

デンマークにおける畜産糞尿リサイクルによる 発電および地域暖房計画の環境経済的考察

－中央集中管理型バイオガス工場を事例として－

加賀爪 優

Masaru KAGATSUME : A Study on Economic and Environmental Efficiency of Power Generation & Districts Heating System Based on the Recycling of Livestock Industry Wastes & Manure in Denmark – Based on Cases of the Centralized Biogas Plant –

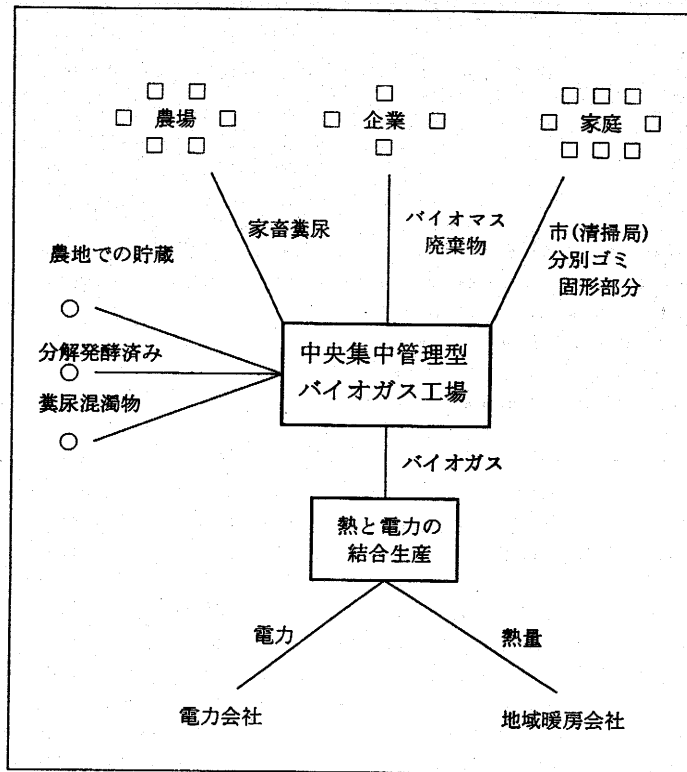
In Denmark, Centralized Biogas plant projects have been established since 1980s. As well known, pork industry and dairy industry have been major agricultural industries in Denmark and the disposition of animal industries manure and waste has been serious environmental issues in this country so far. Also, district heating system has been common and popular nationwide. And so, there were big demand for clean energy to generate heat and power for this purpose. In order to solve this situation, the project was created to establish the centralized biogas plant which could generate heat and power by using animal manure and waste. The purpose of this paper is to describe the economic efficiency and the environmental effects of the centralized biogas plant projects in Denmark.

The activities of the biogas plants have created the environmental benefits, such as the reduction of greenhouse gasses emission, mitigation of odor nuisances and the saving of natural resources through recycling. However, in economic terms, some plants have suffered from low profitability. In order to develop the centralized biogas plant projects in the future, it is necessary to decrease the dependency on the government subsidy and the industry wastes as the additional input because their supply is neither stable nor reliable. In addition to these, technical improvements are required to increase efficiency of plant operation through reduction of production costs.

1. は じ め に

デンマークでは、1980年代初期に環境保全型の資源リサイクル事業として、家畜糞尿のリサイクルによるバイオガス工場が建設された。この事業は、畜産農場の家畜排泄物を収集し、これから原料としてのバイオマスの分解発酵処理過程を経て、メタン等のバイオガスを発生させるものである。さらに、これは、このバイオガスと空気との混合気体を燃焼させ、タービンを回して発電すると同時に、その際に発生する熱を地域に還流して地域暖房として活用するという、環境保全型の資源リサイクリング事業である。図1は、典型的な中央集中管理型バイオガス工場の作業工程を示している。

図1 中央集中管理型バイオガス工場概念



(資料) 文献〔5〕より作成

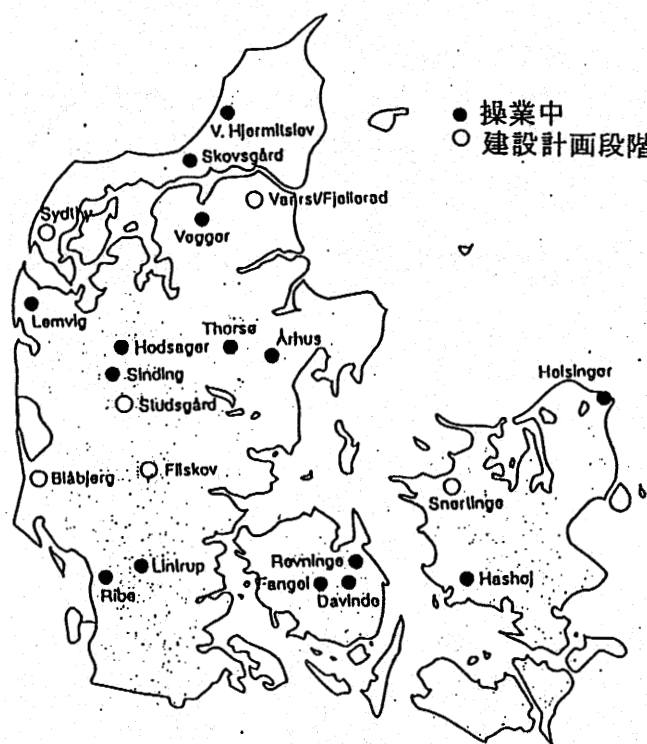
デンマークでは、従来より地域暖房が広く行き渡っており、この種の事業に対する潜在的要望は強かったことが一つの背景になっている。当初は、実験的に1つの農場と提携してそれに隣接してバイオガス工場が建設されたが、経済的には殆ど採算が採れなかった。その後、環境対策の一環から1980年代半ばに、家畜糞尿の貯蔵と農地への散布・廃棄を禁じる環境法が導入された。このことにより、農家は家畜糞尿の有効な処理・利用方法として、糞尿貯蔵施設のレンタルを提供する中央集中管理型バイオガス工場との提携参加への関心を高めたのである。現在、18カ所で中央集中管理型バイオガス工場が操業している。図2は、デンマークにおける中央集中管理型バイオガス工場の分布を示している。黒い点は、現在既に操業中の工場を示しており、白い点は建設中または計画段階の工場を示している。現在、技術的改良を加えつつ、さらに増加しつつある。

この中央集中管理型バイオガス工場は、農場からの家畜糞尿と食品産業からの有機廃棄物を混合して投入し、分解発酵処理プロセスを経て、バイオガスと肥料とを生産する。この際、糞尿は、多数の農場から工場に輸送され、分解処理後の糞尿混濁物は栄養学的に高品質化された肥料として、一部は、投入原料としての糞尿を供給する農場に、また一部は耕種作物農家に供給される。工場への投入原料は、屠場や食品産業からの有機廃

加賀爪 優：デンマークにおける畜産糞尿リサイクルによる発電および地域暖房計画の環境経済的考察

棄物が10～30%、糞尿が70～90%の比率で混合して投入される例が多い。幾つかの工場では、下水ヘドロや家庭の分別ゴミの有機物を混入している。各工場の1日当たり原料投入量は50～500トンの範囲で分散しており、その1日当たりのガス生産量は1,000～15,000立方メートル（以下では m^3 と表記）の範囲で分散している。

