

特集：ガスタービンの燃料として“ゴミ”は使えないか？

家庭からの排水および養鶏業から排出される廃棄物の バイオマスエネルギー転換について

毛利 邦彦*¹

MOURI Kunihiko

1. はじめに

日本における地球温暖化ガスの排出抑制のために、太陽光発電、風力発電などの自然変動電源の導入促進のほかに、動植物に由来する有機物であるバイオマス資源として利用することが出来るバイオマス資源が地球温暖化防止の資源として脚光を浴びて来たが、本解説は多種多様性のあるバイオマスエネルギー源の中から汚泥と鶏糞の利用についての具体的な検討を行った結果を紹介し、そのエネルギー源のガスタービンへの燃料としての利用の課題について取りまとめたものである。

2. 地球温暖化とエネルギー技術開発の背景

地球温暖化防止に対する事象については、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) に報告された第4次評価報告書 (2007年) により、科学的根拠 (データ) が蓄積された報告が発表された。

それによると、地球温暖化が顕在化して来ている傾向を示しており、地球温暖化に起因する異常気象、および異常気象に起因する生態的変化も世界各地で報告されるようになり、地球温暖化に対する考え方が「ほぼ人為的な活動に起因することは疑いの余地がない」と一歩踏み込んだ報告となり、地球温暖化ガスの排出抑制に世界が真剣に取り組むように要請をした。

この地球温暖化に対する防止については、1997年に京都で開催された、気候変動枠組み条約第3回締約国会議 (COP3) にて、地球温暖化ガスの削減目標を定め、2004年に発効した拘束力のある国際的な約束である。

この京都議定書に割り当てられた国別の地球温暖化ガスの削減目標を達成すべく、各国ではいろいろな取り組みを実施し、その達成を義務つけているが、日本は京都議定書以前よりエネルギーを輸入に頼っているためにエネルギーの安定確保のため、早期にその対応政策を実施して来ている。それは1973年の石油ショックに端を発し、エネルギー源の多様化を推進すると共に、新エネルギーの推進を目的としたサンシャイン計画 (1974年) や省エネルギー技術開発促進を目的としたムーンライト計

画 (1978年) が制定されエネルギー安定供給と環境配慮型技術開発が促進されて来た。

京都議定書採択以降のエネルギー政策は地球温暖化ガスの削減を図るために1997年に新エネルギー利用の促進に関する特別措置法により新エネルギーの導入促進を図る措置が取られ、また1998年に防止対策推進大綱が策定され地球温暖化防止の総合的な国の取り組みが促進されて来た。

この地球温暖化ガスの削減には再生可能エネルギーの導入促進が肝要となるが、2002年の「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」によって今まで廃棄物の一部と見なされていたバイオマスエネルギーが「新エネルギー」として認知、追加された事が、エネルギー源と地域とが、連携する結果となり、バイオマスの導入促進に対して、国の支援が可能なシステム (バイオマスタウン構想) が構築できるようになった。

その基本構想は①地球温暖化防止②循環型社会の形成③競争力のある新たな戦略的産業の育成④農林漁業、農漁村の活性化を目的としたものである。

一方、エネルギー安定供給の基幹会社としての電力会社、ガス会社が料金の低減化と安定供給の責任を果たすために、発電設備の高効率化による化石燃料の削減、公害物質排出の低減、大規模化によるスケールメリットによるコストの低減を図るための技術開発を実施して来た。特に1973年の第1次石油ショック以後の開発は環境対策技術開発を含め、大規模火力発電の開発とプラント効率の高効率化であった。

1960年頃に稼働した石炭火力発電は75MW級程度であり、1970年台には250MW級に、更に1980年台には500MW級の運転が開始され、2000年には国内最大の1050MWの石炭火力発電所が開業するなど単機容量を大規模化することで、電力単価の低減 (スケールメリット) を図って来た。

