

〔農工研技報 212〕
〔97 ~ 126, 2012〕

バイオマス利活用システムのライフサイクルを対象とした エネルギー収支の評価

清水夏樹*・柚山義人*・中村真人*・山岡 賢*

目次

I 緒言	97	4 規格外甘しょ・食品加工残さ 対象シナリオ (シナリオ 4)	115
II 評価の方法	98	5 休耕田対象シナリオ (シナリオ 5)	118
1 対象とするバイオマスの決定	98	IV バイオマス利活用シナリオのライフサイクルでの エネルギー収支の評価	121
2 ライフサイクル評価の考え方	98	1 エネルギー収支についての実態・ 計画の比較	121
3 実態シナリオと計画シナリオの作成	99	2 エネルギー収支の評価における課題	123
4 評価のための算出項目	100	V 結言	124
III バイオマス利活用システムにおける エネルギー消費とエネルギー生産	103	参考文献	125
1 乳牛ふん尿対象シナリオ (シナリオ 1)	103	Summary	126
2 豚ふん尿排水対象シナリオ (シナリオ 2)	108		
3 生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さ 対象シナリオ (シナリオ 3)	112		

I 緒言

バイオマス活用推進基本法 (2009 年 6 月制定) に基づき 2010 年 12 月に閣議決定されたバイオマス活用推進基本計画 (以下、基本計画) では、バイオマスの活用の推進に当たっての基本的視点として「総合的、一体的かつ効果的な推進」、「地球温暖化の防止」、「循環型社会の形成」など 11 の項目が掲げられ、そのうち 7 項目でエネルギーとしての利用に言及している。エネルギーの安定的な供給確保への期待が高まる中、再生可能エネルギー買取制度も具体化しつつあり、バイオマス由来のエネルギーも注目されている。また、バイオマスは農山村に多く存在していることから、未利用資源の活用による新たな産業育成と経済活性化が期待される。

しかし、バイオマス利活用のライフサイクルの中で消費されるエネルギーが、バイオマス変換により生成されるエネルギーを上回ると、環境への負荷を増大させることになる。バイオマスの持続的な利活用のためには、バイオマス利活用システム全体を通して、化石エネルギーの使用量と環境負荷量をできるだけ小さくする計画が策

定・実施されることが求められる。そこで、本報では、都道府県、市町村単位で策定が求められているバイオマス活用推進計画を念頭におき、地域におけるバイオマス利活用システムにおける化石エネルギーの消費とバイオマス変換によるエネルギーの生産をライフサイクルで評価するための枠組みを示し、関東都市近郊農業地域を想定した評価事例を報告する。

本報で行ったバイオマス利活用を表現するシナリオの設定およびそれに基づく物質の移動や活動の流れの把握は、LCA (ライフサイクルアセスメント) 手法におけるインベントリ分析と類似の作業である。メタン発酵やバイオエタノール生産など個別の変換技術を採り上げ、ライフサイクルを対象としたインベントリを作成してエネルギー収支を分析したものに、大日方ら (2005)、中山ら (2006)、大村ら (2005)、佐賀ら (2007) がある。このうち、大日方ら (2005) と中山ら (2006) では、牛ふん尿を主原料とした共同利用型のバイオガスプラントを対象として、プラント運転に必要なエネルギーの自給を念頭に置いた変換施設の効率的な運転とエネルギー生産の可能性を検討した。これらにおけるエネルギー消費は、プラントの運転に係るエネルギー (本報でのランニングエネルギー消費に該当) のみに着目している。本報でも家畜ふん尿等を原料としたバイオガスプラントを中心に扱い、プラントの運転だけでなく、初期投入および廃棄に係るエネルギーを評価に含めた。大村ら (2005)

* 資源循環工学研究領域資源循環システム担当

平成 23 年 12 月 15 日受理

キーワード: バイオマス利活用, ライフサイクル, 化石エネルギー消費, メタン発酵消化液, 化学肥料代替

は、バイオガスプラントから余剰ガスの利用（コジェネレーション）・精製・輸送・貯蔵に必要な施設についても、素材製造段階からのインベントリを作成し、経済収支および環境負荷量の評価を試みている。本報を踏まえ、今後の幅広いメタン発酵技術の適用のために参考としたい研究の一つである。佐賀ら（2007）では、玄米および稲わら・もみ殻を生産しバイオエタノールを生産するシステムのエネルギー収支を、エタノール・電力併産とエタノール優先の2つのシナリオを設定して分析しており、本報では農業生産プロセスにおける間接エネルギーの算出において、この研究を参考とした。

菱沼ら（2008）では、乳牛ふん尿を対象としてメタン発酵、堆肥化、固液分離による堆肥+液肥化の3つの技術による変換段階およびメタン発酵消化液、堆肥、液肥の農地への散布段階について、施設、機械の初期投入も含めた環境負荷量を算出し、LCA手法を用いて環境影響を評価している。

これらの既存の研究を踏まえ、本報では、バイオマス活用推進計画の単位となる市町村等の「地域」に着目し、「地域」の空間・社会の中で利活用される様々なバイオマスを対象とした評価を試みた。そして、バイオマス活用計画を実現した場合に、現状（実態）に比べてエネルギー収支がどの程度改善されるかを推計することを目的とした。そのため、事例地域の実態をあらかじめ調査し、バイオマスに係る生産・輸送・変換等のシナリオ条件を可能な限り実測値に基づいて設計した。たとえば、上記の佐賀ら（2007）で扱った玄米を生産してバイオエタノールを生産するシナリオ（後述のシナリオ5）においては、調査対象地域で多収量米の栽培試験を行ったデータを用いた。また、メタン発酵消化液の農地への施用に係る圃場までの輸送距離や車両、散布機械の規模などについても、事例地域の実態を反映して条件を設定した。本報で記載したデータを参考に、読者が入力データを各地域の実情に即したのものや、より信頼性の高いものに更新することによって、評価の精度を上げることができる。

バイオマスの輸送、変換などの各局面、あるいは機械製造や廃棄などの各段階についての個別のインベントリは、既往の研究で紹介したように様々な方面で整備されつつある。しかし、地域に賦存する多様なバイオマスの利用におけるライフサイクルでのエネルギー消費やエネルギー生産を評価するためには、多くのデータの収集とインベントリ作成のための専門的な知識を要する。本報では、主として市町村でバイオマス関連政策の立案・評価を行う担当者、バイオマス利活用事業を総合的に手がける民間事業者をユーザーと考え、ユーザーが自ら評価を行えるよう、データ入手や計算の方法の平易さを心がけた。また、バイオマス利活用システムにおける各活動のエネルギー消費やエネルギー生産を把握するために収集すべきデータや評価項目の算出方法について、できる

だけ詳細に記述し、多様な例題を示すため、5対のシナリオを示した。バイオマス利活用システムを評価対象として表現するためのシナリオの設定方法については、経済性（コストと収入）についての評価を行った報告（清水ら、2012）で詳述しているので、そちらを参照していただきたい。バイオマス活用推進計画の策定においては、バイオマス活用の進捗状況や取組効果の把握、とくに、エネルギーやバイオマス変換製品の地域内自給率の算出が求められる。本報で示すエネルギー消費とエネルギー生産の評価は、計画の妥当性を判断する一助とすることができる。

本研究は、農林水産省の委託プロジェクト研究「地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発（バイオマス利用シナリオの構築・実証・評価）（Cm3100）」（2007～2011年度）によるものである。本研究の実施にあたっては、千葉県香取市経済部農政課、香取市山田区事務所まちづくり課、農事組合法人和郷園、東京大学生産技術研究所他関係各機関の多くの方にご協力いただいた。ここに感謝の意を表す。

II 評価の方法

1 対象とするバイオマスの決定

本報で述べるバイオマス利活用システムの評価の手順は、経済性の評価（清水ら、2012）とほぼ同じである。ここでは、関東地方の都市近郊農業地域である千葉県香取市の事例に基づき、手順を述べる。

まず、市町村等の「地域」を範囲として、バイオマス賦存量や現状での利用状況をもとに対象とするバイオマスを決定する（清水、2011）。

事例地域の千葉県香取市のバイオマス賦存量および現在の利用状況を調査した結果（「清水ら（2012）のFig.1」）、地域での賦存量が多く、また利用があまり進んでいないバイオマスとして、家畜ふん尿、生ごみ、食品加工残さ、農作物残さ（稲わら、もみ殻、麦わら・野菜収穫残さ）等が抽出された。また、香取市におけるバイオマス活用の方向を示した「香取市バイオマスタウン構想」からは、家畜ふん尿や生ごみの高品質堆肥化・地域内農地への還元、農作物残さのうち食用甘しょ等の規格外品の利用が求められていることがわかった。

2 ライフサイクル評価の考え方

次に、対象としたバイオマスについて、輸送、変換、利用などのライフサイクルでの物質の移動や活動の流れを把握する。バイオマスの利活用システムのライフサイクルは、以下に示す「ステージ」と「段階」から構成される。

a バイオマス利活用システムのステージ

バイオマス利活用システムのライフサイクルを、「清

水ら（2012）の Table 1」に示すような5つの局面，すなわち①バイオマスの生産（発生），②収集・輸送・貯蔵，③バイオマスの変換，④生成物の輸送・貯蔵，⑤生成物の利用が繋がったものと捉える。これらの個々の局面を「ステージ」と呼ぶ。

そして，本報では，これらのステージの連携全体を評価対象とする。LCA手法では，「システム境界」を設定するが，本報における対象バイオマスとそれに関連する活動の各ステージの①～⑤が「システム境界内」に該当する。ただし，各ステージで既存の産業や施設利用が見込まれるものについては，「評価対象外」とした。

b 各ステージにおけるライフサイクル

個々のステージについても，3つの段階から構成されるライフサイクルを考慮する。第1は，各ステージの施設や機器装置等の建設・製造の段階，第2は運営段階，第3は廃棄の段階である。第1と第3段階では建設製造時あるいは廃棄時の1回のみエネルギー投入を対象とする。第2の段階では，原材料確保や運転のためのエネルギー消費（ランニングエネルギー消費）を対象とするとともに，③バイオマスの変換ステージでは，化石エネルギーを代替できるエネルギーや製品が生成される場合，エネルギー生産として計上する。各ステージでは，活動の時間的単位が異なるほか，施設や機器の種類や規模に基づく使用年数（耐用年数），更新時期が異なる。そのため第2の運営段階では，1年を単位とした。第1と第3の段階については，計上されるエネルギー消費を使用年数で割り，1年当たりのエネルギー消費とした。

3 実態シナリオと計画シナリオの作成

評価は，実態シナリオと計画シナリオの比較である。評価対象とした地域のニーズや社会受容性，バイオマス利活用システムを支える活動（担い手や組織の体制，運営方法，組織間連携等）（清水・柚山，2010および清水，2005）を考慮して，対象とするバイオマスの活用計画を設計する（柚山ら，2010）。計画シナリオとは，このバイオマス活用計画の各ステージの条件をシナリオとして表現したものである。そして，計画シナリオと同量・同質の原料バイオマスが，現状ではどのように処理・利用されているかを計画シナリオの各ステージに対応して（計画シナリオと対になるように）把握したものが，実態シナリオである。以下，計画シナリオを「計画」，実態シナリオを「実態」と表記する。実態と計画が変わらない部分については，“neutral”と考え，比較評価においては差がないとする。

事例地域の千葉県香取市では，乳牛ふん尿，豚ふん尿排水，生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さ，規格外甘しょの活用および休耕田での資源作物栽培を想定した5つのバイオマス活用計画を設計した。そして，各活用計画について，上記2に挙げた5つのステージの条

件を設定して，5つの計画を作成し，対になる5つの実態を作成した（「清水ら（2012）の Table 3」）。各シナリオの詳細は清水ら（2012）と共通であるため，ここでは概略を述べる。

シナリオ1は，約500頭の乳牛ふん尿9,125t/年を対象としたシナリオである。ふん尿の処理方法が酪農経営の規模や使用形態によって異なるため，経営規模（飼養頭数）と戸数について「ケース1」（100～200頭規模を飼養する酪農家3戸）と「ケース2」（約500頭を飼養する酪農家1戸）を設定した。実態・計画とも，システム全体での③バイオマスの変換ステージにおける原料投入量は25t/日と設定し，変換技術は，実態では堆肥化，計画ではメタン発酵およびコジェネレーションとした。実態では，酪農家（「ケース1」では3戸，「ケース2」では1戸）で発生するふん尿は輸送されることなく，各戸に配置された施設（「ケース1」では8.3t/日規模，「ケース2」では25t/日規模）で堆肥化され，生成された堆肥は各酪農家から地域内の農地に輸送・散布される。地域内の農地では，不足する窒素成分を化学肥料で補って農作物を栽培する。計画では，②収集・輸送・貯蔵ステージの条件が「ケース1」と「ケース2」で異なる。「ケース1」では各酪農家がふん尿をメタン発酵施設まで輸送するが，「ケース2」では輸送は行わない。両ケースとも③バイオマスの変換ステージでは25t/日規模のメタン発酵・コジェネレーション施設で変換し，生成したメタン発酵消化液は地域内の農地に輸送・散布される。地域内の農地の一部では，メタン発酵消化液で窒素化学肥料を100%代替することができる。またコジェネレーションにより生成された電気・熱は，変換施設で必要な電力・熱をまかない，余剰分は販売する。

シナリオ2は，養豚から発生する豚ふん尿と畜舎等の洗浄排水の混合物を対象としたシナリオである。母豚170～180頭規模の一貫経営養豚農家10戸を想定し，発生する豚ふん尿排水をシステム全体で96,738t/年とした。実態では，豚ふん尿排水は各養豚農家において固液分離され，固体分は堆肥化（ただし評価対象外），液体分は浄化処理装置で処理され，処理水は河川放流される。計画との対比のため，計画において消化液を施用する面積と同じ面積で化学肥料を用いた農作物栽培を行う。計画では，豚ふん尿排水を各養豚農家において固液分離後，メタン発酵する。生成したバイオガスをコジェネレーションに利用して得た電気・熱は，変換施設内で利用するとともに，余剰電力は販売する。固体分は堆肥化（ただし評価対象外），消化液は，地域内の農地に輸送・散布して，作物栽培の基肥として利用する。水田では，消化液で窒素化学肥料を100%代替することができる。

シナリオ3は，生ごみ（家庭系＋事業系＋給食残さ含む）（5.26t/日），生活廃水処理汚泥（3.55t/日），食品加工残さ（1.19t/日）の3種のバイオマス（合計10t/日）を対象としたシナリオである。実態では，これらの原料

は、業者が収集・輸送し、1カ所の焼却施設において焼却・焼却灰の処分を行う。**計画**では、同量の生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さを業者が収集・輸送し、1カ所の変換施設(メタン発酵・コジェネレーション施設)において破碎処理・固液分離後、メタン発酵する。メタン発酵で生成したバイオガスをコジェネレーションに利用して得た電気・熱は、変換施設内で利用するとともに、余剰分は販売する。同時に生成される消化液は、地域内の農地に輸送・散布して、作物栽培の基肥として利用する。水田では、消化液で窒素化学肥料を100%代替することができる。

シナリオ4は、香取市内で生産量の多い甘しょの規格外品を対象としたシナリオである。規格外甘しょのみでは活用しにくいいため、併せて食品加工残さを活用することとした。**実態**では、地域内で発生する食品加工残さ(3,917t/年)を収集・輸送し、既存の焼却施設において焼却・焼却灰の処分を行う。青果用甘しょ生産に伴って発生する規格外甘しょは、収集せずに全量を畑に鋤込む。**計画**では、食品加工残さと規格外甘しょの混合原料を飼料化するシナリオとした。飼料化に当たり、規格外甘しょとの混合比率を考慮し、地域内で発生する食品加工残さに加えて、地域外から食品加工残さ(3,283t/年)を輸送することとした。地域外から輸送される食品加工残さは実態シナリオでは地域外で焼却処分されるが、これについては評価対象外としてエネルギー消費を算出しない。地域内外から収集・輸送した食品加工残さを、1カ所の飼料化工場において規格外甘しょ(1,500t/年)を合わせて乾燥・発酵し、栄養補助添加物を混合して養豚用の高付加価値飼料に変換し、販売する。

シナリオ5は、香取市内の休耕水田266.5haを対象としたシナリオである。**実態**では、休耕水田266.5haに対し、食用生産への復帰を前提に最低限の維持(耕うん1回/年、畦畔の除草4回/年)を行う。**実態**は、生産物はなくステージ①のみのシナリオである。**計画**では、生産者が休耕水田266.5haのうち、「活用可能性」が「可能」の231.9haに簡易な基盤整備を行い、「活用可能性」

が「可能」の34.6haは追加的な整備をせずに、資源作物(バイオ燃料原料米)を栽培し、生産された米粉(3,870t/年)を乾燥・調製(粉すり)して、変換施設で粗玄米(2,448t/年)からバイオエタノール(750kL/年)を生成する。エタノール蒸留残さ(981t/年)は飼料原料として販売する。

4 評価のための算出項目

シナリオに基づき、バイオマスの変換や利用などの各ステージを維持するための物質・活動の投入に伴うエネルギー消費を把握するとともに、ライフサイクル全体でのエネルギー消費とエネルギー生産を算出する。エネルギー消費とエネルギー生産を算出する際の基本的な単位はMJ/年である。**Table 1**に算出項目、入力データの例を示す。エネルギー収支は、エネルギー生産からエネルギー消費をひいて求める。