図2 デンマークにおける中央集中管理型バイオガス工場の立地



(資料) 文献〔3〕

この取り組みの農業・環境面でのメリットは、農民にとっては、畜産排尿処理経費の節約や肥料効率の改善に加えて、地球環境にとっても、温室効果ガス放出量の減少や安価で環境に優しい廃棄物リサイクルの実現など、多岐にわたっている。

また、単一の農場と提携して操業するバイオガス工場の場合と比較すると、中央集中管理型工場のデメリットは糞尿の輸送費が高むことである。したがって、中央集中管理型工場は複数の農場と間の総輸送距離が最小になるように配置される。ところで、糞尿に加えて有機廃棄物を投入すると、バイオガス生産量はかなり増加し、それから生成される熱と電力の形のエネルギーの販売所得を増大させる。さらに、産業廃棄物の受入料金収入からの所得も加わる。しかし同時に操業費も幾分高くなることが指摘されている。もう一つの問題は、有機廃棄物の供給量が変動的であり、恒常的に安定的な投入原

料として依存できないことである。多くの工場は協同組合会社として組織されており、糞尿を供給する農家はその株式保有者となっている。会社の理事会が工場の運営や職員雇用、工場建設、原料供給、生成された肥料の配送、エネルギーの販売、融資等に関して責任を持っている。

こうしたバイオガス工場の計画は、デンマークを始めとして、スウェーデン、ドイツ、オランダ等でも試みられているが、デンマークの計画と比べてかなり小規模で、かつ地域単位である。これに対して、デンマークでは農業省・環境省・エネルギー省の関与の下で政府の助成の下に全国規模で展開されている。

本稿の課題は、デンマークにおけるこうしたバイオガス工場の環境経済的側面について、現地調査で得た資料・情報に基づいて考察を加えることである。

2. デンマークにおけるバイオガス計画の経過

デンマークでは、以前から分散的に存在していた農場レベルの小規模なバイオガス工場に代わって、1987年以来、国家主導のバイオガス工場の建設が、エネルギー省、農業省および環境省の共同で本格的に計画されてきた。特に、中央集中管理型バイオガス工場に関しては、1988年から1991年に亘る「実行計画 (Action Program)」が実施され、また1995年までの「継続計画 (Follow-up Program)」が策定された。さらに1997年からはこの事業の効率性と経済的採算性を高めるための「開発計画 (Development Program)」が展開されている。1991年の実行計画終了時点で、このプロジェクトが経済的に自立できるためには、投入原料1 m³当たり30~35 m³のバイオガス生産水準が必要であること、また国家補助を継続する必要があることが指摘された。この生産水準は、糞尿に加えて、10~20%の産業廃棄物を混合して投入することにより達成可能であった。このことは、バイオガス工場にとっても、産業廃棄物供給者にとっても、有利な状況であったが、前述のように、産業廃棄物の供給量は極めて変動的で長期的な信頼性が低い状況にある。将来の発展のためには、産業廃棄物や国家助成に依存しなくても運営できる技術を樹立することが必要となる。そのためには、糞尿1トン当たりのエネルギー収量を増加させることが不可欠であるが、それは、次の2つのことを追求することにより実現される。一つは、糞尿の分解発酵過程においてできるだけ長く反応させることにより、変換可能な成分を多く抽出することである。今一つは、バイオガス工場からの処理済み排出物の緩衝貯蔵タンクからの残留ガスを分解発酵装置へと再収集・還流させることである。これにより、5~10%のバイオガスの追加的な増産が可能となり、今日、殆どの工場でこの技術が採用されている。

また、バイオガス工場の操業コストの35~50%が、各農場から工場への糞尿の輸送お

加賀爪 優：デンマークにおける畜産糞尿リサイクルによる発電および地域暖房計画の環境経済的考察

およびバイオガス工場から各農場への肥料用の処理済み排出物の輸送費で占められている。それ故、新しい中央集中管理型バイオガス工場を計画する場合には、提携農場との平均輸送距離が最小化されるような方法で糞尿供給者を選択し、貯蔵タンクを設置してきた。

さらに、大規模工場の場合には、輸送は、貯蔵タンクの収集設備に適合した半真空状態のローリータンカーで行われ、コンピューター管理の下に、各タンクの貯蔵量とその地理的分布を勘案して総輸送費が最小化されるように糞尿収集の場所とルートを日々最適決定している。

生成されるバイオガスに含まれる硫化水素成分 (H_2S) は悪臭の原因となる。従来、硫化水素成分を低く抑えるために、特別な化学薬品 (塩化鉄 FeCl_3) が使用され、その経費が多額に及んでいた。最近では、分解発酵装置からの排出物より分離された液体を還流させて湿気を保った容器中のバイオガスに、5%の空気を加えることによりガス洗浄を行う方法が開発され、多くの工場でこの方法を検討しつつある。

また、一日の時間帯別電力需要強度に応じて電気料金に格差を付ける新しい電気料金体系が導入された。この料金体系のもとでは、ピーク時の電気料金はオフピーク時の料金よりも数倍も高く設定されている (表1)。このことに伴って、昼間に電力会社へのガス販売収入を最大化するために、バイオガスの供給を調整することが有利となり、夜間にガスを貯蔵する誘因が高まった。そのため、多くの新しい工場では、大規模な低圧式二重膜ガスホルダーを、工場排出物緩衝貯蔵タンクの頂点部分に装備するようになった。これは、工場排出物からの追加的な残留ガスの収集還流にも役立っており、その分、ガス収量の向上につながっている。さらに、バイオガス輸送は濃縮 (液化) トラップを装備する低圧パイプ装置により配送されるようになり、従来からの高圧システムを維持する経費が節減されている。

表1は、バイオガス工場での生産物 (バイオガス、電力、熱量) の各々の販売価格を示している。バイオガスに基づいて生産された電力は全て電力会社に販売される。その電力販売価格は、1日の時間帯により異なり、夜間は百万ワット時 (MWh) 当たり136クローネ、昼間の需給逼迫時の価格は490クローネである。表中の価格は、MWh当たり270クローネの政府補助金を含めた、24時間の平均価格である。

さらに、幾つかの新しい工場では、資源リサイクリングの幅を広げるため、市町村等の行政機関 (清掃局) からの固形廃棄物も原料として受入れ、豚糞尿と混合してバイオガス工場に投入している。この場合、摂氏70度まで予熱し、分解発酵処理される。工場排出物からの公害を防ぐため、分解発酵処理後に、プラスチック等の残留物を分別する装置を備えている。

表1 バイオガス（変換後は電力と熱量）の販売価格

工 場	バイオガス (Kr/m ³)	電力 (Kr/MWh)	熱 (Kr/MWh)	備考
V.Hjermilslev	-	506	290	異なる電気料金の2つのエリア
Vegger	-	506/590	290	
Skovsgaard	-	506	290	
Davinde	-	-	295	
Revinge	1.70	506	-	
Sinding	1.70	506	-	
Fangel	-	506	295	
Lintrup	1.70	-	-	
Ribe	1.65	-	-	
Lemvig	1.75	-	-	
Hashoej	1.43	-	-	
Thorsoe	1.50	-	-	