また大規模化と相まって蒸気条件の高温高压化によるプラント効率の向上技術開発が進められて来た。

蒸気条件は東京電力の柏崎発電所 (600MW 石油火力) に主蒸気温度538℃、再熱温度566℃の超臨界圧の実用化を見たが、1998年には中国電力の三隅発電所 (1,000MW、石炭火力) では主蒸気温度600℃、再熱温度610℃の超超臨界圧 (USC) の蒸気条件の実用化が実

原稿受付 2009年8月4日

* 1 (株)eL-Power Technology 取締役 技術部長
東京海洋大 社旗連携センター 客員教授
〒238-0042 神奈川県横須賀市汐入町 2-36

施されて来た。

余談であるが、この超超臨界圧はUSCと呼ばれウルトラ・スーパー・クリティカル (Ultra Super Critical) の英語の略であるが、この技術を主体的に開発した電源開発株の中林恭之氏が名付けた技術である。

ガスタービンの効率向上も入口ガス温度条件が1100℃以上になるとガスタービンによる発電と排ガスの温度を利用したボイラーで発生した蒸気を利用した蒸気タービン発電との複合発電により、総合的なプラント効率の向上を図った。単機規模も300MWの大型化を達成して、遮熱コーティング (TBC) と、タービン翼の冷却技術の開発等を図りながら、サーマルNO_xの限界値近傍の1,500℃ (TIT) まで高温化により、総合効率60% (LHVベース) の最高効率を達成して来た。

2000年の電気事業法の大幅な改正により、電気事業が自然寡占事業から電力自由化による競争の時代となり、商社やガス会社等が特定規模電気事業者 (PPS) を設立し小売事業に参入して来た。

PPSは関連企業や自社の余剰電源を電力会社の送電線を経由して (託送) 小売を行うものである。

2000年の前後に、電気と熱を併給 (コージェネレーション) した小規模 (28kW程度) のマイクロタービン (MGT) が米国から導入され、改正電気事業法の自由化拡大を視野に、その経済性や技術課題の実証が盛んに実施されていた。

また、環境に優しいとされる各種燃料電池の開発も積極的に実施され、水素をエネルギー源とする開発が積極的に実施されていた。

余談ではあるが、水素の開発は日本では早くから国の取り組みとして、WE-NETと呼ばれた産学官の大型プロジェクトが推進され、水素利用推進に日本は先駆的な開発を実施していた。

このような技術の進展については、第1次石油ショックを契機に大型化、効率向上、省エネルギーなどのエネルギーセキュリティおよび環境負荷の低減を目的とした技術開発を行ってきたが、その背景には、地球温暖化防止に対する国の政策に基づき、地域、大学、企業、国民と多方面に亘る利害関係を調整する必要性が新たに考慮しなければならない時代となって来た。

3. バイオマス資源のエネルギー転換への適用

バイオマスのエネルギーは図1に示すように多種多様なバイオマス資源が存在するが、林業の活性化と賦存量が比較的多いとされる木質バイオマスが、早期に開発が始められ、間伐材の処理を効果的かつ経済的に処理する目的として、能代森林組合による木質バイオマス発電 (3,000kW) が平成15年に運開したが、このシステムは既存のボイラー・タービンシステムで、プラント効率も11.3% (燃料発熱量 2,700kcal/kg) と効率の良くないシステムであった。

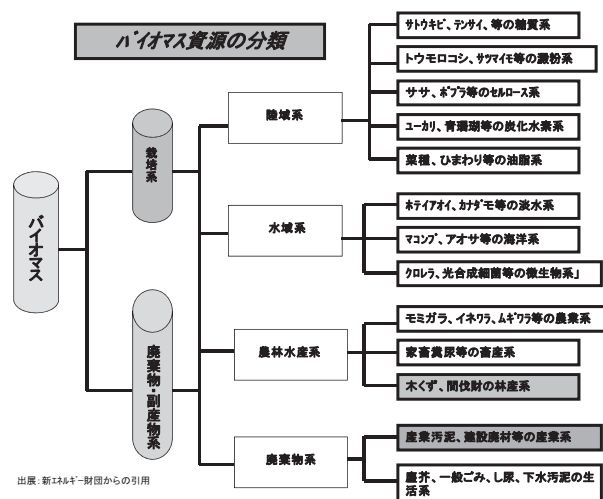


図1 バイオマスの分類

最近ではPPSの事業のグリーン電力販売促進として、サミット明星パワーエナジー社による木質系バイオマス発電 (50MW) を運開して、グリーン電力の小売りを実施している。