入力データの中で示されている原単位については、南齋ら(2010)の産業連関表による環境負荷原単位(以下、3EIDと表記)の2005年表・生産者価格ベースの(I-A)⁻¹型を用いた。3EIDは、日本の産業連関表(生産活動の各部門間の経済的なつながりを年間の取引額で表現した行列形式の統計表)を用いて、各部門の単位生産活動に伴い直接間接的に発生する環境負荷量を示した数値である。環境負荷原単位は、エネルギー消費量、CO₂排出量、NO_x排出量、SO_x排出量、SPM排出量が示されている。本報ではこのうちエネルギー消費量の原単位を用いた。この原単位に製品や素材の価格を乗じることで、製品や素材の生産に伴うエネルギーが求められる。参照した2005年生産者価格に基づく原単位表は403部門に分かれており、エネルギーを算出したい製品や素材に最も近い部門の原単位を用いた。

Table 2に、本報で用いた3EIDの値をMJ/円に換算(3EID原表はGJ/百万円で表記)したものを示す。

本報で収集した価格データは、生産者価格と購入者価格が混在している。本来は購入者価格に統一した上で、生産者価格ベースの原単位に流通・販売段階での負荷を

Table 1 各ステージでのエネルギー消費とエネルギー生産の算出のための項目と入力データ
Index and data for calculating energy consumption and production in each stage

段階	算出項目	入力データ例
1 (建設・製造)	初期投入エネルギー (MJ/使用年数)	建設費(建築土木)または建設費(設備機器)、使用年数、原単位
		車両・機器購入費、使用年数、原単位
2 (運営)	ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)活動に伴い使用される電力、熱、化石燃料の量、各燃料等の発熱量およびWell-to-Tank ^{*1} でのエネルギー消費量
		(間接エネルギー)資材調達、保守点検、事務、労務、廃棄委託等に対する支払額(円/年)、原単位
	エネルギー生産 (MJ/年)	バイオマスを原料として生成された電力、ガス、化石代替燃料等の量、発熱量、または製品が代替する化石エネルギー
3 (廃棄)	廃棄エネルギー (MJ/使用年数)	初期投入エネルギーの5%(建築土木)、初期投入エネルギーの3%(設備機器および車両・機器等)、使用年数

*1 一次エネルギーの採掘(well)から燃料タンクに充填される(tank)まで

Table 2 3EID によるエネルギー原単位
Embodied energy intensity data from 3EID

部門名	原単位 (MJ/円)	原単位を用いたシナリオ	該当部門の原単位を用いた項目名
11 種苗	0.0223	5	種籾
21 農業サービス	0.0455	1, 2, 3, 4, 5	堆肥化施設管理運営, 汚水処理施設管理運営, メタン発酵施設管理運営, 堆肥および消化液輸送・散布作業, 飼料化施設管理運営, バイオ燃料原料米生産費の土地改良及び水利費由来, 賃借料及び料金由来, 籾乾燥調製施設運転
69 飼料	0.0420	4, 5	(代替: 甘しょ混合飼料, 発酵副産物)
70 有機質肥料	0.0406	5	バイオ燃料原料米その他の材料(育苗用培土)
104 化学肥料	0.1232	1, 2, 3	普通化成肥料, (代替: 堆肥, 消化液)
109 その他の無機化学工業製品	0.1499	2, 3, 4	汚水処理施設薬剤(無機系凝集剤, 苛性ソーダ, メタノール), 活性炭
119 その他の有機化学工業製品	0.1164	5	バイオエタノール変換施設運転作業
126 医薬品	0.0378	4, 5	飼料栄養補助添加物, バイオエタノール副原料
132 農薬	0.1054	5	殺菌剤・消毒剤等薬剤
138 プラスチック製品	0.0579	1	フレコンバッグ
157 その他の窯業・土石製品	0.0813	1, 2, 3, 4	脱硫剤, 消石灰
195 冷凍機・温湿調整装置	0.0409	4	保冷装置, 貯蔵庫
196 ポンプ及び圧縮機	0.0041	2	ポンプ類
204 農業用機械	0.0484	1, 2, 3	堆肥化施設(設備機器), メタン発酵・コジェネ施設(設備機器), 堆肥散布機, 消化液散布機, 固液分離装置, 曝気装置, 液中膜ユニット
223 電気計測器	0.00198	2	汚水処理施設付属機器
247 トラック・バス・その他の自動車	0.0520	1, 2, 3, 4	クレーン付きトラック, 堆肥散布機・消化液輸送用トラック, バキューム車, 規格外甘しょ輸送用大型トラック
284 河川・下水道・その他の公共事業	0.0413	3, 4	焼却施設建設
289 その他の土木建設	0.0428	1, 2, 3, 4, 5	堆肥化施設(建築土木)建設, おがくず貯蔵施設建設, メタン発酵施設(建築土木)建設, 汚水処理施設(建築土木)建設, 飼料化施設建設, バイオエタノール変換施設建設
297 廃棄物処理(公営)	0.0583	3, 4	焼却施設保守点検, 焼却灰搬出・処分
298 廃棄物処理(産業)	0.0345	1	牛ふん尿輸送作業, 食品加工残さ輸送作業
312 道路貨物輸送(除自家輸送)	0.0528	4	規格外甘しょ輸送作業, 玄米輸送作業
337 情報サービス	0.0142	5	バイオ燃料原料米生産費の生産管理費由来
344 公務(地方)	0.0185	3, 4	焼却施設管理事務
376 機械修理	0.0361	2	汚水施設機械据え付け工事および配管・電気・雑工事, 汚水処理施設機械補修

加算した購入者価格ベースの原単位を用いる必要があるが、本報では利用のしやすさを優先し、すべての計算で生産者価格ベースの原単位を用いた。購入者価格と生産者価格の差額(流通等の段階で発生するマージン等)にもとづいて算出されるエネルギー消費については、佐賀ら(2007)を参考に、流通等の段階で発生したエネルギーとみなした。

各エネルギー算出に用いる価格については、本報と並行して行った経済性の評価(清水ら, 2012)において、コストおよび収入として詳細な算出方法を示している。「清水ら(2012)のTable 4」に示す燃料消費量およびコストの算出条件も、本報と共通である。

a 初期投入エネルギー

各ステージの運営に係る施設・機器・車両の建設・製造のために投入されるエネルギーであり、施設建設費、機器購入費等に原単位を乗じて求めた。本報で用いる3EIDには、各施設の建設や機器製造などの固定資本形成に伴うエネルギー消費は含まれない。そのため、日本建築学会(2006)のように、産業連関表の付帯表(固定資本マトリクス)を用いて、各部門からの投入に伴うエネルギーを算出する方法がある。本報では、原単位の入手のしやすさと参照のしやすさを重視し、施設等の建設・整備・購入費を使用年数で割った減価償却費(円/年)を求め、それにエネルギー原単位を乗じて1年当たりの初期投入エネルギー(MJ/年)として算出した。同様の考え方で原単位を用いた評価例に菱沼ら(2008)がある。

本報では、使用年数の長短に対応するため、施設の建設費は可能な限り「建築土木」と「設備機器」に分けて計上し、それぞれ最も近いと考えられる原単位を用いている (Table 2)。

b 使用年数

経済性の評価と同様、機器や施設の構造物について個別に使用年数を定めることができない施設については、バイオマス変換施設を中心に、想定される施設が適切な管理運営が行われた場合の使用年数として「総合耐用年数」を設定した。「総合耐用年数」は、文献調査、バイオマス変換施設・関連機器メーカーや実際の利用現場へのヒアリング等により決定した。車両等の一般的な機器については、税法上の固定資産の耐用年数をもって使用年数とした。

c ランニングエネルギー消費

ランニングエネルギー消費は、年を単位として算出した。ランニングエネルギー消費は、直接エネルギーと間接エネルギーに分けられる。直接エネルギーは、機械や車両などでの化石燃料や電力の使用に伴うエネルギーであり、燃料については単位当たり発熱量 (環境省, 2011) と Well-to-Tank (一次エネルギーの採掘から燃料タンクに充填されるまで) のエネルギー消費量 (トヨタ自動車株式会社・みずほ情報総研株式会社, 2004) を合計した原単位を乗じて求めた。電力については、総合エネルギー統計 (経済産業省資源エネルギー庁総合エネルギー統計検討会事務局, 2007) より、購入電力については消費時発生熱量 (3.60MJ/kWh) と受電端投入熱量 (9.63MJ/kWh) の合計を原単位とし、自給電力については消費時発生熱量のみを原単位とした。直接エネルギーの算出に用いた発熱量および Well-to-Tank のエネルギー消費量を Table 3 に示す。

間接エネルギーは、原材料や副資材の調達・製造、保守点検や事務、労務、廃棄委託等のサービス等の提供に要する化石エネルギーとみなし、原材料や活動、提供されるサービス等の種類や投入量、金額から、3EID より引用したエネルギー原単位を用いて算出した。同一の評

価シナリオで生産する電力・熱を利用する (エネルギー自給) 場合でも、エネルギー消費とエネルギー生産はそれぞれ算出し、エネルギー収支の中で相殺される。

d エネルギー生産

③バイオマス変換ステージでは、熱や電力等の形で利用できるエネルギーが生産される。本報では、これらのエネルギーに加え、バイオマス変換ステージで生成される製品についても、化石エネルギーが代替できる場合は、その代替可能量をエネルギー生産として計上した。本報では、堆肥およびメタン発酵消化液を化学肥料の代替として、規格外甘しょ・食品加工残さを原料とした飼料およびエタノール発酵副産物を飼料の代替として、それぞれエネルギー生産を計上した。

化学肥料は、普通化成肥料 (8-8-8) とみなし、価格を農林水産省大臣官房統計部 (2010) より 108 円/kg と設定した。Table 2 から、普通化成肥料の間接エネルギーを 13.3MJ/kg と算出できる。普通化成肥料に含まれる窒素含有率は 8% であるため、窒素 1kg を施用しようとする場合、投入される間接エネルギーは 166.2MJ/kgN となる。これに基づき、堆肥中の窒素含有率を重量当たり 2.2%、肥効率 10% とすると、1t の堆肥が代替できる窒素量は 0.77kgN となり、代替可能エネルギーは 0.77kgN × 166.2MJ = 128MJ となる。また、メタン発酵消化液中の窒素含有率を重量当たり 0.282%、肥効率 50% とすると、1t の消化液が代替できる窒素量は 1.4kgN となり、代替可能エネルギーは 1.4kgN × 166.2MJ = 233MJ となる。

飼料については、バイオマス変換により生成される飼料および発酵副産物の一般的な価格および成分含有率が把握できなかった。そのため、成分は考えず、シナリオで設定した価格に 3EID の飼料部門の値を乗じて代替可能エネルギーとした。

e 廃棄エネルギー

廃棄エネルギーは、施設の構造や規模、機器の種類等によって大きく異なり、とりわけバイオマス変換に関連する施設機器についてのインベントリデータは整備され

Table 3 直接エネルギー算出に用いた発熱量および Well-to-Tank のエネルギー消費量
Calorific value and Well-to-Tank energy consumption for calculation of directly energy consumption

算出項目	A: 標準発熱量 (MJ/L)	B: Well-to-Tank のエネルギー消費量 ^{*2} (MJ/L)	本報で用いたエネルギー消費原単位 A+B (MJ/L)
軽油	37.7	2.769	40.47
ガソリン・混合油 ^{*1}	34.6	5.635	40.24
灯油	36.7	2.251	38.95
A 重油	39.1	3.531	42.63
電力	消費時発生熱量 3.6MJ/kWh	受電端投入熱量 9.63MJ/kWh	13.23MJ/kWh

*1: 混合油はガソリンと同じとした。

*2: 文献値は石油製品 1MJ 製造時におけるエネルギー消費量であるため、各燃料の低位発熱量を用いて 1L 当たりのエネルギー消費量に換算した。

ていない。本報では、一律に初期投入エネルギーに基づいて廃棄エネルギーを算出した。コスト算出（清水ら、2012）と同様、施設については建設（建築土木）に伴う初期投入エネルギーの5%と建設（設備機器）に伴う初期投入エネルギーの3%とし、その他の車両・機器等については初期投入エネルギーの3%と仮定して算出した。

Ⅲ バイオマス利活用システムにおけるエネルギー消費とエネルギー生産

1 乳牛ふん尿対象シナリオ（シナリオ1）

対象とするバイオマスの量・性状などの条件および**実態・計画**の各シナリオの詳細は、経済性の評価（清水ら、2012）と共通である。

a 各ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産の算出

(1) バイオマスの生産（発生）ステージ

「ケース1」と「ケース2」では担い手の規模が異なるが、評価対象とするシステム全体でのふん尿発生量（25t/日）は同じである。また、**実態・計画**とも、初期投入・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費は“neutral”であるとした。

(2) 収集・輸送・貯蔵ステージ

「清水ら（2012）の Fig.2」に示すように、「ケース1」の**実態**では輸送は行わないため、エネルギー消費は0MJである。一方、**計画**では、中型ダンプトラックを用いて片道10kmの収集輸送を行うが、酪農家が自ら行うため、輸送用車両は酪農経営内で調達されることを考える。よって、車両に係る初期投入エネルギーと廃棄エネルギーおよび輸送作業（人件費より算出）に由来する間接エネルギーは算出せず、収集輸送作業に伴う燃料由来の直接エネルギー、輸送車両（運行費より算出）に由来する間接エネルギーのみをランニングエネルギー消費として計上した。

中型ダンプトラックの走行距離（3戸×15回×51週×10km×2（往復）=45,900km/年）から計算した燃料消費量に基づき、エネルギー消費を算出した（Table

4）。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している（Table 2 参照）。

「清水ら（2012）の Fig.3」に示すように、「ケース2」では、**実態・計画**とも、①バイオマスの生産（発生）ステージと③バイオマス変換ステージとが同じ場所で行われると見做され、エネルギー消費は計上しない。

(3) バイオマスの変換ステージ

バイオマスの変換ステージにおいては、エネルギー消費に加え、変換により生成されたエネルギーや製品に由来するエネルギー生産を算出する。

シナリオ1・**実態**では、「ケース1」・「ケース2」とも、乳牛ふん尿は酪農経営内に設置されたロータリー式発酵槽を中心とした開放型堆肥化施設で変換され、堆肥が生成される。年間を通して原料が投入されるため、年間稼働日数は365日とした。堆肥の副資材であるおがくずは有価で購入されるが、ここでは廃棄物を利用するものと考え、エネルギーは計上しない。また、資材や製品の搬入・搬出に用いるバケットローダーは既存の酪農経営で用意され、初期投入エネルギー・廃棄エネルギーを計上しない。「ケース1」（8.3t/日規模の堆肥化施設3基、変換工程フローについては「清水ら（2012）の Fig.4」参照）について算出したエネルギー消費とエネルギー生産を Table 5 に、「ケース2」（25t/日規模の堆肥化施設1基、変換工程フローについては「清水ら（2012）の Fig.5」参照）について算出したエネルギー消費とエネルギー生産を Table 6 に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、それぞれ部門名を付記している（Table 2 参照）。

シナリオ1・**計画**では、乳牛ふん尿は共同で設置（「ケース1」）または酪農経営内に設置（「ケース2」）した25t/日規模のメタン発酵・コジェネレーション施設1基で変換される。詳細な変換工程の条件は、清水ら（2012）を参照いただきたい。年間稼働日数は365日とした。同様のメタン発酵施設である山田バイオマスプラント（中村ら、2010）では、電気の保守点検のために数時間/年の停止はあるものの、365日/年の連続運転が実施されている。前処理段階で発生する夾雑物を堆肥化する装置は既存の設備を使用すると仮定し、初期投入エネルギー・廃棄エネルギーは算出しない。また堆肥化に係るランニ

Table 4 シナリオ1・計画の「ケース1」の②収集・輸送・貯蔵ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ② Biomass transportation stage of Plan Scenario 1 ("Case 1")

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	中型ダンプ2台購入	酪農経営内調達のため算出としない
廃棄エネルギー(MJ/年)	中型ダンプ2台購入	酪農経営内調達のため算出としない
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)燃料(軽油)由来	総走行距離 45,900km/年 ÷ (5.26km/L) = 8,726L/年 8,726L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 353,141MJ/年
	(間接エネルギー)輸送作業由来(車両)	344千円/年(輸送用車両運行費) × 0.0345MJ/円 (No.298 廃棄物処理(産業)) = 11,868MJ/年
	(間接エネルギー)輸送作業由来(労力)	酪農経営内調達のため算出としない

Table 5 シナリオ1・実態の「ケース1」の③バイオマス変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Present Scenario 1 ("Case 1")

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	堆肥化施設(建築土木)3 基建設	{(34,740千円 ÷ 30年) × 0.0428MJ/円(No.289 その他の土木建設)} × 3基 = 148,687MJ/年
	堆肥化施設(設備機器)3 基建設	{(14,900千円 ÷ 12年) × 0.0484MJ/円(No.204 農業用機械)} × 3基 = 180,290MJ/年
	おがくず貯蔵施設 3 基建設	{(1,856千円 ÷ 10年) × 0.0428MJ/円(No.289 その他の土木建設)} × 3基 = 23,831MJ/年
廃棄エネルギー (MJ/年)	堆肥化施設(建築土木)3 基廃棄	148,687MJ/年 × 0.05 = 7,434MJ/年
	堆肥化施設(設備機器)3 基廃棄	180,290MJ/年 × 0.03 = 5,409MJ/年
	おがくず貯蔵施設 3 基廃棄	23,831MJ/年 × 0.05 = 1,192MJ/年
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)軽油由来	(12.25L/日 × 365日 × 3基) = 13,414L/年 13,414L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 542,865MJ/年
	(直接エネルギー)電力由来	(120kWh/日 × 365日 × 3基) = 131,400kWh/年 131,400kWh/年 × (電力 13.23MJ/kWh) = 1,738,422MJ/年
	(間接エネルギー)施設管理運営由来	10,344千円/年(人件費 + 点検補修費) × 0.0455MJ/円(No.21 農業サービス) = 470,652MJ/年
	(間接エネルギー)副資材おがくず由来	廃棄物利用であるため、エネルギーは計上しない
エネルギー生産 (MJ/年)	堆肥(2,701t/年 × 3戸)による化学肥料代替	8,103t/年 × 128MJ/堆肥 t = 1,037,184MJ/年