(注) バイオガスに基づいて生産される全ての電力は電力会社に販売される。電気料金は1日の時間帯に依存し、夜間は百万ワット時当り136クローネ、昼間のピーク需要時には490クローネである。表中の電気料金は政府補助金270クローネを含めた24時間平均価格である。

(資料) 図2に同じ

デンマークでは、優遇税制を適用して再生可能なエネルギーの使用を促進するため、化石燃料等の枯渇性エネルギーに対して課される消費税が、再生可能なエネルギー源に対しては免除されている。バイオガス価格は地域間で10～20%の範囲で変動しているが、この税控除は、実質的にバイオガス1 m³当たり1.60～1.70クローネの価格補填効果を生じていると試算されている。さらに、1980年代末において、中央集中管理型工場の投資費用の30～40%は公共助成によって補填されていたが、この助成比率は現在では約20%であり、試行錯誤による運営効率の改善と耐えざる技術進歩により、公共助成への依存を徐々に低減させている。バイオガス工場の経済的効率性は年次毎にも大きなばらつきがあり、また工場間でも大きな開きがある。傾向として、初期の頃の比較的小規模な工場は財政的に困難に直面しており、逆に、最近の大規模な工場は良好な経済状態を示している。

同じ北欧または西欧諸国の中で、デンマークで特にバイオガス工場の計画が発展した前提条件については幾つかの要因が考えられる。まず第1に、GDPに占める畜産業の比重が高く、それ故、原料となる畜産糞尿の排出比率が高いことである。このことは、デンマークでは、欧州諸国の中でも、特に糞尿排出量の多い酪農や養豚の国際競争力が強く輸出比率が高いことに表れている。第2に、国家補助により、エネルギー価格、再生可能エネルギー源の市場環境、金融・投資面に関して、バイオガス工場の計画が他国以上に優遇されていることである。さらに、伝統的に農民協同組織が高度に発展していたことも重要な要因の一つである。

多くの工場では、生成されたバイオガスは専ら熱と電力を同時に生産するために使用されている。その際、バイオガスのままの状態では販売する場合に得られる価格は1 m³当たり約1.7クローネであるが(表1)、熱と電力に変換して販売すると、付加価値生産物

加賀爪 優：デンマークにおける畜産糞尿リサイクルによる発電および地域暖房計画の環境経済的考察

としてのエネルギーの価値は、同じくバイオガス1 m³あたりに換算して2.50クローネに上昇する。バイオガスに基づく熱と電力生産からの所得の約50%は補助金制度に依拠している。それ故、電気の販売原価（補助金無しの平均価格）はキロワット時当たり0.25クローネであり、他の諸国に比べて安くなっている。

なお、地域暖房に関与するバイオガス工場に関しては、1987年以来、インフレ連動型の特別融資計画が導入された。この貸付タイプは、借り入れ利率がインフレに連動して指数化されて調整される仕組みになっており、実質的には、通常の担保融資に比べて年平均支払い額は低くなる。このように、再生可能なエネルギー源に基づく産業活動は、優遇税制に加えて、融資面でも優遇されているといえる。さらに、この税制面および融資面での優遇措置に加えて、前述したように、中央集中管理型バイオガス工場は、そのエネルギー生産活動部分に関して、デンマーク・エネルギー省から投資に対する助成を受けている。この助成率は、1980年代には30～40%であったが、その後の技術進歩を反映して、現在では、約20%になっており、今後、徐々に低下させることを目標にしている。この助成はバイオガス工場のエネルギー生産部分に対するものであるが、一方、バイオガス工場と提携する農場に対しても、その糞尿貯蔵タンク設備の建築投資に対して、40%の一般助成計画が実施されている。農民は、糞尿の農場散布が禁止され、1995年秋までに、9ヶ月分の糞尿貯蔵設備を建築することが義務付けられた。この貯蔵タンクは、バイオガス工場が建設して農民にレンタルするケースが多い。その場合、究極的にはこの助成は、中央集中管理型バイオガス工場の「貯蔵および輸送」部分に対する助成となる。

バイオガス工場には、その投入物の内容および産出物の販売形態に関して種々のタイプがある。まず、投入原料に関して基本的に共通していることは、畜産糞尿を投入原料として使用していることである。これに産業廃棄物や市清掃局からの分別ゴミを混入する程度は各工場間で差があるが、基本的には畜産糞尿をベースにしている。また産出物に関して、バイオガスのみをガス会社に販売するタイプとバイオガスから発電してその電力を電力会社に販売し、同時に発生する熱量を地域暖房会社に提供するタイプとに大別できる。最近では、次第に後者の方が優位を占めるようになった。さらに、提携している農場数にも差があり、初期のものは、単一の農場にバイオガス工場を併設するものであったが、これでは経済的採算性が合い難く、次第に提携農場数の多い中央集中管理型工場へと重点が移ってきた。

3. バイオガス工場の経済性と収益性

1980年代半ばの操業開始以来、中央集中管理型バイオガス工場の運営効率はかなり改善され、さらに新しい工場が次々に建設されるにつれて、その経済性が改善されつつある。1990年代に入って、その総費用（運転および資本費用）は、投入されるバイオマス 1 m³当たり50～60クローネ（7～9ドル）の水準であった（表2）。この費用のうち、約30％は各農場とバイオガス工場との間でのバイオマス輸送に関連するものであり、残りの70％はバイオガス工場の資本および運転費用に関するものである。表2は、これらの費用を、バイオガス工場の収入、（つまりエネルギー販売収入＜補助金部分は控除＞、産業廃棄物の引き取り料金収入）、さらに農家と産業廃棄物供給者に対する便益となる経費節減とを比較している。なお、バイオガス工場の収入にはこの他に、各農場への貯蔵タンク施設のレンタル料収入および分解発酵処理後の排出バイオマスから再生される肥料販売収入があるが、相対的に少額であるため、この表では捨象している。

表2 中央集中管理型バイオガス工場でのバイオマス分解処理からの所得と支出
（バイオマス 1 m³当たり）

	デンマーク・クローネ	US\$
バイオガス純生産額	25	3.6
農民の経済的便益	5	0.7
産業廃棄物の受入手数料収入	5	0.7
産業廃棄物供給者の経済的便益	10	1.4
所得(エネルギー販売、手数料、経費節約額)	45	6.4
中央集中管理型バイオガス工場運営費	18	2.6
中央集中管理型バイオガス工場資本費	22	3.1
糞尿輸送、運営費	12	1.7
糞尿輸送、資本費	4	0.6
運営費および資本費	56	8.0
利 潤	-11	-1.6

（資料）文献〔9〕

以下の3つの点を指摘しうる。

(1) 1992年時点で、10の中央集中管理型工場が稼働しており、それらは投入原料としてのバイオマス 1 m³当たり22.5m³のメタンを生産する技術水準に達していた。これから、分解発酵過程でのエネルギー消費分を控除すると、ネットのエネルギー生産は、バイオマス 1 m³当たり20m³が残る。この純エネルギー生産は 1 m³当たり1.25クローネの市場価格で販売される。しかし、デンマークでは、再生可能エネルギーに対して、税制上の優遇措置が採られており、その国家補助金部分の効果を考慮すると、実際の販売価格は1

