

## 16. 共同型バイオガスプラントを核とした地域バイオマスの循環利用システムの開発

研究期間：平成 18 年度～22 年度

プロジェクトリーダー：寒地農業基盤研究グループ長 秀島好昭

研究担当グループ(チーム)：寒地農業基盤研究グループ(資源保全チーム)、特別研究監(水素地域利用ユニット)

### 1. 研究の必要性

北海道では多量の乳牛ふん尿が排出されており、さらに、地域の有機性廃棄物を含めてそれらの処理と有効利用が大きな課題となっている。北海道は他都府県と異なり、家畜ふん尿等を肥料として利用できる広大な農地を有している。このため、家畜ふん尿を主原料とし、他の有機性廃棄物を副資材として共同利用型バイオガスプラントで処理し、その生成物であるバイオガスを再生可能エネルギーとして利用し、消化液を肥料として農地に還元利用する技術の実用化が求められている。一方、地域では家畜ふん尿バイオマス原料を個別に処理する整備がより早く進展しており、嫌気・好気条件による個別処理技術と肥培灌漑技術を分析し、地域に最適なバイオマスの循環利用方法を提案することが重要となっている。当該研究は食料・農業・農村基本計画(平成 17 年 3 月)、最近の各種政策等(バイオマスニッポン総合戦略、家畜排泄物処理法、食品リサイクル法、循環型社会形成推進基本法、新エネルギー法)で火急とされる開発課題である。

### 2. 研究の範囲と達成目標

本重点プロジェクト研究では、消化液を農地で循環利用する営農技術を検証するため、原料の安全性の確保、施用効果の解明、経済的に自立するシステムとするための原料や生成物の効率的な搬送手法・処理技術の解明、さらに、環境・資源面からの社会システムとしての分析と評価を行うこととした。また、バイオマスを地域で効率的にエネルギー利用する技術開発として、バイオガスを水素に変換し、将来の水素・燃料電池社会へ活用する諸技術を実証する。さらには、共同型バイオガスプラントによる資源循環利用システムに関する研究成果と対照し、嫌気・好気処理、共同・個別処理の選択・組合せによる地域に最適なバイオマスの循環利用方法の提案が図れるよう、個別処理システムによる生産環境改善効果および環境負荷軽減効果を解明する。このため、以下の達成目標を設定した。

- ① 各種バイオマスの特性・安全性とその消化液の品質解明
- ② 各種バイオマス副資材の効率的発酵手法の解明
- ③ 消化液の長期連用の各種効果と影響の解明
- ④ スラリー・消化液の物性把握と効率的搬送手法の解明
- ⑤ 個別処理システムの生産環境改善効果の解明
- ⑥ 肥培灌漑土壌における環境負荷物質収支の解明
- ⑦ システムの環境負荷軽減効果の解明
- ⑧ 草地農地の肥培灌漑効果のまとめ
- ⑨ バイオガスの水素化技術開発と副生成物の混合燃料とする特性解明
- ⑩ バイオマスの肥料化・エネルギー化技術の開発

### 3. 個別課題の構成

本重点プロジェクト研究では、上記の目標を達成するため、以下に示す研究課題を設定した。

- ① バイオマスの肥料化・エネルギー化技術の開発と効率的搬送手法の解明(平成 18～22 年度)
- ② バイオマス起源生成物の地域有効利用技術の開発(平成 18～19 年度)
- ③ 肥培灌漑による生産環境改善効果の解明(平成 20～22 年度)