Table 6 シナリオ1・実態の「ケース2」の③バイオマス変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Present Scenario 1 ("Case 2")

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	堆肥化施設(建築土木)1 基建設	(86,850千円 ÷ 30年) × 0.0428MJ/円(No.289 その他の土木建設) = 123,906MJ/年
	堆肥化施設(設備機器)1 基建設	(37,250千円 ÷ 12年) × 0.0484MJ/円(No.204 農業用機械) = 150,242MJ/年
	おがくず貯蔵庫 1 基建設	(5,504千円 ÷ 10年) × 0.0428MJ/円(No.289 その他の土木建設) = 23,557MJ/年
廃棄エネルギー (MJ/年)	堆肥化施設(建築土木)1 基廃棄	123,906MJ/年 × 0.05 = 6,195MJ/年
	堆肥化施設(設備機器)1 基廃棄	150,242MJ/年 × 0.03 = 4,507MJ/年
	おがくず貯蔵庫 1 基廃棄	23,557MJ/年 × 0.05 = 1,178MJ/年
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)軽油由来	49L/日 × 365日 = 17,885L/年 17,885L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 723,806MJ/年
	(直接エネルギー)電力由来	359kWh/日 × 365日 = 131,035kWh/年 131,035kWh/年 × (電力 13.23MJ/kWh) = 1,733,593MJ/年
	(間接エネルギー)施設管理運営由来	5,245千円/年(人件費 + 点検補修費) × 0.0455MJ/円(No.21 農業サービス) = 238,648MJ/年
	(間接エネルギー)副資材おがくず由来	廃棄物利用であるため、エネルギーは計上しない
エネルギー生産 (MJ/年)	堆肥(8,067t/年)による化学肥料代替	8,067t/年 × 128MJ/堆肥 t = 1,032,576MJ/年

ングエネルギー消費は、発生する夾雑物の量から、**実態**の「ケース1」で設定した堆肥化施設1基分の60%を計上した。堆肥化工程も簡素化されるため、堆肥化作業用のバケットローダーの燃料消費は、4.2L/日と設定した。夾雑物を原料とした堆肥については、化学肥料代替効果はないものとみなし、エネルギー生産は計上しない。

以上より算出した、シナリオ1・**計画**のステージ③に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とエネルギー生産を**Table 7**に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している(**Table 2**参照)。

(4) 生成物の輸送・貯蔵ステージ

シナリオ1・**実態**における生成物の堆肥は、フレコンバッグで輸送用車両に積載されて輸送されるとした。輸送および農地での散布の条件は、清水ら(2012)と同じである。各車両の価格から、初期投入エネルギーを算出した。また、フレコンバッグは消耗品(1組当たり18袋を使用、各1ヶ月使用で交換)とみなして、ランニングエネルギー消費を算出した。

シナリオ1・**実態**のステージ④に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費を**Table 8**に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原

Table 7 シナリオ1・計画の③バイオマス変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Plan Scenario 1

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	メタン発酵施設(建築土木)1基建設	$(66,000 \text{ 千円} \div 30 \text{ 年}) \times 0.0428 \text{ MJ/円 (No.289 その他の土木建設)} = 94,160 \text{ MJ/年}$
	メタン発酵施設(設備機器)1基建設	$(168,000 \text{ 千円} \div 12 \text{ 年}) \times 0.0484 \text{ MJ/円 (No.204 農業用機械)} = 677,600 \text{ MJ/年}$
	夾雑物堆肥化施設1基建設	既存施設利用のため算出しない
廃棄エネルギー(MJ/年)	メタン発酵施設(建築土木)1基廃棄	$94,160 \text{ MJ/年} \times 0.05 = 4,708 \text{ MJ/年}$
	メタン発酵施設(設備機器)1基廃棄	$677,600 \text{ MJ/年} \times 0.03 = 20,328 \text{ MJ/年}$
	夾雑物堆肥化施設1基廃棄	既存施設利用のため算出しない
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)電力由来	$382 \text{ kWh/日} \times 365 \text{ 日} = 139,430 \text{ kWh/年}$ $139,430 \text{ kWh/年} \times (\text{自給電力 } 3.60 \text{ MJ/kWh}) = 501,948 \text{ MJ/年}$
	(直接エネルギー)熱由来	$4,229 \text{ MJ/日} \times 365 \text{ 日} = 1,543,585 \text{ MJ/年}$
	(直接エネルギー)堆肥化作業用バケットローダー燃料(軽油)由来	$4.2 \text{ L/日} \times 365 \text{ 日} = 1,533 \text{ L/年}$ $1,533 \text{ L/年} \times (\text{軽油 } 40.47 \text{ MJ/L}) = 62,041 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)脱硫剤由来	$538 \text{ 千円/年 (脱硫剤費)} \times 0.0813 \text{ MJ/円 (No.157 その他の窯業・土石製品)} = 43,739 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)施設管理運営由来	$10,110 \text{ 千円/年 (人件費 + 補修点検費)} \times 0.0455 \text{ MJ/円 (No.21 農業サービス)} = 460,005 \text{ MJ/年}$
エネルギー生産(MJ/年)	電力	$(1,200 \text{ kWh/日} \times 365 \text{ 日}) \times (\text{電力生産 } 3.60 \text{ MJ/kWh}) = 1,576,800 \text{ MJ/年}$
	熱	$7,020 \text{ MJ/日} \times 365 \text{ 日} = 2,562,300 \text{ MJ/年}$
	消化液(7,118t/年)による化学肥料代替	$7,118 \text{ t/年} \times 233 \text{ MJ/消化液 t} = 1,658,494 \text{ MJ/年}$
	夾雑物原料堆肥(1,132t/年)	化学肥料代替エネルギーは計上しない

Table 8 シナリオ1・実態の④生成物の輸送・貯蔵ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ④ Transportation of generated material stage of Present Scenario 1

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	3tクレーン付トラック3台購入	$\{(8,000 \text{ 千円} \div 8 \text{ 年}) \times 0.0520 \text{ MJ/円 (No.247 トラック・バス・その他の自動車)}\} \times 3 \text{ 台} = 156,000 \text{ MJ/年}$
	堆肥散布機(タンク容量1.8t)3台購入	$\{(4,148 \text{ 千円} \div 7 \text{ 年}) \times 0.0484 \text{ MJ/円 (No.204 農業用機械)}\} / 7 \text{ 年} \times 3 \text{ 台} = 86,041 \text{ MJ/年}$
	堆肥散布機輸送用トラック(2t車)3台購入	$\{(1,500 \text{ 千円} \div 8 \text{ 年}) \times 0.0520 \text{ MJ/円 (No.247 トラック・バス・その他の自動車)}\} \times 3 \text{ 台} = 29,250 \text{ MJ/年}$
廃棄エネルギー(MJ/年)	3tクレーン付トラック3台廃棄	$156,000 \text{ MJ/年} \times 0.03 = 4,680 \text{ MJ/年}$
	堆肥散布機3台	$86,041 \text{ MJ/年} \times 0.03 = 2,581 \text{ MJ/年}$
	堆肥散布機輸送用トラック(2t車)3台	$29,250 \text{ MJ/年} \times 0.03 = 878 \text{ MJ/年}$
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)輸送用燃料(軽油)由来	クレーン付トラック：総走行距離 18,000km/年/台 ÷ (5.26km/L) = 3,422L/年/台 $3,422 \text{ L/年} \times 3 \text{ 台} = 10,266 \text{ L/年}$ 堆肥散布機輸送用トラック：総走行距離 7,000km/年/台 ÷ (6.26km/L) = 1,118L/年/台 $1,118 \text{ L/年} \times 3 \text{ 台} = 3,354 \text{ L/年}$ $(10,266 \text{ L/年} + 3,354 \text{ L/年}) \times (\text{軽油 } 40.47 \text{ MJ/L}) = 551,201 \text{ MJ/年}$
	(直接エネルギー)堆肥散布作業用燃料(軽油)由来	堆肥散布面積(3台合計) 133ha/年 + 337ha/年 = 470ha $470 \text{ ha} \times (3.5 \text{ L/ha}) = 1,645 \text{ L/年}$ $1,645 \text{ L/年} \times (\text{軽油 } 40.47 \text{ MJ/L}) = 66,573 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)輸送・散布作業由来	3組合計： $\{14,400 \text{ 千円} + 2,109 \text{ 千円} + 563 \text{ 千円 (人件費 + 輸送用車両固定費 + 運行費)}\} \times 0.0455 \text{ MJ/円 (No.21 農業サービス)} = 776,776 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)フレコンバッグ由来	$1.3 \text{ 千円/袋} \times 18 \text{ 袋/組} \times 3 \text{ 組} \times 12 \text{ ヶ月} = 842 \text{ 千円/年}$ $842 \text{ 千円/年} \times 0.0579 \text{ MJ/円 (No.138 プラスチック製品)} = 48,752 \text{ MJ/年}$

単位については、部門名を付記している (Table 2 参照)。

シナリオ1・計画における生成物のメタン発酵消化液 (以下、消化液) は、バキューム車で輸送され、農地で消化液散布機 (各圃場まで消化液散布機輸送用車両で輸送) に移し替えられて散布されるとした。輸送および農地での散布の条件は、清水ら (2012) に詳述している。各車両の価格から初期投入エネルギーを算出した。

シナリオ1・計画のステージ④に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費を Table 9 に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している (Table 2 参照)。

(5) 生成物の利用ステージ

シナリオ1の生成物の利用ステージでは、水田133ha、畑337haを評価対象とした。これは、実態で、堆肥を施用する面積である。肥料の施用量は、窒素成分のみを考慮して決定した。水田および畑の基肥における窒素要求量を千葉県施肥基準に基づき、水田3.5kgN/10a、畑15kgN/10a (香取市の主な栽培作物の基肥窒素要求量の平均)、また、同施肥基準に基づき堆肥施用量を、水田1t/10a、畑2t/10aとした。堆肥の窒素含有率を2.2%、肥効率を10%として、不足する窒素を補う化学肥料の投入量を算出した。作物栽培に係る施設・機械、追肥のための肥料や他の農業生産資材投入に由来するエネルギーは、初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とも“neutral”として計上しない。また、堆肥施用による収量の増加はないものとした。以上より算出した、シナリオ1・実態のステージ⑤に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギーおよびランニング

エネルギー消費を Table 10 に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している (Table 2 参照)。

計画においても、実態と同じ面積 (水田133ha、畑337ha) を評価対象とする。これらの農地のうち、水田46.8haについては、③バイオマスの変換ステージで生産した消化液2.5t/10aを施用することにより、窒素要求量3.5kgN/10aの100%を代替できる。消化液で代替可能なエネルギーは、1ha当たり5,825MJ (25t/ha × 233MJ/消化液t) である。消化液を施用しない水田86.2haについては、基肥における窒素要求量のすべて (3.5kgN/10a) を化学肥料 (普通化成) 43.75kg/10aでまかなうことから化学肥料由来の間接エネルギーが消費される。

畑119haについては、同様に消化液5t/10aを施用し、窒素要求量15kgN/10aの47%が消化液でまかなわれる。不足する窒素量8kgN/10aは、化学肥料100kg/10aを施用して補う。消化液で代替可能なエネルギーは、1ha当たり11,650MJ (50t/ha × 233MJ/消化液t) である。また消化液を施用しない畑218haについては、基肥における窒素要求量のすべて (15kgN/10a) を化学肥料 (187.5kg/10a) でまかなうため、化学肥料由来の間接エネルギーが計上される。

窒素施用量は実態・計画とも同じであり、消化液中の速効性窒素を勘案した施肥設計下では、化学肥料 (硫安) に近い施肥効果がある (中村, 2011) ため、水田においても畑においても、消化液の施用/非施用にかかわらず収量の差はないものとした。また作物栽培に係る施設・機械の初期投入エネルギー、廃棄エネルギー、労働

Table 9 シナリオ1・計画の④生成物の輸送・貯蔵ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ④ Transportation of generated material stage of Plan Scenario 1

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	バキューム車2台購入	(10,000千円 ÷ 8年) × 0.0520MJ/円 (No.247トラック・バス・その他の自動車) = 65,000MJ/年
	消化液散布機 (タンク容量1.6t) 1台	(8,000千円 ÷ 7年) × 0.0484MJ/円 (No.204農業用機械) = 55,314MJ/年
	消化液散布機輸送用トラック (2t車) 1台	(1,500千円 ÷ 8年) × 0.0520MJ/円 (No.247トラック・バス・その他の自動車) = 9,750MJ/年
廃棄エネルギー (MJ/年)	バキューム車2台廃棄	65,000MJ/年 × 0.03 = 1,950MJ/年
	消化液散布機1台廃棄	55,314MJ/年 × 0.03 = 1,659MJ/年
	消化液散布機輸送用トラック (2t車) 1台廃棄	9,750MJ/年 × 0.03 = 293MJ/年
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー) 輸送用燃料 (軽油) 由来	バキューム車: 総走行距離 39,720km/年 ÷ (5.26km/L) = 7,551L/年 消化液散布機輸送用トラック: 総走行距離 6,620km/年 ÷ (6.26km/L) = 1,058L/年 (7,551L/年 + 1,058L/年) = 8,609L/年 8,609L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 348,406MJ/年
	(直接エネルギー) 消化液散布作業用燃料 (軽油) 由来	消化液散布面積 46.8ha + 119ha = 165.8ha 165.8ha × (18.3L/ha) = 3,034L/年 3,034L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 122,786MJ/年
	(間接エネルギー) 輸送・散布作業由来	{7,944千円 + 1,069千円 + 348千円 (人件費 + 輸送用車両固定費 + 運行費)} × 0.0455MJ/円 (No.21農業サービス) = 425,926MJ/年

および追肥肥料や他の農業生産資材等に由来する間接エネルギーは“neutral”とし、計上しない。以上より算出した、シナリオ1・計画のステージ⑤に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費をTable 11に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している(Table

2参照)。

b 算出結果

シナリオ1における実態(2ケース)と計画(2ケース)のエネルギー消費およびエネルギー生産の算出結果をTable 12にまとめた。ライフサイクルでのエネルギー

Table 10 シナリオ1・実態の⑤生成物の利用ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ⑤ Utilization of generated material stage of Present Scenario 1

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の整備・購入	neutral
廃棄エネルギー(MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の廃棄	neutral
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る燃料由来	neutral
	(間接エネルギー)水稲生産(133ha)の基肥のうち堆肥で供給される窒素成分(22%)由来	$133\text{ha} \times (10\text{t}/\text{ha}) \times 128\text{MJ}/\text{堆肥} = 170,240\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)水稲生産(133ha)の基肥のうち化学肥料由来(窒素要求量の78%)	化学肥料施用量 $341\text{kg}/\text{ha} \times 108\text{円}/\text{kg} \times 133\text{ha} = 4,898\text{千円}/\text{年}$ $4,898\text{千円}/\text{年} \times 0.1232\text{MJ}/\text{円}(\text{No.104 化学肥料}) = 603,449\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)畑作物生産(337ha)の基肥のうち堆肥で供給される窒素成分(10.3%)由来	$337\text{ha} \times (20\text{t}/\text{ha}) \times 128\text{MJ}/\text{堆肥} = 862,720\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)畑作物生産(337ha)の基肥のうち化学肥料由来(窒素要求量の89.7%)	化学肥料施用量 $1,683\text{kg}/\text{ha} \times 108\text{円}/\text{kg} \times 337\text{ha} = 61,255\text{千円}/\text{年}$ $61,255\text{千円}/\text{年} \times 0.1232\text{MJ}/\text{円}(\text{No.104 化学肥料}) = 7,546,616\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る追肥化学肥料, および他の資材・サービスや活動由来	neutral

Table 11 シナリオ1・計画の⑤生成物の利用ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ⑤ Utilization of generated material stage of Plan Scenario 1

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の整備・購入	neutral
廃棄エネルギー(MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の廃棄	neutral
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る燃料由来	neutral
	(間接エネルギー)水稲生産(133ha)の基肥のうち消化液で供給される窒素成分由来(消化液施用面積 46.8ha の100%)	$46.8\text{ha} \times 25\text{t}/\text{ha} \times 233\text{MJ}/\text{消化液} = 272,610\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)水稲生産(133ha)の基肥のうち化学肥料由来(消化液無施用面積 86.2ha の100%)	$437.5\text{kg}/\text{ha} \times 108\text{円}/\text{kg} \times 86.2\text{ha} = 4,073\text{千円}/\text{年}$ $4,073\text{千円}/\text{年} \times 0.1232\text{MJ}/\text{円}(\text{No.104 化学肥料}) = 501,794\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)畑作物生産(337ha)の基肥のうち消化液で代替される窒素成分由来(消化液施用面積 119ha の47%)	$119\text{ha} \times 50\text{t}/\text{ha} \times 233\text{MJ}/\text{消化液} = 1,386,350\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)畑作物生産(337ha)の基肥のうち化学肥料由来(消化液施用面積 119ha の53%と無施用面積 218ha の100%)	$1,000\text{kg}/\text{ha} \times 108\text{円}/\text{kg} \times 119\text{ha} = 12,852\text{千円}/\text{年}$ $1,875\text{kg}/\text{ha} \times 108\text{円}/\text{kg} \times 218\text{ha} = 44,145\text{千円}/\text{年}$ $12,852\text{千円}/\text{年} + 44,145\text{千円}/\text{年} \times 0.1232\text{MJ}/\text{円}(\text{No.104 化学肥料}) = 7,022,030\text{MJ}/\text{年}$
	(間接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る追肥化学肥料および他の資材・サービスや活動由来	neutral

