

# 生産型下水道システム"ACE II"の構築に向けて

(2020.9 川口幸男)

## はじめに

このレポートは、2019年7月に書き上げた「新農村地域廃棄物有効利用システム"ACE II"の構築に向けて」と題したレポート<sup>注1</sup>の要約版である。原レポートは、2013年にJICA関連業務で「中華人民共和国 農村汚水処理技術システムおよび管理体系の構築プロジェクト詳細計画策定調査」に携ったことを契機に、「使用料がいない下水道事業とは？」を最大のテーマとして着想したもので、愛称を"ACE II"とした。

ACE II<sup>注2</sup>は、従来の廃棄物有効利用技術のアプローチとは異なり、生活系廃棄物の根幹をなすし尿や生ゴミを含めた食品系廃棄物全体を「原材料」とする“生産型下水道システム”を構築しようとしたものである。

検討の結果は、エネルギー生産では生ゴミを加えることにより発電量が大幅に増加し、生産システム全体のエネルギー自立が可能と試算された。また、生産総額では、農産物の売上が発電等も含めた生産額全体の約9割を占め、システム全体の自立経営の道が期待できる結果であった。

2020年に至り新型コロナウイルス感染症が全世界に広がる中、分散型社会の構築の必要性が盛んに叫ばれるようになってみると、本レポートで提案した技術は、途上国の下水道事業ばかりでなく今後の社会全体の在り方にもヒントを与えられるものであると思うに至った。

そこで、内容はまだまだ未熟であり実現までには多くの課題が残されているが、同様なアプローチに基づく技術が早期に実現されることを願って、その概要を紹介することにした。

注1) 下水道業務支援センターホームページ掲載：[https://www.sbmc.or.jp/05\\_investion/DATA/1-1.pdf](https://www.sbmc.or.jp/05_investion/DATA/1-1.pdf)

注2) 愛称"ACE II"の由来：

下水処理場から発生する廃棄物を有効利用しようとする日本で最初の本格的な試みには、日本下水道事業団が実施した「下水汚泥広域処理事業(area-wide sludge disposal project)」があり、その愛称がACE Plan (エースプラン)である。ACE Planは、下水汚泥の再利用法として重要な農業利用(Agriculture use)、化学材料(資材)利用(Chemical use)、エネルギー利用(Energy use)の3つの頭文字をとって命名された。

今回提案する新システムも、人間活動から発生する廃棄物の全てを有効利用しようとするもので、ACE Planと同じ思想・観点を廃棄物全般に拡張し、さらにバージョンアップして構築しようとするものである。最初のACE事業からみれば2番目であること、ごみ処理等も含めて相乗効果が期待できること、日本と途上国等の2国間の協力で実現を目指そうとすることから、システムの愛称を“ACE II”とすることにした。

## 目次

1. 有効利用の課題 .....	1
1-1 既存有効利用技術の課題 .....	1
1-2 有効利用製品の課題.....	1
1-3 クローズドシステム化の課題 .....	2
2. 有効利用システム基本フローの構築 .....	2
2-1 生活系廃棄物有効利用の基本条件.....	2
2-2 有効利用システムの構築手順.....	2
2-3 食品系廃棄物の発生源原単位の推定 .....	3
2-4 有効利用システムの機能要件 .....	4
(1) 前処理・収集システムの機能要件 .....	4
(2) 水処理(資源回収)システムの機能要件 .....	5
(3) 資源生産システムの機能要件 .....	6
2-5 選定プロセス技術.....	6
(1) 選定プロセス技術 .....	6
(2) 修正コンタクトスタビリゼーション-MBR 法.....	7
(3) 逆浸透膜(RO 膜) .....	8
2-6 有効利用システムの全体イメージ.....	9
3. 有効利用システムの妥当性の検証.....	12
3-1 物質収支の検討 .....	12
(1) 物質収支の算出条件の検討.....	12
(2) 物質収支の算出事例(農業利用施設).....	14
(3) システム全体の物質収支 .....	17
3-2 最小規模の算定 .....	19
3-3 事業の採算性の検討 .....	20
(1) システムの建設・維持管理費 .....	20
(2) 生産額 .....	20
4. まとめと今後の課題 .....	22
図表目次 .....	23

# 1. 有効利用の課題

## 1-1 既存有効利用技術の課題

生活系廃棄物を再利用し、生産性のあるものにする廃棄物の再利用技術には表 1-1 に示すようなものがあり、一部は各地で古くから行われている。

例えば、日本の江戸時代には、し尿の農業利用がビジネスとして行われていたし、中国の農村部では糞便のメタン発酵・燃料利用が一般に行われていたという。近年では可燃ごみの焼却熱を利用した蒸気発電や、消化ガスを利用したガス発電や温水利用などが行われており、地域冷暖房などをビジネスとして行っている場合もある。

しかし、近年の有効利用技術の導入事例では、廃棄物の処理を含めたシステム全体として利益が上がっているようなものは少ないようである。これは、有効利用技術の導入事例が都市域に限られており、しかも個々の処理分野で別々に有効利用が図られていることに大きな原因があると考えられる。

表 1-1 廃棄物の再利用技術

処理分野	処理法	生産物	利用法例
ごみ処理	生ごみ堆肥化	堆肥	農業利用、花卉栽培
	可燃ごみ焼却	温水 (炭酸ガス)	発電、温水利用、 (温室栽培)
し尿処理	嫌気性消化	消化ガス	燃料、ガス発電、温水利用
	貯留熟成(安定化)	液体肥料	農業利用
下水処理	水処理	高度処理水	中水道利用、農業用水、修景用水
	嫌気性消化	消化ガス	ガス発電、温水利用
	汚泥堆肥化	堆肥	農業利用、花卉栽培
	汚泥焼却・溶融	焼却灰・溶融スラグ	建設資材(路盤材、レンガ)
温水		発電、温水利用、	

## 1-2 有効利用製品の課題

有効利用製品の代表例として、リンの肥料化について考えてみる。

リン肥料の製造は、鉱山に大量に埋蔵されているリン鉱石を掘り出し、船で消費地近くまで運搬して、肥料工場で精製・加工して商品化している。国土交通省都市・地域整備局下水道部の「下水道におけるリン資源化の手引き(平成 22 年 3 月)」に示されたく化成肥料価格設定のための化成肥料成分価(パリテイ方式)によれば、リン含有量 15%の高度化成肥料の想定市場価格は 2,552 円/20-kg で、内訳は製造諸経費が 667 円/20-kg、残りが原材料価格でリンは 985.5 円/20-kg 1 袋となっている。

リン 1 kg 当たりの原材料費に直すと約 330 円/kg になり、もし、廃棄物からの回収リンがリン鉱石と同等の品質であると仮定すると、回収費用を 330 円/kg 程度以下に抑えないと価格競争に打ち勝てないことになる。リン回収対象の廃棄物を下水とすれば、我が国の下水中のリン濃度は 2~4mg/L であるから、下水中のリンを 100%回収できたとしても処理する下水は 250~500m<sup>3</sup> になる。したがって、回収リンが市場性を持つためには、下水 1m<sup>3</sup> 当たりの回収コストを最高でも 1.3 円/m<sup>3</sup> (0.66~1.3 円/m<sup>3</sup>) 以内に抑える必要があり、リン回収で何らかの利益を上げようとするのはまったく現実的でない。

このように、従来の有効利用のアプローチは、一般的な製造工場と比べて原材料の質と調達コストが

圧倒的に不利な状況にあり、市場性のある有効利用製品を生み出すためには、原材料の調達方法にまで遡ってシステム全体を見直す必要があることを示唆している。

### 1-3 クローズドシステム化の課題

一般的な製造工場では、ほぼ 100%近いクローズドシステム化が達成されており、廃棄物をほとんど出さずに済んでいる事例も多い。その主な理由は、製造工場に入ってくる原材料のほとんど全てが、製品化に必須の材料であるからである。このため、製造工程からの廃棄物は製品化されなかった原材料が大半であり、分別さえすれば原材料としての再利用が比較的容易にできる。また、再利用できないとしても、その大半は製造過程で発生する副生成物であり、これも純度が高ければ別用途の原材料としての再利用が十分可能になる。

このように、再利用の基本は、製造工程から出る廃棄物を個々に回収し、なるべく短いサイクルで製造工程に戻して原材料にすることにあるといえる。

## 2. 有効利用システム基本フローの構築

### 2-1 生活系廃棄物有効利用の基本条件

有効利用の課題にあげた基本的要件を生活系廃棄物の有効利用に適用すると、生活の場そのものを製造工程の一部と想定してシステムを組み立てる必要があると考える。

生活の場を製造工場とすれば、人間が製造装置であり、原材料は食料品、製造装置のメンテナンス機材は生活用品、廃棄物は糞(し)尿や食品残渣(生ごみ)、雑排水、プラスチックごみその他などになる。したがって、製造工場の“再利用の基本”を適用すれば、廃棄物のうち原材料の性状に最も近いのは食品残渣(生ごみ)であり、これを食料品に再利用することである。し尿も人間が形態を変えただけで食料品の組成を継承しているから、食品残渣とし尿を併せて他の廃棄物と分離回収し、これを肥料として農業利用し、食料品の再生産に利用することが生活系廃棄物の有効利用システムの基本になると考えられる。

これを前提とすれば、生活系廃棄物の有効利用システムを構築するための基本条件には以下のような事項があげられる。

- 大半の生産物の生産と利用を地域内で完結できること。
- 生活系廃棄物全体を速やかに排除できること。
- 原材料の前処理・収集を安価で効率的に行うこと。
- 食品残渣とし尿を併せて農業利用し、食料品の再生産に利用すること。
- 工程からの廃棄物を混合せず、なるべく短いサイクルで原材料にすること。

### 2-2 有効利用システムの構築手順

以下で検討する生活系廃棄物の有効利用システムの対象は、生活系廃棄物のうち、し尿を含めて人間生活を通して発生する食料品を起源とする液体・個体の排出物を特に食品系廃棄物と定義し、この有効利用システムの構築方法を次の手順で検討する。