また、北欧では2000年頃から木質バイオマスのガス化の実証試験をヨーロッパ連合 (EU) にて実施していた。

写真1は、オーストリアにおける5,000kW相当の加圧型の木質バイオマス実証試験装置を示す。

またフィンランドのケースであるが、木質ボイラーによる地域暖房へのエネルギーとして、図2に示す様に、広くフィンランド国内に分布している。

この木質バイオマスの普及は化石燃料からの転換、再生可能エネルギーによる地球温暖化防止を目的以外に林業の振興による雇用の創出を国の政策として位置付けている点が、昨今の日本の雇用状況の悪化を考えると、環境の促進と雇用機会の創出をソリューションとして考えている点 (図3を参照) に先駆的であると感じている。



写真1 オーストリアの電力会社によるガス化実証試験装置 (5000kW相当)

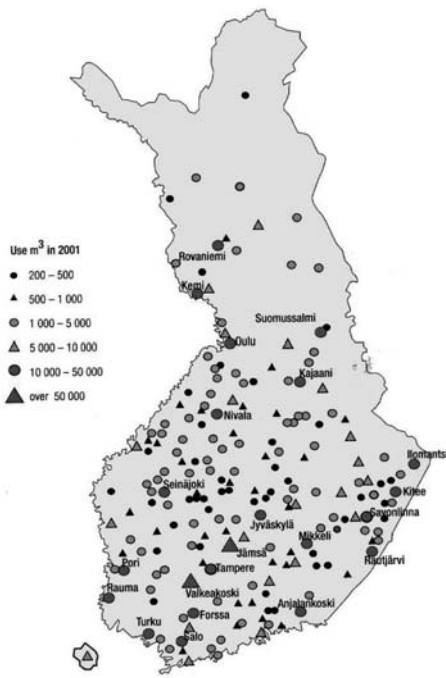


図2 チップを用いた地域暖房プラントの実績

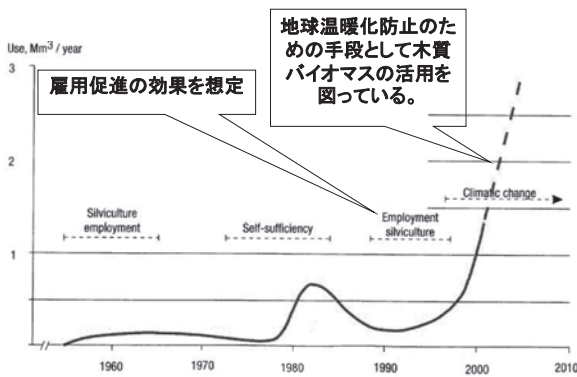


図3 雇用促進等のための木質バイオマス産業の発展経緯

4. 未活用のバイオマス資源

バイオマス資源の年間発生量は表1に示すように年間約2億2千万トンとなっているがそのうち未活用分として約9,500万トン(年間)が未活用として埋め立てや焼却されているが、エネルギーへの利用はパルプ工場からの黒液が主で、全体の9%程度しか利用されていない。

循環型社会の構築に、食品残渣、汚泥、畜産残渣等の多くは肥料として有効利用されていると報告されている。

食品、畜産飼料は輸入によるものが多いが、餌が食肉に転化される割合は正確には把握していないが、牛は10%程度、豚は30%程度、鶏は50%程度と言われている。食肉にならない分は放熱と糞尿になるので、飼料の輸入は糞尿の輸入とも考えられる。糞尿は肥料として活用され、新たに作物に生育に転化すると考えられるが、毎年約1億トンを堆肥等の肥料として日本の土壤に散布していることになる。

