

雑誌掲載論文紹介

世界のバイオガス利用技術開発動向*

Progress of Biogas Utilization Technologies in the World

日本エネルギー経済研究所 山口馨 (研究主幹)

Kaoru Yamaguchi

Senior Economist, The Institute of Energy Economics, Japan

Abstract

Biogas is one of the most promising biomass utilization technologies, which is expanding not only in the developed countries, but also in developing countries of such as China and India. Regarding this, firstly, this paper reviews the elements and factors of biogas utilization technologies, which made uniquely environment-friendly and helped to expand very rapidly in the world. Secondly, the recent development of the production and utilization of bio-methane and bio-hydrogen is explored as an application of micro-organisms, which play very important role in the organic cycle in the nature. Finally, current development of the biogas utilization in the major countries—Germany, UK, Sweden, US, China, and Japan—are outlined. In summary, the importance of biogas utilization in developing countries is emphasized in terms of cost advantages and contribution to the environment of the world through the reduction of such GHGs as carbon dioxide and methane.

1. はじめに

本稿はバイオガスのバイオマスエネルギーとしての利用技術開発動向を概観するものである。バイオガスはバイオマス由来のメタンを主とするガスであるが特に微生物による有機物の分解の際に生成されるガス体を指し、再生可能エネルギーとして利用される。再生可能エネルギーの中には水力、風力、太陽エネルギー、バイオマスなどがあるが、バイオマスは太陽エネルギーによって二酸化炭素と水が生物中に有機物の形に変換され、蓄積されたものである。実際その量は地域や天候によって差があるものの風力や水力に比べると地理的普遍性があり実際広く使われてきたエネルギー源である。

バイオマスの利用形態としてはバイオガスのようなガス体もあるが途上国での薪や炭など固体木質バイオマスの直接燃焼による熱利用がこれまで伝統的な利用形態であったとすれば、最近では直接燃焼およびガス化による発電やバイオ燃料などのように輸送用燃料としての利用が増えている。一方、バイオエタノールやバイオディーゼルといった液体バイオ

* 本稿は、「エネルギーと動力 2008 秋季号」に寄稿した論文について転載許可を得て掲載しました。

燃料生産の急増は食料や環境との競合があるとしてここ数年大きな問題となっている。食料との競合はすなわち、もともと食料・飼料用であったトウモロコシやパーム油のような農産物がバイオ燃料としての付加価値が高くなるにつれ食料用ではなくエネルギー作物として消費される量が増えるため食糧危機を招きかねないという懸念である。環境との競合はバイオ燃料によるライフサイクル上の CO2 排出抑制が必ずしも効率的でないことと原料作物の生産拡大が森林破壊など生態系を破壊するという懸念である。こうした食料と環境との競合の観点からバイオ燃料だけでなくバイオマス全体の維持可能な有効利用について大きな関心が寄せられているところである。

バイオガスはこうした食料や環境を考慮に入れた維持可能性の観点から数あるバイオマス利用技術の中でも特に優れていると考えられている。一番大きな理由はバイオガス利用技術がもともと農産物や家庭廃棄物の衛星処理から始まった技術であり、これが現在では家畜の糞尿、農産物残渣、下水汚泥等、これまで捨てられるのみであった廃棄物からエネルギーを取り出す技術に進化したものであることにある。次に挙げられる理由は、さらにバイオマスをメタンガス等、ガスに変換するのは自然界に存在する微生物であり、もともと自然界に存在する生化学変換プロセスが主たる変換エンジンであることがある。

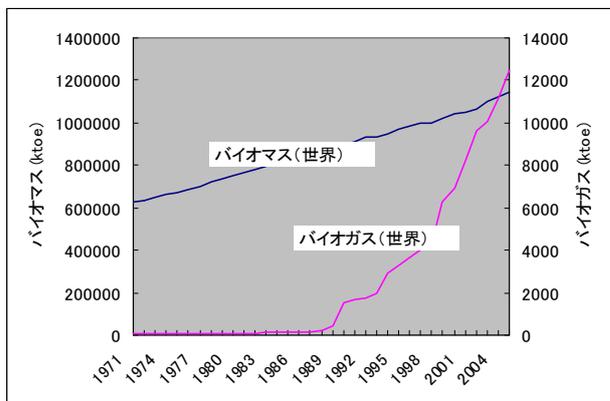
さらにバイオガス利用技術の利点としてその拡大を支えた特徴はこれが高度な技術を必ずしも必要としないことがあげられる。むしろ先進国における高度なバイオテクノロジーは増収に貢献する。しかしもともと自然界に存在する微生物が主役であるため中国やアフリカの無電化村でもバイオガスは生産できるのであり、現在アジア途上国の農村でこの技術が急速に拡大している主要因でもある。