食品系廃棄物は、発生源がほぼ共通しており性状も大差がないと考えられるから、最適な有効利用システムも基本的なフローは同様でよいと考えられる。そこで、一般的な食品系廃棄物の量と質を出発点とした最適な有効利用システムを構築し、地域や有効利用先による差異は構築した基本フローの部分修

正により対応することとし、基本フローの構築を以下の２段階の手順で行うことにする。

＜基本フローの構築＞食品系廃棄物の発生量と性状の特定と最適なプロセスの選定

- (1) 食品系廃棄物の発生源別の質と量を把握する。
- (2) 有効利用システムの機能要件を整理する。
- (3) 各要素プロセスの技術と能力仕様を把握する。
- (4) 有効利用方法に適した要素プロセス技術を選定し、基本フローを作成する。

＜システムの妥当性の検証＞システムの物質収支の算定と採算性の検証

- (1) 物質収支を計算し、各処理プロセスの必要能力(比)を算定する。
- (2) 各プロセスの最小必要能力から、システム全体の適正最小規模を算定する。
- (3) システム構築・維持に必要な費用と生産量(額)を見積り、システムの事業性を検証する。

## 2-3 食品系廃棄物の発生源原単位の推定

食品系廃棄物の有効利用システムは農業利用を基本にするから、その肥効成分(栄養塩類)の三要素である窒素(T-N)、リン(T-P)、カリウム(K)の収支が合うことが、システム構築上、特に重要な要件になる。しかし、栄養塩類のうち窒素・リンは富栄養化物質として下水や廃棄物で広く測定されているが、カリウムは排水の規制対象物質になっていないため、環境分野ではほとんど測定されていない。

一方、食品分野では日本食品標準成分表<sup>1)</sup>としてあらゆる食品について詳細な成分データが公表されているほか、医療分野ではし尿の化学的組成が調べられており、農業分野では有機系廃棄物の利用の観点からデータ収集が行われている。例えば、農業分野でインターネット検索できる情報としては、中村真人らの各種バイオマス成分のデータベース整備<sup>2)</sup>(以下「バイオマス DB」という。)があり、Appendix に多種類の試料の肥料成分含有率が紹介されている。

そこで、これらインターネット検索できる資料をベースにし、これを個人所有のデータ等で補完して、栄養塩類発生量の発生源別の原単位を推定してみる。ここでは、検討の過程は省略するが、推定した食料供給総量に対応する生活系廃棄物を“食品系廃棄物”としてその原単位表 2-1 に示す。表の T-N 他の 3 栄養塩類は、上水を含む食料供給総量と生ごみの原単位の推定値を先に決定し、“食料供給総量＝家庭汚水＋生ごみ＝し尿＋雑排水＋生ごみ”の関係が成り立ち、かつ、し尿と雑排水の T-N 比が流総指針の内訳比の 9:2 になるとして推定した。また、K、Ca、Mg に関しては、上水に含まれている分を加味して推定した。

表より、SS(TS)は、食料供給総量に比べて廃棄量が明らかに少ないが、これは有機物等が人体等に消化・吸収されて消失したためと考えられ、矛盾はない。

T-N と T-P は、食料供給総量と家庭汚水と生ごみの合計量がほぼ一致しているものの、し尿の推定値が家庭汚水を上回っている。家庭汚水はし尿と雑排水の混合物なので、し尿は家庭汚水の内数になるはずであるが、T-N に至っては食料品の供給総量を上回った値に推定されている。し尿の推定には医学分野の古い文献値を用いており、近年とは食生活も大きく異なっていると考えられ、T-N が過大に設定さ

1) 文部科学省トップ/政策・審議会/審議会情報/科学技術・学術審議会/資源調査分科会/資源調査分科会報告「日本食品標準成分表 2010」について：

[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu3/houkoku/1298713.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu3/houkoku/1298713.htm)

2) 中村真人, 柚山義人：各種バイオマス成分のデータベース整備農工研技報 203,p57～80,(2005)

れている可能性も高いので、し尿の文献値は無視した。

Ca と Mg は、家庭汚水の占有率が高めの値を示している。これは、生ごみの値が標準生ごみから推計された骨や卵殻起因の値を反映出来なかったことが原因と思われるが、家庭汚水と生ごみを合わせた食品系廃棄物の総計は、他の文献値と比較してもほぼ妥当な推定値と考えられた。そこで、今回の試算では表の推定値を食品系廃棄物全体の発生量原単位としてシステムの物質収支を検討することにした。

なお、生産型下水道システムでは農業生産プロセスを組み込むことが前提になるので、家畜糞尿や農作物残渣も廃棄物として有効利用できる可能性が高い。そこで、これらの廃棄物についても文献値を参考に原単位を設定した。

表 2-1 食品系廃棄物の発生量原単位推定結果一覧

区分	水質項目 (グラム当量)		食料供給 総量※1	食品系廃棄物				参考(雑排水内訳)		
				家庭汚水	(家庭汚水内訳)		生ごみ	総計	上水	その他
					し尿	雑排水				
原単位推定値	総量※2	kg/人/日	1.3	310	1.34	309	0.21	310	309	0.1
	SS(TS)	g/人/日	550	55	15	40	80	135	0.0	40
	T-N	g/人/日	12.9	11.3	9.2	2.1	1.6	12.9	0.0	2.1
	T-P	g/人/日	1.7	1.5	1.0	0.5	0.2	1.7	0.0	0.5
	K	g/人/日	3.8	3.3	0.9	2.4	0.5	3.8	0.4	2.0
	Ca	g/人/日	4.18	4.13	0.12	4.01	0.05	4.18	3.65	0.36
	Mg	g/人/日	1.23	1.17	0.06	1.11	0.06	1.23	0.77	0.34

※1) 上水の含有量を含む。※2) 家庭汚水及びし尿の比重=1.00とする。

## 2-4 有効利用システムの機能要件

水を収集媒体とする有効利用システムは、大きく前処理・収集システムと資源回収生産システムに分けて考えることができる。下水道に当てはめれば、排水設備から管きょ・ポンプ場に至るまでが前処理・収集システムであり、水処理と汚泥処理・有効利用施設が資源回収生産システムということになる。

以下に、それぞれの機能要件について整理する。

### (1) 前処理・収集システムの機能要件

食品残渣はし尿などと同様に食品系廃棄物に分類でき、食料品の再生産に一括して再利用を図ることが最も適しているといえる。したがって、これらを一括して収集できるシステムが、後段の処理システムを構築する上でも有利になる。

これに該当するシステムには、ディスポーザを導入し、食品残渣を自動細断して下水道に流下する方法があり、既に欧米の都市部を中心に広く行われている。今回想定するシステムでもディスポーザを導入することにするが、この方式は集水方式に多くの制約条件があり、集水システム全体を一括して考える必要がある。

食料品再生産のため前処理・収集システムの機能要件には、以下の事項が考えられる。

#### 1) 前処理プロセス(廃棄物排除技術)

前処理設備は、生活系廃棄物を生活空間から排除するための設備であり、生活に直接かかわるので、生活環境改善効果と廃棄物の有効利用性の両面からシステムを選定する必要がある。

それぞれに期待される主な機能要件としては、次のような事項が考えられる。

○生活環境改善効果(システムの導入により生活環境の改善が強く実感できる)

- ・衛生的な排除：廃棄物に直接触れることなく、衛生的に排除できること。
- ・迅速な排除：廃棄物が腐敗することなく、迅速に排除できること。
- ・設備の清潔度：前処理設備を清潔に維持できること。
- 廃棄物の有効利用性（廃棄物の収集・再利用がしやすい）
  - ・粒径の均等性：廃棄物の大きさがそろっていること。
  - ・性状の均質性：廃棄物の性状の変動が少ないこと。
  - ・濃度：廃棄物が大幅に希釈されていないこと。
  - ・保持熱量：利用可能な保有エネルギーを大幅に低下させないこと。
  - ・流動性：懸濁液の流動性が高く、固形物が分離濃縮しにくいこと。
  - ・設備設置・維持費用：設備は高価でなく、管理も簡単で利用者の負担があまり増えないこと。

## 2) 収集プロセス

収集プロセスは、生活系廃棄物を衛生的かつ速やかに再利用施設まで移送できることが重要であるので、次のような機能要件が考えられる。

- ・混入防止：食品系廃棄物以外の廃棄物等、有効利用の障害となる物質の混入を防止できること。
- ・環境保全性：移送過程での収集物漏洩や悪臭発生など、環境を悪化する危険性が少ないこと。
- ・閉塞防止性：固形物が沈殿分離しづらく、速やかに移送・収集できること。
- ・収集規模：より広範囲に少ないエネルギーで収集できること。
- ・維持管理性：点検頻度が少なく、維持管理が容易であること。
- ・維持費用：収集プロセスの維持コストが低く、利用者の負担増にならないこと。

### (2) 水処理(資源回収)システムの機能要件

有効利用を前提にすると、水処理は、“衛生的に処理する”という従来からの視点に加えて、“原材料を利用しやすい形で効率よく回収できる”という機能も重要になる。

従来の水処理を資源回収システムの視点で分類すると、物理学的方法は水とその他の物質(原材料)の分離プロセス、生物化学的方法は分離を容易にするための調質プロセスとみることができ、両者を組み合わせると、効率よく目的を達成することが求められる。これらを考慮すると、有効利用のための各プロセスの機能要件としては、次のようなものが考えられる。

#### 1) 分離プロセス(物理学的方法)

物理学的方法には、水と汚濁質の比重差を利用して分離する沈殿や遠心分離、粒子径の差を利用したろ過、電気的な性質の差を利用したイオン交換や吸着、気化温度の差を利用した汚泥乾燥などがあり、分離する対象によって様々な方法が選択される。これらに共通する機能要件には次のようなものが考えられる。

- ・分離性能：分離対象物の選択性が高く、処理水への流出が少ないこと。
- ・迅速性：分離対象物を速やかに分離回収できること。
- ・閉塞防止性能：分離装置の閉塞が起りにくく、閉塞した場合も速やかに回復できること。
- ・処理の安定性：水質や流量の変動に対して、安定して処理できること。
- ・経済性：エネルギー消費量が少ないこと。
- ・耐久性：機械設備や分離膜等は、十分な耐久性を有すること。