このうち、平成 18～19 年度は①、②の両課題を、平成 20～21 年度は①、③の両課題を実施している。

### 4. 研究の成果

「2. 研究の範囲と達成目標」に示した達成目標に関して、平成 20 年度までに実施してきた研究と今後の課題について

て要約すると以下のとおりである。

### (1) 各種バイオマスの特性・安全性とその消化液の品質解明

平成 20 年度までに、家畜ふん尿以外の合併浄化槽汚泥、乳牛工場汚泥、農業用浄化槽汚泥、廃乳製品、水産加工残滓等の地域で発生するバイオマスを副資材として共発酵処理し、その消化液中に含まれる重金属成分の組成変化および窒素・リン酸・カリなどの肥効成分の変化および原料乳牛ふん尿スラリーに対する臭気の低減効果について調査・検討を行った。さらに、BDF(バイオディーゼル燃料)残渣となるグリセリン等の有機生成物・廃棄物の共発酵特性等を室内試験により把握した。その概要は、次のとおりである。

- ① 共発酵処理した副資材の総量は総処理量の 15～17%であり、このことにより消化液中の有機物含有率が高まり、その結果、窒素やリン酸の含有率が高くなる。肥料成分の増加により、より効率的な消化液へと改質することが確認された。副資材の共処理による成分の変動の把握・管理方法さらに地域バイオマスの種類による品質解明は継続する必要がある。
- ② 副資材の共発酵処理により、重金属のうち銅および亜鉛の含有率は高くなったが、基準値以下の小さな値であり、消化液は安全である。含有率が高くなった成分由来の副資材を同定した。
- ③ 消化液の臭気は、原料乳牛ふん尿スラリーの臭気の 26.6%にまで低下し、嫌気発酵処理の脱臭効果が確認された。
- ④ 粗製グリセリンの成分は、グリセリン分 41%、有機性不純物 48%、灰分 5%等からなり有害な物質の含有はない。一方、アルカリ成分が含まれが、共発酵の資材としての利用に支障はない。

### (2) 各種バイオマス副資材の効率的発酵手法の解明

平成 18, 19 年度は、副資材の発生時期および発生量に応じた共発酵処理とするもので、受入槽で原料スラリーと混合後に 1 日 1 回メタン発酵槽に所定容量の混合原料を投入した(日曜日は原料投入を休止)。すなわち、副資材共処理において投入有機物含量の調整制御やそのためのバイオマスの搬入量・手順などの調整を行わない共処理方法でのガス発酵量の調査・検討を行った。また、平成 20 年度は各種バイオマスの共発酵処理量と処理料金収入との関係についても検討し、経済性も加味して効率的発酵手法の解析を行った。その概要は、次のとおりである。

- ① 平成 18, 19, 20 年度での共発酵処理総量はそれぞれ 16,250 トン、18,000 トン、18,640 トンであり、副資材の処理は全体量の 15%、17%、26%である。これを原料に平成 18, 19 年度それぞれ 355,300m<sup>3</sup>、373,700m<sup>3</sup>のバイオガスを生産し、これらを自家発電消費や余剰電力の売電を行った。
- ② 汚泥(脱水汚泥)は水分含量が多く、また、有機物分解が進んだ副資材でありそれ自体のガス発生量も少ないが、地域で適正に処理する必要があるバイオマスである。共発酵処理全量の約 9～12%(副資材全量の約 59～85%)を処理したが、発酵プロセスが停止することはなかった。
- ③ バイオガス発生の様子は特徴的で、原料投入を休止した翌日はガス発生量が低下する。すなわち、現行の投入量(有機物総量)速度と発酵・消化のシステムが均衡しており、原料投入が途絶えることでガス発生量が即座に影響を受ける。このことは実用的なプラント運転において、原料投入が連続であることや連続処理する施設規模やマスフローの設計の重要さが示唆される。上述の汚泥副資材を多量に不定期に処理した平成 18 年度のバイオガス発生量は、その時期に大きく変動したが、汚泥副資材をおよそ定期的に処理できた平成 19 年度では、相対的にバイオガス発生量の変動は少なかった。副資材の定期的な投入や制御が効率的なバイオガス発生を起こすことが示唆された。このことから、共発酵システムにおける原料と副資材の調整機能が重要である。室内(チャンバー)実験で予測するガス増量の傾向は、実プラントでは認められなかった。
- ④ バイオマス処理量は年間合計が 21,300 Mg で乳牛ふん尿が 82.8%と大部分を占める一方で、バイオガス発生効果の小さいバイオマス副資材が 12.8%、同効果の大きいバイオマス副資材が 4.5%となっている。一方、処理収入は 4,100 万円だが、バイオガス発生効果の小さいバイオマス副資材の処理収入に占める割合は 54.4%と半分以上を占め、その重要度が際立っており、バイオガス発電の売電価格が低い日本において共同型バイオガスプラントの経営を安定させるためには、バイオガス発生効率が低くとも安全で処理収入の大きい地域バイ