2. バイオガスの意義

2. 1 急拡大するバイオガスの利用

バイオマスエネルギーの中でもバイオマス直接燃焼、ガス化やバイオ燃料の陰に隠れて統計情報のある国も量も限られているが近年急速にその勢いを伸ばしているのがバイオガスの利用である。その伸び率はバイオマス全体が過去 10 年で約 1.7% であるのに対しバイオガスの伸び率は 14.7% である。

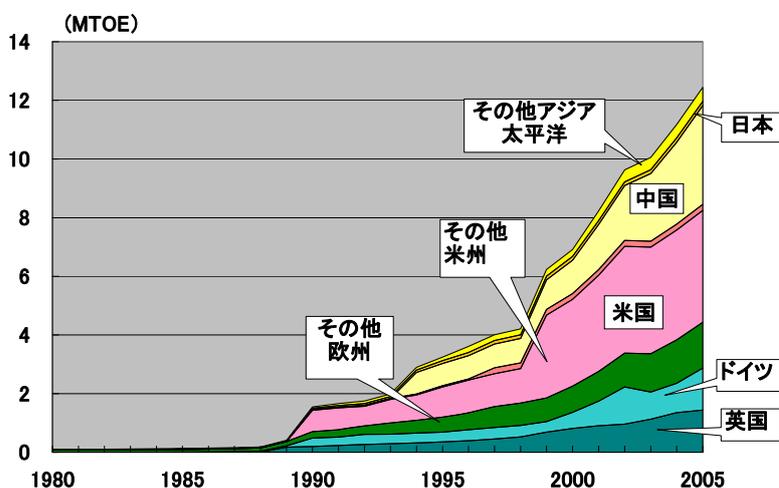
図 2-1 急拡大するバイオガスの利用



(出所) IEA Energy Balance OECD/Non OECD(2007 版)

この急拡大は OECD を初めとする先進国のみならず中国を初めとする途上国でも同じである。欧米ではバイオガスはクリーンな再生可能エネルギーとしての位置づけから政策支援を受け熱利用、発電はもちろん、輸送用にもその用途を拡大している。一方、中国をはじめエネルギー供給が十分でない農村を抱える途上国では農村における自給エネルギーとしてこれを位置づける政府支援を得てこの拡大につながっている。

図 2-2 全世界におけるバイオガスの生産量



(出所) IEA Energy Balance OECD/Non OECD(2007 版)

2. 2 バイオガスの特徴

バイオガスは微生物が有機物を分解して作り出すガスであり、一般的に微生物によるメタン発酵による生成ガスを指す。このメタン発酵は自然界において湿地帯、湖、沼などの無酸素条件下や牛など反芻動物の体内の胃の中での消化過程にも見られるため嫌気性発酵とも嫌気性消化とも呼ばれている。微生物は炭水化物（炭素、水素、酸素）と水が反応す

際のエネルギーを吸収、最終的にメタン (CH₄) と一酸化炭素 (CO) を生成する。実際のバイオガスの成分はメタン (CH₄) 60-70%、二酸化炭素 (CO₂) 30-40%と微量の窒素 (N₂)、硫化水素 (H₂S)、およびアンモニア (NH₃) を含む。

生物由来であるのでバイオメタンとも呼ばれるが最近ではバイオ水素生産技術にも期待が寄せられている。もともと自然界に存在するメタン発酵と呼ばれるプロセスであり、有機物を分解、栄養分を次世代に伝えるための生態系の循環を維持する一役を担っている。このバイオメタンをエネルギーとして消費した場合、再生可能エネルギーとして CO₂ 抑制に繋がるだけでなく、温室効果ガスとして CO₂ の 21 倍 (地球温暖化係数) の効果をもつメタンを抑制することにも繋がる。