加賀爪 優：デンマークにおける畜産糞尿リサイクルによる発電および地域暖房計画の環境経済的考察
 m³当たり2.50クローネとなる。

表3 バイオガス工場における所得の推移（単位：千クローネ）

工 場	建築年	1日当り バイオマス 処理量	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	損益 分岐点
Fangel	1989	150	1533	1225	1458	2422	2247	2842	2800	2600
Ribe	1990	400	-1422	472	1904	2657	2895	3230	3500	2700
Lintrup	1990	350	329	2762	2350	2822	3622	3605	3400	3500
Lemvig	1992	410			318	2393	3927	4642	4000	3500
Hashoej	1994	130					490	1502	1480	1400
Thorsoe	1994	285					303	1482	2200	1800

（資料）図1に同じ

表4 バイオガス工場における生産費（1995年）

（単位：バイオマス1 m³当り、バイオガス純生産1 m³当りクローネ）

	Fangel	Ribe	Lintrup	Lemvig	Hashoej	Thorsoe
1日当たりバイオマス処理量	137	391	323	369	116	278
バイオマス1 m ³ 当りバイオガス収量（m ³ ）	48	30	34	38	44	28
バイオマス輸送	20	21	20	23	17	20
バイオガス生産	59	34	47	49	62	40
バイオマス1 m ³ 当り総生産費	79	55	67	72	79	60
バイオガス1 m ³ 当り総生産費	1.81	2.06	2.2	2.11	1.97	2.46

（資料）表3に同じ

(2) 中央集中管理型バイオガス工場へ原材料としての糞尿を供給する各農家にとっての金銭的な便益は、第1に、工場からの処理済み排出物が効率性の高い肥料として還元されるので、別途に化学肥料を購入する経費が節約されることである。また第2に、デンマークの環境保全規則により糞尿の農地への直接散布は禁止されており、各農場は9ヵ月分の糞尿貯蔵施設の設置を義務づけられているが、この貯蔵施設がバイオガス工場からレンタルにて提供され、またその関連設備投資への国家助成があるため、その経費が節約されることである。さらに、以前になされていた糞尿の土壌散布に要する時間が節約されることも重要である。

(3) デンマークで典型的なバイオガス工場の場合、原材料としてのバイオマスは、その80%が糞尿であり、残りの20%は屠殺場や種々の食品産業からの有機廃棄物から構成され、それらが混合されて投入されている。産業廃棄物の処理費用は、その場所や廃棄物のタイプに応じて大きく異なっているが、バイオガス工場へ提供する場合以外の処理方法と比べて、廃棄物1 m³当たり50クローネ節約できると推定されている。またデンマー

クの中央集中管理型工場でリサイクルされる産業廃棄物の約半分は、代替的な処分方法として、埋め立てに処理されてきた。この当時、産業廃棄物の受け入れに対してバイオガス工場が徴収する平均的引き取り料金は、1 m³当たり25クローネであるに過ぎない。従って、廃棄物放出産業にとって、他の処理方法よりもバイオガス工場に提供することにより大きく経費を節減できることになる。

また、表3は、6つの工場における工場建設年、1日当たりバイオマス処理量、1996年までの所得の展開過程および損益分岐点となる所得水準を示している。これで見ると、損益分岐点は1400クローネから3500クローネへと広がっており、各工場で大きな違いがあるが、どの工場でも所得水準は上昇しつつあり、最近時点では殆どの工場で損益分岐点を超える所得を上げていることが分かる。

さらに表4は、これらの代表的な工場における、1995年のバイオガス生産費をバイオマス（＝投入物）とバイオガス（＝産出物）各単位量（1 m³）当たりの金額（クローネ）で示したものである。各工場の直面する市場条件や1日当たりの処理量に応じて、原料バイオマス単位量当たり生産費や生産されたバイオガス単位量当たりの生産費にも大きな差異が存在する。

表5 バイオマス1 m³当り生産費の内訳と範囲

（単位：バイオマス1 m³当りクローネ）

生産費水準のシナリオ	低い生産費水準	高い生産費水準
輸送費	16	18
バイオガス生産費	34	38
総生産費	50	56

（資料）図1に同じ

表6 種々の生産費とガス収量の下での経済的に採算の採れるガス価格

	低い推定	高い推定
バイオマス1 m ³ 当りのバイオガス収量25 m ³	1.67	1.93
バイオマス1 m ³ 当りのバイオガス収量30 m ³	1.37	1.59
バイオマス1 m ³ 当りのバイオガス収量35 m ³	1.16	1.34

（資料）図1に同じ（単位：クローネ）

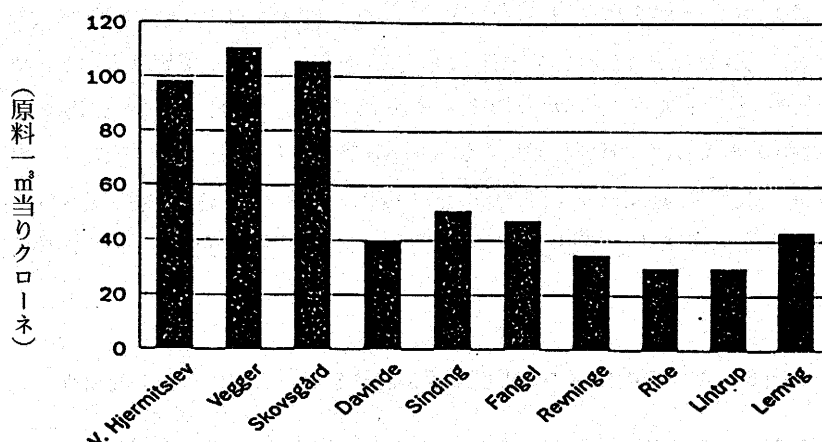
表5は、原料バイオマス1単位当たりの輸送費、ガス生産費および総生産費について、高低2通りの想定に基づいて推定し、幅を持たせて示している。

表6は、生産費およびガス収量の種々の想定の下での経済的採算の採れるバイオガス価格を示している。経済的に採算のとれるバイオガス価格は、最良の場合（収量が高くて生産費が低い想定）でも1.16クローネであり、また最悪の場合（収量が低くて、生産