オマスを積極的に受け入れる必要性が示唆された。

- ⑤ 粗製グリセリンは適切な原料スラリーとの混合率では、有機物当たりのメタンガス発生量は原料スラリー単味に比べて約3倍の高い値を示す。また、粗製グリセリンは有機物濃度が高く、高い混合割合(粗製グリセリン/原料スラリー=4~8%程度)ではガス発生量の低下や停止が室内試験で確認された。
- ⑥ 平成21年度は、長期供用した発酵槽の清掃(槽内の堆積物の堆積状況と成分を実施)を実施した。また、再度発酵プロセスを立ち上げ、安定化させるのに半年を要したことから、発酵処理量は大きく減じた。

### (3) 消化液の長期連用の各種効果と影響の解明

平成18,19年度は、好気処理・嫌気処理後のスラリー等の長期連用による土壌中の肥効成分等の含有量や土壌物理性の変化を考察した。液肥等の農地への還元利用が行われてきた圃場と還元利用がなされていない対照圃場の土壌の理・化学性を比較することで、消化液利用による影響解明への知見を整理した。また、平成20年度は消化液施用が牧草の収量および品質に及ぼす影響を、平成21年度は圃場への消化液施用が土壌中および牧草中の微量要素含量へおぼす影響を検証した。その概要は、次のとおりである。

- ① 散布圃場(草地)は非散布圃場(草地)に比べ、粗孔隙(大きいと余剰水(重力水)の迅速な排除と空気の混入による湿害防止に効果)、易有効水分孔隙・難有効水分孔隙(植物が吸収利用する水分保持や旱魃害の防止)が大きく土壌物理環境が相対的に良好である。また、散布圃場の表層土壌では腐植が集積している。
- ② 散布圃場の表層の塩基置換容量(CEC)は大きく、保肥力が高く、交換性塩基Ca・Kが集積する。
- ③ 営農機械の走行により土壌は堅密化し易いが、曝気スラリーや消化液施用により表層土壌の膨軟化がもたらされ、根の伸長に良好な土壌環境が形成されていると判断される。
- ④ 牧草収量は消化液の施用により収量が増加する場合と変わらない場合があり、更なる検証が必要だが、牧草の重要な栄養分である粗タンパク含量は、1番草、2番草ともに消化液施用により有意に高まり、消化液施用が牧草の栄養価を高めることが示唆された。
- ⑤ 9年間の施用でも、土壌中あるいは牧草中の微量要素(銅、亜鉛、マンガン、鉄、モリブデン)が蓄積することがなく、一定量で推移することが示唆された。

### (4) スラリー・消化液の物性把握と効率的搬送手法の解明

共発酵処理の原料スラリーとその消化液の固形分量と従来までの乳牛ふん尿を原料とするスラリーとその消化液の固形分量を比較し、その固形分量から推算できる圧送搬送効率を分析・評価した。また、原料スラリーを効率的に圧送管路搬送できる固形分量まで希釈した場合の発酵効率および原料スラリーを運搬車で搬送した場合、希釈しない原料スラリーを真空式管路システムで搬送する場合および効率的に圧送管路搬送できる程度に水で希釈して圧送管路搬送する場合のモデルを構築し、経営収支について評価した。その概要は、次のとおりである。