ちなみにメタン発酵においては微生物が利用するエネルギーは、たとえばブドウ糖を分解する場合、理論上、もともと分解前の有機物が有するエネルギーのせいぜい 2%で、分解後のガス体にはもとのエネルギーの 98%が保存される非常に効率的なプロセスであることも大きな利点である。なお、実際には微生物の増殖などにエネルギーが失われるがそれでもメタンとして 90%近いエネルギーが保存される。¹

さらにすべて微生物による固体・液体有機物の気体への変換であり、残差が少なくなる長所もある。もともと自然界にある有機物循環過程を利用しているためこの残差は肥料として次の生物成長の栄養ともなる。このメタン発酵は水分が 50%から 90%、温度が 10 度から 100 度超まで適応できるのは自然界のいろいろな条件下で進化してきた結果である。嫌気性微生物は嫌気性が示すとおり地球上に酸素が誕生する前から存在する非常に古い微生物であり、大気中に酸素が大量に集積する前、すなわちリグニンの多い木質植物が地球上に出現する前に進化した自然界のプロセスであるためリグニンを含む木質の分解は不得手である。しかし幸運にも自然界は木質植物の出現に合わせこれを分解する微生物をも生み出している。

メタン発酵における発酵液はバイオガスを生成する微生物の集合体であり、メタン菌を始め硫酸還元菌・セルロース分解菌・光合成細菌等様々な嫌気性微生物が生態系を形作っている。周辺の沼や水路あるいは家畜糞尿にある微生物を種として用いた周辺の環境に近い自然な醗酵が特徴である。元々ある地元の生態系をそのまま環境浄化とエネルギー生産に生かす点に特徴がある。

この自然界のメタン発酵を人工的に利用するには埋め立て地や下水、環境に合わせて設計された嫌気性消化装置などで行われる。このメタン発酵法は 19 世紀から欧州において廃水・汚水衛生処理技術として開発されてきた。すなわち下水汚泥の処理が目的であったが現代は環境や食料問題が顕在化、さらにかつて無いエネルギー価格の高騰が続き、生ゴミ、食品工場廃棄物、および下水汚泥などの有機性廃棄物はバイオガスの原料として新たな価値を生み出している。

なおバイオガスの主成分がメタンであるように地球上のメタンの発生源は湿地帯、稲作、

¹ 木田健二、メタン発酵の最新研究、「バイオガスの最新技術」

バイオマスの燃焼、埋め立て地、家畜、海洋であるが生物がほとんど約 70%を占めている。これら生物源のメタンはメタン発酵による。しかし都市ゴミや産業廃棄物が急速に増えている現在これら人工物からのメタンガスの増加は温室効果の観点から特に注意が必要である。実際、日本の全メタン放出量の 3 割は、都市ごみ・産業廃棄物の埋め立て地から発生しているといわれている。²

ごみでは急速に発展している中国がアメリカを超えて世界最大の都市固体廃棄物 (MSW) 発生国である。2004 年時点で都市部 1 億 9,000 万トンの MSW を出し、2030 年にはその発生量は少なくとも 4 億 8,000 万トンに達すると予想されている³。中国のみならず世界における廃棄物からのメタンガスを利用せずそのまま大気中に放出すれば現在均衡している地球大気の大気中のメタンガス濃度への影響が心配される。

温室効果ガスの観点からのライフサイクル分析からはバイオガスを化石燃料による熱供給の代替とした場合、温室効果ガスの減少は化石燃料の場合の 75%から 90%という研究がある。輸送用燃料を置き換えた場合には 50%から 85%である。輸送用燃料としての応用は特にスウェーデンが進んでいるがここでの研究によれば輸送用燃料として小麦をエタノールの原料として用いる場合とバイオガス原料として用いる場合バイオガスの方が効率的である。小麦や菜種を原料にバイオガスとエタノールを生産する場合、同量の化石燃料を代替するのにバイオガスの方がバイオ燃料より 2/3 の面積の農地で済むとする研究結果がある。⁴