加賀爪 優：デンマークにおける畜産糞尿リサイクルによる発電および地域暖房計画の環境経済的考察

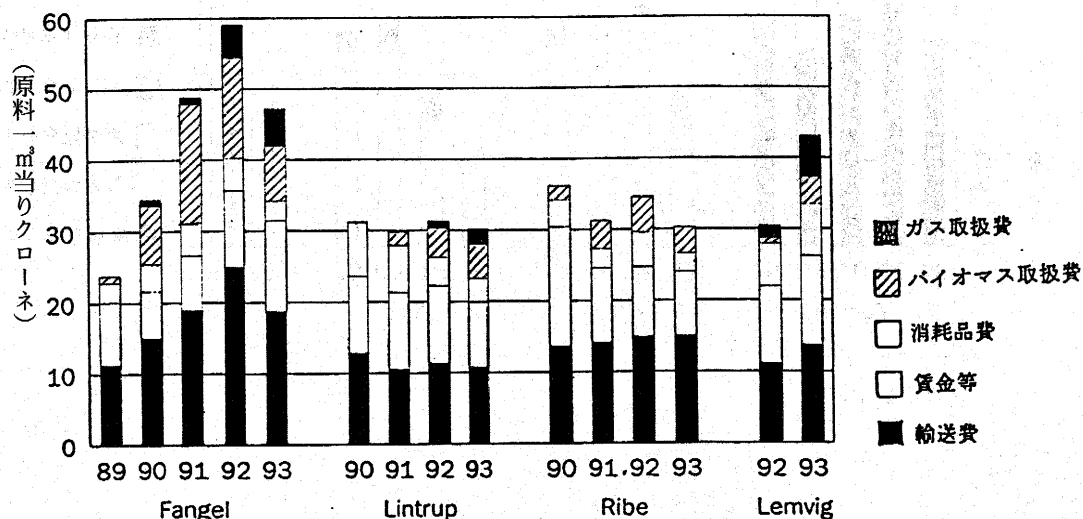
費が高い想定) では1.93クローネとなっている。これらの値は、技術進歩と操業効率の上昇により以前よりも低下してきているが、後述の表9と比較すれば、廃棄物受け取り料金や融資のタイプにより、採算の採れるガス価格が大きく影響されることが分かる。

図3 原料1 m³当たりの操業費 (1993年)



(資料) 図2に同じ

図4 最新4工場における総操業費



(資料) 図2に同じ

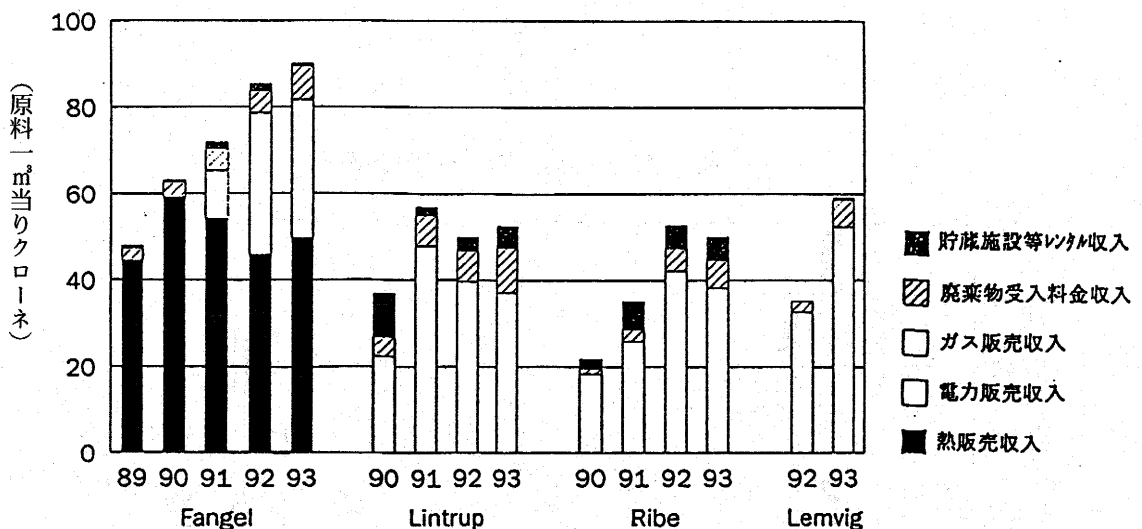
図3は、代表的なバイオガス工場における原料1単位当たりの操業費を示している。生産形態の差および建設年に応じて操業費に大きな違いがあることがわかる。左側の3

つの工場は建設年が古く、他の工場に比べて操業費が高くなっている。

図4は、4つの工場について、その原料単位当たりの操業費とその内訳の推移を示している。どの工場でも、輸送費の費目が最大の構成比率を示していることが分かる。

また、図5は4つの工場における所得水準の内訳とその推移を示したものである。Fangel工場は従来は地域暖房会社に熱のみを販売していたが、契約上の上限があり、1991年以後は、電力と熱を販売するようになった。他の3工場はガス販売が主であるが、中でもLemvig工場は、木材チップを投入している点で、他の工場と異なっている。木材チップの価格はバイオガスの半分以下であるので、その分、収益性は高くなっている。またRibe工場の場合には、電力会社がガスの輸送費等を負担するので、その分、ガスの販売価格は、他の工場よりも安くなっている。一般的に、総所得の80~90%はエネルギーの販売から生じており、残りの10~20%が、主に産業廃棄物の受入料金収入から生じている。

図5 4つの中央集中管理型工場における原料1 m³当たりの総所得



(資料) 図2に同じ

4. バイオガス計画の農業および環境面への効果

(1) 温室効果ガスの放出削減効果

つぎに、中央集中管理型バイオガス工場による資源リサイクリングのもつ農業および

加賀爪 優：デンマークにおける畜産糞尿リサイクルによる発電および地域暖房計画の環境経済的考察

環境面への効果について考察しておこう。表7は、中央集中管理型バイオガス工場におけるバイオマス1 m³の分解発酵処理によるエネルギー純生産量と温室効果ガス放出量の変化を示している^(注1)。

表7 中央集中管理型バイオガス工場における分解発酵処理からの
純エネルギー生産量と温室効果ガス放出量の変化

(バイオマス1 m³当り)

	純エネルギー生産量 (百万ジュール)	CO ₂ 放出量の変化 (kg)
バイオガス純生産	716	-68
糞尿輸送のための燃料	-35	3
科学肥料生産の減少からの間接的節約	30	-3
メタン放出の減少 (CO ₂ 温室効果に換算)		-61
酸化窒素 (N ₂ O) の放出量の変化		?
合 計	711	-129

(資料) 表2に同じ

バイオガスは、再生可能なエネルギー源である上、石油等の枯渇性の化石燃料に比べて、温室効果ガスの放出が削減されるという利点を有している。前述のように、中央集中管理型バイオガス工場の場合、生産されたバイオガスは熱と電力の生成のために使用されるが、その際、電力は変換率約35%という高い効率性で生成される。それ故、同一水準のエネルギー量を生成する場合に、火力発電等での化石燃料投入に伴う二酸化炭素の放出を削減するのに貢献している。また、専門書によれば、一般的に、バイオガスは、有機物が酸素の無い状態で分解発酵される時に発生し、メタンと二酸化炭素と硫化水素、窒素等を含んでいる。燃焼すると5500～6500カロリーの熱量を発生するとされている。これは、天然ガスや液化石油ガスなどの都市ガスとほぼ同様のエネルギー効率を有していることになる^(注2)。

さらに、この場合、もし、この畜産排泄物や有機物がバイオガス工場に投入されずに廃棄されたとすると、それから大気中にメタンが直接放出されることになるが、このように畜産廃棄物や有機物がバイオガス工場で有効利用される場合には、その分、地球温暖化への影響が削減されることになる。因みに、バイオマスの無酸素状態での分解発酵過程から放出されるメタンの地球温暖化の潜在力は、二酸化炭素に比べて、重量単位あたり19倍大きいと言われている。ただ、空気中での濃度が二酸化炭素に比べて遙かに低いので、今のところ全体としての地球温暖化効果は二酸化炭素ほど深刻ではないが、(その効果は100年間の長期に亘って持続的に影響し)、重量当たりの影響力としては無視できない。同様に、酸化窒素N₂Oの重量当たり地球温暖化効果についても、二酸化炭素と比べて290倍大きいと言われている。それ故、酸化窒素の僅かな変化でも大きな