- ① 共発酵の原料スラリーの固形分はTS=7.2%から、消化後はTS=3.9%まで分解・消化が進行する。このことにより液の粘性は低下し、消化液の管路での搬送効率は高いと分析できる。
- ② 共発酵とふん尿単味の発酵処理後の消化液の固形分は顕著な差はなく(それぞれTS=3.9%とTS=3.5%)、管路輸送を想定する場合は同一仕様のシステム整備でよいと示唆された。
- ③ 希釈後の原料スラリーの濃度がTS=4 g kg<sup>-1</sup>程度までであり、かつ、投入原料スラリー量や投入有機物量が同量であり、さらに、滞留日数が同一であれば、原料スラリーの希釈に伴ってメタン発酵効率は低下することではなく、原料スラリーの希釈はバイオガスの発生に支障をきたさないことが明らかとなった。
- ④ 乳牛ふん尿とその発酵生成物を無希釈で運搬車により搬入出するモデルとパイプラインで2ないし3倍希釈して搬入出するモデルについて経済性を検討し、プラントによる農家便益額を考慮すれば、原料スラリーを3倍まで希釈してもプラント運営は経済的に成立することが試算された。
- ⑤ 乳牛ふん尿を真空式管路で農家敷地からプラントまで搬送し、消化液を圧送管路で農家圃場へ搬送するモデルは、建設費が2倍希釈の圧送搬送モデルとほぼ同等で、維持管理費は乳牛ふん尿とその発酵生成物を無希釈で運搬車により搬入出するモデルより1割ほど安価であることが試算された。

#### (5) システムの環境負荷軽減効果の解明

平成 20 年度は、別海プラント導入前の従来の地域バイオマス処理利用システムと別海プラント導入後の地域バイオマス処理利用システムにおける地球温暖化ガス（メタン、亜酸化窒素、二酸化炭素）の、平成 21 年度は酸性化物質（アンモニア、イオウ酸化物、窒素酸化物、塩酸）の発生量および被害額を試算し、共同利用型バイオガスプラント導入による環境負荷軽減効果を検証した。

- ① 共同利用型バイオガスプラント導入により、地球温暖化ガスの発生量は被害額にして約 35%減少する一方、酸性化物質発生量は被害額相当にして大きな値と試算された。
- ② 酸性化物質は消化液の貯留時および乳牛ふん尿の運搬時に主に発生し、今後のバイオガスプラントの設計では、消化液貯留槽の有蓋化やプラントへの原料および消化液の搬入出のシステム化などを考慮することが示唆された。

#### (6) 個別処理システムの生産環境改善効果の解明

乳牛ふん尿を曝気処理した曝気スラリーは窒素、リン酸、カリウム等の肥料成分を含み、牧草地に液肥として施用すれば、長期的には土壌の理化学性を改善するとともに牧草収量・品質にも影響をおよぼすと考えられる。

そこで、曝気スラリーの長期施用が牧草地土壌の理化学性と牧草収量・品質におよぼす影響を検証した。

- ① 肥培灌漑圃場では、非肥培灌漑圃場に比べて、土壌表層における腐植の増大、膨軟化、保水性・排水性の向上、保肥力の向上が認められ、肥培灌漑による土壌理化学性改善効果が示唆された。
- ② 牧草収量は多くの場合、草地更新から 4~6 年目にピークを迎え、その後は牧草個体の減少と雑草の侵入によって低下するとされる。しかし、肥培灌漑圃場ではそのような傾向は認められず、直近の草地更新からの曝気スラリーの施用が 18 年目を迎える圃場においても雑草の侵入は少なく、1 番草収量は目標収量以上を確保していた。