食糧は人間を経由して下水汚泥として下水処理場に運ばれ、飼料は家畜を経由して、糞尿になり、それが堆肥に変換され循環していることになる。

特に鶏糞はリンやカリウムを多く含んでいるので良質の肥料として、畜産農場の近傍の農家が引き取りバランスしているが、大規模の養鶏業者は糞尿の発生が過剰になり、遠方の肥料利用者に処理コスト以下のコストにて処理をしている現実が存在する。

2005年に、デンマークで循環型社会を実践している地域であるグリーンベルトを調査したが、その構造は図4に示すように豚の飼料の100%自給から糞尿は発酵プラントまたは温水ボイラー用の燃料として活用している。グリーンベルトの目標は、次に示す様に循環型社会の実践を行い、それをデンマークの「技術・制度のショーウィンドー」として自国の技術やマネジメントを海外

表1 バイオマス資源の年間発生量と利活用状況

バイオマス		年間発生量	利活用の状況
廃棄物系バイオマス	家畜排せつ物	約9,100万トン	たい肥利用 約80%
	食品廃棄物	約1,900万トン	肥飼料利用など10%未満、90%が焼却・埋立等
	製材工場等残材	約610万トン	エネルギーやたい肥への利用 約90%
	廃棄紙	約1,400万トン	大半が焼却
	下水汚泥	約7,600万トン	建設資材、たい肥利用 約60%、埋立 約40%
	パルプ黒液(乾燥重量)	約1,400万トン	直接燃焼によるエネルギー利用 ほぼ全量
	建設発生木材	約480万トン	製紙原料、ボード原料、家畜敷料等へ利用 約40%
未活用バイオマス	農作物非食用部(稲わら、もみがら等)	約1,300万トン	たい肥、飼料、畜舎敷料等への利用 約30%
	林地残材	約390万トン	ほぼ未利用
資源作物			試験利用レベル

発生源が分散している
ので、収集が難しい。

工場内でまとまって発生するので、利用しやすい。

分散して賦存するバイオマスと収集・輸送コスト
バイオマスは、化石資源に比べ、薄く広く賦存し、また水分や空隙が多いので、輸送コストがかかる。このため、地域で発生するバイオマスは、できるだけその地域で利用するのが効率的。

3

バイオマス・ニッポン総合戦略(平成14年閣議決定)より

に輸出している。

- ①エネルギー自給率向上と地球環境保全
- ②殺菌をしない水源の確保
- ③化学物資に依存しない排水処理
- ④100%自給率の家畜飼料の確保
- ⑤畜産系バイオマス技術の導入

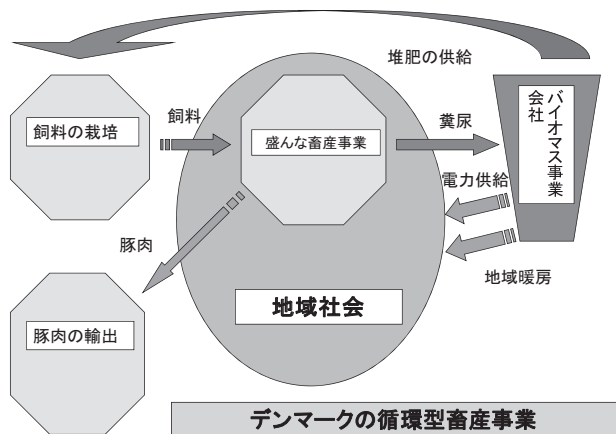


図4 デンマークのグリーンベルト地帯の循環型社会の図式

5. 鶏糞のエネルギー変換事業の検討

畜産バイオマスには、牛糞、豚糞、鶏糞等があるが、発電へのエネルギー転換の一つとして、メタン発酵による発電があるが、各糞尿の単位当たりの発電能力は次のようになるが、鶏糞の低位発熱量が高く、発電に最も効果的なバイオマス資源であることが分かる。

- ▼牛糞尿のトン当たり約50kWh/日
- ▼豚糞尿のトン当たり約90kWh/日
- ▼レイヤー糞尿トン当たり約180kWh/日
- ▼ブロイラー鶏糞トン当たり約700kWh/日