Table 12 シナリオ1における実態と計画のエネルギー消費とエネルギー生産 (GJ/年)
Energy consumption and production in Present and Plan of Scenario 1 (GJ/year)

			①バイオマスの生産(発生)	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	計
実態	堆肥化(ケース1)	消費	0	0	3,149	1,722	9,183	14,054
		生産			1,037			1,037
	堆肥化(ケース2)	消費	0	0	3,006	1,722	9,183	13,911
		生産			1,033			1,033
計画	メタン発酵(ケース1)	消費	0	365	3,408	1,031	9,183	13,987
		生産			5,798			5,798
	メタン発酵(ケース2)	消費	0	0	3,408	1,031	9,183	13,622
		生産			5,798			5,798

収支は、“neutral”とした部分を含まないとしても、**実態**、**計画**のいずれのケースでもマイナスとなった。**実態**では、「ケース1」に比べて「ケース2」の③バイオマス変換ステージでのエネルギー消費が143GJ/年小さくなった。これは、8.3t/日規模の堆肥化施設3基(ケース1)に比べて、25t/日規模の堆肥化施設1基(ケース2)の方が施設建設費・人件費に基づく初期投入エネルギー、廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費が小さいためである。また、ステージ③のみに着目すると、**実態**に比べて**計画**でのエネルギー消費は大きくなるが、**計画**ではメタン発酵・コジェネレーションによるエネルギー生産により、変換工程に必要な電力・熱を自給できるとともに、エネルギーの余剰も生じた。

2 豚ふん尿排水対象シナリオ(シナリオ2)

対象とするバイオマスの量・性状などの条件および**実態**・**計画**の各シナリオの詳細は、経済性の評価(清水ら, 2012)と共通である。

a 各ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産の算出

(1) バイオマスの生産(発生ステージ)

実態と**計画**で除ふん率の設定が異なるため、豚ふん尿排水の発生量は異なるが、除ふんに係るエネルギー消費は評価対象外とし算出しないため、本ステージに係る初期投入・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費は“neutral”であるとした。

(2) 収集・輸送・貯蔵ステージ

シナリオ2では、**実態**・**計画**とも、各養豚農家内で処理・変換され、輸送しない。そのため、エネルギー消費は0MJである。

(3) バイオマス変換ステージ

バイオマスの変換ステージにおいては、エネルギー消費に加え、変換により生成されたエネルギーや製品に由来するエネルギー生産を算出する。

シナリオ2・**実態**では、各養豚農家に污水处理施設を

設置する条件としたため、施設数は10となる。各污水处理施設では、豚ふん尿排水が固液分離され、液体分は河川放流できる水質まで浄化处理される。固体分および余剰汚泥は堆肥化される(固体分の堆肥化工程および余剰汚泥の乾燥・堆肥化工程は評価対象外のためエネルギー消費は算出しない)。

污水处理施設の運転条件、建設費および各装置の価格は、「清水ら(2012)のFig.11, Table 16」に示されている。これに基づいて初期投入エネルギー・廃棄エネルギーを算出した。ランニングエネルギー消費のうち間接エネルギーは、補修費に基づき算出した。機械補修が適宜行われることを前提に保守点検に係るエネルギーは0MJとした。以上より算出したシナリオ2・**実態**のステージ③に係る1施設当たりの初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とエネルギー生産を**Table 13**に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している(**Table 2**参照)。

シナリオ2の**計画**では、各養豚農家にメタン発酵・コジェネレーション施設を設置する。そのため、**実態**と同様、施設数は10となる。各施設では豚ふん尿排水がメタン発酵装置で変換され、生成したバイオガスを用いたコジェネレーションにより電力と熱が生成されると同時にメタン発酵消化液が生成される。固体分は堆肥化する(ただし堆肥化工程は評価対象外とする)。メタン発酵・コジェネレーション施設の運転条件、建設費および各装置の価格は、「清水ら(2012)のFig.12およびTable 17」に示されている。これに基づいて算出したシナリオ2・**計画**のステージ③に係る施設1施設当たりの初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とエネルギー生産を**Table 14**に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している(**Table 2**参照)。

(4) 生成物の輸送・貯蔵ステージ

シナリオ2の**実態**においては、污水处理された水は河川放流されるため、本ステージでのエネルギー消費は計

Table 13 シナリオ 2・実態の③バイオマス変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産 (1 施設)
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Present Scenario 2 for each facility

算出項目	データ名	算出結果	
初期投入エネルギー (MJ/年)	污水处理施設(建築土木)建設	(17,320千円÷30年)×0.0428MJ/円(No.289 その他の土木建設)=24,710MJ/年	
	污水处理施設(設備機器)建設	固液分離装置(平型振動篩)	(700千円÷10年)×0.0484MJ/円(No.204 農業用機械)=3,388 MJ/年
		曝気装置	(6,750千円÷10年)×0.0484MJ/円(No.204 農業用機械)=32,670MJ/年
		液中膜ユニット	(850千円÷7年)×0.0484MJ/円(No.204 農業用機械)=5,877MJ/年
		污水ピットポンプ	(100千円÷5年)×0.0041MJ/円(No.196 ポンプ及び圧縮機)=82MJ/年
		污水投入ポンプ	(100千円÷8年)×0.0041MJ/円(No.196 ポンプ及び圧縮機)=51MJ/年
		汚泥返送・硝化液循環ポンプ(1施設につき2台)1セット	(300千円÷5年)×0.0041MJ/円(No.196 ポンプ及び圧縮機)=246MJ/年
		膜透過水吸引ポンプ	(150千円÷5年)×0.0041MJ/円(No.196 ポンプ及び圧縮機)=123MJ/年
		放流ポンプ	(150千円÷5年)×0.0041MJ/円(No.196 ポンプ及び圧縮機)=123MJ/年
		薬液注入ポンプ(1施設につき4台)1セット	(300千円÷5年)×0.0041MJ/円(No.196 ポンプ及び圧縮機)=246MJ/年
		付属機器(自動運転操作盤)	(1,500千円÷7年)×0.00198MJ/円(No.223 電気計測器)=424MJ/年
	機械据え付け工事, 配管・電気・雑工事 *1)	(8,480千円÷30年)×0.0361MJ/円(No.376 機械修理)=10,204MJ/年	
廃棄エネルギー (MJ/年)	污水处理施設(建築土木)廃棄	24,710MJ/年×0.05=1,235MJ/年	
	污水处理施設(設備機器)廃棄	設備機器初期投入エネルギー計(43,231MJ/年)×0.03=1,297MJ/年	
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)電力由来	526.6MJ/日×365日=192,209kWh/年 192,209kWh/年×(電力13.23MJ/kWh)=2,542,925MJ/年	
	(間接エネルギー)薬剤(無機系凝集剤, 苛性ソーダ, メタノール)由来	(8,533千円+449千円+1,079千円(各薬剤費))×0.1499MJ/円(No.109 その他の無機化学工業製品)=1,508,144MJ/年	
	(間接エネルギー)施設管理運営由来	3,150千円/年(人件費)×0.0455MJ/円(No.21 農業サービス)=143,325MJ/年	
	(間接エネルギー)機械補修由来	523千円/年(機械補修費)×0.0361MJ/円(No.376 機械修理)=18,880MJ/年	
エネルギー生産 (MJ/年)	なし	0MJ/年	

*1) 建設時のみの投入であり、「建築土木」と同じ使用年数とした。廃棄エネルギーは伴わない

上しない。計画では、消化液をバキューム車で農地に輸送し、各圃場で消化液散布機に移し替えて散布する。輸送および農地での散布の条件は、清水ら(2012)のシナリオ2・計画(「清水ら(2012)のFig.13, Fig.14」参照)と同じである。

シナリオ2・計画のステージ④に係る1施設当たりの初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費をTable 15に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している(Table 2参照)。

(5) 生成物の利用ステージ

シナリオ2の生成物の利用ステージでは、水田620ha、畑1,574haを評価対象とした。これは、計画で

消化液(水田2.5t/10a, 畑5t/10a)を施用する面積である。実態では、バイオマス由来の生成物はないが、計画との対比のため、すべての面積で基肥として化学肥料(普通化成肥料8-8-8, 窒素成分8%)を使用した場合のエネルギー消費を算出した。水田・畑における基肥の窒素要求量は、シナリオ1と同じである。各窒素要求量を満たすため、評価対象水田(620ha)では化学肥料43.8kg/10aを、評価対象畑(1,574ha)では化学肥料187.5kg/10aを施用し、いずれも収量の増加はないものとした。また、作物栽培に係る施設や機械、追肥のための肥料や他の農業生産資材等の投入に由来するエネルギーは、初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とも“neutral”として計上しない。

Table 14 シナリオ2・計画の③バイオマス変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産 (1施設)
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Plan Scenario 2 for each facility

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	メタン発酵施設(建築土木)建設	(68,400千円 ÷ 30年) × 0.0428MJ/円 (No.289 その他の土木建設)=97,584MJ/年
	メタン発酵施設(設備機器)建設	(168,000千円 ÷ 12年) × 0.0484MJ/円 (No.204 農業用機械)=677,600MJ/年
	堆肥化施設	評価対象外のため算出しない
廃棄エネルギー (MJ/年)	メタン発酵・コジェネ施設(建築土木)廃棄	97,584MJ/年 × 0.05=4,879MJ/年
	メタン発酵・コジェネ施設(設備機器)廃棄	677,600MJ/年 × 0.03=20,328MJ/年
	堆肥化施設	評価対象外のため算出しない
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)電力由来	324kWh/日 × 365日 = 118,260kWh/年 118,260kWh/年 × (自給電力 3.60MJ/kWh)=125,736MJ/年
	(直接エネルギー)熱由来	5,470MJ/日 × 365日 = 1,996,550MJ/年
	(間接エネルギー)脱硫剤由来	368千円/年(脱硫剤費) × 0.0813MJ/円 (No.157 その他の窯業・土石製品) = 29,918MJ/年
	(間接エネルギー)施設管理運営由来	10,110千円/年(人件費+補修点検費) × 0.0455MJ/円 (No.21 農業サービス) = 460,005MJ/年
エネルギー生産 (MJ/年)	電力	838kWh/日 × 365日 =305,870kWh/年 305,870kWh/年 × (電力生産 3.60MJ/kWh) =1,101,132MJ/年
	熱	5,487MJ/日 × 365日 =2,002,755MJ/年
	消化液(9,417t/年)による化学肥料代替	9,417t/年 × 233MJ/消化液 t=2,194,161MJ/年

Table 15 シナリオ2・計画の④生成物の輸送・貯蔵ステージにおけるエネルギー消費 (1施設当たり)
Energy consumption in ④ Transportation of generated material stage of Plan Scenario 2 for each facility

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	バキューム車3台購入	(15,000千円 ÷ 8年) × 0.0520MJ/円 (No.247トラック・バス・その他の自動車)=97,500MJ/年
	消化液散布機2台購入	(16,000千円 ÷ 7年) × 0.0484MJ/円 (No.204 農業用機械)=110,629MJ/年
	消化液散布機輸送用トラック1台購入	(1,500千円 ÷ 8年) × 0.0520MJ/円 (No.247トラック・バス・その他の自動車)=9,750MJ/年
廃棄エネルギー (MJ/年)	バキューム車3台廃棄	97,500MJ/年 × 0.03=2,925MJ/年
	消化液散布機2台廃棄	110,629MJ/年 × 0.03=3,319MJ/年
	消化液散布機輸送用トラック1台廃棄	9,750MJ/年 × 0.03=293MJ/年
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)輸送用燃料(軽油)由来	バキューム車: 総走行距離 52,380km ÷ (5.26km/L)=9,958L/円 消化液散布機輸送用トラック: 総走行距離 11,640km ÷ (6.26km/L)=1,859L/年 (9,958L/年 +1,859L/年)=11,817L/年 11,817L/年 × (軽油 40.47MJ/L)=478,234MJ/年
	(直接エネルギー)消化液散布機作業用燃料(軽油)由来	消化液散布面積 62ha+157.4ha=219.4ha 219.4ha × (18.3L/ha)=4,015L/年 4,015L/年 × (軽油 40.47MJ/L)=162,487MJ/年
	(間接エネルギー)輸送・散布作業由来(人件費+輸送用車両固定費・運行費より算出)	(11,640千円 +1,098千円 + 337千円 +393千円 +87千円) × 0.0455MJ/円 (No.21 農業サービス)=616,753MJ/年

以上より算出したシナリオ2・実態のステージ⑤に係るエネルギー消費を **Table 16** に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している (**Table 2** 参照)。

計画では、水田 620ha、畑 1,574ha に消化液を施用する。水田・畑における面積当たりの消化液施用量、窒素要求量、消化液ではまかなえない窒素量を補うための化学肥

料(普通化成肥料 8-8-8)の条件は、シナリオ1と同じである。水田(620ha)については消化液により、窒素要求量の100%がまかなわれる。消化液で代替可能なエネルギーは、1ha当たり 5,825MJ (25t/ha × 233MJ/消化液 t) である。畑 1,574ha については、消化液 50t/ha を施用し、窒素要求量の47%がまかなわれる。代替可能なエネルギーは、1ha当たり 11,650MJ (50t/ha × 233MJ/

Table 16 シナリオ 2・実態の⑤生成物の利用ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ⑤ Utilization of generated material stage of Present Scenario 2

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の整備・購入	neutral
廃棄エネルギー (MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の廃棄	neutral
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る燃料由来	neutral
	(間接エネルギー)水稲生産 620ha の基肥としての化学肥料由来	化学肥料施用量 438kg/ha × 108 円/kg × 620ha=29,328 千円/年 29,328 千円/年 × 0.1232MJ/円(No.104 化学肥料)= 3,613,210MJ/年
	(間接エネルギー)畑作物生産 1,574ha の基肥としての化学肥料由来	化学肥料施用量 1,875kg/ha × 108 円/kg × 1,574ha=318,735 千円/年 318,735 千円/年 × 0.1232MJ/円(No.104 化学肥料)= 39,268,152MJ/年
	(間接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る追肥肥料および他の資材・サービスや活動由来	neutral

消化液 t)である。不足する窒素(窒素要求量の 53%)は、化学肥料 1,000kg/ha を施用して補う。水田においても畑においても、消化液の施用/非施用にかかわらず、収量の差はないものとし、また作物栽培に係る施設・機械の初期投入エネルギー・廃棄エネルギー、労働および追肥肥料や他の農業生産資材等に由来する間接エネルギーは“neutral”とし、計上しない。以上より算出したシナリオ 2・計画のステージ⑤に係るエネルギー消費を **Table 17** に示す。間接エネルギーの算出に用いた 3EID 原単位については、部門名を付記している (**Table 2** 参照)。

b 算出結果

シナリオ 2 における**実態**と**計画**のエネルギー消費お

よびエネルギー生産の算出結果を **Table 18** にまとめた。ライフサイクルでのエネルギー収支は、“neutral”部分を含まないとしても、**実態**、**計画**ともにマイナスとなった。ステージ⑤のエネルギー消費が**実態**と**計画**で若干数値が異なるのは、算出過程での精度による誤差であり、投入される肥料成分に由来するエネルギー消費は同じである。**計画**では、消費される約 42,900GJ/年のうち、約 50%はステージ③で生成された消化液由来のエネルギーである。また、**計画**のステージ③では、初期投入エネルギー・廃棄エネルギーは**実態**に比べて約 10 倍と大きいですが、ランニングエネルギー消費は**実態**の 70%程度である。そのため、ステージ③の**計画**では、エネルギー消費は**実態**よりも小さくなり、またエネルギー生産によって

Table 17 シナリオ 2・計画の⑤生成物の利用ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ⑤ Utilization of generated material stage of Plan Scenario 2

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の整備・購入	neutral
廃棄エネルギー (MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の廃棄	neutral
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る燃料由来	neutral
	(間接エネルギー)水稲生産(620ha)の基肥として消化液で供給される窒素成分由来(消化液施用面積 620ha の 100%)	620ha × 25t/ha × 233MJ/消化液 t=3,611,500MJ/年
	(間接エネルギー)畑作物生産(1,574ha)の基肥のうち消化液で供給される窒素成分由来(消化液施用面積 1,574ha での 47%)	1,574ha × 50t/ha × 233MJ/消化液 t=18,337,100MJ/年
	(間接エネルギー)畑作物生産(1,574ha)の基肥のうち化学肥料由来(消化液施用面積 1,574ha での 53%)	1,000kg/ha × 108 円/kg × 1,574ha=169,992 千円/年 169,992 千円/年 × 0.1232MJ/円(No.104 化学肥料)= 20,943,014MJ/年
	(間接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る追肥化学肥料および他の資材・サービスや活動由来	neutral

Table 18 シナリオ2における実態と計画のエネルギー消費とエネルギー生産 (GJ/年)
Energy consumption and production of Present and Plan Scenario 2 (GJ/year)