温暖化効果を生じさせることになる。しかし、現在のところ、酸化窒素の形成過程に関する微生物学的な研究は十分には蓄積されていない。

これに加えて、家畜糞尿や酸化窒素成分が工場で分解発酵処理されることにより、バイオガス工場からの発酵処理済み排出物が未処理の糞尿そのものに比べてより効率の高い肥料として再利用されるようになる。これは、農地に散布された場合、土壌中での脱窒作用を少なくし、その分、メタンや酸化窒素の放出が削減される。Fenger *et al.* (文献〔4〕、1990、p61) は、未処理の糞尿中の窒素肥料成分の0.5%が、土壌中の微生物変換により酸化窒素として失われることを推定している。さらに、こうしたバイオガス工場の処理済み排出物の再利用としての肥料は、粘性が低いために土壌中への浸透が早く、養分のロスが少ない上に、地下水汚染の程度が低くなることが指摘されている。

さらに、最近では、バイオガス工場からの排出物貯蔵から生じる残留メタンを貯蔵タンクから処理装置へと再収集還流してエネルギー効率を高めているので、糞尿を未処理のまま貯蔵または農場散布する場合に比べて、メタンの放出は削減される。その上、バイオガス工場への投入処理が無い場合にはゴミ埋め立て地に回されるであろう有機廃棄物からのメタン発生が削減されることになる。この削減分は中央集中管理型バイオガス工場でのバイオガス生産の約20%に達している。これは、1992年に分解発酵されたバイオマス1 m³当たりメタン4.5 m³ (=3.2トン) の比率に相当する。さらに、ゴミ埋め立て地(面積)自身も有限資源であり、その使用が節約される分、環境保全と有限資源の持続的活用という目標に合致している。

(2) 大気汚染の軽減効果

一般に、工場活動には、二酸化硫黄SO₂、二酸化窒素NO₂および粉塵などの大気汚染分子の発生が伴う。デンマークの中央集中管理型バイオガス工場の経験では、代替的な燃料を用いた場合に比べて、二酸化硫黄の放出は3分の1に減少し、粉塵微粒子の放出は10分の1に減少することを示した。しかし、窒素酸化物NO_xの放出は、旧式のエンジンを用いた工場の場合2.5倍に増加したものもある。最近では、近代的な技術を取り入れたエンジンを使用することにより、代替的燃料を使用した場合と同程度に収まっている。

分解発酵処理後のバイオマスは、未処理の糞尿に比べて、アンモニア成分の濃度が高く、pH値も高い。このことは、貯蔵中や散布後の発酵作用によるアンモニアの損失が大きくなるという危険性があることを意味している。それ故、デンマークでは、排出物貯蔵タンクからのアンモニアの蒸発を防ぐために、特製カバーの装備を義務づけており、その多くはバイオガス工場の処理装置に残留ガスを再収集する設備を備えている。この貯蔵タンクおよび残留ガス収集還流設備はバイオガス工場からレンタルにて提供されている場合が多い。そのレンタル料がバイオガス工場の収入にもなり、提携農場にとって

加賀爪 優：デンマークにおける畜産糞尿リサイクルによる発電および地域暖房計画の環境経済的考察

は、貯蔵タンク建設費の自己負担分の節約に貢献しているのである。

(3) 水質汚染の軽減効果

前述の如く、中央集中管理型バイオガス工場での分解発酵の過程で、処理済みの排出物は、肥料としての価値が成分的に高められている。そのため農家での作物生産における施肥効果が改善される。因みに、牛糞の場合はカリ成分の濃度が高く、また豚糞尿の場合は磷成分の濃度が高い。現状では、両者が混合されて投入されていることと、さらに、アンモニアとして有機的に結合された窒素が分解発酵過程で解放されることにより、バイオガス工場での処理後の排出物は、肥料としての成分価値が改良される。従って、中央集中管理型バイオガス工場を運営する協同組合組織が、工場からの排出物を肥料として各農場に還付配送するのも効率的となり、その販売は工場の収入の一部となる。また、これにより、農家は、通常の化学肥料の使用量を節約することができる。

デンマークでは、畜産排尿による地表水や地下水の汚染を厳しく規制しており、その直接散布を禁じている。当然ながら、農薬・肥料による水質汚染も規制されている。中央集中管理型バイオガス工場のこれまでの操業から、肥料使用の効率が10%向上したことが指摘されている。施肥効率の向上は、栄養分の損失（作物に吸収されずに土壤中に残留する栄養分）の減少を意味し、その結果、漏出残留栄養分による水質汚染が軽減されることになる。他方、市清掃局の分別ゴミを投入物に混入している工場の中には、その有機質成分を無酸素状態で分解発酵処理する工場設備からの廃液の一部を下水道に放出している所もあり、この部分は水質汚染につながる危険性を孕んでおり、今後の検討課題となっている。

(4) 資源消費の節約効果

デンマークの畜産廃棄物を利用したバイオガス工場は、既に指摘したように幾つかの点で、有限な枯渇性資源の消費節減につながっており、その意味で、環境資源保全に貢献する持続可能な産業活動であるといえる。つまり、この工場活動は、熱量や電力等、同等のエネルギー源を産出するために必要とされる化石燃料とミネラル栄養素（特に磷とカリ成分）の双方の消費を節約することになる。

結局のところ、バイオガス工場の生産活動は、畜産廃棄物等を原料としてバイオガスを中間生産し、これから、電力と熱量を結合生産し、さらにその過程で排出される肥料をも複合生産する。つまり、工場排出物中のアンモニア20%（約1 m³当たり0.7kg）と磷30%（1 m³当たり0.3kg）が化学肥料に置き換わることになる。このことはこの量の化学肥料の生産のために消費されるエネルギー（約30MJ）を節約できることを意味している。

さらに、ますます増大する産業廃棄物はその処理問題に直面しており、伝統的な方法

では、ゴミ処理場の埋め立て空間が必要となるが、近年これがダイオキシンなどの深刻な公害問題を引き起こしている。産業廃棄物のバイオガス工場への投入処理は、資源リサイクルを通じて、これに対する有効な手だての一つとなっている。埋め立て地自体も限られた資源であることから、バイオガス工場のこの効果もまた、有限資源の節約という意味で環境保全的である。

(5) 悪臭公害の軽減効果

一般的に、畜産公害のかなりの部分は、その悪臭によるものである。多くの酪農場のように、居住地の比較的近くに立地する畜産農場の場合には特に深刻である。畜産農場に限らず、耕種作物農家でも、作物による栄養吸収を効率的にするために、通常、畜産農家から仕入れた糞尿の散布は、春先に行われる。それ故、その悪臭による被害は深刻となるケースが多い。その点、バイオガス工場による糞尿等の無酸素状態での分解発酵処理は、この悪臭のもとを分解し、工場からの処理後の排出物を最終的に無臭の肥料に変換するので、糞尿を農場へ直接散布することによる悪臭公害を大幅に軽減している。