また鶏糞はリンとカリウムが多く含有するので、次のような利用法が行われている。

- 直接、農家への肥料として利用
- 発酵して、発酵鶏糞堆肥を製造し、農家に販売
- 鶏糞を焼却して、飛灰を肥料として販売
- 炭化して、販売
- 鶏糞を焼却して、発電および熱利用にして販売

現在は、上記の利活用により、鶏糞の発生量と利活用量はバランスしていると言われている。

6. 北東北における鶏糞発電の事業化試算

青森県南、岩手県北には、図5に示すようにブロイラー養鶏業が盛んであり、その鶏糞発生量は年間23万トンを超えるものである。そのため、多くのプラントメーカーやコンサルタントがブロイラー養鶏業者や行政の未活用バイオマス調査事業の一環としてその事業化を数年

平成19年度県別ブロイラー飼養羽数（単位：千羽）

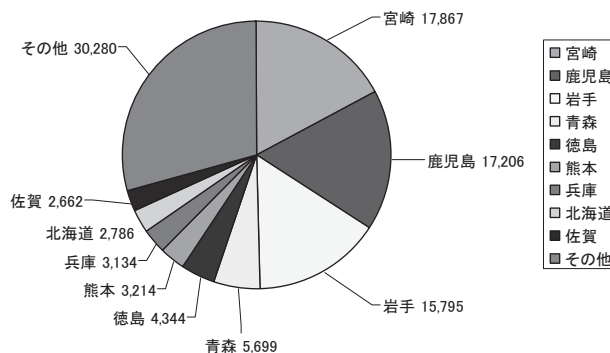


図5 ブロイラー鶏糞の飼養数（出典：畜産統計）

前から調査や検討を実施している。

しかしながら、未だその事業化には至らず、今日に来ている。

既に先進事例としてプラントが稼働している宮崎、鹿児島の事例から次の事が言える。

- ・ブロイラー鶏糞が年間安定して多量（10万トン以上）に入手出来る場所に立地することが推奨される。
- ・鶏糞の処理コストが増加し、そのコスト低減を望んでいる地域
- ・環境問題（悪臭、排水）の問題が起こっているか、今後懸念される地域
- ・発電した電力を連系可能な変電所が近隣にあること。
- ・発電に必要な蒸気冷却用の工業用水（上水でも可）が入手できる地域。
- ・立地に際して立地地域の住民の了解を得やすい地域
- ・補助金が期待され、建設費の資金調達が容易となる行政の協力が得やすい地域

南九州の実績から北東北においても、上記の要件に合致する地点は考えられ、具体的な事業化評価の結果により、早期のプロジェクトの立ち上げが、期待されている。

7. 試算の諸元と試算結果

鶏糞発電が実際どのような事業性があるかを試算した結果を紹介するが、これは石油が高騰する平成19年度に行ったものであり、また日本では電力の環境価値が低い時の検討である。

また、鶏糞の焼却灰は良好な肥料であるが、その買取り先が確実でなく、焼却灰を肥料として売却することが困難として、焼却灰は最終処分場にて廃棄処理をすることを前提にして試算を行った。試算に当たり、前提条件となる建設費や運転に用いる用役量やその単価は平成19年度以前のデータをベースにしている。実際にプロジェクトを開始する場合は前提条件の精度を向上させることが必要となる。次には試算の前提を示す。

1) 試算の前提条件

表2 プロイラーおよびレイヤー鶏糞の分析値

	プロイラー鶏糞				レイヤー鶏糞			
	A	B	C	D	E	F	G	H
発熱量(低位 kcal/kg)	3500	2700	2500	2000	2500	2000	1200	400
水分(%)	14	26	28	38	12	32	47	71
灰分(%:乾きベース)	11	14	15	10	20	18	22	25