			①バイオマスの生産(発生)	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	計
実態	汚水処理	消費	0	0	42,940	0	42,881	85,820
		生産			0			0
計画	メタン発酵	消費	0	0	37,126	14,819	42,892	94,837
		生産			52,981			52,981

変換に係るエネルギーを自給できるとともに、エネルギーの余剰も生じた。

3 生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さ対象シナリオ (シナリオ3)

対象とするバイオマスの量、性状などの条件および**実態・計画**の各シナリオの詳細は、経済性の評価(清水ら, 2012)と共通である。

a 各ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産の算出

(1) バイオマスの生産(発生)ステージ

シナリオ3では、**実態・計画**とも、本ステージに係る初期投入・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費は“neutral”であるとした。

(2) 収集・輸送・貯蔵ステージ

シナリオ3では、**実態・計画**とも車両や設備、輸送距離も同じと仮定し、本ステージに係る初期投入・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費はいずれも“neutral”とした。

(3) バイオマスの変換ステージ

バイオマスの変換ステージにおいては、エネルギー消

費に加え、変換により生成されたエネルギーや製品に由来するエネルギー生産を算出する。

シナリオ3の**実態**では、地域内の焼却施設が生ごみ、生活廃水処理汚泥、食品加工残さを受入れて焼却処理し、焼却灰は施設内で埋め立て処分を行う。エネルギー生産は0MJである。

焼却施設の建設費、運転条件等は、清水ら(2012)に詳述している。薬剤に係る間接エネルギーは、各薬剤の使用量および文献値から求めた価格(消石灰の使用量は、70t/日規模の焼却施設へのヒアリング値より155t/年、単価を間野(2009)より25.7円/kgとした。活性炭購入費は、薬剤費総額からさしひいて求めた)に3EIDより引用した各薬剤に相当する部門の原単位を乗じて求めた。本シナリオの対象とするバイオマス総量は10t/日であるため、調査により得られた各エネルギーの値の1/7をシナリオ3のエネルギー消費として計上した。

以上より算出したシナリオ3・**実態**のステージ③に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とエネルギー生産を**Table 19**に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している(**Table 2**参照)。

計画では、10t/日の混合原料を変換するメタン発酵・

Table 19 シナリオ3・実態の③バイオマス変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Present Scenario 3

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	焼却施設建設(1/7負担)	(414,503千円÷15年)×0.0413MJ/円(No.284 河川・下水道・その他の公共事業)=1,141,265MJ/年
廃棄エネルギー(MJ/年)	焼却施設廃棄(1/7負担)	1,141,265MJ/年×0.05=57,063MJ/年
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)電力(1/7負担)	393,389kWh/年×(電力13.23MJ/kWh)=5,204,536MJ/年
	(直接エネルギー)A重油(1/7負担)	701L/年×(A重油42.63MJ/L)=29,884MJ/年
	(間接エネルギー)活性炭由来(1/7負担)	569千円/年(活性炭購入費)×0.1499MJ/円(No.109 その他の無機化学工業製品)=85,293MJ/年
	(間接エネルギー)消石灰由来(1/7負担)	1,190千円/年(消石灰購入費)×0.0813MJ/円(No.157 その他の窯業・土石製品)=96,747MJ/年
	(間接エネルギー)保守点検(1/7負担)	11,387千円/年(保守点検費)×0.0583MJ/円(No.297 廃棄物処理(公営))=663,862MJ/年
	(間接エネルギー)施設管理事務(1/7負担)	14,170千円/年(事務経費)×0.0185MJ/円(No.344 公務(地方))=262,145MJ/年
	(間接エネルギー)燃焼灰排出処分(1/7負担)	3,382千円/年(焼却灰搬出・処分費)×0.0583MJ/円(No.297 廃棄物処理(公営))=197,171MJ/年
エネルギー生産(MJ/年)	なし	0MJ/年

コジェネレーション施設を1基、地域内に設置する。変換施設では、10t/日の混合原料は、前処理段階で破砕・固液分離され、発生する固体分（夾雑物）は評価対象外（エネルギー消費は算出しない）で堆肥化される。液体分はメタン発酵され、生成したバイオガスを用いたコジェネレーションにより電力と熱が生成される。同時にメタン発酵消化液が生成される。メタン発酵・コジェネレーション施設の運転条件、建設費および各装置の価格は、「清水ら（2012）の Fig.15, Table 24」に示されている。これに基づいて算出したシナリオ3・計画のステージ③に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とエネルギー生産を Table 20 に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している（Table 2 参照）。

(4) 生成物の輸送・貯蔵ステージ

シナリオ3・実態においては、バイオマス由来の生成物はないため、本ステージでのエネルギー消費は計上しない。計画では、消化液をバキューム車で農地に輸送し、各圃場で消化液散布機に移し替えて散布する。輸送および農地での散布の条件は、清水ら（2012）のシナリオ3・計画と同じである（「清水ら（2012）の Fig.16, Fig17」参照）。

シナリオ3・計画のステージ④に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費を Table 21 に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している（Table 2 参照）。

(5) 生成物の利用ステージ

シナリオ3の生成物の利用ステージでは、水田

21.3ha、畑54haを評価対象とした。これは、計画で消化液（水田2.5t/10a、畑5t/10a）を施用する面積である。実態では、バイオマス由来の生成物はないが、計画との対比のため、すべての面積で基肥として化学肥料（普通化成肥料8-8-8、窒素成分8%）を使用した場合のエネルギー消費を算出した。水田・畑における基肥の窒素要求量は、シナリオ1と同じである。評価対象水田（21.3ha）では化学肥料43.8kg/10aを、評価対象畑（54ha）では化学肥料187.5kg/10aを施用し、いずれも収量は計画と差がないものとした。また、作物栽培に係る施設・機械、労働および追肥のための肥料や他の農業生産資材等の投入に由来するエネルギーは、初期投入エネルギー・廃棄エネルギーや、ランニングエネルギー消費とも“neutral”とし、計上しない。以上より算出した、シナリオ3・実態のステージ⑤に係るエネルギー消費を Table 22 に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している（Table 2 参照）。

計画では、水田21.3ha、畑54haに消化液を施用する。水田・畑における面積当たりの消化液施用量、窒素要求量、消化液ではまかなえない窒素量を補うための化学肥料（普通化成肥料8-8-8）の条件は、シナリオ1と同じである。水田（21.3ha）については、消化液を施用することにより、窒素要求量の100%を代替できるため、消化液で代替可能なエネルギーは、1ha当たり5,825MJ（25t/ha × 233MJ/消化液t）である。畑54haについては、消化液50t/haを施用し、窒素要求量の47%がまかなわれる。代替可能なエネルギーは、1ha当たり11,650MJ（50t/ha × 233MJ/消化液t）である。不足する窒素（窒素要求量の53%）は、化学肥料1,000kg/haを施用して補う。

Table 20 シナリオ3・計画の③バイオマス変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Plan Scenario 3

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	メタン発酵施設(建築土木)建設	(38,100千円 ÷ 30年) × 0.0428MJ/円 (No.289 その他の土木建設)=54,356MJ/年
	メタン発酵施設(設備機器)建設	(116,900千円 ÷ 12年) × 0.0484MJ/円 (No.204 農業用機械)=471,497MJ/年
廃棄エネルギー(MJ/年)	メタン発酵・コジェネ施設(建築土木)	54,356MJ/年 × 0.05=2,718MJ/年
	メタン発酵・コジェネ施設(設備機器)	471,497MJ/年 × 0.03=14,145MJ/年
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)電力由来	165kWh/日 × 365日 = 60,225kWh/年 60,225kWh/年 × (自給電力3.60MJ/kWh)=216,810MJ/年
	(直接エネルギー)熱由来	2,009MJ/日 × 365日 = 733,285MJ/年
	(間接エネルギー)脱硫剤由来	511千円/年(脱硫剤費) × 0.0813MJ/円 (No.157 その他の窯業・土石製品) = 41,544MJ/年
	(間接エネルギー)施設管理運営由来	9,088千円/年(人件費+点検補修費) × 0.0455MJ/円 (No.21 農業サービス)=413,504MJ/年
エネルギー生産(MJ/年)	電力	1,080kWh/日 × 365日 =394,200kWh/年 394,200kWh/年 × (電力生産3.60MJ/kWh) =1,419,120MJ/年
	熱	6,480MJ/日 × 365日 =2,365,200MJ/年
	消化液(3,230t/年)による化学肥料代替	3,230t/年 × 233MJ/消化液t=752,590MJ/年

Table 21 シナリオ 3・計画の④生成物の輸送・貯蔵ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ④ Transportation of generated material stage of Plan Scenario 3

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	バキューム車 1 台購入	$(5,000 \text{ 千円} \div 8 \text{ 年}) \times 0.0520 \text{ MJ/円 (No.247 トラック・バス・その他の自動車)} = 32,500 \text{ MJ/年}$
	消化液散布機 1 台購入	$(8,000 \text{ 千円} \div 7 \text{ 年}) \times 0.0484 \text{ MJ/円 (No.204 農業用機械)} = 55,314 \text{ MJ/年}$
	消化液散布機輸送用トラック 1 台購入	$(1,500 \text{ 千円} \div 8 \text{ 年}) \times 0.0520 \text{ MJ/円 (No.247 トラック・バス・その他の自動車)} = 9,750 \text{ MJ/年}$
廃棄エネルギー (MJ/年)	バキューム車 1 台廃棄	$32,500 \text{ MJ/年} \times 0.03 = 975 \text{ MJ/年}$
	消化液散布機 1 台廃棄	$55,314 \text{ MJ/年} \times 0.03 = 1,659 \text{ MJ/年}$
	堆肥散布車輸送用トラック 1 台廃棄	$9,750 \text{ MJ/年} \times 0.03 = 293 \text{ MJ/年}$
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)輸送用燃料(軽油)由来	バキューム車：総走行距離 18,000km/年 $\div (5.26 \text{ km/L}) = 3,422 \text{ L/年}$ 消化液散布機輸送用トラック：総走行距離 6,000km/年 $\div (6.26 \text{ km/L}) = 959 \text{ L/年}$ $(3,422 \text{ L/年} + 959 \text{ L/年}) = 4,381 \text{ L/年}$ $4,381 \text{ L/年} \times (軽油 40.47 \text{ MJ/L}) = 177,299 \text{ MJ/年}$
	(直接エネルギー)散布用燃料(軽油)由来	消化液散布面積 21.3ha + 54ha = 75.3ha $75.3 \text{ ha} \times (18.3 \text{ L/ha}) = 1,378 \text{ L/年}$ $1,378 \text{ L/年} \times (軽油 40.47 \text{ MJ/L}) = 55,768 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)輸送・散布作業由来	$8,083 \text{ 千円 (人件費 + 輸送用車両固定費 + 運行費)} \times 0.0455 \text{ MJ/円 (No.21 農業サービス)} = 367,777 \text{ MJ/年}$

Table 22 シナリオ 3・実態の⑤生成物の利用ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ⑤ Utilization of generated material stage of Present Scenario 3

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の整備・購入	neutral
廃棄エネルギー (MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の廃棄	neutral
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る燃料由来	neutral
	(間接エネルギー)水稲生産(21.3ha)の基肥としての化学肥料由来	化学肥料施用量 $438 \text{ kg/ha} \times 108 \text{ 円/kg} \times 21.3 \text{ ha} = 1,008 \text{ 千円/年}$ $1,008 \text{ 千円/年} \times 0.1232 \text{ MJ/円 (No.104 化学肥料)} = 124,186 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)畑作物生産(54ha)の基肥としての化学肥料由来	化学肥料施用量 $1,875 \text{ kg/ha} \times 108 \text{ 円/kg} \times 54 \text{ ha} = 10,935 \text{ 千円/年}$ $10,935 \text{ 千円/年} \times 0.1232 \text{ MJ/円 (No.104 化学肥料)} = 1,347,192 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る追肥化学肥料および他の資材・サービスや活動由来	neutral

水田においても畑においても、消化液の施用/非施用にかかわらず、収量の差はないものとし、また作物栽培に係る施設・機械の初期投入エネルギー・廃棄エネルギー、労働および追肥肥料や他の農業生産資材等に由来する間接エネルギーは“neutral”とし、計上しない。以上より算出したシナリオ 3・計画のステージ⑤に係るエネルギー消費を Table 23 に示す。間接エネルギーの算出に用いた 3EID 原単位については、部門名を付記している (Table 2 参照)。

b 算出結果

シナリオ 3 における実態と計画のエネルギー消費およびエネルギー生産の算出結果を Table 24 にまとめた。ライフサイクルでのエネルギー収支は、“neutral”部分を含めない条件では、実態ではエネルギー消費のみであるためマイナス 9,209GJ/年であるが、計画では 415GJ/年のプラスとなった。ステージ③では、実態におけるエネルギー消費が計画に比して大きく、とくにランニングエネルギー消費の約 68% を占める電力と A 重油由来の直接エネルギーの影響が大きい。計画では電力・熱に由来する直接エネルギーは小さく、また生産されたエネル

Table 23 シナリオ3・計画の⑤生成物の利用ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ⑤ Utilization of generated material stage of Plan Scenario 3

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の整備・購入	neutral
廃棄エネルギー(MJ/年)	水稲・畑作物生産に係る施設・機械の廃棄	neutral
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る燃料由来	neutral
	(間接エネルギー)水稲生産(21.3ha)の基肥として消化液で供給される窒素成分由来(消化液施用面積 21.3ha の100%)	21.3ha × 25t/ha × 233MJ/消化液 t=124,073MJ/年
	(間接エネルギー)畑作物生産(54ha)の基肥のうち消化液で供給される窒素成分由来(消化液施用面積 54ha での47%)	54ha × 50t/ha × 233MJ/消化液 t=629,100MJ/年
	(間接エネルギー)畑作物生産(54ha)の基肥のうち化学肥料由来(消化液施用面積 54ha での53%)	1,000kg/ha × 108円/kg × 54ha=5,832千円/年 5,832千円/年 × 0.1232MJ/円(No.104 化学肥料)=718,502MJ/年
	(間接エネルギー)水稲・畑作物生産に係る追肥化学肥料および他の資材・サービスや活動由来	neutral

Table 24 シナリオ3における実態と計画のエネルギー消費とエネルギー生産(GJ/年)
Energy consumption and production in Present and Plan of Scenario 3 (GJ/year)

			①バイオマスの生産(発生)	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	計
実態	焼却	消費	0	0	7,738	0	1,471	9,209
		生産			0			0
計画	メタン発酵	消費	0	0	1,948	702	1,472	4,122
		生産			4,537			4,537

ギーによりそのすべてが自給される。

4 規格外甘しょ・食品加工残さ対象シナリオ(シナリオ4)

対象とするバイオマスの量、性状などの条件および**実態・計画**の各シナリオの詳細は経済性の評価(清水ら, 2012)と共通である。

a 各ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産の算出

(1) バイオマスの生産(発生)ステージ

食品加工残さについては、地域内発生分(10.7t/日)・地域外発生分(9t/日)のいずれも、食料品等の製造加工工程(評価対象外)で発生する廃棄物であるため、本ステージにおけるエネルギー消費は算出しないものとした。

規格外甘しょ(9~11月に1,500t/年)は、青果用甘しょ生産工程で発生する副産物であり、**実態**では畑に鋤込むが、鋤込みのためのエネルギーは主産物の生産(評価対象外)に含まれるとみなした。また、**計画**では、生産者(農家)が畑で収集し、集荷施設から次ステージでの輸送に供するが、主産物収穫時の作業と同時にに行われるとみな

し、エネルギー消費を算出しない。また、本ステージで生産される規格外甘しょは、化石エネルギー代替として生産されたものではなく、**実態**で鋤込まれていたもの(廃棄物とみなす)であるため、エネルギー生産としては計上しない。

(2) 収集・輸送・貯蔵ステージ

地域内発生分の食品加工残さについては、本ステージに係る車両や設備、輸送距離は、**実態・計画**とも同じとし、初期投入・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費はいずれも“neutral”とした。

地域外発生分の食品加工残さについては、**実態**では、地域外で収集輸送業者により焼却施設まで輸送される。この収集・輸送作業は評価対象外とし、初期投入・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費は算出しない。規格外甘しょの収集・輸送・貯蔵は行われぬ。以下、**実態・計画**で“neutral”でないもの(計画について追加的に算出すべき項目)について示す。

計画においては、地域外発生分の食品加工残さを飼料化工場に輸送するための輸送距離延長分と飼料原料としての鮮度を保つために車両に積載する保冷装置(車両は既存のものを使用すると仮定し、算出対象としない)について、追加的にエネルギーが消費されるとした。地域

外発生分の食品加工残さの輸送距離延長分を片道 50km と設定し、3 台のトラックで 365 日 / 年輸送するため、年間の輸送総距離延長分は 109,500km となる。保冷装置を積載することによりトラックの燃費効率が 20% 低下すると仮定し、小型トラックの燃費効率を基に、5km/L として燃料消費量を算出した。また、距離延長分に係る車両運行費については、間接エネルギーとして計上した。保冷装置はトラック積載型で 3 基、価格はメーカーカタログ等より 1,000 千円 / 基として初期投入エネルギー・廃棄エネルギーを算出した。

規格外甘しょ輸送のための大型トラックの購入価格および輸送条件は、清水ら (2012) のシナリオ 4・計画と同じである。トラック価格に基づき初期投入エネルギー・廃棄エネルギーを、また輸送条件に基づき燃料消費由来の直接エネルギー、人件費・車両固定費・車両運行費由来の間接エネルギーを算出した。