## 2) 調質プロセス(生物化学的方法)

有効利用システムにおいて生物化学的な方法は、物理学的な分離を容易にするための前処理的な位置付けになるので、これらに共通する機能要件には次のようなものが考えられる。

- ・資源保持能：原材料の保有エネルギーをなるべく低下させないこと。
- ・差別化能：汚濁質の比重や粒径の増加、イオン化の促進など、水から分離し易い性質に変化させること。
- ・経済性：エネルギーや薬剤の消費量が少ないこと。
- ・処理の安定性：水質や流量の変動に対して、安定して処理できること。

## (3) 資源生産システムの機能要件

ここで想定している有効利用システムでは、生活から発生する動植物系廃棄物を一括して液体輸送して収集するので、水を含めてすべての物質が原材料として資源生産システムに回すことが可能である。そこで、各プロセスの選定にあたっては、個々のプロセスでの経済性は求めるが、資源生産システム総体として、すべての資源を有効活用できることを優先することにする。

以上を勘案すると、資源生産システムの機能要件は次のようになる。

- ・品質：不純物が少なく、生産物の品質が安定しており、質も高いこと。
- ・生産効率：原材料の製品化割合が高く、かつ製造時間が短いこと。
- ・省エネ率：エネルギー消費がなるべく少ないこと。
- ・再利用率：副生成物の再利用率が高いこと。
- ・付加価値：生産物の付加価値が高いこと。
- ・経済性：製造コストが商品価値に見合うこと。
- ・連携性：他の資源生産プロセスとの組合せが可能であること。

## 2-5 選定プロセス技術

### (1) 選定プロセス技術

以上の機能要件を元に選定したプロセス技術を表2-2に示す。一般的な污水处理場との最も大きな違いは、汚水の生物処理法として汚濁質の性状を極力変化させない「修正コンタクトスタビリゼーション・MBR法」を採用し、栄養塩類を後段の逆浸透膜(RO膜)で一括して回収する点である。

表2-2 選定プロセス一覧

プロセス区分		対象物	選定プロセス
前処理・収集システム	前処理プロセス (廃棄物排除技術)	し尿	水洗式トイレ(希釈無処理方式)
		固形廃棄物(生ごみ)	ディスプレイ
		雑排水	ろ過処理
	収集プロセス	液状廃棄物	小規模下水道(自然流下)
		固形廃棄物(生ごみ以外)	(分別収集)
水処理(資源回収)システム	分離プロセス (物理学的的方法)	砂分・し渣	沈砂池(スクリーン)
		微細な固形物	微細目スクリーン
		栄養塩類	逆浸透膜(RO膜)
	調質プロセス (生物化学的方法)	微粒子物質・溶解性物質	コンタクトスタビリゼーション-MBR法



資源生産システム	前処理プロセス (精製技術)	引抜き汚泥(余剰汚泥)	浮上濃縮/ベルト式ろ過濃縮
		濃縮汚泥	圧入式スクリーンプレス脱水機/回転加圧脱水機/ベルトプレス脱水機
	エネルギー生産プロセス	濃縮汚泥/作物残渣/畜産廃棄物	メタン発酵(バイオガス化)施設
		消化ガス	発電施設(コージェネレーション方式)
		(濃縮汚泥)	微生物燃料電池(MFC)
	農業利用プロセス	脱水汚泥/作物残渣	堆肥化施設
		堆肥	圃場(堆肥利用)施設
		RO 膜濃縮液/発電排ガス/温排水	植物工場施設
		農作物残渣	畜産施設
	その他有効利用プロセス	処理水	中水道施設
温排水		熱交換設備	

## (2) 修正コンタクトスタビリゼーション-MBR 法

表 2-3 に膜分離活性汚泥法(MBR)とコンタクトスタビリゼーション法の仕様を比較して示す。MBR の最大の特徴は、沈降分離に依存しないため、MLSS を高く維持できる (8,000~12,000mg/L 程度) ことである。一方、コンタクトスタビリゼーション法では汚水との接触効率を上げるために MLSS をなるべく高く維持することが求められており、安定化タンクを含めて反応タンクと位置付ければ、多くの指標項目で MBR と類似していることが分かる。

表 2-3 膜分離活性汚泥法(MBR)とコンタクトスタビリゼーション法の仕様比較

項目	膜分離活性汚泥法(MBR) <sup>※1</sup>	コンタクトスタビリゼーション法 <sup>※2</sup>
BOD-SS 負荷(kg/SSkg・日)	0.07~0.18 <sup>※3</sup>	0.2(安定化タンクを含む)
BOD-容積負荷(kg/m <sup>3</sup> ・日)	0.8~1.4 <sup>※3</sup>	0.8~1.4(安定化タンクを含む)
MLSS(mg/L)	8,000~15,000	2,000~8,000
送気量(倍/下水量)	14~23(JS 技術評価)	12 以上
エアレーション時間(時間)	3.0(循環法)	5 以上(安定化タンク)
滞留時間(時間)	6.0(循環法) (EU における事例 3~8.5)	5.5~6.0 以上(安定化タンクを含む) (混和タンク:0.5~1.0)
汚泥返送比(%)	—	50~100

※1) ※3 以外は、下水道維持管理指針 実務編 -2014 年版-(日本下水道協会)による。

※2) 下水道施設設計指針と解説-1984 年版-(日本下水道協会)による。

※3) コンタクトスタビリゼーション法の BOD-容積負荷から設定流入水 BOD を逆算(200-350mg/L)して算出。

資源回収を目的にした修正コンタクトスタビリゼーション法の想定プロセスフローを図 2-1 に示す。図のフローでは、余剰汚泥のエネルギー価値をなるべく損なわない観点から、余剰汚泥を混和タンクの出口から引抜くフローとしている。また、好気槽は混和槽での吸着能が回復でき、かつ微生物膜による分離膜のハウリングが抑制できる程度まで活性汚泥が安定化できれば良い。したがって、それぞれの滞留時間は混和槽(嫌気)はコンタクトスタビリゼーション法と同程度の 0.5 時間程度、安定化槽(好気)は MBR と同じ 3 時間程度としたが、実績がないので実証的に確認する必要がある。

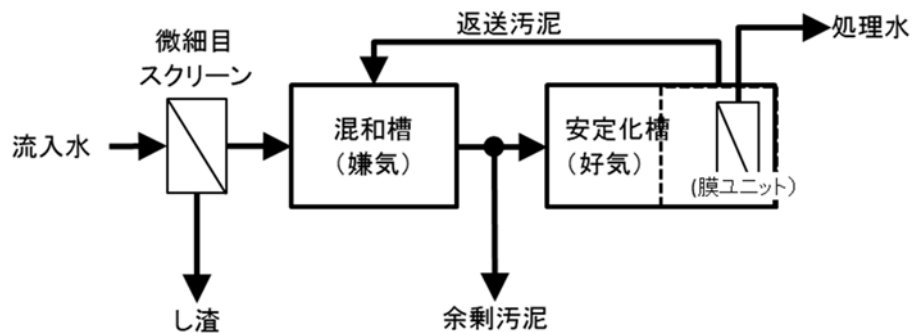


図 2-1 修正コンタクトスタビリゼーション-MBR 法の概念図

### (3) 逆浸透膜(RO 膜)

逆浸透膜(RO 膜)の用途別の主な仕様を表 2-4 に示すが、RO 膜の仕様は用途によって様々である。最も異なるのは原水に対する精製水の抽出率であり、例えば海水淡水化や水道水の精製では精製水：濃縮液水が 1：0.67～1.5、1：0.5～4 と、高性能な RO 膜でも精製水より濃縮水の割合が多い場合があり、塩類濃度が高い場合や除去(阻止)率を高めようとする場合は精製水の抽出率が低下する。

表 2-4 RO 膜の用途別の性能仕様と今回設定値

用途区分		海水淡水化 <sup>※2,3,4</sup>	水道水の精製 <sup>※5,6</sup>	下廃水再生水 <sup>※3,7</sup>	今回設定値
入口圧力(Mpa)		5.5～6.5	0.4～1.2	-	-
精製水回収率(%)		40～60	25～67	80(単段)～97(pH調整 2 段)	80×2 段
濃縮液の濃縮倍率		1.7～2.5	1.3～3.0	5～33	25
流入	イオン量(μS/cm) <sup>※1</sup>	50,000	100～200	(70) <sup>※8</sup>	-
	塩分濃度(mg/L)	35,000	-	-	-
処理水	イオン量(μS/cm)	150～300	3～9	-	-
	塩分濃度(mg/L)	80～150	-	-	-
濃縮液	イオン量(μS/cm)	85,000～12,500	130～600	-	-
	塩分濃度(mg/L)	60,000～88,000	-	-	-
除去(阻止)率(単段)	イオン(%)	99.4～99.7	97～98	-	-
	全溶解性固形物 TDS(%)	-	98.6	>97	97(=T-P)
	塩化ナトリウム(%)	99.8	98	>95	95(=K)
	アンモニア(%)	-	-	>90	90(=T-N)
硝酸イオン(%)		-	95.9	>80	-

※1) 水温 25℃の導電率

※2) 食用塩公正取引協議会 用語解説; <http://www.salt-fair.jp/term/>

※3) 岩堀博; 逆浸透膜の世界市場展開と技術開発の歩みおよび都市域水循環圏での新規水資源開発, <http://www.rite.or.jp/Japanese/lab0/kagaku/111104sympo/pdf/No6.pdf>

※4) 日覺昭廣; 水処理事業の拡大戦略, [http://www.toray.co.jp/ir/pdf/lib/lib\\_a270.pdf](http://www.toray.co.jp/ir/pdf/lib/lib_a270.pdf)

※5) 中島博志; 地下水 RO (逆浸透) 膜処理水と腐食, 腐食センターニュース No. 057, <http://www.corrosion-center.jp/pdf/news/No.057/No.057.pdf>