#### (7) 肥培灌漑土壌における環境負荷物質収支の解明

乳牛ふん尿を曝気処理した曝気スラリーは窒素、リン酸等の環境負荷物質を含み、牧草地に液肥として施用すれば、長期的には土壌下層に集積し、地下水汚染の原因となることも予想される。そこで、平成 20 年度は土壌下層における無機態窒素の垂直分布を把握し、土壌下層における無機態窒素の集積の有無を確認した。平成 21 年度は肥培灌漑開始後 6 年が経過した採草地において、2 番草への施肥前から 2 番草の収穫時までの窒素、リンおよび微量元素（鉄、マンガン、亜鉛、銅、ホウ素、モリブデン、塩素）の土壌中および 2 番草中のこれら元素の含量について検討した。

- ① 肥培灌漑圃場では、非肥培灌漑圃場に比べて無機態窒素の下層への集積傾向は認められず、肥培灌漑での無機態窒素による地下水汚染は生じないものと推察された。
- ② 肥培灌漑圃場においても非肥培灌漑圃場においても、前述の各種肥料成分ならびに微量元素が土壌中や牧草中に蓄積することはなく、牧草やこれを食した乳牛に障害が発生するとはないと示唆された。

#### (8) 個別処理システムによる環境負荷改善効果の解明

平成 21 年度は肥培灌漑施設導入前後の地球温暖化ガス発生量の変化を検証した。

- ① 肥培灌漑施設による処理は従来処理に比べ、地球温暖化ガスによる被害額にして 44%、339,000 円の増と試算された。これは曝気スラリー貯留中のメタンおよび亜酸化窒素が多かったことに起因しており、被害の防止には曝気スラリー貯留槽の有蓋化が有効と判断された。

#### (9) 草地農地の肥培灌漑効果のまとめ

本課題は平成 22 年度より実施する予定の課題である。

#### (10) バイオマスの肥料化・エネルギー化技術の開発

この目標は平成 22 年度に実施・達成する計画であるが、その予備的な調査・研究を実施したので、その概要を下記に示す。

- ① 共同研究にて、バイオガス中の精製メタンのガス燃料利用を検討した。燃料用ガスとしての利用に問題ないことを検証できた。

### (11) バイオガスの水素化技術開発と副生成物の混合燃料とする特性解明

バイオガスの触媒改質により水素や従来は石油等から生産されるベンゼン等の化学基礎原料の併産技術を実証し、その生成物の地域利用を検討した。実証実験データを基に、乳牛飼養頭数の多い農家の個別バイオガスプラント、乳牛ふん尿等の共同型バイオガスプラントおよび生ゴミバイオガスプラントを想定したバイオガス～水素生成(メタン分離)～燃料電池利用モデルの生産性・経済性および施設整備の具備条件等を精査した。また、分散型のエネルギーを効率的に利用する方式(マイクログリッド)の試案や環境改善効果の試算を行った。さらに、併産したベンゼン(バイオベンゼン)の特性を精査し、水素添加による有機ハイドライドとして水素運搬に供する技術と燃焼燃料の添加材として利用するなどの応用技術を精査した。