また、本ステージでは、飼料化工場での食品残さおよ

び春夏冬の規格外甘しょ貯蔵のための貯蔵庫についても「清水ら (2012) の Table 32」に示す価格条件・使用条件から初期投入エネルギー・廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費の直接エネルギーを算出した。以上より、シナリオ 4・計画のステージ②に係るエネルギー消費を Table 25 に示す。間接エネルギーの算出に用いた 3EID 原単位については、部門名を付記している (Table 2 参照)。

(3) バイオマスの変換ステージ

バイオマスの変換ステージにおいては、エネルギー消費に加え、変換により生成されたエネルギーや製品に由来するエネルギー生産を算出する。

シナリオ 4 の実態では、地域内発生分の食品加工残さは焼却施設で焼却される。一方、地域外発生分の食品加工残さは地域外で処理され、規格外甘しょは、ステージ①で畑に鋤込まれている (発生しない) ため、評価対象外である。よって、本ステージでは、地域内発生分の食

Table 25 シナリオ 4・計画の②収集・輸送・貯蔵ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ② Biomass transportation stage of Plan Scenario 4

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	食品加工残さ(市内発生分)の収集輸送(貯蔵なし)に係る車両等購入	neutral
	食品加工残さ(市外発生分)の収集輸送のための小型トラック 3 台購入	評価対象外のため算出しない
	食品加工残さ(市外発生分)の収集輸送のためのトラック積載保冷装置 3 台購入	{(1,000 千円 ÷ 6 年) × 0.0409MJ/円 (No.195 冷凍機・温湿調整装置)} × 3 台 = 20,450MJ/年
	規格外甘しょの収集輸送用大型トラック 1 台購入	(12,960 千円 ÷ 8 年) × 0.0520MJ/円 (No.204 トラック・バス・その他の自動車) = 84,240MJ/年
	貯蔵庫設置	(10,000 千円 ÷ 10 年) × 0.0409MJ/円 (No.195 冷凍機・温湿調整装置) = 40,900MJ/年
廃棄エネルギー (MJ/年)	食品加工残さ(市内発生分)の収集輸送(貯蔵なし)に係る車両等廃棄	neutral
	食品加工残さ(市外発生分)の収集輸送のための小型トラック 3 台廃棄	評価対象外のため算出しない
	食品加工残さ(市外発生分)の収集輸送のためのトラック積載保冷装置 3 台廃棄	20,450MJ/年 × 0.03 = 614MJ/年
	規格外甘しょの収集輸送用大型トラック 1 台廃棄	84,240MJ/年 × 0.03 = 2,527MJ/年
	貯蔵庫廃棄	40,900MJ/年 × 0.03 = 1,227MJ/年
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接・間接エネルギー)食品加工残さ(市内発生分)の収集輸送(貯蔵なし)作業由来	neutral
	(直接エネルギー)食品加工残さ(市外発生分)の収集輸送に係る燃料由来	総走行距離 109,500km ÷ (5km/L) = 21,900L/年 21,900L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 886,293MJ/年
	(間接エネルギー)食品加工残さ(市外発生分)の収集輸送作業由来	評価対象外のため算出しない
	(間接エネルギー)食品加工残さ(市外発生分)の収集輸送作業由来	821 千円 / 年 (輸送車両運行費) × 0.0345MJ/円 (No.298 廃棄物処理(産業)) = 28,325MJ/年
	(直接エネルギー)規格外甘しょの収集輸送に係る燃料由来	総走行距離 6,000km/年 ÷ (3.34km/L) = 1,796L/年 1,796L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 72,684MJ/年
	(間接エネルギー)規格外甘しょの収集輸送作業由来(人件費、車両固定費、車両運行費より算出)	{671 千円 / 年 (人件費) + 73 千円 / 年 (車両固定費) + 54 千円 / 年 (車両運行費)} × 0.0528MJ/円 (No.312 道路貨物輸送(除自家輸送)) = 42,134MJ/年
	(直接エネルギー)貯蔵庫運転電力	3,240kWh/年 × (電力 13.23MJ/kWh) = 42,865MJ/年

品加工残さの焼却処理，焼却灰の埋立処分に係るエネルギーについて計上した。**実態**でのエネルギー生産は0MJである。

焼却施設の建設費，運転条件等は，清水ら（2012）のシナリオ4・**実態**と同じである。「清水ら（2012）のTable 33」に基づき算出したシナリオ4・**実態**のステージ③に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とエネルギー生産をTable 26に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については，部門名を付記している（Table 2参照）。

計画では，飼料化工場が，地域内・地域外で発生した食品加工残さと，原料として購入した規格外甘しょを混合して乾燥・発酵し，栄養補助添加物（ふすまやビタミン類などの添加剤，288t/年）を加えて養豚用の高付加価値飼料に変換する。製造された飼料は工場渡りして販売するため，同量の市販飼料を代替するものとしてエネルギー生産を計上した。

飼料化施設の建設費や運転条件は，清水ら（2012）のシナリオ4・**計画**と同じである。「清水ら（2012）のTable 34」に基づき算出したシナリオ4・**計画**のステージ③に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費とエネルギー生産をTable 27に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については，部門名を付記している（Table 2参照）。

(4) 生成物の輸送・貯蔵ステージおよび生成物の利用ステージ

シナリオ4・**実態**では，バイオマス由来の生成物はないため，生成物の輸送・貯蔵ステージおよび生成物の利用ステージでのエネルギー消費は計上しない。**計画**でも，生成物である飼料は工場渡りして販売されるため，輸送・貯蔵は行わない。飼料の利用（養豚）についても，本シナリオでは取りあげない。

Table 26 シナリオ4・実態の③変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Present Scenario 4

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	焼却施設建設(15%負担)	$(435,228 \text{ 千円} \div 15 \text{ 年}) \times 0.0413 \text{ MJ/円 (No.284 河川・下水道・その他の公共事業)} = 1,198,328 \text{ MJ/年}$
廃棄エネルギー(MJ/年)	焼却施設廃棄(15%負担)	$1,198,328 \text{ MJ/年} \times 0.05 = 59,916 \text{ MJ/年}$
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)電力由来(15%負担)	$413,058 \text{ kWh/年} \times (\text{電力 } 13.23 \text{ MJ/kWh}) = 5,464,757 \text{ MJ/年}$
	(直接エネルギー)A重油(15%負担)	$736 \text{ L/年} \times (\text{A重油 } 42.63 \text{ MJ/L}) = 31,376 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)活性炭(15%負担)由来	$1,250 \text{ 千円/年 (活性炭購入費)} \times 0.1499 \text{ MJ/円 (No.109 その他の無機化学工業製品)} = 187,375 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)消石灰(15%負担)由来	$598 \text{ 千円/年 (消石灰購入費)} \times 0.0813 \text{ MJ/円 (No.157 その他の窯業・土石製品)} = 48,617 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)保守点検(15%負担)由来	$11,956 \text{ 千円/年 (保守点検費)} \times 0.0583 \text{ MJ/円 (No.297 廃棄物処理(公営))} = 697,035 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)施設管理事務(15%負担)由来	$14,879 \text{ 千円/年 (事務経費)} \times 0.0185 \text{ MJ/円 (No.344 公務(地方))} = 275,262 \text{ MJ/年}$
エネルギー生産(MJ/年)	なし	0MJ/年

Table 27 シナリオ4・計画の③変換ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Plan Scenario 4

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	飼料化施設建設	$(500,000 \text{ 千円} \div 20 \text{ 年}) \times 0.0428 \text{ MJ/円 (No.289 その他の土木建設)} = 1,070,000 \text{ MJ/年}$
廃棄エネルギー(MJ/年)	飼料化施設廃棄	$1,070,000 \text{ MJ/年} \times 0.05 = 53,500 \text{ MJ/年}$
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)施設運転電力由来	$389,484 \text{ kWh/年} \times (\text{電力 } 13.23 \text{ MJ/kWh}) = 5,152,873 \text{ MJ/年}$
	(直接エネルギー)電動フォークリフト2台のバッテリー用電力由来	$8,640 \text{ kWh/年} \times (\text{電力 } 13.23 \text{ MJ/kWh}) = 114,307 \text{ MJ/年}$
	(間接エネルギー)栄養補助添加物(ふすまやビタミン類など添加剤)由来	$8,640 \text{ 千円/年 (栄養補助添加剤購入費)} \times 0.0378 \text{ MJ/円 (No.126 医薬品)} = 326,592 \text{ MJ/年}$
エネルギー生産(MJ/年)	飼料(5,760t/年)による化石エネルギー代替	$5,760 \text{ t/年} \times 41 \text{ 千円/t} = 236,160 \text{ 千円/年}$ $236,160 \text{ 千円/年} \times 0.042 \text{ MJ/円 (No.69 飼料)} = 9,918,720 \text{ MJ/年}$

Table 28 シナリオ4における実態と計画のエネルギー消費とエネルギー生産 (GJ/年)
Energy consumption and production in Present and Plan of Scenario 4 (GJ/year)

			①バイオマスの生産(発生)	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	計
実態	焼却	消費	0	0	8,170	0	0	8,170
		生産			0			0
計画	飼料化	消費	0	1,222	7,332	0	0	8,554
		生産			9,919			9,919

b 算出結果

シナリオ4における**実態**と**計画**のエネルギー消費およびエネルギー生産の算出結果を**Table 28**にまとめた。ライフサイクルでのエネルギー収支は、“neutral”部分を含めない条件において、**実態**では、マイナス8,170GJ/年(ステージ③のエネルギー消費のみ)、**計画**ではプラス1,365GJ/年となった。ステージ②の**計画**では、**実態**では発生しないエネルギー消費が計上された。これは、市外発生食品加工残さの飼料化施設までの収集輸送(保冷装置や輸送距離の延長)と規格外甘しょの収集輸送に由来するものである。しかし、ステージ③の**計画**でのエネルギー消費は、**実態**に比して小さく、また生成された飼料が代替する化石エネルギーをエネルギー生産とみなすため、**実態**に比べて**計画**ではエネルギー収支が改善される結果となった。

5 休耕田対象シナリオ(シナリオ5)

対象とする休耕水田面積や生産性等の条件、および**実態**・**計画**の各シナリオの詳細は経済性の評価(清水ら, 2012)と同じである。

a 各ステージにおけるエネルギー消費とエネルギー生産の算出

(1) バイオマスの生産(発生)ステージ

シナリオ5・**実態**における維持管理作業(耕うん1回/年、畦畔除草4回/年)については、2007年度に筆者らが行った栽培実証試験(清水ら, 2009)の結果に基づき、

燃料消費量から直接エネルギーを算出した。維持管理作業のための農業機械は食用米のものを利用するため、初期投入エネルギー・廃棄エネルギーは“neutral”とした。

燃料消費量の算出に当たり、各圃場と作業車自宅との距離を5kmとし、作業のための移動も含めた。耕うん(27PSのトラクターに標準ロータリーを装着)は、20aを1単位として算出した。トラクターの燃費効率は軽油7.3L/作業時間、1.5時間の作業として、燃料(軽油)消費量は11L/20a、作業車自宅から圃場までのトラクター移動(往復10km)に係る燃料(軽油)消費量は3.6L/回/20aと算出され、20a当たりの移動および耕うん作業に係る燃料(軽油)消費量は14.6L/年となった。また、畦畔除草は、各回0.5時間の作業とし、刈払機の燃費効率は混合油0.2L/20aとなった。自宅から圃場までの移動には燃費効率(ガソリン)11km/Lの軽トラックを用いるものとした。以上より算出したシナリオ5・**実態**のステージ①に係る初期投入エネルギー・廃棄エネルギー・ランニングエネルギー消費を**Table 29**に示す。

シナリオ5・**計画**では、対象とする休耕水田でバイオ燃料原料米を栽培する。栽培に係る作業条件は、清水ら(2012)に示すシナリオ5・**計画**の①バイオマスの生産(発生)ステージと同じである。栽培対象水田のうち、「活用可能性」が「可能」な休耕田(231.94ha)に対しては、作付前に簡易な農地整備を実施する。この農地整備については、疎水材を用いた暗渠工の単位面積当たりのエネルギー消費を使用期間(15年と仮定)で割り、1年当たりの初期投入エネルギーとした。農地整備は、定期的に

Table 29 シナリオ5・実態の①バイオマスの生産(発生)ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ① Biomass production stage of Present Scenario 5

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	土地(休耕田266.5ha)	評価対象外
	農業機械等購入	食用米のものを利用するため neutral
廃棄エネルギー(MJ/年)	農業機械等廃棄	食用米のものを利用するため neutral
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)トラクターの移動・耕うん作業に係る燃料(軽油)由来	$(266.5\text{ha} \div 0.2\text{ha}) \times 14.6\text{L} = 19,455\text{L/年}$ $19,455\text{L/年} \times (\text{軽油 } 40.47\text{MJ/L}) = 787,344\text{MJ/年}$
	(直接エネルギー)畦畔除草に係る燃料(混合油)由来	$(266.5\text{ha} \div 0.2\text{ha}) \times 0.2\text{L} \times 4\text{回/年} = 1,066\text{L/年}$ $1,066\text{L/年} \times (\text{混合油 } 40.24\text{MJ/L}) = 42,896\text{MJ/年}$
	(直接エネルギー)畦畔除草作業のための移動に係る燃料(ガソリン)由来	$(266.5\text{ha} \div 0.2\text{ha}) \times 0.91\text{L} \times 4\text{回} = 4,850\text{L/年}$ $4,850\text{L/年} \times (\text{ガソリン } 40.24\text{MJ/L}) = 195,164\text{MJ/年}$

施す管理作業とみなし、廃棄エネルギーは計上しない。バイオ燃料原料米栽培に必要な農業機械等（生産費調査項目の建物費、自動車費、農機具費）については、既存の食用米のものを利用するため、初期投入エネルギー・廃棄エネルギーは“neutral”とし、農業機械の機械保守点検のためのランニングエネルギー消費は計上せず、機械使用時の燃料から算出される直接エネルギーのみを算出した。ランニングエネルギー消費のうち、バイオ燃料原料米栽培に投入される資材・サービスに係る間接エネルギーを、「清水ら（2012）の Table 38」に示す各価格と、本報 Table 2 に示す 3EID の原単位を用いて算出した。バイオ燃料原料米（籾付き、水分 25%）は、すべての圃場において 1,452kg/10a の収穫が得られると仮定した。米は、本シナリオ内でエタノール原料として利用されるため、化石エネルギー代替のエネルギー生産と

しては計上しない。以上より算出したシナリオ 5・計画のステージ①におけるエネルギー消費を Table 30 に示す。間接エネルギーの算出に用いた 3EID 原単位については、部門名を付記している（Table 2 参照）。

(2) 収集・輸送・貯蔵ステージ

シナリオ 5・実態では、ステージ①で生産（発生）されるバイオマスはないため、エネルギー消費は計上しない。

計画では、休耕水田で生産された 3,870t/年（水分 25%）の籾付き玄米を、生産者が圃場から乾燥調製施設（食用の既存施設を利用）まで輸送し、乾燥調製する。輸送に係る条件は、清水ら（2012）のシナリオ 5・計画の収集・輸送・貯蔵ステージと同じである。輸送用のダンプトラックは食用米生産と共用と考え、初期投入エネルギーおよび廃棄エネルギー、車両固定費・輸送人件費

Table 30 シナリオ 5・計画の①バイオマスの生産（発生）ステージにおけるエネルギー生産
Energy consumption in ① Biomass production stage of Plan Scenario 5

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー (MJ/年)	土地(休耕田 266.5ha)	評価対象外
	農業機械等購入	食用米のものを利用するため neutral
	「活用可能性」が「可能」な休耕田 (231.94ha)における簡易な農地整備 *1	$(59,870\text{MJ/ha} \div 15\text{年}) \times 231.94\text{ha} = 925,750\text{MJ/年}$
廃棄エネルギー (MJ/年)	農業機械等廃棄	食用米のものを利用するため neutral
	「活用可能性」が「可能」な休耕田(231.94ha)における簡易な農地整備に係る廃棄	計上しない(本文参照)
ランニングエネルギー消費 (MJ/年)	(直接エネルギー)作業及び輸送・移動に係る燃料(軽油)由来	$(327\text{L/ha} \times 266.5\text{ha}) = 87,146\text{L/年}$ $87,146\text{L/年} \times (\text{軽油 } 40.47\text{MJ/L}) = 3,526,799\text{MJ/年}$
	(直接エネルギー)作業及び輸送・移動に係る燃料(ガソリン)由来(ガソリン 54.3L/10a)	$(543\text{L/ha} \times 266.5\text{ha}) = 144,710\text{L/年}$ $144,710\text{L/年} \times (\text{ガソリン } 40.24\text{MJ/L}) = 5,823,130\text{MJ/年}$
	(直接エネルギー)作業に係る燃料由来(混合油 0.4L/10a)	$(4\text{L/ha} \times 266.5\text{ha}) = 1,066\text{L/年}$ $1,066\text{L/年} \times (\text{混合油 } 40.24\text{MJ/L}) = 42,896\text{MJ/年}$
	(直接エネルギー)作業に係る電力由来(0.26kWh/10a)	$(2.6\text{kWh/ha} \times 266.5\text{ha}) = 693\text{kWh/年}$ $693\text{kWh/年} \times (\text{電力 } 13.23\text{MJ/kWh}) = 9,168\text{MJ/年}$
	(間接エネルギー)種籾由来	$93,280\text{円/ha}(\text{種苗費}) \times 266.5\text{ha} = 24,859\text{千円/年}$ $24,859\text{千円/年} \times 0.0223\text{MJ/円(No.11種苗)} = 554,356\text{MJ/年}$
	(間接エネルギー)メタン発酵消化液(化学肥料代替)由来	$266.5\text{ha} \times 40\text{t/ha} \times 233\text{MJ/消化液 t} = 2,483,780\text{MJ/年}$
	(間接エネルギー)消毒剤・殺菌剤等薬剤由来	$31,780\text{円/ha} \times 266.5\text{ha} = 8,469\text{千円/年}$ $8,469\text{千円/年} \times 0.1054\text{MJ/円(No.132農薬)} = 892,633\text{MJ/年}$
	(間接エネルギー)その他の材料(育苗用培土)由来	$35,900\text{円/ha} \times 266.5\text{ha} = 9,567\text{千円/年}$ $9,567\text{千円/年} \times 0.0406\text{MJ/円(No.70有機質肥料)} = 389,420\text{MJ/年}$
	(間接エネルギー)バイオ燃料原料米栽培(土地改良及び水利費+賃借料及び料金由来)	$81,780\text{円/ha}(\text{土地改良及び水利費+賃借料及び料金}) \times 266.5\text{ha} = 21,794\text{千円/年}$ $21,794\text{千円/年} \times 0.0455\text{MJ/円(No.21農業サービス)} = 991,627\text{MJ/年}$
	(間接エネルギー)バイオ燃料原料米栽培(建物費、自動車費、農機具費由来)	食用米のものを利用するため計上しない
	(間接エネルギー)バイオ燃料原料米栽培(生産管理費由来)	$4,500\text{円/ha}(\text{生産管理費}) \times 266.5\text{ha} = 1,199\text{千円/年}$ $1,199\text{千円/年} \times 0.0142\text{MJ/円(No.337情報サービス)} = 17,026\text{MJ/年}$