- ① 発電規模は年間15万トンのプロイラー鶏糞とする。
- ② 発熱量は岩手県南のプロイラー鶏糞の分析を実施した結果、表2に示すが、2,500kcal/kgが妥当とした。
- ③ 鶏糞処理費用は3,000円/トンとした
- ④ 電力は卸電力として電力会社に10円/kWhで売却し、電力の環境価値はRPS不確定なので対象外とした。
- ⑤ 建設費は約42億円としたが、その内数として土地代、連系送電線（2 km, 特別高圧線）、工業用水負担金、鶏糞対策費を見込んでいる。
- ⑥ 補助金はプラントに1/2の補助金（バイオマスタウン制度の活用）
- ⑦ プラントの償却年は20年とし、残存価格は0とした。内部収益率（IRR）は事業評価に用いる評価法として、広く活用している方法である。

その結果、内部収益率（IRR）は16%と試算結果が出た。これは金利を5%としても、8年目以降に赤字が一掃され、純益が出ることを意味している。

また、適正な運転と保守を行うことにより、20年以上の運転が可能であれば、償却が終わり、その利益は更に向上する。

この試算は具体的な地点を限定した上で、より精度のある試算を行い、事業の推進を図る必要がある。

最近、図6に示す様に輸入リン鉱石の国際市場が高騰し、鶏糞焼却灰がその代替品となる可能性がある。焼却灰を産業廃棄物として、最終処分するのと有価物として対価を得られるのでは、その事業収支は大きく異なり、事業成立性はより向上する。

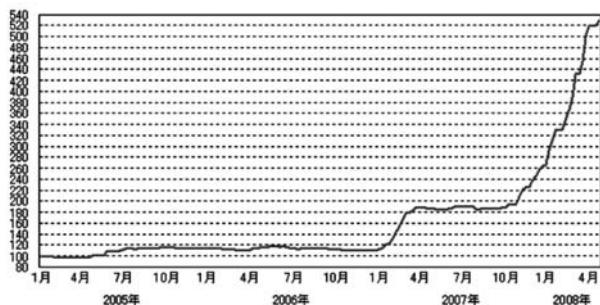


図6 リン安の国際市況（指数）（周展JA）

更に南九州の事例を考慮すると、隣接した場所に、プロイラーのレンダーリング工場を設置し、レンダーリング工場の電力および熱エネルギーを供給する図7のビジネスモデルが考えられる。

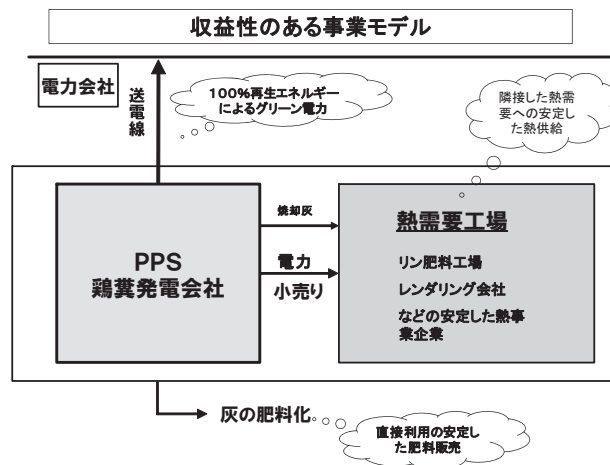


図7 推奨されるビジネスモデル

図7のビジネスモデルによる収益性の向上は、年間15万トンの鶏糞を使用する鶏糞発電から年間8万トン程度の規模の小さな鶏糞発電の事業成立性が期待される。

小規模の鶏糞発電事業が成立すると、鶏糞量が多量に賦存する区域からより広範な区域での普及が期待できることになる。

8. ガスタービン技術の導入促進について

鶏糞発電のプラント効率が11%程度として計算すると販売電力が少なく事業成立性が低くなる。鶏糞をガス化し、10,000kW程度 of ガスタービン発電プラントが20%以上の効率が期待できれば、その事業成立性がより期待出来る。

鶏糞のガス化技術開発は不明であるが、欧州の調査において木質バイオマスのガス化は発生するタール処理が課題とされている。

9. 汚泥バイオマス発電の検討

汚泥バイオマスの発電への展開については、平成15年から平成19年度までNEDOの委託事業として青森県八戸市にて新エネルギー地域集中実証試験が実施され、そのベース負荷を受け持つ発電に汚泥から発生する消化ガスを燃料にガスエンジン発電を行った。