- ① バイオガス量 400m<sup>3</sup>/日を改質する実験等により、安定して水素とベンゼンを併産できるシステムであることが確認できた。各過程のエネルギー効率(E%)：出口エンタルピー/入口エンタルピー)や物質収支の概要は、1) バイオガスから精製メタン製造する前処理過程で E=81%、精製メタン 1m<sup>3</sup>製造にバイオガス 1.9m<sup>3</sup>を使用、2) 水素・ベンゼン併産(直接改質法)でのエネルギー効率は E=12%、水素 1m<sup>3</sup>製造にバイオガス 5.3m<sup>3</sup>を使用、3) 水素のみの生産方式(水蒸気改質法)のエネルギー効率は E=29%、水素 1m<sup>3</sup>製造にバイオガス 0.7m<sup>3</sup>を使用などであり、さらに各過程・設備の詳細なエネルギーフローを明らかにし、開発したシステムを基礎に、今後改良・規模拡大を図るための諸量を明らかにした。
- ② 併産したベンゼンを添加原料とする水素化実験では、Wet-dry 多相式反応器と固定床触媒反応器を連結した二段水素化方式を開発し、この方式により転化率(ベンゼン(C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)→シクロヘキサン(C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>))は100%を示し、水素キャリアとしての高い効率を得た。また、ガスクロ分析により、ベンゼン～シクロヘキサン系以外の成分や微量不純物の量・起源を明らかにし、さらに、水添速度によって変わる未反応ベンゼン濃度を明らかにすることで、ガソリン等の混合燃料として利用する場合の可否・収支を明らかにした。バイオマス起源のベンゼンを水素貯蔵・運搬として利用するための生産技術の実証およびベンゼンの特性を把握したことから、バイオマスの多様変換と多用途利用の技術範囲を拡大できた。
- ③ バイオガスから水素化を図る連携した実用プラント(BTH: biogas to hydrogen)あるいは連携した水素利用を考察すると、1) 酪農地域では、バイオマス原料・消化物の集配(農家の空間分布の広さ)も条件となり、農家 20～30 戸(乳牛頭数 2,000～3,000 頭)が 1 ユニットと考えられ、自立した物質・エネルギー収支状態で約 1,600～2,400m<sup>3</sup>/日の水素製造量が試算されるなど、地域においても、今後、実現化が図れる技術と確認した。2) 都市域の生ゴミバイオガスプラントは、既に効率の良いバイオマスの収集法が採られており、ここでの水素化利用への発展は容易であると判断する。人口 10 万人程度の生活系の有機性廃棄物を対象とした BTH プラントを想定すると、自立した物質・エネルギー収支状態で約 4,000m<sup>3</sup>/日の水素が生産できると試算され、生ゴミプラントは、将来の有効な水素生産ステーションとし位置づけられる。3) 飼養頭数の多い農家のバイオガス化処理設備はメタンガス供給源としての諸量を満たし、メタンガス～メタンガス改質器付燃料電池系の利用形態が今後示唆される。
- ④ 施設建設コストや水素製造コストを試算し、市場の発電単価と対照することで、将来の BTH プラントを運営していく方法を提案した。
- ⑤ バイオガス起電、燃料電池起電等の特徴を精査し、地域において商用電力をベースにこれら分散型電源の安全で効率的な連携利用(マイクログリッド)の例題を提案した。また、マイクログリッドを導入した場合の地域からの温室効果ガスの排出量の抑制量を試算し、環境にも適正であることを明らかにした。

本達成目標は、バイオマスとりわけバイオガスを改質することで、その利用用途を変えたり、地域に現存しなかった有益な物質を得る方法を明らかにした。水素は工業的に生産されることから、遠隔な地では遠距離輸送となる。将来の水素社会が地方でも展開されるとなれば、水素社会基盤を進展する一技術として本成果が役目をなす。

## DEVELOPMENT OF A LOCAL BIOMASS RECYCLING SYSTEM BASED ON A CENTRALIZED BIOGAS PLANT

**Abstract :** The object of the study is to propose regionally optimum biomass recycling system which combines individual and centralized biogas plant system with individual and cooperated cattle manure irrigation system. In 2006-2009's fiscal years, we investigated the general characteristics of the regional biomass, the co-fermentation and dilution effects on the characteristics of the digested slurry and the biogas production, the long-term application effects of aerobically or anaerobically digested cattle slurries on the physical and chemical properties of grassland soils and on the yield and qualities of grass, the economical feasibility on application of pipeline transportation system to centralized biogas plant system, the effect of centralized biogas plant system on emissions of greenhouse gases and acidic materials, and development of technologies for the conversion of biogas into hydrogen gas and by-products (aromatic compounds) and estimation of their use in the future.

**Key words :** biogas, digested cattle slurry, biomass, recycling system, hydrogen gas, methane reforming