※6) メルクミリポア; 逆浸透膜(RO), <https://www.merckmillipore.com/JP/ja/lw/learning/water-techniques/ro/akib.qB.gCsAAAFI6KgXcz52,nav>

※7) 古藤慶彦外; 排水を最大限再利用し液体廃棄物を排出しない ZLD システム 図 2(部分) [https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2016/04/71\\_04pdf/b08.pdf](https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2016/04/71_04pdf/b08.pdf)

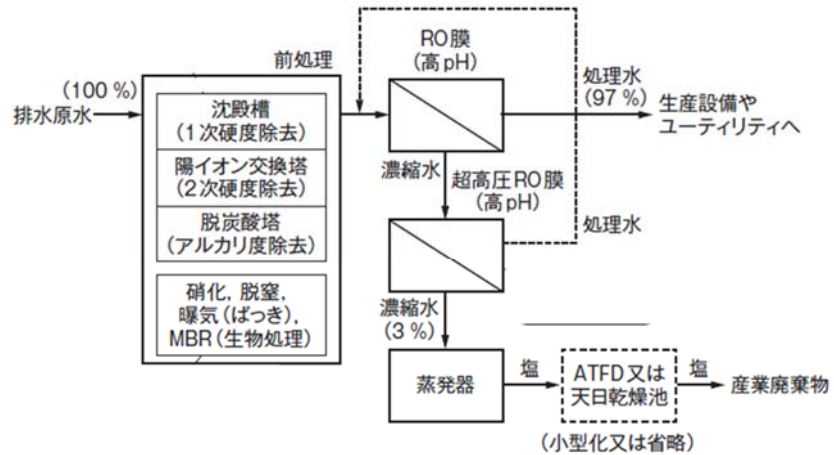
※8) バイオマス DB/4. 人間の居住空間/農業集落排水原水・処理水

今回の RO 膜導入の目的は、栄養塩類の回収に主眼を置いており、精製水の水質に関しては最低限の

基準が守れば良いと想定している。したがって、処理水質からみれば、表の中では下廃水再生水程度の除去(阻止)率で十分であり、回収した栄養塩類の利用しやすさを考えれば、なるべく濃縮倍率が高いほうが有利である。そこで、表に示した仕様のうち、下廃水再生水の pH 調整 2 段 RO 膜処理(精製水回収率 97%)を基本フローとし、右欄に示した設定値を用いて物質収支を計算することにする。

pH 調整 2 段 RO 膜処理法のフロー例を図 2-2 に示す。この処理フロー例は、古藤慶彦外が「排水を最大限再利用し液体廃棄物を排出しない ZLD システム」と題して紹介している東芝グループのソリューションの処理フローの一部である。なお、このフローでは、RO 膜から排出された濃縮水(全体の 3%)は蒸発乾固して産業廃棄物として処分することになっている。これは、原水として工場排水を想定しており、重金属等の有害物質を含む可能性がある濃縮水を排出しないフローとしているためである。

今回のフローでは、排水中に有害物質は含まれず、RO 膜で回収される濃縮水は液体肥料として農業利用するので蒸発乾固は不要である。また、下水処理水の硬度やアルカリ度も 1 段目の膜のハウリングを助長するほど高くないと考えられるので、前処理についても 1 段目の pH 調整は省略し、前掲の修正コンタクトスタビリゼーション-MBR 法の処理水をそのまま 1 段目に導入する通常の RO 膜処理とし、2 段目をこのシステムに準拠した高 pH の超高压 RO 膜とするフローとすることにした。



出典：古藤慶彦外：排水を最大限再利用し液体廃棄物を排出しないZLDシステム 図2(部分)  
[https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2016/04/71\\_04pdf/b08.pdf](https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2016/04/71_04pdf/b08.pdf)

図 2-2 pH 調整 2 段 RO 膜処理法のフロー例

2-6 有効利用システムの全体イメージ

有効利用システムの全体イメージを図 2-3 に示す。なお、図は人工材料系廃棄物を可燃物として別途収集することを前提にしているため、その焼却施設は含んでいない。もし、それらの施設も併設する場合は、さらに発電・温熱回収量の増加が期待できることになる。

資源回収プロセスのうち、固形物の回収プロセスは、先ず固液分離して固形廃棄物を回収後、残った液状廃棄物は高負荷型の活性汚泥処理により、溶解性有機物を微生物体に変換して汚泥として回収し、両方の固形物を合わせて発酵してエネルギー生産することを基本にしている。

なお、回収固形物からのエネルギー回収は、このフローではバイオガスを用いたコージェネレーション方式の発電を想定しているが、開発が進めば濃縮汚泥を用いた微生物燃料電池(MFC)に置換えることを前提とする。この場合、農作物残渣も併せて原材料にするから、前処理・調質設備を原料の性状に応じた最適な方法に変更することも想定される。

一方、栄養塩類の回収プロセスは、バイオガス化等エネルギー回収後に得られる残存物には未分解有機物と窒素・リンなどの塩類が高濃度に含まれるので、汚水処理過程からの回収の外に残存物からの回収プロセスも組み込む必要がある。ここでは、固形物は脱水して堆肥化し、残りの脱水ろ液は RO 膜により栄養塩類を回収し、汚水の RO 膜濃縮液と共に液体肥料の原料として利用することを想定した。

なお、脱水ろ液等に含まれる栄養塩類は、汚水に比べて窒素・リンの濃度が高いほか、汚水に多く含まれるカリウムの含有濃度が低く、組成が異なると考えられる。そこで、汚水とは別のプロセスで別途回収し、液体肥料として用いる時に混合調整するプロセスとするのが合理的である。同様の理由で、畜産施設からの発生が想定される家畜ふん尿についても、し渣分離後のし尿を単独で RO 膜分離を行い、栄養塩類を回収することを想定する。

なお、プロセス技術の選定では詳述しなかったが、植物栽培の場合、空気中の二酸化炭素濃度を高くすることにより光合成が促進されることが報告されている。エネルギー生産に付随して発生する二酸化炭素を植物工場に供給することにより、地球温暖化ガスの削減と併せて作物の成長促進を図ることとする。

以上のフローが実用化できれば、食品系廃棄物を含めた生活系廃棄物の大半を再利用・再生産することが可能になり、排気ガスを含めて廃棄物をほぼゼロにすることが可能になると考えられる。

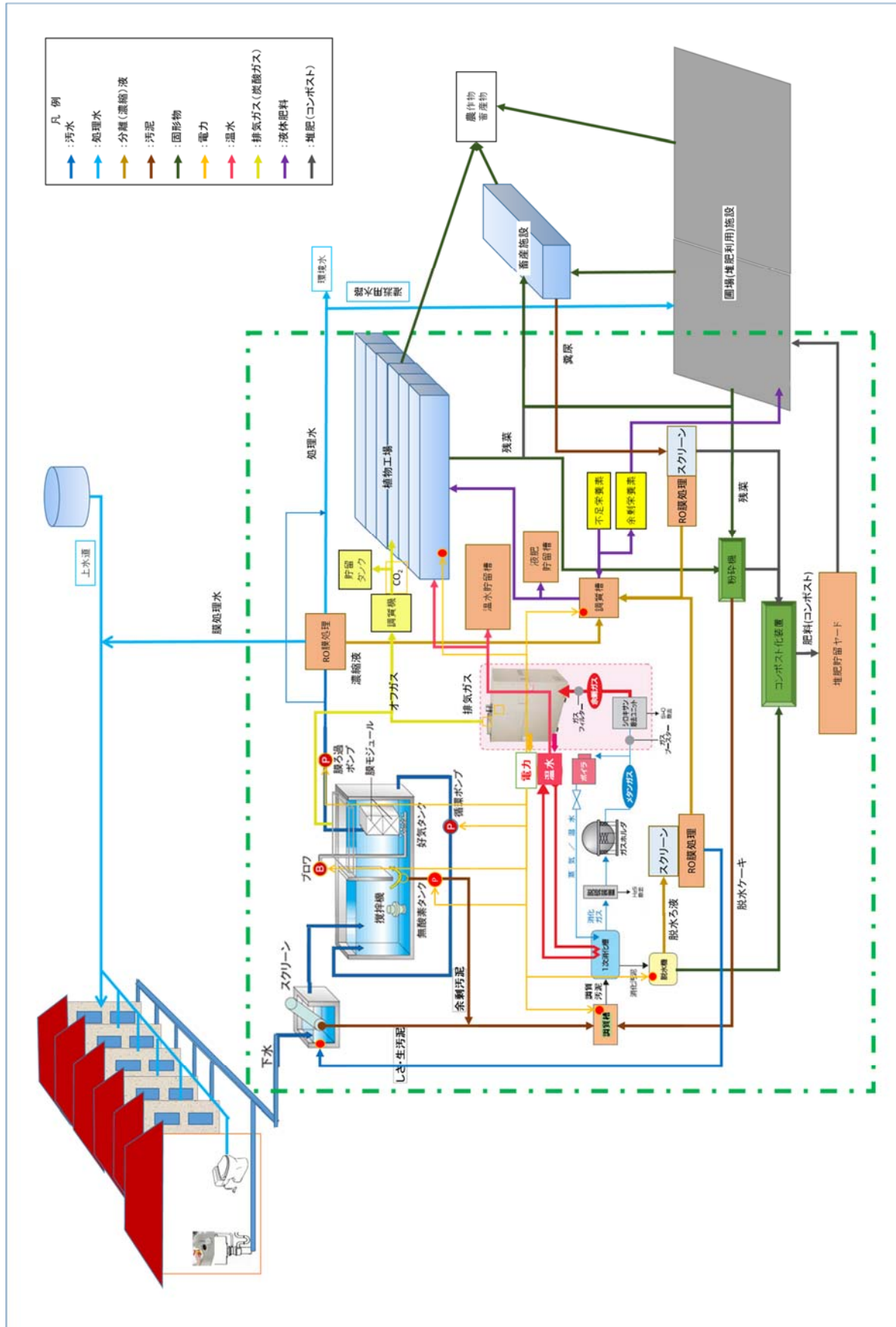


図 2-3 有効利用システムのイメージ

### 3. 有効利用システムの妥当性の検証

#### 3-1 物質収支の検討

廃棄物の発生をゼロとするシステムを構築する上で最も重要になるのは、各プロセス相互の物質収支が合っていることである。今回想定した有効利用システムでは、システム全体を循環している栄養塩類の物質収支をバランスさせることが必要になる。