また、バイオガス工場およびその周囲における臭いに関しては、各工場とも木材チップフィルターを装備し、全てのタンクを閉鎖して、中央換気装置を通じて半真空状態を維持することにより対処している。さらに、悪臭を伴う空気については、ガスボイラーで燃焼し、熱量生成に回している。

周知のとおり、近年、環境保全への関心が急速に高まっており、その対策にますます高い優先度が与えられている。そのために必要とされる追加的費用とそれから得られる環境改善便益とのバランスが重要となるが、客観的な尺度設定は必ずしも容易ではない。

前述の表2に示すように、過去のバイオガス工場での経験では、分解発酵されたバイオマス1 m³当たり11クローネの赤字を生じている工場がかなりある。しかし、この金銭的赤字は、以下のような定性的（非金銭的）な環境改善便益と比較考量して、判断されねばならない。

つまり、(a)二酸化炭素などの放出129kgの減少（表7）、(b)二酸化硫黄および粉塵微粒子の減少、(c)窒素および磷成分の有効性の10%改善による施肥効率の改良とそれによる水質汚染の減少、(d)化石燃料、ミネラル栄養分および埋め立て空間などの資源消費の節減、(e)糞尿の農地散布からの悪臭公害の軽減、などの環境改善が上記の金銭的赤字を相殺すると見るかどうかであるが、デンマーク政府および国民の見解はこの点について、肯定的であることは言うまでもない。中央集中管理型バイオガス工場の運営費用の一部は、政府により助成されており、またバイオガスのような再生可能なエネルギーの販売価格は税制上、優遇されている。しかし、その助成率は技術改善の達成とともに縮小してきており、今後も低下させることを目標としていることは、既に指摘した通りである。

5. バイオガス工場の将来展望

中央集中管理型バイオガス工場の長期的な戦略は、供給が不安定な産業廃棄物と投資助成への依存をなくして、経済的自立性を達成することである。そのためには、操業費用、可能な所得、融資タイプおよび投資の大きさに注目することが重要である。表8は、4つの代表的な工場と産業廃棄物への原料依存を少なくした場合のモデル工場における経済収支の内訳および所得水準を示している。

表8 各工場における収入、費用、所得の内訳 (単位: Kr/m³)

工場名	Fangel	Lintrup	Ribe	Lemvig	モデル工場
バイオガス生産量 (百万m ³)	2.819	3.666	4.068	4.726	-
原料投入量 (1000m ³)	56.7	131.8	140.0	150.4	
ガス収量 (m ³ /m ³)	49.7	27.8	28.9	31.4	30.0
ガス価格	-	1.70	1.65	1.75	1.65
[販 売]					
熱	50				
電力	32				
ガス		38	38	52	44.5
廃棄物受入収入	8	11	6	6	
排泄物貯蔵設備レンタル収入		4	5		
その他		1		1	
総収入	90	54	49	59	44.5
[費 用]					
輸送	18.8	10.8	15.1	13.8	10.0
賃金その他	12.5	8.6	8.8	11.8	7.5
消耗品	2.9	3.8	2.6	3.2	2.5
分解発酵処理に伴う熱消費	0	0	0	4.6	0
バイオマス取扱	7.7	4.8	3.6	3.7	4.5
ガス取扱	1.5	2.2	0.1	0.6	0.5
熱・電力生成工場及び化学薬品	3.8	0	0	5.3	0
総費用	47.3	30.2	30.2	43.1	25.0
所得	42.7	23.8	18.8	15.9	19.5

(資料) 図2に同じ

表8に示すように、将来のモデル工場では投入原料1 m³当たり総操業費25クローネが達成可能とされている。これは、これまでの最良成果のさらに15～20%の費用削減である。この目標に到達するための主な前提条件は、総輸送距離の最短化、農場での運搬施設の改善、設備の信頼性向上と建設方法の簡素化、脱硫黄用の化学薬品を要しない低圧ガスシステムの導入、自動化の推進などである。

達成可能な所得水準については、有機廃棄物を使用しないモデル工場の場合には、投

入原料 1 m³ 当たりバイオガス 30 m³ の収量が達成可能である。もしこの目標を達成するには、固形成分比率の増大と有機物質からのガス収量を増大させねばならない。さらに、貯蔵タンクからのガス抽出も収量を増加させる一つの方策である。将来のモデル工場に対する所得は変動的で、産業廃棄物の存在や販売市場の潜在性などの工場立地現場の経済環境に大きく依存する。原料 1 m³ 当たり 44.5 クローネという計算上の総収入は、産業廃棄物は殆ど投入しない状況を想定しており、従って、産業廃棄物の受入れ料金収入の期待できない想定での推定値である^(注3)。

融資の形態については、中央集中管理型バイオガス工場は投資の懐妊期間が長く、投資資本に比べて所得が相対的に低いことが特徴である。このことは、平均担保支払いが低く、償還期間の長い融資タイプを要求する。

表 9 バイオガス生産のモデル工場における経済的採算の採れる最低ガス価格

バイオマス m ³ 当たり バイオガス収量	融資形態	採算の採れるために必要なガス価格 (バイオガス 1 m ³ 当たり クローネ)		
		廃棄物受入料金収入 バイオマス m ³ 当たり 0 クローネ	廃棄物受入料金収入 バイオマス m ³ 当たり 10 クローネ	廃棄物受入料金収入 バイオマス m ³ 当たり 20 クローネ
30 m ³	インフレ連動型融資 返済期間 20 年	1.8	1.4	1.1
	9% 担保融資 返済期間 20 年	2.1	1.8	1.5
	11% 銀行貸付 返済期間 10 年	2.5	2.1	1.8
35 m ³	インフレ連動型融資 返済期間 20 年	1.5	1.2	0.9
	9% 担保融資 返済期間 20 年	1.8	1.5	1.2
	11% 銀行貸付 返済期間 10 年	2.1	1.8	1.5
40 m ³	インフレ連動型融資 返済期間 20 年	1.3	1.1	0.8
	9% 担保融資 返済期間 20 年	1.6	1.3	1.1
	11% 銀行貸付 返済期間 10 年	1.8	1.6	1.3

(資料) 図 2 に同じ

表 9 は、ガスの収量、廃棄物受入料金収入および融資形態の 3 種類の項目について各々 3 つの条件の組合せからなる 27 のシナリオの下で、財政的に採算の採れるガス価格を示している。

表 9 は、ガス価格を高く設定することができない地域や国でも、産業廃棄物の受入搬入料金とガス収量との組合せが適当であれば、経済的採算性は達成できることを示している。例えば、投入原料 1 m³ 当たりのガス収量が 35 m³ であり、廃棄物受入料金収入が投

入原料 1 m³当たり10クローネであるとすれば、経済的に採算が採れるために必要なガス価格は、融資条件の有利さに応じて変動するが、1.2クローネから1.8クローネの範囲となる。この場合、10年返済銀行融資の場合には、20年返済インフレ連動型融資に比べて、採算が採れるために必要なガス価格は50%高くなる。しかし、融資期間10年のもとで採算が合う場合、それを20年の償還期間について計算すれば、その収益生はかなり高くなることも考慮すべきである。その分を加味すれば、20年の全期間については、より低い価格でも、経営状況は悪化しないことになる。