この実証試験は愛知県の万国博覧会にて、NEDO館と日本館へマイクログリッドと呼ばれる分散エネルギーネットワーク技術を採用した一連のプロジェクトである。

「八戸市 水の流れを電気で返すプロジェクト」イメージ図

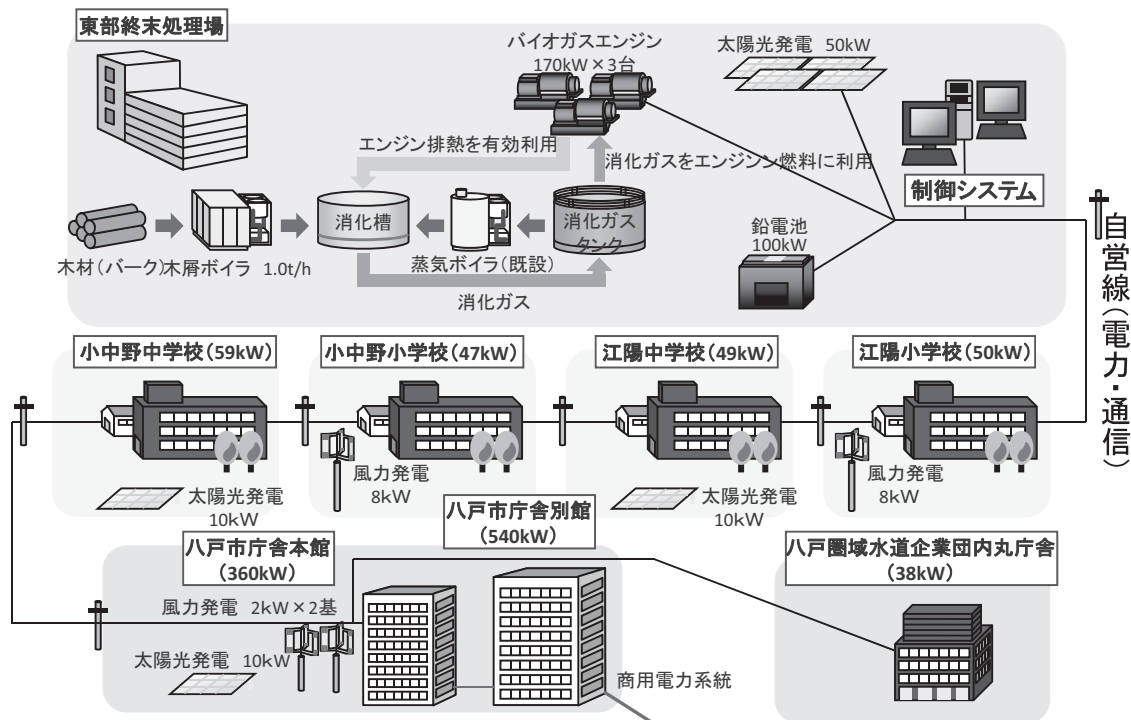


図8 八戸マイクログリッドフロー図

9.1 システムの全体概況

本システムはマイクログリッドと呼ばれる「複数の分散電源と複数の需要家」を「自営線」にて連系され、電力を供給するシステムで、その構成は下水汚泥より発生する消化ガスにてガスエンジンによる発電を行い、八戸市の小中学校、八戸市役所に小型風力発電、太陽光発電にて構成されている。その設備の概要はガスエンジン発電510kW（170kW×3台）、太陽光発電80kW（60kW、10kW、10kW×2）、小型風力発電20kW（2kW×2、8kW×2）および鉛蓄電池100kWであり、特徴として、市街地に東北電力の配電系統と並行して自営線を敷設したこと、鉛蓄電池による二次電池を設置したことが挙げられる。