栄養塩類の物質収支を考えると、このシステムの栄養塩類の流出口は農産物と畜産物のみであるから、最終的には流入汚水の栄養塩類含有量と農畜産物の含有量が等しくならなければならない。農畜産物の構成と生産量は流入栄養塩量に制約されることになる。

##### (1) 物質収支の算出条件の検討

物質収支の算定に当たっては、システムに流入する物質量と物質ごとの各プロセスの分離性能を設定する必要がある。以下に各プロセスの算出条件を整理する。

##### 1) 流入物質量

有効利用システムに流入する物質は、前処理・収集システムを介して集められた物質であり、液状廃棄物と生ごみ以外の固形廃棄物に大別できる。各物質の発生量を基にした流入物質量の算出条件を表3-1に示す。

算出条件のうち栄養塩類の溶解性成分量に関しては、推定根拠とした発生源を勘案して、収支算出条件に示したように設定した。例えば、雑排水に含まれる固形分の大半はトイレ排水起因の紙類で、その他に風呂場排水起因の毛髪、洗濯排水起因の土粒子などが若干含まれる程度と考えられる。そこで、毛髪の量が無視できるとすれば、固形分には栄養塩類がほとんど含まれないので、雑排水中の栄養塩類は全て溶解性成分と仮定した。

表3-1 有効利用システムの流入物質量の算出条件

プロセス区分	対象物	収支算出条件
前処理プロセス (廃棄物排除技術)	し尿	トイレ洗浄水を除く。溶解成分＝尿含有量：T-N＝89.3%、T-N以外＝88.8%
	雑排水(トイレ洗浄水含む)	溶解性成分比：K＝100%、その他＝上水含有量
	固形廃棄物(生ごみ)	溶解性成分＝0%、生ごみ含水率＝62%
収集プロセス	液状廃棄物	前処理設備排出物の合計
	固形廃棄物(生ごみ以外)	全量 SS(T-S)とし、厨芥(生ごみ)比率＝35%より逆算。栄養塩類＝0

上記の条件により算出した1日千人当たりの有効利用システムの流入物質量を、表3-2に示す。

算出結果には参考値として、食料供給総量(上水起源の栄養塩類を除く)と、別途に回収される生ごみ以外の固形物廃棄物量を併せて示した。表のうち、今回の物質収支で計算対象とするのは汚水で移送される廃棄物であり、前述のとおり、流入汚水にはし尿と雑排水のほか、ディスポーザを介して生ごみの全量が含まれることを想定している。

以後の有効利用システムの物質収支は、これらの値のうち液状廃棄物を出発点として算出することにした。

表 3-2 有効利用システムの流入物質質量(千人 1 日当たり)の算出結果

プロセス区分	対象物	全体							溶解性成分				
		総量	SS(TS)	T-N	T-P	K	Ca	Mg	T-N	T-P	K	Ca	Mg
		t(m <sup>3</sup> )	kg										
(食料供給総量)		1.3	550	12.9	1.7	3.8	4.18	1.23	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
前処理プロセス	し尿	1.3	15	9.2	1.0	0.9	0.12	0.06	8.2	0.9	0.8	0.11	0.05
	雑排水	308.5	40	2.1	0.5	2.4	4.01	1.11	0.0	0.0	2.4	3.65	0.77
	固形廃棄物(生ごみ)	0.21	80	1.6	0.2	0.5	0.05	0.06	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
収集プロセス	液状廃棄物	310	135	12.9	1.7	3.8	4.18	1.23	8.2	0.9	3.2	3.76	0.82
	固形廃棄物(生ごみ以外)	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00

2) 各プロセスの算出条件

各プロセスの収支計算に用いた算出条件の主なものを表 3-3 にまとめて示す。次項の物質収支の計算では、この表の条件を用いてシステム全体の収支を検討する。

なお、詳細に記述した算出条件の根拠等については、この表では省略している。また、農業利用に関しては、実際に栽培する作物の構成によって栄養塩類の収支が異なってくるので、流入栄養塩類構成に最適な作物と生産量の組合せを算出して物質収支に組み込んでいる。算出方法を次項で紹介する。

表 3-3 物質収支算出条件一覧

プロセス区分	対象物	選定プロセス	収支算出条件	
(食料供給総量)		(人間消費量)	残存 SS=液状廃棄物 SS、栄養塩類: 摂取量=排出量(∴消費量=0)、溶解性成分残存量=液状廃棄物溶解成分量-上水含有量	
前処理・収集プロセス	前処理設備(廃棄物排除技術)	し尿	水洗式トイレ(希釈無処理方式)	除去率=0、溶解成分=尿含有量、T-N=89.3%、T-N 以外=88.8%(=有機性窒素比)、水洗用水は雑排水に含む。
		雑排水	ろ過処理	除去率=0、溶解性成分比=100%
		固形廃棄物(生ごみ)	ディスポーザ	除去率=0、溶解性成分=0%
	収集プロセス	液状廃棄物	小規模下水道(自然流下)	前処理設備排出物の合計
		固形廃棄物(生ごみ以外)	(分別収集)	全量 SS(T-S)とし、厨芥(生ごみ)比率=35%より逆算。栄養塩類=0
水処理(資源回収)プロセス	分離方法(物理学的的方法)	砂分・し渣	沈砂池(スクリーン)	除去率=0
		微細な固形物	細目スクリーン	ディスポーザ固形廃棄物を回収、生ごみ含水率=62%、総含水率=90%
	調質方法(生物化学的方法)	微粒子物質・溶解性物質	コンタクトスタビリティイオン-MBR 法	MBR の MLSS=1.5%、余剰汚泥含有率(ds%): T-N=4%、T-P=1%、K~Mg=流入固形物濃度に同じ、揮散消失量=0
	分離方法(物理学的的方法)	栄養塩類	逆浸透膜(RO 膜)	精製水回収率: 80%×2 段、濃縮液の濃縮倍率: 25 倍、除去(阻止)率: T-N=90%、T-P=97%、K,Ca,Mg=95%
資源生産プロセス	前処理(精製技術)	引抜き汚泥(余剰汚泥)	浮上濃縮/ベルト式ろ過濃縮	SS 回収率 98%、濃縮汚泥 SS=5%、溶解性塩類の吸着なし。凝集剤(0.3%溶液)添加率 0.3%-SS
		濃縮汚泥	メタン発酵(バイオガス化)施設	有機物含有率=90VTS/TS-%、有機物減少率=76VTS-%、消化ガス発生量=0.6Nm <sup>3</sup> /kg 投入 VS、濃度(V/V-%): CH <sub>4</sub> =60, CO <sub>2</sub> =38, H <sub>2</sub> S=0.02、発熱量=22,000kJ/m <sup>3</sup> N
	エネルギー生産	微細な固形物		
		作物残渣 畜産廃棄物		

プロセス区分	対象物	選定プロセス	収支算出条件
前処理(精製技術)	濃縮汚泥(消化汚泥)	圧入式スクリーンプレス脱水機/回転加圧脱水機/ベルトプレス脱水機	SS 回収率 98%、脱水汚泥含水率=80%、薬品添加率=1.3ds-%
	エネルギー生産	発電施設(コージェネレーション方式)	消化ガスメタン濃度=60%、発電効率=32%、熱回収率=52%、出力=1.92Kw/Nm <sup>3</sup> 、排気ガス O <sub>2</sub> 濃度=16%
農業利用	(濃縮汚泥+)	(バイオ燃料電池)	今回は収支計算条件から除く。
	脱水汚泥	堆肥化(天日乾燥)施設	堆肥含水率=35%、分解率(有機物=10%、タンパク質(T-N)=10%)、堆肥返送率=150%、運転(No.1/2): HRT(10/40 day)、空気量(50/10 LN/min・m <sup>3</sup> )
	作物残渣		
	計	植物工場施設	生活排水系栄養塩類量=出荷農産物栄養塩類量となるように、構成農作物と出荷量を最適化計算で算出。出荷物以外の栄養塩類は全量回収し、肥料として完全リサイクルとして、収支計算。ただし、収支が整合しない分は家畜飼料栽培作物の施肥量と収穫量の差として圃場残渣として調整。
	RO膜濃縮液		
	発電排ガス		
	温排水	圃場施設	
堆肥			
RO膜濃縮液	畜産施設		
農作物残渣			
飼料作物			
その他有効利用	処理水	中水道施設	今回は収支計算条件から除く。
	温排水	熱交換設備	今回は収支計算条件から除く。

## (2) 物質収支の算出事例(農業利用施設)

物質収支の算出の一例として、栽培作物の選定などで特に工夫を要した農業利用施設の物質収支の検討手順を以下に紹介する。

### 1) 栄養塩類収支の制約条件

農作物を栽培する場合の栄養塩類収支は、図3-1に示すように、大きく施肥量と作物摂取量、出荷量に分けて考えることができ、肥料の最適な塩類構成比やその後の収支は栽培する作物によって異なってくる。