2. 3 途上国農村におけるエネルギー供給への寄与

中国、インド、ベトナム、ミャンマーなどアジアの農村でバイオガスの利用が進んでいる。そのほとんどが 10m³以下のタンク容量の家庭用がほとんどであるが人口増加と森林破壊から燃料となる薪が欠乏する中、地方における新しいエネルギー源として急速に普及してきている。その大きな利点は高度の技術を要せずコストが安いことである。

たとえば中国の広西自治区はバイオガスの導入に積極的な地区の一つであり 2007 年末時点において 300 万世帯以上でバイオガスを導入。2015 年までに全農家の 74%でバイオガスの利用を目標としている⁵。

広西自治区南寧市にある中学 (青秀区長塘鎮初級中学) では、中学の学生寮のトイレと数十頭の豚の糞尿からバイオガスを生産し、給食の調理の燃料や、ボイラーの助燃剤として利用、また副産物の肥料も学校敷地内にある農園で利用している。これは 2003 年における広西自治区政府の関係者の実地調査の結果として、長塘鎮中学校を「農村中・小学校バイオガス建設プログラム」のパイロット学校に指定し、薪の消費を少なくして森林資源を

² 環境省、2006 年

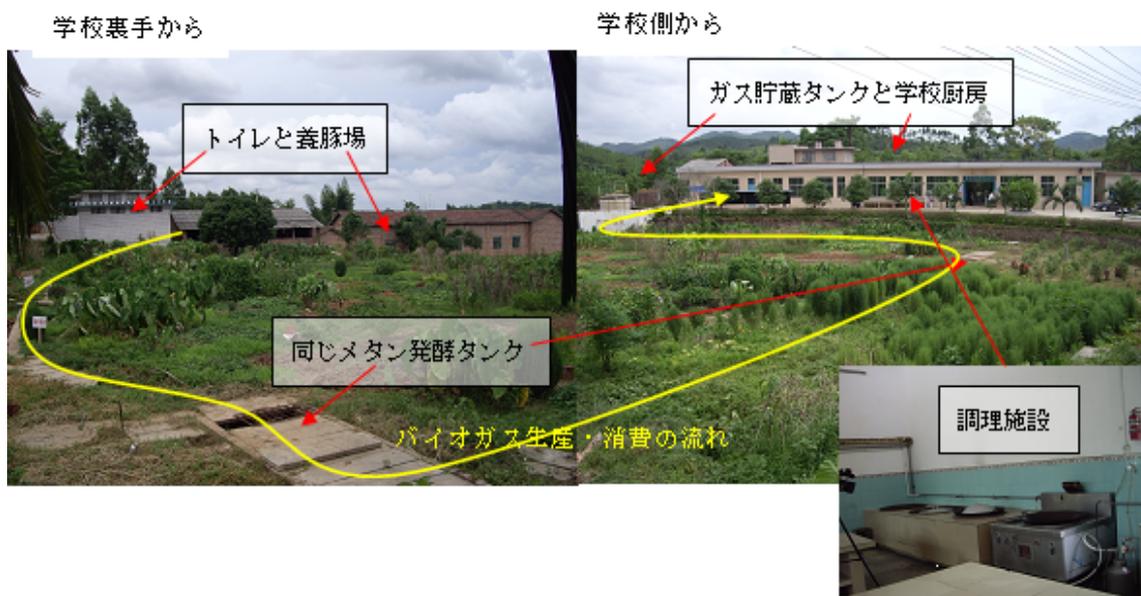
³ WB, Waste Management in China

⁴ Hanna Savola

⁵ International Forum on Renewable Energy development and New Rural Construction in Guangxi

保存するためと説明されている⁶。

図 2-3 長塘镇初級中学のメタン発酵システム



上記写真に見るようにシステムはいたって簡単である。若干高い位置にあるトイレと養豚場からの糞尿を中庭地下の発酵タンクに集め、生成したガスを裏庭上部にあるガスタンクに貯蔵、ガス管を通して適宜、ガス灯としてまた調理用に用いる。総工費 26.18 万人民币 (日本円にして約 400 万円)、発酵タンク容積 220m³、ガス貯蔵タンク容積 20m³である。一日当りのバイオガス生産量 45.5m³は全校エネルギー消費量の 20%に相当し、薪の節約量は 353kg/日、薪代替率は 67.8%であり当初の薪の節約目的は十分果たしている。