*1 面積当たりの農地整備に係るエネルギー原単位は、北川巖氏(農研機構農村工学研究所・農地基盤工学研究領域)による(未公表)

に由来するランニングエネルギー消費(間接エネルギー)は計上せず、輸送用燃料消費に伴う直接エネルギーと燃料以外の運行費由来の間接エネルギーを清水ら(2012)に基づき算出した。

次に、食用米と共用のカントリーエレベータ(循環式乾燥方式)で乾燥調製されると想定し、エネルギーを算出した。乾燥調製施設は食用米と共用のため、初期投入エネルギーおよび廃棄エネルギーは計上せず、運転に係る燃料・電力由来の直接エネルギーと管理費由来の間接エネルギーを清水ら(2012)に基づき算出した。乾燥調製施設で発生するもみ殻は販売されるが、副産物であるため化石エネルギーを代替するエネルギー生産とはみなさない。

さらに、乾燥調製済みの玄米の輸送条件(清水ら, 2012)に基づき、輸送用車両の初期投入エネルギーおよび廃棄エネルギー、車両固定費に由来するランニングエネルギー消費(間接エネルギー)は計上せず、輸送用燃料消費に伴う直接エネルギーと、人件費および燃料以外の運行費由来の間接エネルギーを計上した。以上より算出したシナリオ5・計画のステージ②におけるエネルギー消費をTable 31に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している(Table 2参照)。

(3) バイオマスの変換ステージ

バイオマスの変換ステージにおいては、エネルギー消費に加え、変換により生成されたエネルギーや製品に由来するエネルギー生産を算出する。

シナリオ5では、本ステージ以降は計画のみ設定した。

地域内に建設された変換施設において、玄米からバイオエタノールを生成する。本ステージにおけるエネルギー消費・エネルギー生産の算出条件は、清水ら(2012)に詳述されている。

生成されるバイオエタノールは、純エタノール理論発熱量21.2MJ/Lを用いてエネルギー生産を算出した。発酵副産物については飼料原料として販売すると仮定したが、成分等のデータが入手できなかったため、通常の飼料を代替すると仮定して販売予定価格(10千円/t)から3EIDを用いてエネルギー生産を算出した。以上より算出したシナリオ5・計画のステージ③に係る初期投入エネルギー、廃棄エネルギー、ランニングエネルギー消費およびエネルギー生産をTable 32に示す。間接エネルギーの算出に用いた3EID原単位については、部門名を付記している(Table 2参照)。

(4) 生成物の輸送・貯蔵ステージおよび生成物の利用ステージ

シナリオ5・実態では、バイオマス由来の生成物はないため、生成物の輸送・貯蔵ステージおよび生成物の利用ステージでのエネルギー消費は計上しない。計画についても、生成されたバイオエタノールの貯蔵やガソリン混合、流通販売については、シナリオ作成に十分な知見が得られなかった。また、発酵副産物の利用についても実証試験が進められている段階であり、今後の課題としたい。

b 算出結果

シナリオ5における実態と計画のエネルギー消費お

Table 31 シナリオ5・計画の②バイオマスの収集・輸送・貯蔵ステージにおけるエネルギー消費
Energy consumption in ② Biomass transportation stage of Plan Scenario 5

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	乾燥調製施設建設	食用米のものを利用するため計上しない
	初付き玄米輸送用4tダンプトラック購入	食用米のものを利用するため計上しない
	乾燥調製済み玄米輸送用10tダンプトラック購入	食用米のものを利用するため計上しない
廃棄エネルギー(MJ/年)	乾燥調製施設廃棄	食用米のものを利用するため計上しない
	初付き玄米輸送用4tダンプトラック廃棄	食用米のものを利用するため計上しない
	乾燥調製済み玄米輸送用10tダンプトラック廃棄	食用米のものを利用するため計上しない
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)初付き玄米収集輸送のための4tダンプトラックの燃料(軽油)由来	総走行距離 26,600km/年 ÷ (5.26km/L) = 5,057L/年 5,057L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 204,657MJ/年
	(直接エネルギー)乾燥調製施設使用燃料(灯油)由来	28,391L/年 × (灯油 38.95MJ/L) = 1,105,829MJ/年
	(直接エネルギー)乾燥調製施設使用電力由来	140,978kWh/年 × (電力 13.23MJ/kWh) = 1,865,139MJ/年
	(直接エネルギー)玄米輸送のための10tダンプ燃料の燃料(軽油)由来	総走行距離 14,000km/年 ÷ (3.34km/L) = 4,192L/年 4,192L/年 × (軽油 40.47MJ/L) = 169,650MJ/年
	(間接エネルギー)乾燥調製施設運転由来	24,683千円(管理費) × 0.0455MJ/円(No.21 農業サービス) = 1,123,077MJ/年
	(間接エネルギー)玄米輸送作業由来(乾燥調製施設→変換施設)	1,740千円/年(人件費+燃料以外の運行費) × 0.0528MJ/円(No.312 道路貨物輸送) = 91,872MJ/年

Table 32 シナリオ 5・計画の③変換ステージにおけるエネルギー消費およびエネルギー生産
Energy consumption and production in ③ Biomass conversion stage of Plan Scenario 5

算出項目	データ名	算出結果
初期投入エネルギー(MJ/年)	バイオエタノール変換施設建設	(1,600,000千円÷15年)×0.0428MJ/円(No.289 その他の土木建設)=4,565,333MJ/年
廃棄エネルギー(MJ/年)	バイオエタノール変換施設廃棄	4,565,333MJ/年×0.05=228,267MJ/年
ランニングエネルギー消費(MJ/年)	(直接エネルギー)電力由来	322,929kWh/年×(電力13.23MJ/kWh)=4,272,351MJ/年
	(直接エネルギー)スチーム由来	12,626,000MJ/年
	(間接エネルギー)主原料由来	ステージ①で生産された玄米のため計上せず
	(間接エネルギー)副原料由来	3,668千円/年×0.0378MJ/円(No.126 医薬品)=141,952MJ/年
	(間接エネルギー)施設運転作業由来(点検補修費+人件費より算出)	{24,000千円/年(点検補修費)+40,909千円(人件費)}×0.1164MJ/円(No.119 その他の有機化学工業薬品)=7,555,408MJ/年
エネルギー生産(MJ/年)	バイオエタノール(750kL/年)	750,000L/年×21.2MJ/L=15,900,000MJ/年
	発酵副産物(=飼料とみなす)(981t/年)による化石エネルギー代替	9,810千円/年×0.042MJ/円(No.69 飼料)=412,020MJ/年

およびエネルギー生産の算出結果を **Table 33** にまとめた。シナリオ 5 では、**計画**のステージ③と①におけるエネルギー消費が非常に大きい。ステージ③では、バイオエタノール変換施設のランニングエネルギー消費に占める直接エネルギー(電力およびスチーム由来)が57%を占めており、これらのエネルギーの削減が技術的課題であると言える。また、ステージ①では、機械等を食用米生産と共用することにより初期投入エネルギー・廃棄エネルギーを算出していないにもかかわらず、ランニングエネルギー消費における直接エネルギー(バイオ燃料米栽培の作業及び輸送・移動に係る燃料に由来)がステージ①のエネルギー消費の約60%を占めており、省エネルギー型の農業技術体系の重要性が示唆された。

IV バイオマス利活用シナリオのライフサイクルでのエネルギー収支の評価

1 エネルギー収支についての実態・計画の比較

各シナリオのライフサイクル(全ステージ)のエネルギー消費とエネルギー生産を算出した結果(単位はGJ/年)を **Fig.1** にまとめた。**実態**(上図)および**計画**(下図)について、エネルギー消費(初期投入エネルギー、廃棄エネルギーおよびランニングエネルギー消費の合計)を

右軸に、エネルギー生産を左軸に示している。この図は、地域全体でのエネルギー収支の構造を理解するのに有用である。バイオマス利活用システムのエネルギー自給率を検討する際、バイオマス変換によって生産できるエネルギーに対して、ランニングエネルギー消費が目まされることが多い。本報で扱ったシナリオでは、ライフサイクルでのエネルギー消費のうち、ランニングエネルギー消費が占める割合が84%以上であった。ただし“neutral”の部分を記載していないことに注意を要する。

シナリオ 1 では、約500頭の乳牛ふん尿(25t/日、香取市内牛ふん尿利用可能量の26%)を対象とし、**実態**では堆肥を、**計画**ではメタン発酵とコジェネレーションにより電気・熱・消化液を生成した。システム全体でのエネルギー収支は、**実態**のケース1(3戸の酪農家が個別で堆肥化)でマイナス13,017GJ/年、ケース2(1戸の酪農家が個別で堆肥化)でマイナス12,878GJ/年となった。一方、**計画**では、ケース1(3戸の酪農家が共同でメタン発酵)でマイナス8,189GJ/年、ケース2(1戸の酪農家が個別でメタン発酵)でマイナス7,824GJ/年になり、エネルギー収支の観点では37~39%改善されたことになる。**計画**では、ステージ③で生成される消化液由来のエネルギー生産(代替可能な化石エネルギー)が、**実態**の堆肥由来のエネルギー生産に比べて大きくなって

Table 33 シナリオ 5 における実態と計画のエネルギー消費とエネルギー生産
Energy consumption and production in Present and Plan of Scenario 5

			①バイオマスの生産(発生)	②収集・輸送・貯蔵	③バイオマス変換	④生成物の輸送・貯蔵	⑤生成物の利用	計
実態	休耕田の維持	消費	1,025	0	0	0	0	1,025
		生産			0			0
計画	バイオ燃料原料米栽培とバイオエタノール生成	消費	15,657	4,560	29,389	0	0	49,606
		生産			16,312			16,312

	実態モデル	計画モデル
シナリオ1	乳牛ふん尿の堆肥化	乳牛ふん尿のメタン発酵
シナリオ2	豚ふん尿排水の汚水処理	豚ふん尿排水のメタン発酵
シナリオ3	生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さの焼却	生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さのメタン発酵
シナリオ4	規格外甘しょ・籾込み・食品加工残さの焼却	規格外甘しょ・食品加工残さの飼料化
シナリオ5	休耕田の維持	休耕田でのバイオ燃料原料米栽培とエタノール生成

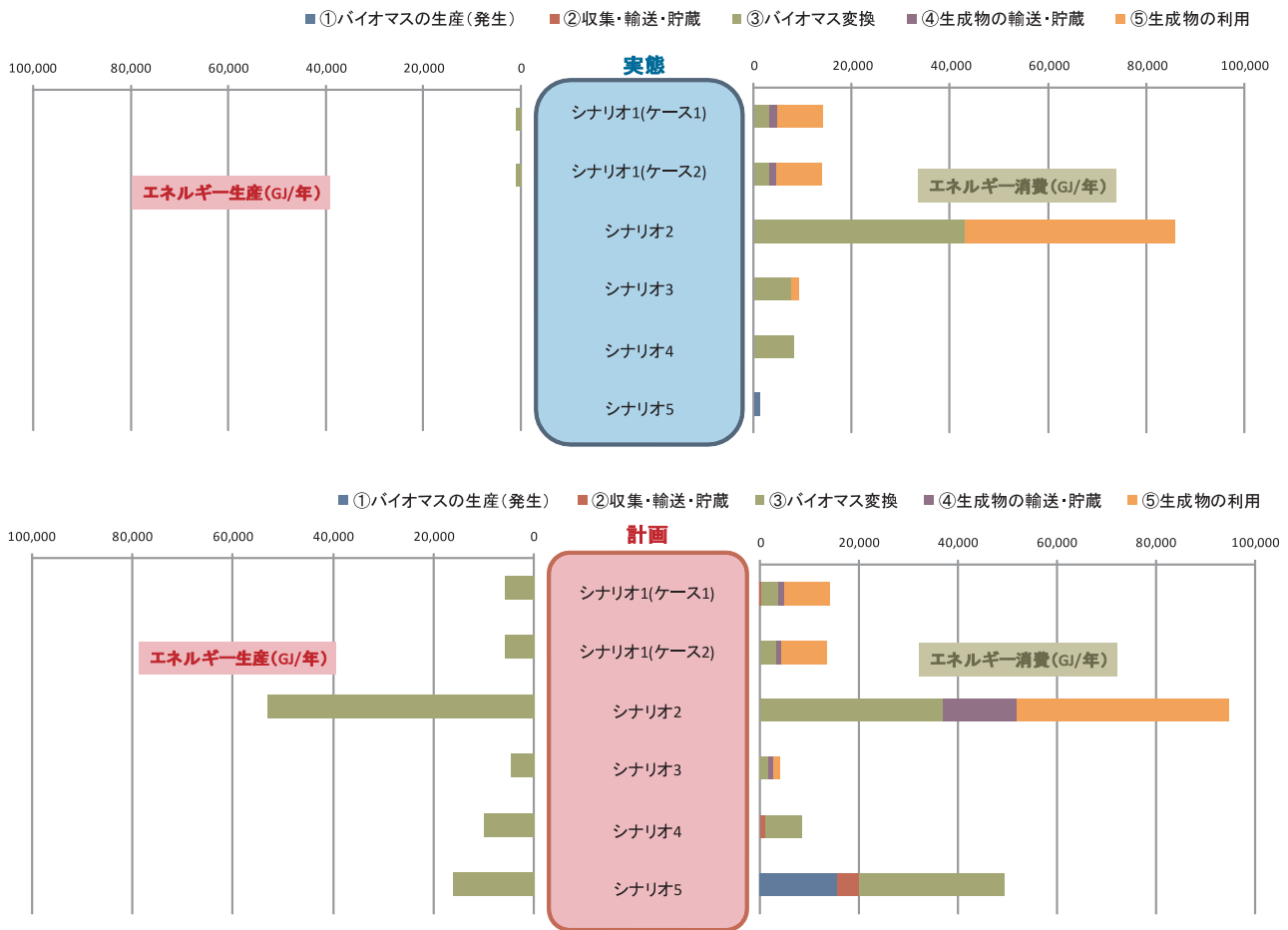


Fig.1 5シナリオにおける実態・計画のライフサイクルでのエネルギー消費およびエネルギー生産
Lifecycle-basis energy consumption and production in Present and Plan of 5 scenarios

いる。また、Fig.1からは、ステージ④におけるエネルギー消費が、実態に比べて計画で小さくなっていることが読み取れる。本報の条件下では、ステージ⑤のエネルギー消費（投入される肥料成分に基づいて算出しているため実態・計画とも同じである）を除くと、計画のステージ②、③、④で消費されるエネルギーは、ステージ③で生産されるエネルギーよりも小さく、計画は妥当であると言える。

シナリオ2では、母豚170～180頭規模の養豚一貫経営10戸より発生する豚ふん尿排水（除ふんなしで266t/日、香取市内豚ふん尿利用可能量の20%）を対象とし、実態では汚水処理を、計画ではメタン発酵とコジェネレーションを行った。実態ではエネルギー生産はなく、豚ふん尿排水の適切な処理と化学肥料を用いた農産物栽培のために85,821GJ/年が費やされる結果となった。計画では、ステージ④でのエネルギー消費が発生する一方で、ステージ③でのエネルギー消費は実態に比べて小さ

くなり、また、電力、熱、消化液由来のエネルギーが生産された。計画におけるエネルギー収支はマイナス41,856GJ/年であるが、実態と比べると50%以上の改善となっている。計画のステージ④における消化液の輸送・散布体系は、本報で評価対象とした千葉県香取市の道路事情や圃場条件に基づいて設定しており、輸送・散布車両の大型化や消化液の中継貯留槽の設置など、より効率的な輸送・散布体系を構築することにより、エネルギー消費を削減できる可能性がある。

シナリオ3では、生ごみ、生活排水処理汚泥、食品加工残さの混合物10t/日を対象とした。実態では焼却処理を、計画ではメタン発酵・コジェネレーションを行った。実態ではエネルギー生産はなく、焼却処理（ステージ③）と化学肥料を用いた農作物栽培（ステージ⑤）のためのエネルギー消費は合わせて9,209GJ/年となった。計画では、ステージ④で消化液の輸送・散布のためにエネルギーが消費されたものの、メタン発酵・コジェネ