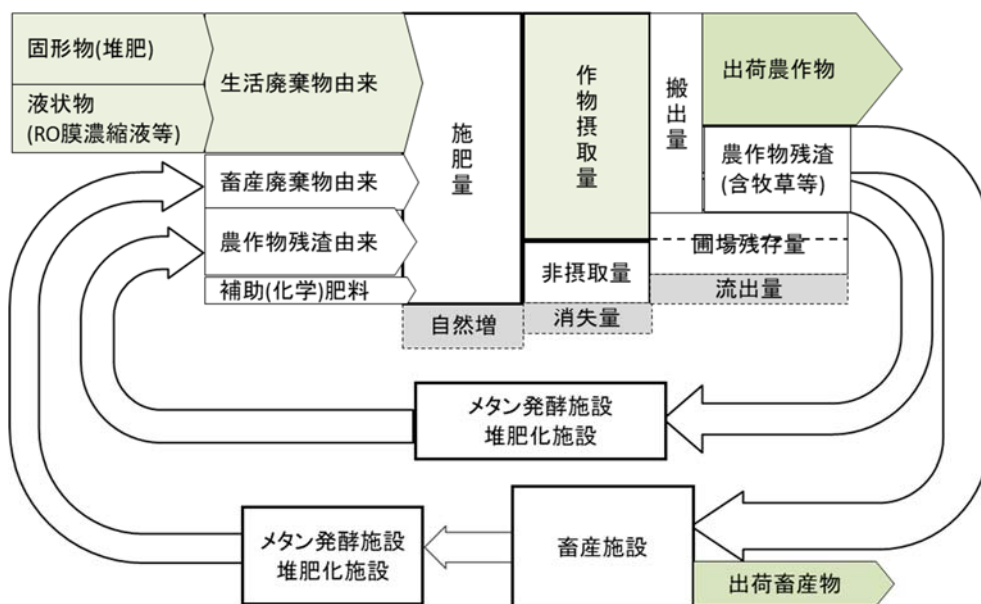


図3-1 農作物栽培時の栄養塩類収支の概念図



したがって、生産できる作物の種類や生産量は、循環量も含めた供給栄養塩類の構成比と量によって制約されることになる。特に、本有効利用システムでは、システムから回収できる栄養塩類だけで農作物を栽培するので、供給可能な栄養塩類と栽培作物の種類と量の間最適な組合せがあり、それらを勘案しながら計画的に栽培することが重要になる。

なお、栄養塩類のうち窒素は、豆類のように根粒菌の作用により空気中から固定されたり、細菌の作用で肥料中から窒素ガスに還元されたりして、圃場の中で増減する。また、無機性の窒素やカリウムは、大半が水溶性化合物で降雨等の影響により流出するものもあり、実際の収支は圃場条件などによっても異なってくるが、ここでは考慮しないことにした。

## 2) 生産物の選定

栽培される作物は、回収された栄養塩類を無駄なく利用できることが前提になるので、回収物と肥料の栄養塩類組成が一致することが理想である。しかし、圃場作物の施肥成分と収穫物の栄養塩類組成の関係が分かる文献や、植物工場の液体肥料成分も収穫物との関係を明らかにしている文献も見出せなかった。そこで、施肥された肥料成分のうち、出荷農作物に含まれるもの以外は全てシステム内を循環し、再び肥料として供給されると仮定して、栽培作物を選定することにした。

これを前提にすると、施肥量に関係なく“（生活系排水から回収される）食品系廃棄物の栄養塩類量”＝“出荷作物の栄養塩類量”の関係が成り立てばよいことになる。そこで、食品系廃棄物と作物の栄養塩類の構成比の関係を把握するため、“主な作物の可食部”と“食品系廃棄物”の栄養塩構成比を比較して図3-2に示す。なお、図には“食品系廃棄物”を赤丸で示した他、農作物に加えて畜産物の栄養塩構成比も示した。

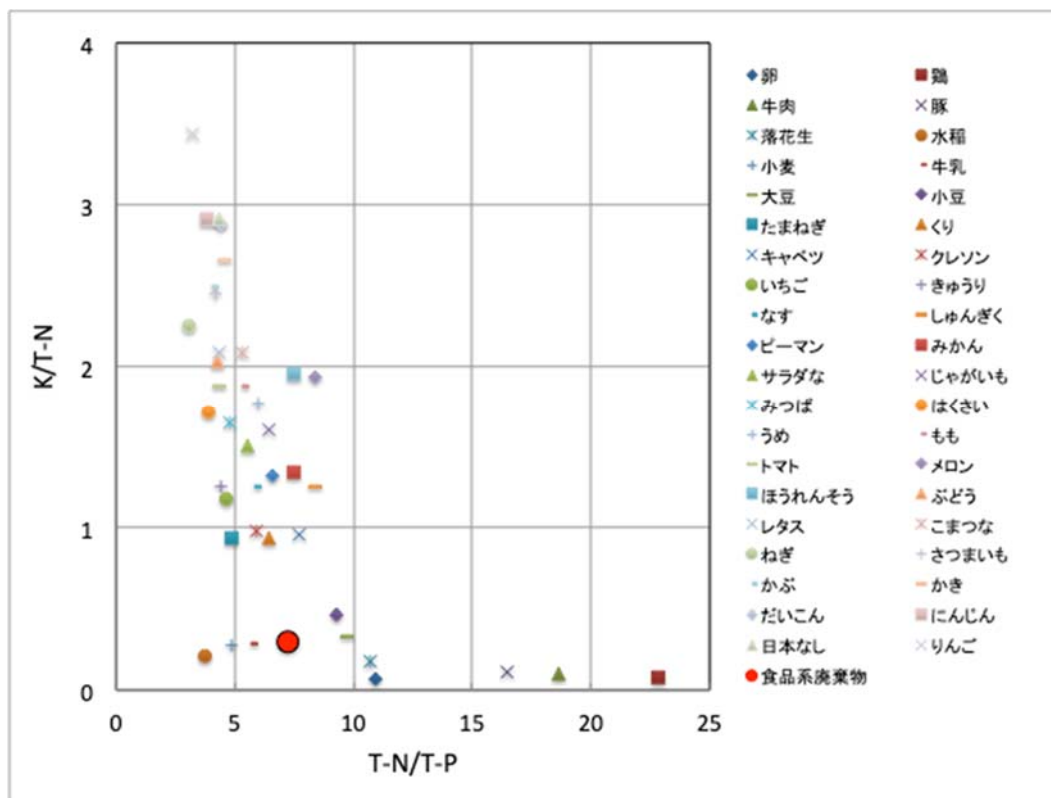


図3-2 主な農・畜産物と食品系廃棄物の栄養塩類構成比の比較

図に赤丸で示した食品系廃棄物と、主な農・畜産物の栄養塩類構成比を比較すると、食品系廃棄物と構成比が比較的近いのは牛乳の他、大豆、小豆、小麦などの穀類であり、牛乳以外の畜産物は“T-N/T-P”比が大きく、反対に果物や野菜類などの農作物は“K/T-N”比が大きい傾向にある。

したがって、穀類を含めたとしても農作物だけで栄養塩類の収支バランスをとることが難しいことは明らかであり、畜産物も含めて栽培作物を選定しないと最適な作物の組合せができないと推測された。

なお、汚水処理では生物学的窒素除去を導入すれば肥料に含まれる窒素量を一定の範囲で削減することができ、図の赤丸の位置は左上方にずれるので、畜産を組み込まないシステムの構築も可能かもしれない。しかし、生物学的窒素除去を導入した場合は、生物処理に必要な酸素量が増加し、余剰污泥から回収できるエネルギー量も減少するので得策ではないと判断し、回収過程での窒素削減は想定しないことにした。

そこで、汚水処理で生物学的窒素除去を導入せず、食品系廃棄物の栄養塩類の全量を出荷作物に移行できるとした時の、畜産を含めた最適な農業生産物の構成比と栄養塩類回収量の例を表3-4に示す。

表3-4 栽培作物と栄養塩類回収量(例)

作物	区分	農作物			農作物収穫量				必要圃場面積 ×10a
		可食部含有率(kg/t)			T-P 基準 収量(t)	可食部含有量(kg)			
		T-N	T-P	K		T-N	T-P	K	
水稻	穀類	10.9	2.9	2.3	62.4	679	181	144	65
小麦	穀類	17.0	3.5	4.7	44.9	762	157	211	75
大豆	豆類	56.5	5.8	19.0	10.2	576	59	194	14
落花生	豆類	40.6	3.8	7.4	5.6	228	21	41	12
じゃがいも	芋類	2.6	0.4	4.1	58.3	149	23	239	8
キャベツ	野菜	2.1	0.3	2.0	28.5	59	8	57	2
サラダな	野菜	2.4	0.4	3.7	37.4	92	16	138	-
みつば	野菜	2.0	0.4	3.3	28.0	55	12	91	-
メロン	野菜	0.9	0.1	1.7	54.4	48	6	92	-
農作物小計					329.7	2,647	483	1,207	176
牛肉	畜産	22.4	1.2	2.2	10.3	231	12	23	-
豚肉	畜産	29.2	1.8	3.1	2.9	85	5	9	-
鶏肉	畜産	32.3	1.4	2.4	14.5	468	20	35	-
鶏卵	畜産	19.7	1.8	1.3	50.6	996	91	66	-
畜産小計					78.3	1,779	129	133	
計					408.0	4,427	612	1,340	176
収支計算目標値(kg/千人/年)					-	4,426	612	1,339	-
残存量					-	-1	-0	-1	-

最適な栽培作物の組合せは、各作物の収量を任意に設定した時の各栄養塩類の量と“食品系廃棄物から回収される栄養塩類量”を比較し、なるべく少ない作物の種類でその差が最小になる組合せを栄養塩類総計の収量の多い順に絞り込みながら収束計算して、見出したものである。

表によれば、穀類や野菜、畜産物をバランス良く組み合わせることが必要であり、食品系廃棄物の栄養塩類構成が食生活を反映したものであることを考えると、当然の結果とも言える。

なお、今回の収支計算目標値では最適な生産物の組合せは表に示した1条件であったが、栄養塩類構成比が類似していれば、生産物を置き換えることも可能である。今回試算したケースで選定作物と栄養塩類構成比の相関が高く（相関係数 0.9995 以上）置換え可能な作物は表3-5に示すようになった。