このプロジェクトは平成15年度から平成19年度までの5カ年に亘り、電源の供給の安定性と需要との制御を確認するもので、平成19年の秋には系統から独立した単独運転を実施し、成功をするなど、技術の実証を確認した。

9.2 目的

この実証試験の大きな目的は国の補助事業である新エネルギーの導入促進であり、この実証試験に配置された設備は図8に示すようにすべて新エネルギーと定義される太陽光発電、小型風力発電、汚泥バイオマス発電設備である。

実証試験の特徴は、次に示すように技術的課題が多く、実証試験の推進母体は八戸市役所であり、この試験の結果の事業性について、このプロジェクトでは具体的

かつ組織的には検討されていない。

◆再生可能エネルギー100%の電源・熱源構成

- ・個々の設備は成熟した技術
- ・地域間での隔たりない新エネルギー普及

◆熱と電力の非同一施設での利用

- ・電気の供給先は業務用の6つの需要家
- ・熱の供給先は下水処理場の汚泥消化槽

◆30分同時同量よりもさらに精度が高い需給制御技術開発

- ・誤差の過去6分移動平均が需要量に対し±3%以内
- ・自営線に併架した通信線により集中監視・制御を行う

◆自営線を利用した供給形態

- ・常時は商用系統に連系し計画量を買電
- ・自立運転試験を実施

9.3 下水処理場の概要と消化ガスの成分とガスエンジン

八戸市の下水処理場は、写真2に示すように、開放型の施設であり、汚泥を加温して消化ガスを効果的発生し、タンクに貯蔵するものである。

この汚泥の成分は全水分が79%、炭素は42%（ドライベース）、水素は5%（ドライベース）、灰分は22%であり、発熱量は381kcal/kg（1,592kJ/kg）であり、得られる1日の発生消化ガス量は3,000m³で、メタンの濃度は60mol%である。

この消化ガスにて、510kWのガスエンジンを稼働さ



写真2 八戸市下水処理場

せるが、消化ガスの発生を促進させる為に、木質ボイラーを新たに設置して消化槽を加温している。

9.4 汚泥のガスタービンへの適用

消化ガスのガスエンジンへの適用にはガスエンジンに影響与える成分が存在するために、定期的に点検が必要となるなど補修費用の増大などの改善すべき点がある。

そのため、保守性の良いガスタービンの適用が推奨されるが、消化ガスは汚泥を加温してその発生を増加する必要があり、加温設備が必要となるなどガスタービンの総合的な効率を低下させる。

大規模な都市の場合には規模の増加により（スケールメリット）により、加温エネルギー比率が小さくなり、効率の向上が期待できるので、検討する価値が考えられる。

一般的には、上記の理由によって、中小規模の都市での汚泥についてはガスタービン燃料としての利用は現時

点での評価は低と考えている。

10. まとめ

未活用の再生可能エネルギーとして鶏糞と汚泥について、その事例を紹介した。

どちらもバルク燃料であり、技術的ハードルの低いガスエンジンや蒸気タービン発電技術を採用している発電システムである。

木質バイオマスのガス化技術開発は大規模の開発事例が欧州にあるが、汚泥や鶏糞等の未活用バイオマスエネルギーのガス化技術について、議論も行われていない状況にあると言える。

ガス化技術は石炭、木質バイオマスなどのバルク燃料について蓄積された成果がある。

未活用バイオマス資源をガスタービンの燃料源と考えるには、技術的にも、事業化評価にも、時期が熟していないと思っているが、未活用バイオマスエネルギー資源として汚泥や鶏糞等をガスタービンへ適用への関心、検討および議論が生み出され、新たな視点が生まれることを期待している。

参照資料

本解説には次の資料を参照した。

- (1) 北東北に多く賦存する鶏糞を利活用した熱・電供給事業の事業化成立性の調査事業報告書（平成21年3月、みちのくエネルギー株）
- (2) 八戸市民エネルギー事業化可能性調査報告書（平成19年2月、八戸市）
- (3) 全国マイクログリッドフォーラムin 八戸報告資料 水の流れを電気で返すプロジェクト（2007年2月、八戸市）