<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2005/index.htm>
- 4) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の都道府県別将来推計人口（平成 19 年 5 月推計）  
<http://www.ipss.go.jp/pp-fuken/j/fuken2007/t-page.asp>
- 5) 農林水産省、国土交通省、環境省報道発表資料：汚水処理人口普及状況について（平成 12 年度～平成 20 年度）  
<http://www.env.go.jp/recycle/jokaso/data/population/population.html>
- 6) 環境省：環境統計集（平成 11 年度～平成 19 年度）  
<http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/>
- 7) (社)日本下水道協会：平成 20 年度版下水道統計
- 8) 惣田訓、池道彦：処理規模を考慮した様々な下水汚泥処理システムのエネルギー消費量の比較評価、再生と利用、Vol.34、No.129、pp.6-15、2010
- 9) 独立行政法人土木研究所：平成 20 年度下水道関係調査研究年次報告書集、土木研究所資料第 4157 号、2009
- 10) 国土交通省都市・地域整備局下水道部、(社)日本下水道協会：バイオソリッド利活用基本計画（下水汚泥処理総合計画）策定マニュアル、平成 16 年 3 月
- 11) (財)下水道新技術推進機構：下水処理場へのバイオマス（生ゴミ等）受け入れの手引き、2010 年 3 月

((独)土木研究所 岡本誠一郎、堀尾重人、国土交通省(元土木研究所) 山下洋正)