表によれば、置換えが可能なのはキャベツ、メロン、肉類などであり、その他の作物は置き換えによって栄養塩類の系内の残存量が増加することになる。

表 3-5 選定作物の置き換えが可能な作物

選定作物	区分	置換え可能な作物(栄養塩類構成比の相関係数 0.9995 以上)
水稻	穀類	-
小麦	穀類	落花生(豆類)
大豆	豆類	-
落花生	豆類	小麦(穀類)
じゃがいも	芋類	-
キャベツ	野菜	クレソン(野菜), くり(果物)
サラダな	野菜	-
みつば	野菜	-
メロン	野菜	トマト、はくさい、ほうれんそう(野菜), もも(果物)
牛肉	畜産	豚肉(畜産)
豚肉	畜産	牛肉(畜産)
鶏肉	畜産	牛肉、豚肉(畜産)
鶏卵	畜産	-

### (3) システム全体の物質収支

処理人口 1 千人 1 日当たりの生活系廃棄物を出発点とした時の各プロセスの収支計算結果を統合したシステム全体の物質収支を図 3-2 に示す。なお、農作物残渣を再利用するので、収支計算は循環式になってしまう。そこで、飼料作物圃場施設で計算を区切り、ここで収支調整することにした。そのため、飼料作物圃場施設の前後では収支にわずかなずれが生じている。

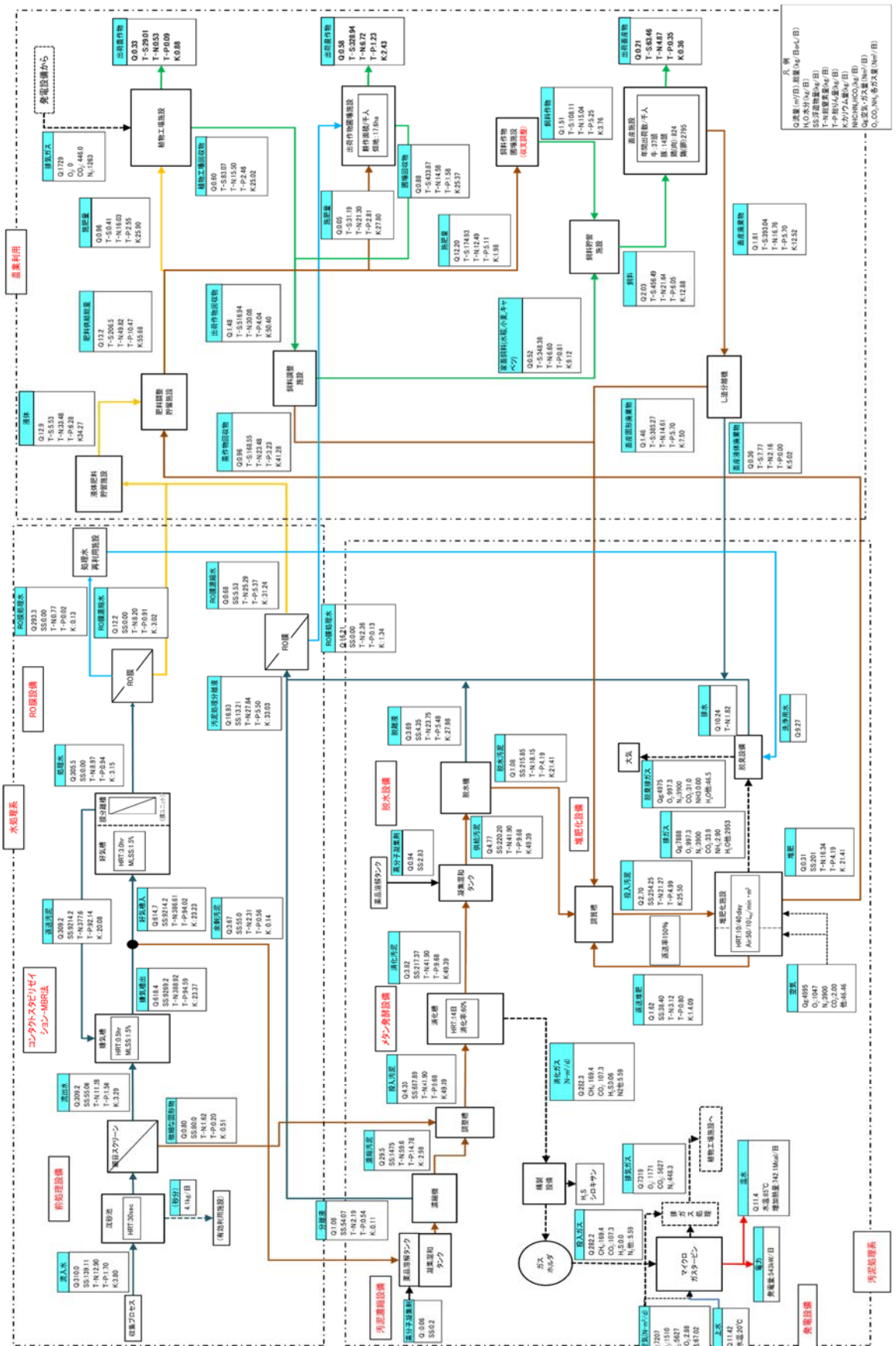


図 3-3 システム全体の収支 (処理人口 1 千人 1 日当たり)

### 3-2 最小規模の算定

収支計算結果から、処理人口1千人1日当たりの主な物質収支をまとめて表3-6に示す。なお、備考欄には想定に用いたプロセスと設備容量をわかる範囲で記入した。

表3-6 主な物質収支(処理人口1千人1日当たり)

プロセス区分	対象物	総量	SS(TS)	T-N	T-P	K	備考(設備容量等)
		t(m <sup>3</sup> )	kg				
(食料供給総量)		1.3	550.0	12.9	1.7	3.4	—
生活系水 処理(資源 回収)	流入汚水	310.0	135.0	12.9	1.7	3.8	—
	反応タンク流入水	309.2	55.0	11.3	1.5	3.3	コンタクトスタビリゼーション- MBR:3.5時間(45m <sup>3</sup> )
	処理水(RO膜)	293.3	0.0	0.8	0.0	0.1	pH調整2段RO膜処理法
汚泥処理	メタン発酵投入汚泥 ※	4.3	687.9	41.9	9.7	49.4	バイオマス混合消化:25日 (125m <sup>3</sup> )
	脱水汚泥※	1.1	215.9	18.2	4.2	21.4	回転加圧脱水機:100kg- DS/h/m <sup>2</sup> (0.09m <sup>2</sup> )
農業利用	液体肥料※	12.9	5.5	33.5	6.3	34.3	—
	堆肥※	0.3	201.0	16.3	4.2	21.4	50日(1+2次発酵)(54m <sup>3</sup> )
	圃場生産物	0.6	328.9	6.7	1.2	2.4	農地(18ha)
	植物工場生産物	0.3	29.0	0.5	0.1	0.9	—
	畜産生産物	0.2	63.5	4.9	0.4	0.4	—
エネルギー 生産等	消化ガス (Nm <sup>3</sup> /日)	総量	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	N <sub>2</sub> 他	—
		282.3	169.4	107.3	0.0	5.6	—
	発電量	543 kW/日(1.75kW/m <sup>3</sup> )				マイクロガスタービン: 13Nm <sup>3</sup> /h/25kW(22.7kW)	
	温水	11.4 m <sup>3</sup> /日(85°C,熱量 742Mcal/日)					

※) 農業利用リサイクル分を含む。

表によれば、処理人口1千人当たりの流入汚水量 310m<sup>3</sup>/日に対して、農作物が日量 1.1 t(約 400t/年)、発電量が 543 kW/日(流入水 1m<sup>3</sup>当たり 1.75kW)が見込まれることになる。表の備考の設備容量をみると、反応タンクが処理人口1千人1日当たり 50 m<sup>3</sup>程度で済むのに比べて、消化タンク 125 m<sup>3</sup>、農地 18ha(1.8a/人)など、農産物をリサイクル利用する施設で設備容量が大きくなる傾向がある。

設備容量を比較すると、システムが成り立つための最小規模の制約になるのはマイクロガスタービンと考えられる。発電は 24 時間連続で行う必要があり、現在市販されているマイクロガスタービンの最小のものは発電能力 25kW である。人口1千人1日当たりの必要設備容量は 22.7kW であるから、稼働率を勘案すれば、処理人口1千人を最小単位としてシステムを構築することが可能と考えられる。

なお、数値では示せなかったが、物質収支のフロー図をみると、牧草などの飼料作物の生産に必要な圃場も出荷用農作物の圃場以上に広く必要になると考えられる。仮に、施肥量と必要圃場面積が比例すると考えれば、飼料作物用圃場は出荷作物用圃場の T-P 比で 1.8 倍必要になる。したがって、植物工場分を合わせれば、処理人口1千人当たりに必要な農地は 50ha 程度以上になると見積もられる。

以上のように、ここに想定した“食品系廃棄物に含まれる栄養塩類を全て生産物として系外に出荷するシステム”では、居住人口に対して相当広大な圃場面積を確保する必要があると推測される。したがって、このシステムを実現できるのは、隣接して広い農地を確保できる農村近郊都市に限定される。また、施設規模も処理人口 1 千人程度から適用が可能と推定されることから、新たに建設される農村集落等への導入が理想的であると考えられる。

### 3-3 事業の採算性の検討

#### (1) システムの建設・維持管理費

小規模下水道施設の平均的な費用関数等を用いて、今回設定した処理人口1千人当たり(310m<sup>3</sup>/日)の建設費と維持管理費を求めて表3-7に示す。表には、費用関数が入手できた収集・資源回収システムに対応する管きよ、汚水処理施設およびRO膜について、各費用総額その他、処理水1m<sup>3</sup>当たりの費用(処理単価)を併記した。

表3-7 収集・資源回収システムの建設費と維持管理費(処理人口1千人当たり)