レーション(ステージ③)でのエネルギー消費は小さく、また生成物に基づくエネルギー生産はエネルギー消費を上回った。シナリオ3の**計画**におけるエネルギー生産は、“neutral”とみなした部分を対象外とすれば、ステージ①~⑤のエネルギー消費の合計よりも大きくなり、本報で設定した**計画**は、エネルギー収支の観点から妥当であると言える。

シナリオ4では、規格外甘しょ(1,500t/年、発生量の17%)と地域内発生分食品加工残さ(3,917t/年)に加え、地域外発生分の食品加工残さ(3,283t/年)を対象とした。地域外発生分の食品加工残さを対象としたのは、規格外甘しょの飼料化の副原料が地域内だけではまかなえなかったためである。**実態**では、規格外甘しょは利用されず、食品加工残さは焼却処理される。**計画**では、これらを合わせた30t/日(300日/年稼働)から19.2t/日の飼料を生成した。**実態**における食品加工残さの適切な処理(ステージ③の焼却処理)に係るエネルギー消費は8,170GJ/年であるのに対し、**計画**では、地域外発生分の食品加工残さの輸送に係る追加エネルギー消費も含めたシナリオ全体でのエネルギー消費は8,554GJ/年と増加した。しかし、③バイオマスの変換ステージでは、化石エネルギーを代替する飼料が生成され、“neutral”とみなした部分を評価対象外とすれば、エネルギー生産はシナリオ全体でのエネルギー消費を上回る結果となった。そのため、**計画**の②収集・輸送・貯蔵ステージで飼料原料確保のために新たに消費されるエネルギー(市外発生分の食品加工残さに係る保冷装置や輸送距離の延長、規格外甘しょの収集輸送に由来)を加味しても、本報で設定した**計画**は、エネルギー収支の観点から妥当であると言える。

シナリオ5では、資源作物(バイオ燃料原料米)の生産とこれを原料としたバイオエタノール生成を扱った。**実態**では、休耕田266.5ha(香取市内の遊休水田の約70%)は維持管理作業のみを行い何も栽培しない。**計画**では、同じ休耕田でバイオ燃料原料米を栽培し、バイオエタノールを生成する。**実態**では休耕田の維持に係るエネルギー消費のみであるため、エネルギー消費は1,025GJ/年と小さい。一方、**計画**では、ステージ①における休耕田での簡易な圃場整備およびバイオ燃料米栽培、ステージ②における原料籾・玄米輸送や乾燥調製、ステージ③におけるエタノール生成に係るエネルギー消費が大きく、シナリオ全体で49,606GJ/年のエネルギー消費となった。それに対し、ステージ③で生産されるバイオエタノールおよび飼料原料が代替可能なエネルギーは16,312GJ/年であり、エネルギー収支は大きくマイナスとなった。バイオエタノール生成においては、とくに熱の消費の小さい変換技術の開発・導入、あるいは熱を供給できる他のシナリオ(たとえばシナリオ1,3)との組み合わせにより、エネルギー収支の改善を図る必要があることが示唆された。ただし、シナリオ5について

は、エタノール生成やそれに伴う原料の前処理に係る技術、変換工程の規模について十分な知見が得られず、また、エタノール発酵残さの飼料原料としてのエネルギー代替可能性についても過大に評価している可能性があるため、今後さらなる情報収集と検討が必要である。

以上のように、シナリオ1,2,3,4では、**実態**に比べて**計画**ではエネルギー収支が改善される結果となった。シナリオ5では、**計画**でのエネルギー消費がエネルギー生産の約3倍となり、エネルギー収支の観点のみで判断すれば、望ましくない結果と言える。

本報では、5対のシナリオを個別に評価した。各シナリオの対象となるバイオマスの種類や量が異なるため、シナリオ間の比較には注意が必要である。また、シナリオ1,2,3で生産された電力・熱等のシナリオ間での融通など、複数のシナリオの組み合わせにより、地域内のエネルギー収支が改善される可能性もある。これらの課題については、改めて別報で検討することとしたい。

2 エネルギー収支の評価における課題

ここでは、本報に示した評価方法の課題を整理し、市町村担当者等が評価方法を用いる際の留意点を述べる。

本報では、バイオマス利活用システムの**実態**と**計画**をシナリオとして作成・表現し、**実態**と**計画**が変わらない部分については“neutral”と考えて、その部分のエネルギーを算出していない。また、既存の産業や施設を利用するため、「評価対象外のため算出しない」あるいは「計上しない」とした部分もある。たとえば、シナリオ1の①バイオマスの生産(発生)ステージにおいて酪農経営内で調達される中型ダンプや、シナリオ5の②収集・輸送・貯蔵ステージで利用する乾燥調製施設などである。市町村等での実務においては、公正な評価となるよう、シナリオ設計時に**実態**と**計画**のシナリオをよく比較して、“neutral”あるいは「評価対象外のため算出しない」としてよいかどうかを見極めることが必要である。

評価例として示した5対のシナリオのうち、メタン発酵技術を用いたシナリオでは、異なる原料・規模を取り上げた。メタン発酵施設の規模の大小に伴う建設費の差異は、スケールファクターを用いて算出した(環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課,2006)が、他の地域における評価においては、技術の組み合わせ(破碎や固液分離などの前処理工程等)や変換規模等のスケールメリット/デメリットを考慮する必要がある。

エネルギーの算出方法については、以下のような課題が残る。まず、本報では、変換施設(建設土木)に係る施設の初期投入エネルギーは、建設費を使用年数で割った減価償却費に3EIDの「その他の土木建設」部門等の原単位を乗じて初期投入エネルギーを求めた。可能な範囲で施設建設を建設土木および設備機器に分け、設備機器については可能な限り個別に該当部門の原単位を用い

てエネルギーを算出した。しかし、施設は様々な構造物から構成されており、また設備機器についてもさらなる細分化が必要であると考えられる。本来は、その1つ1つについてインベントリを作成することが望ましい。バイオマス変換技術の内容や組み合わせにより設備機器も異なってくるが、本報ではこれらに基づく初期投入エネルギーの差異は、建設費のみによって表現している。建築物の種類別のインベントリデータは、日本建築学会(2006)等、国内でもデータが整備されている。しかし、バイオマス変換施設のような特殊な設備機器については、新たなインベントリデータの構築・蓄積が必要である。また、廃棄エネルギーについては、初期投入エネルギーの5% (建設土木) および3% (設備機器) として算出した。廃棄といっても、木材、コンクリート、金属などリユースやリサイクルされるものもあり、どの段階までを評価対象に含めるかを決定してインベントリを作成する必要があるが、本報では、市町村等が新たにバイオマス利活用施設を建設することを前提としているため、バイオマスの利活用施設の建設については、建設コストと同様に廃棄コストも用意しておく必要があるという観点に基づき、廃棄に係る金額に相当するエネルギーと考えた。数値の妥当性の検証については今後の課題としたい。

個々のシナリオで用いたデータのうち、シナリオ4の**計画**、シナリオ5の**計画**におけるバイオマス変換ステージ(規格外甘しょ・食品加工残さの飼料化、玄米からのバイオエタノール生成)については一貫したデータが得られなかった。既存の文献や調査等から必要な数値を拾い出し、計画したシナリオに当てはまるよう按分して用いているため、これらの数値の使用には注意が必要である。

また、本報では、輸送や施設運転に伴う燃料・電力等の直接的な化石エネルギー消費(直接エネルギー)に加えて、原材料・副資材や活動、サービス等に由来するエネルギー消費として間接エネルギーを、3EIDを用いて算出した。原単位に乗じる価格データは、本来一貫して生産者価格とすべきところであるが、生産者価格と購入者価格が混在している点が課題である。また、原単位は最も近いと思われる部門のものを用いたが、評価者によって異なる見解もあると思われる。とくに新たな労力の投入に対して計上した人件費に基づいた施設管理運営や、輸送に伴う間接エネルギーの算出については、人件費には社会保険や税等を含むかどうかなど、詳細な検討が必要である。

このような課題はあるが、本報では評価の簡便性を重視した。エネルギー消費としてどのような項目を挙げればよいか、またそれらの項目からどのような考え方に基づいてエネルギーを算出すればよいか、を示すことができたと考えている。

V 結 言

本報では、市町村等の「地域」を対象範囲としたライフサイクルでのバイオマス利活用システムについて、エネルギー収支、すなわち化石エネルギーの消費とバイオマス変換によるエネルギー生産のバランスを**実態**と**計画**で比較評価するための枠組みを示し、千葉県香取市を事例として具体的な評価方法を著した。

評価に当たっては、まず、対象地域のバイオマス賦存量や現状での利用状況から、利活用の計画対象となるバイオマスを決定した。次に、対象バイオマスの生産(発生)から生成物の利用までを5つのステージに分け、各ステージの物質の移動や活動の流れを表す**実態**シナリオと**計画**シナリオを作成した。地域内のバイオマス利活用のライフサイクルは、5つのステージで構成されるとともに、各ステージ内でも建設・製造、運営、廃棄の3段階のライフサイクルが設定されている。これらのライフサイクルを考慮した上で、**実態**と**計画**のシナリオ設定に沿って、各ステージでのエネルギー消費およびエネルギー生産を算出し、**実態**と**計画**のエネルギー収支を比較評価した。事例地域では、5対の**実態**と**計画**のシナリオを作成した。各シナリオで対象としたバイオマスは、乳牛ふん尿(シナリオ1)、豚ふん尿排水(シナリオ2)、生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さ(シナリオ3)、規格外甘しょと食品加工残さ(シナリオ4)、休耕田で栽培されるバイオ燃料原料米(シナリオ5)である。各シナリオの**実態**は、事例地域の現状を反映したシナリオ設定とし、**計画**は、シナリオ1, 2, 3ではメタン発酵とコジェネレーションによる電熱生産および消化液の農地利用、シナリオ4では養豚用の飼料生成、シナリオ5では玄米を原料としたバイオエタノール生成を設定した。

評価の結果、牛ふん尿のメタン発酵(シナリオ1・**計画**)、豚ふん尿排水のメタン発酵(シナリオ2・**計画**)、生ごみ・生活廃水処理汚泥・食品加工残さのメタン発酵(シナリオ3・**計画**)、規格外甘しょ・食品加工残さの飼料化(シナリオ4・**計画**)では、**実態**(シナリオ1では堆肥化、シナリオ2では汚水処理、シナリオ3では焼却、シナリオ4では鋤込みと焼却)に比べてエネルギー収支が改善された。

本報では、エネルギー収支の評価において、ランニングエネルギー消費だけでなく初期投入や廃棄に係るエネルギーも評価に含めた。既述したように、評価方法については精度や公平性における課題を残している。しかし、地域(市町村)の中でバイオマス利活用のライフサイクルを把握し、エネルギーを指標としてこのライフサイクルを追うことにより、エネルギーの需要と供給、また、地域内のエネルギー自給率をも評価することができる。

ライフサイクルでのエネルギー収支の評価は、提案されるバイオマス利活用システム導入の可否条件を判断する上で重要であり、また、エネルギー利用と密接に関わ

る温室効果ガス排出量の評価にも応用可能である。

参考文献

- 1) 菱沼竜男・栗島英明・楊翠芬・玄地裕 (2008) : LCA 手法を用いたメタン発酵施設によるふん尿処理・利用方式の環境影響の評価－堆肥化・液肥化処理との比較－, 日本家畜管理学会誌・応用動物行動学会誌, 44(1), 7-20
- 2) 環境省 (2011) : 温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度について, 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 (改正後), < <http://www.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/material/itiran.pdf> > (2011.11.24 最終確認)
- 3) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課 (2006) : 廃棄物処理施設建設工事等の入札・契約の手引き, 2006.7.18 公開, http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=8285&hou_id=7331, (2011.11.2 最終確認)
- 4) 経済産業省資源エネルギー庁総合エネルギー統計検討会事務局 (2007) : 2005 年度以降適用する標準発熱量の検討結果と改定値について, 1-29, < <http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/jukyu/resource/pdf/070601.pdf> > (2011.11.24 最終確認)
- 5) 間野和美 (2009) : ごみ焼却施設における触媒フィルターによる排ガス処理コスト等の削減に関する事例, 環境技術会誌, 134, 89-92
- 6) 中村真人 (2011) : メタン発酵消化液の液肥利用の環境影響評価, 農研機構発－農業新技術シリーズ 3, 184-187
- 7) 中村真人・柚山義人・山岡賢・折立文子・藤川智紀・清水夏樹・阿部邦夫・相原秀基 (2010) : メタン発酵プラントのトラブル記録と長期運転データの解析－山田バイオマスプラントを事例として－, 農工研技報, 210, 11-36
- 8) 中山博敬・中村和正・大深正徳 (2006) : メタン発酵施設のエネルギー収支と光熱費に与える気温の影響, 北海道開発土木研究所月報, 634, 33-41
- 9) 南齋規介・森口祐一 (2010) : 産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID) : 2005 年表 (β+版), 独立行政法人国立環境研究所 地球環境研究センター
- 10) 日本建築学会 (2006) : 建物の LCA 指針～温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール～, 第 3 版, 1-178, 日本建築学会, 東京
- 11) 農林水産省大臣官房統計部 (2010) : 平成 21 年農作物価指数 (2010.6.22 公表), 1-24
- 12) 大日方裕・石田哲也・栗田啓太郎・小野学・石渡輝夫 (2005) : 共同利用型バイオガスプラントの稼働状況とエネルギー収支－別海資源循環試験施設の稼働状況の総括－, 北海道開発土木研究所月報, 629, 27-39
- 13) 大村道明・竹内良曜・松井克則・菊池貞雄 (2005) : 個別農家用バイオガスプラントからの余剰ガスの輸送・貯蔵に関する予備的考察, 農業施設, 35(4), 211-220
- 14) 佐賀清崇・横山伸也・芋生憲司 (2007) : 稲作からのバイオエタノール生産システムのエネルギー収支分析, Journal of Japan Society of Energy and Resources, 29(1), 30-35
- 15) 清水夏樹 (2005) : 有機性資源の利活用を促進するための支援策－牛ふん尿の堆肥としての利用を例として－, 農工研技報, 203, 47-56
- 16) 清水夏樹・柚山義人・中村真人 (2009) : バイオ燃料原料としての多収米栽培におけるエネルギー収支と経済性, 平成 21 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 筑波大学, 208-209, 2009 年 8 月 6 日
- 17) 清水夏樹・柚山義人 (2010) : エネルギー収支・経済性・環境負荷からみたバイオマス利活用シナリオの評価, 農村計画学会誌, 28 巻, 論文特集号, 243-248
- 18) 清水夏樹 (2011) : バイオマス賦存量の算定方法, バイオマスタウンアドバイザー育成テキスト (農林水産省平成 22 年度国産バイオ燃料等普及促進事業) 第 5 章 2, 375-394, 日本有機資源協会, 東京
- 19) 清水夏樹・柚山義人・中村真人・山岡賢 (2012) : バイオマス利活用システムのライフサイクルを対象とした経済性の評価, 農工研技報, 212, 53-96
- 20) トヨタ自動車株式会社・みずほ情報総研株式会社 (2004) : 輸送用燃料の Well-to-Wheel 評価 日本における輸送用燃料製造 (Well-to-Tank) を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書 (平成 16 年 11 月) 19, 2004, < <http://www.mizuho-ir.co.jp/publication/report/2004/wtwghg041130.html> > (2011.10.24 最終確認)
- 21) 柚山義人・山岡賢・中村真人・清水夏樹 (2010) : ライフサイクルにみたバイオマス利活用評価の論点, 農土論集, 266, 71-76

Lifecycle-basis Evaluation of Energy Balance on the Biomass Utilization System

SHIMIZU Natsuki, YUYAMA Yoshito, NAKAMURA Masato and YAMAOKA Masaru

Summary

Biomass utilization system is consisted of 5 process stages of 1) production or generation of feedstock biomass, 2) collection, transportation and storage of feedstock biomass, 3) conversion of the feedstock biomass to demand-oriented energy and material (products), 4) storage, transportation of the products and 5) use of the products. Each of them has 3 time stages of 1) initial installation/construction, 2) running (operation) and 3) disposal. This paper tried to show the methodology of calculating lifecycle energy balance between energy consumption and production of designed biomass utilization system to contribute to the Municipal Biomass Utilization Promotion Plan under the Master Plan for the Promotion of Biomass Utilization. Energy consumption consisted of direct fossil energy and indirect energy. Indirect energy is fossil energy consumption to produce material and supplementary material or to provide services, calculated by price and the Embodied Energy and Emission Intensity Data for Japan Using Input-Output Tables.

To show the concrete procedures of evaluation, Katori city of Chiba prefecture was chosen as a representative of suburban agricultural and livestock industrial area. Five scenarios of biomass utilization system were designed that represent both present condition and planned condition. Each process stage is considered from both needed hardware and human activities. Biomass utilization in scenarios are composed methane fermentation, composting, animal feeding and so on.

The evaluation results clarified the structure of energy consumption and production for designed biomass utilization scenarios and will provide ideas to choose suitable biomass utilization plan in terms of energy profitability. The lifecycle-basis evaluation is important to ensure the sustainability of biomass utilization system. The person in charge of preparing the Municipal Biomass Utilization Promotion Plan can apply this methodology for their own plans.

Keywords: biomass utilization, lifecycle, fossil energy consumption, methane fermentation digested slurry, alternative chemical fertilizer