前述したように、表9は典型的なバイオガス工場において、経済的に採算の合う最低ガス価格を示している。この価格は、当該工場が直面する諸条件の関数として示される。その条件とは、ガス収量、産業廃棄物の受入料金収入、融資形態の3つである。ガス収量については、原料となるバイオマス 1 m³当たりのガス収量30 m³、35 m³、40 m³の3つのケースを想定し、また融資形態については、インフレ連動型返済期間20年、返済期間20年利率9%担保融資、返済期間10年11%銀行貸付の3タイプの各ケースである。さらに、産業廃棄物の受け入れ料金収入については、バイオマス 1 m³当たり無料、10クローネ、20クローネの3つのケースである。他の条件を一定とすれば、ガス収量が高くなるほど、採算の合う最低ガス価格は低くなる。同様に、産業廃棄物の受け入れ料金収入が高くなれば、採算の合う最低ガス価格は低くなる。さらに、融資形態についても、最も有利なインフレ連動型20年返済融資のケースから、より条件の厳しい返済期間10年11%銀行貸付のケースへと融資条件が厳しくなるほど、採算の合う最低ガス価格は高くなる。例えば、ガス収量が40 m³で、廃棄物受け入れ料金収入が20クローネの場合で、融資の形態が20年返済9%の担保融資の場合には、経済的採算の合うガス最低価格は1.1クローネとなる。因みに、エネルギー省の指摘によれば、たとえ、熱販売の可能性がなく、ガスが電気のみに変換される場合でも、電気価格がキロワット時当たり0.6クローネ以上であれば、バイオガス工場の経済的採算性を満たすこのガス価格は実現可能である。

バイオガス工場の将来的な発展のためには、既存のガス輸送システムとの競合の問題がある。天然ガス輸送システムは既に全国的に張り巡らされている。また、バイオガスと天然ガスとの複合輸送制度の充実拡充や2種類のガスによる二重燃料エンジンの普及が今後の課題となる。

また、バイオガス工場への原料バイオマスは、人体や家畜に有害な病原菌を含んでいる。既述したように、バイオガス工場からの排出物は高品質の肥料として再生利用され、農地に散布されるので、衛生的に殺菌する必要がある。投入原料としてのバイオマスの中でも、下水ヘドロや家庭からの分別ゴミは、糞尿や産業廃棄物よりも危険度が高いと言われている。下水ヘドロや市清掃局の分別ゴミが投入される場合には、バイオガス工場は、摂氏70度で1時間以上殺菌処理をするという衛生基準を満たさねばならない。バイオガス工場の今後の更なる発展のためには、同様の衛生基準をより低コストで達成す

るために、より低温でより長時間殺菌処理する方法が模索されねばならない。これは、幾つかの新しいバイオガス工場で試みられている。

注

- 1) 1992年時点では全国で10箇所の中央集中管理型工場が稼働しており、バイオマス 1 m³当たり 22.5m³ (806MJ) のメタンの生産効率を達成していた。その際、典型的な工場では、90MJのバイオガスから27MJの電力と50MJの熱を発生させており、その処理工程でのエネルギー消費量は、生産される電力と熱の結合生産物 (CHP) により十分カバーされている。最近では、処理工程からの処理済みバイオマスに含まれる熱が、熱交換機により未処理の投入バイオマスへと還流され、分解・発酵処理工程でのエネルギー消費を節約している。
- 2) 糞尿を供給する農場から工場までの平均距離が7~8 kmの中央集中管理型工場の場合、糞尿 1 m³を輸送するのに、ディーゼルオイル約1リットルを消費すると試算されている。
- 3) 産業廃棄物 1 m³当たりの受入料金が100クローネの場合、糞尿など投入原料中の廃棄物混入率が20%ならば、総バイオマス 1 m³当たりの廃棄物受入料金収入は20クローネとなる。表 8 から投入原料 1 m³からバイオガス40m³以上の生産は可能である。

(*) 本稿は、文部省国際学術科学研究助成に基づいて企画された「北欧農業研究」の一環として、1998年9月18日から9月30日にかけて実施した北欧現地調査の際に行った聞き取り調査で得た情報をもとに、とりまとめたものである。バイオガス工場の操業状況の資料は、各工場毎に或いは年次毎に、統計数値の単位が必ずしも統一されていないものが少なくない。例えば、工場への投入原料である糞尿と産業廃棄物や市清掃局等からの分別ゴミの混入物の数量についても、その総量の容積で表現しているものや、重量で表現しているもの、或いはバイオマス換算にしているものなど不統一である。その際、それぞれの混合比率や換算比率が明記されていないものもある。また、産出物についても、容積表示や重量表示のもの、ジュール換算したもの等不統一である。本稿では、第一次接近として、もとの資料の情報を生かすため、類似概念の異種の単位表記によるものも敢えて採用した。

参考文献

- [1] Danish Energy Agency (1991), "Main Report from the Coordination Committee on Centralized Biogas Plants" (in Danish), Published by the Biomass Section of the Danish Energy Agency, Landemaerket 11, 1119 Copenhagen K, Denmark, June 1991.
- [2] Danish Energy Agency (1992), "Update on Centralized Biogas Plants", Published by the Biomass Section of the Danish Energy Agency, Landemaerket 11, 1119 Copenhagen K, Denmark, October 1992.
- [3] Danish Energy Agency (1995), "Centralized Biogas Plants", February 1995
- [4] Fenger, J., Fenhann, J., Kilde, N., (1990). " Danish Budget for Greenhouse Gases",

加賀爪 優：デンマークにおける畜産糞尿リサイクルによる発電および地域暖房計画の環境経済的考察

Published by the Nordic Council of Ministers, Store Strandsytraede 18. 1255
Copenhagen K, Denmark.

- [5] Hjort-Gregersen. K.(1996), "Centralized Biogas Plants – Present and Future Economic Potential –", Danish Institute of Agricultural & Fisheries Economics, 1996
- [6] Mosier, A.R.,(1993)," Nitrous Oxide Emissions from Agricultural Soils", Presented to the RIVVM "Int. Workshop Methane and Nitrous Oxide", February 3-5, 1993, Amersfoort, The Netherlands. Authors address:USDA-ARS, P.O.Box E. Fort Collins, Colorado 80522, USA.
- [7] Sommer, S.G., Christensen, B.T.,(1990), "Ammonia Volatilization from Solid Manure and Raw, Fermented and Separated Slurry after Surface Application, Injection, Incorporation into the Soil and Irrigation" (in Danish with English summary), Tidsskr. Plantea Vol. 94, 407-417, 1990
- [8] Oertenblad, H., Hvelplund, E., Henriksen, K.,(1992), "Comparison of Fertilizer Effect and Nitrogen Losses from Application of Digested and Undigested Cattle Manure" (in Danish), Landbrugets Rådgivnings center, Udkaersvej 15, DK-8200 Aarhus N.
- [9] Tafdrup, S. (1993), "Environmental Impact of Biogas Production from Danish Centralized Plants", Danish Energy Agency, 1993