種別	施設	総額	処理単価	根拠等
建設費	管きよ	391 百万円	0.7 円/m <sup>3</sup>	小規模下水道費用関数※1 自然流下管:6.3 万円/m(開削),標準耐用年数:50 年 污水管必要長:20m/m <sup>3</sup> ※2
	汚水処理施設	244 百万円	94 円/m <sup>3</sup>	小規模下水道費用関数※1 C=1468×Qd <sup>0.49</sup> C:処理場建設費(万円), Qd:日最大汚水量(m <sup>3</sup> /日) 標準耐用年数:23 年
	RO 膜設備	39 百万円	23 円/m <sup>3</sup>	海水淡水化装置※3 建設コスト=1643ドル/m <sup>3</sup> /日(能力1 万 m <sup>3</sup> /日) 污水/海水換算係数=0.7,換算レート:110 円/ドル
	小 計	674 百万円	118 円/m <sup>3</sup>	—
維持管理費	管きよ	37 万円/年	3 円/m <sup>3</sup>	小規模下水道費用関数※1 管理費=57 円/m/年
	汚水処理施設	732 万円/年	65 円/m <sup>3</sup>	小規模下水道費用関数※1 M=16.6×Qa <sup>0.66</sup> M:処理場維持管理費(万円/年), Qa:日平均汚水量(m <sup>3</sup> /日)
	RO 膜設備	356 万円/年	32 円/m <sup>3</sup>	海水淡水化装置※4 消費電力:3kWh/m <sup>3</sup> , 污水/海水換算係数=0.7 単価:15 円/kWh※5
	小 計	1125 万円/年	99 円/m <sup>3</sup>	—
処理単価総計			217 円/m <sup>3</sup>	—

※1) 国土交通省外課長通達：汚水処理施設の建設費等の修正について；

[http://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/nn/n\\_nouson/syuhai/130130shiryoyou/pdf/3shiryoyou\\_2.pdf](http://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/nn/n_nouson/syuhai/130130shiryoyou/pdf/3shiryoyou_2.pdf)

※2) by Hitachi, Ltd. Water Business Unit

※3) 2013 年下水道統計：特定環境単独公共下水道の計画日最大汚水量当たりの污水管路延長の平均値

※4) 栗原優：海水淡水化各階層の課題とモデルについて，第3回システム構築戦略研究事例検討会，2011

※5) 全国の電気料金単価(高圧)<https://pps-net.org/unit>

表によれば、標準耐用年数を用いて算出した建設費の減価償却分の処理単価は 118 円/m<sup>3</sup>、維持管理費は 99 円/m<sup>3</sup>、処理単価の総額は合せて 217 円/m<sup>3</sup>になった。表には農業利用その他の有効利用設備が含まれていないので、建設費、維持管理費ともに更に高額になると考えられる。例えば、その費用が表に示した収集・資源回収システムと同程度と仮定すれば、システム全体の運営コストは 500 円/m<sup>3</sup>程度と見込まれる。

#### (2) 生産額

物質収支で想定した生産物の処理人口 1 千人当たりの年売上高を算出して、表 3-8 に示す。表に示した設定単価は IT 検索で得られた日本の一般的な価格である。

表3-8 主な生産物の生産額(処理人口1千人当たり)

農産物生産量						売上高占 有率(%)
区分	作物	区分	収量(t/年)	設定単価(千円/t)	売上高(千円/年)	
圃場	水稻 <sup>※1</sup>	穀類	62.4	47	2,958	2.1
	小麦 <sup>※1</sup>	穀類	44.9	20	916	0.6
	大豆 <sup>※1</sup>	豆類	10.2	35	353	0.2
	落花生 <sup>※2</sup>	豆類	5.6	711	3,983	2.8
	じゃがいも <sup>※2</sup>	芋類	58.3	149	8,687	6.0
	キャベツ <sup>※2</sup>	野菜	28.5	95	2,708	1.9
	小計		209.9	—	19,604	13.6
植物工場	サラダな <sup>※2</sup>	野菜	37.4	193	7,218	5.0
	みつば <sup>※2</sup>	野菜	28	666	18,648	13.0
	メロン <sup>※2</sup>	野菜	54.4	771	41,942	29.2
	小計		119.8	—	67,809	47.1
畜産物	牛肉 <sup>※3</sup>	畜産	10.3	1,971	20,301	14.1
	豚 <sup>※3</sup>	畜産	2.9	531	1,540	1.1
	鶏 <sup>※4</sup>	畜産	14.5	481	6,975	4.8
	卵 <sup>※5</sup>	畜産	50.6	205	10,373	7.2
	小計		78.3	—	39,189	27.2
計		408	—	126,601	88.0	
その他生産量						—
項目	年間生産量	設定単価	売上高(千円/年)		—	
電力 <sup>※6</sup>	198千kWh/年	15円/kWh	2,973		2.1	
温水 <sup>※7</sup>	271Gcal/年	2.2円/MJ	596		0.4	
RO膜処理水 <sup>※8</sup>	107千m <sup>3</sup> /年	128円/m <sup>3</sup>	13,703		9.5	
その他生産量 計					17,272	12.0
総生産額					143,873	100.0
流入水1m <sup>3</sup> 当たりの生産額(円/m <sup>3</sup> )					1,272	—

※1) [http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j\\_zyukyu\\_kakaku/attach/pdf/index-135.pdf](http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_zyukyu_kakaku/attach/pdf/index-135.pdf)

※2) 卸売数量・価額・価格2017

※3) 畜産物流通統計 <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500227&tstat=000001044816&cycle=0&year=20170&month=0&tclass=000001034718>

※4) 東京の卸売価格2017 [https://www.alic.go.jp/joho-c/joho05\\_000073.html](https://www.alic.go.jp/joho-c/joho05_000073.html)

※5) JA全農たまご株式会社 <http://www.jz-tamago.co.jp/souba/quote/find>

※6) 全国の電気料金単価(高圧) <https://pps-net.org/unit>

※7) 熱供給料金 <http://www.marinavi.com/images/プレスリリース/2006/20060925> ■熱供給料金の改定.pdf

※8) 水道料金(東京都)

表によれば、処理人口1千人当たりの年間の総生産額は約1億4千万円になり、流入水量当たりでは1,272円/m<sup>3</sup>になる。前掲の試算からシステムの運営費用を500円/m<sup>3</sup>程度とすれば、生産原価は売上の約40%と計算され、採算性が十分見込める事業といえることができる。

生産額の内訳をみると、農産物が9割近くを占め、その中でも植物工場の農産物が半分近くに達している。植物工場は天候に影響されにくく、年間を通じて安定して生産できることを考えればシステムの維持には欠かせないプロセスといえることができる。

農畜産物以外の生産物では、RO膜処理水が生産額の大半を占め、総生産額に対しても1割近くになっている。これは、生産量の多さに加えて設定単価を上水道並みとしたことが原因である。従来のよう

に処理水を中水道として再利用しようとするると単価を低く設定し、その上、上水道とは別途に給水設備を整備する必要が生じるので、とても採算ベースに乗らないことになる。もし、上水道以外に RO 膜処理水を利用するとすれば、圃場の灌漑用水など新たな設備投資がほとんど不要な用途に限定すべきであり、試算値をそのまま収入に見込むのには無理がある。

また、電力は、処理水 1/m<sup>3</sup> 当たりの発電量が 1.75kWh/m<sup>3</sup> であり、前掲の RO 膜設備の消費電力が約 2.1 kWh/m<sup>3</sup> と見込まれることから、発電量だけではシステム全体の消費電力を賄えないことになる。したがって、電力についても発電分を全量自家消費に回しても不足分を売電で賄う必要があり、システムの省エネルギー化を進めない限り、収入は見込めない状況にある。

以上が試算結果であるが、食品系廃棄物を出発点として構築した本有効利用システムの採算性を物質収支から試算したところ、栄養塩類を利用する農業生産を組み込むことにより運営方法次第では十分採算性のある事業になると結論された。

#### 4. まとめと今後の課題

生活系廃棄物を原料とする生産型下水道システム”ACE II”の構築について検討してきたが、ACE II は採算性を十分見込める事業であると結論された。試算された生産額の内訳をみると、約 9 割が圃場や植物工場、畜産を組み合わせた農産物であり、食品系廃棄物の有効利用システムの事業化には、農作物生産を組み込むことが必須条件であることが明らかになった。

システムを構築する上で最も悩んだのは、農業利用における施肥量と収穫量の関係であった。公表データだけでは収支が取れず、流入栄養塩類＝農産物出荷量という大胆な仮定で物質収支を計算した。そのため、試算した農産物出荷量は理論最大値と考えてよいものであり、実際のシステムの構築では栄養塩類のリサイクル率を考慮するなどの検証が必要である。

余談であるが、食品系廃棄物に含まれる栄養塩類を余すことなく再利用するためには、畜産業を組み入れることが必須条件であったことは予想外であった。人間の食生活を考えると当然の結果であったが、廃棄物が人間生活をそのまま反映したものであることを改めて感じた。

なお、食品価格は知名度によって大幅に異なり、ブランド商品になれば平均価格の何倍もの高値で販売することが可能であり、事業収益の改善に寄与できる。例えば、「長寿で有名な地域にこのシステムを導入し、“健康長寿のお裾分け農産物”としてブランド化して高品質の物だけ売り出す。」などが考えられる。この場合は、「農産物の自家消費により地域の健康を促進することが、そのまま商品価値を高めることになる。」というような相乗効果も期待できる。システムの普及には導入技術の開発に加えて、このような経営戦略的な工夫も重要だと考える。

将来、人類が地球以外の宇宙空間で生活するようになると、生活廃棄物の完全リサイクルは最大の課題になると思われる。リサイクルの夢は大きく広がっている。



## 図表目次

4

6

表 2-3 膜分離活性汚泥法(MBR)7

表 2-4 R08

12

表 3-2 有効利用システムの流入物質量(千人 1 日当たり)12

13

表 3-4 栽培作物と栄養塩類回収量(例)

エラー!ブックマークが定義されていません。

表 3-6 主な物質収支(処理人口 1 千人 1 日当たり)

表 3-7 収集・資源回収システムの建設費と維持管理費(処理人口 1 千人当たり)

表 3-8 主な生産物の生産額(処理人口 1 千人当たり)

図 2-1 修正コンタクトスタビリゼーション-MBR8

図 2-2 pH 調整 2 段 R09

11

14

図 3-2 主な農・畜産物と食品系廃棄物 15

図 3-3 システム全体の収支 (処理人口 1 千人 118