中国国家発展改革委員会「再生可能エネルギー11時5カ年計画」⁷によるとバイオガスからのバイオメタンの利用量は 2005 年の中国全体実績で 70 億 m³、2010 年と 2020 年の目標をそれぞれ 190 億 m³、440 億 m³と定めている。440 億 m³はおよそ 400 兆 kcal に相当、日本の都市ガス需要が 2006 年で 340 兆 kcal であるから中国の十数年後のバイオガス生産量は現在の日本の都市ガス需要をはるか上回ると推定される。

バイオガスの利用ではネパールも成功例である。すなわちネパールではガスの利用としては、バイオガスが 100%であり、天然ガスの利用はない。バイオガスの一次エネルギー供給量は、ネパール政府等の支援によるバイオガスサポートプログラムにより大幅に増加しており、2005 年には 48,000 石油換算トンのバイオガスを生産している。

この支援プログラムは、農村家庭におけるバイオガス設備の設置に対して補助金を支給するもので、ネパール政府やオランダ政府の支援により 1992 年より開始され、1997 年か

⁶ 南寧市青秀区農村中・小学校バイオガス建設プログラムパンフレットより

⁷ 海外電力 2008.6

らはドイツも支援に加わっている。同プログラムの成果により、2005 年末時点では 15 万件以上のバイオガスプラントが設置され、9 万軒以上のトイレでの排出物がバイオガスプラントにおいて処理されている。また、バイオガス会社 60 社が立ち上がり関連産業において 11,000 人の雇用を吸収するなど産業育成策としても成功している。⁸

3. バイオガス利用技術：有機廃棄物の有効利用

3. 1 メタン発酵/バイオメタンの生成

バイオガス利用技術はメタン発酵による有機廃棄物の有効利用として発展してきた。もともと欧州において家畜糞尿の衛生処理として開発されたが 1970 年代、80 年代の石油危機ではエネルギー安全保障の観点から、また 90 年代以降からは地球環境の観点から有機廃棄物よりエネルギー、すなわちバイオメタンを取り出す技術として注目されてきた。

衛生処理からエネルギーをより効率的に取り出すことに目的が移ることにより家畜糞尿や汚泥だけでなくより広範な有機廃棄物やエネルギー作物を処理する方向に開発が進んでいる。すなわちエネルギーをより多く含む有機物濃度が濃い原料からバイオガス収率を高めることが目的となり、メタン発酵が効率的に進むような攪拌技術や発酵プラントのデザインが重要になってきている。

さらにメタン発酵は違った種類の微生物による複雑な反応の総合であり、これに関わる微生物の生化学反応は温度や水分によって異なる。メタン発酵は一般的に大きく 3 つの段階、1) 加水分解：固体有機物を加水分解、有機酸やアルコールを生成、2) 酸・水素生成：酢酸と水素を生成、3) メタン生成：水素と酢酸からメタンを生成する過程に分けられる。原料や水分、温度によってそれぞれの反応速度が異なるため原料によって全体として最適な反応になるような生化学反応環境を与えることがバイオメタン製造の鍵となる。酸生成過程では水素を発生するので後に述べるバイオ水素製造への応用が研究されている。

なお、自然界においては様々な微生物によって草木が腐って分解されるようにバイオガスの製造においてはセルロース系も含む様々な原料を処理することが利点である。しかし自然においても枯れ木が腐って無くなるのに時間がかかるようにメタン発酵においても木質原料は分解されにくい。この木質原料を分解する過程は上記 3 段階のうち最初の加水分解の段階であるが木質原料の場合この加水分解過程が遅くなり生産性が落ちる。これに対し、たとえば人工的にセルロース分解酵素を加えることによって全体の生産性を高める研究が進められている。一方すでに分解されているような糞尿や生ゴミは 1) や 2) より 3) のメタン生成過程を、早めるべく水分濃度や温度が調整される。

バイオガス生産においてはこのように、メタン発酵と呼ばれる生化学反応に必要な条件、特に水分濃度、温度の違いにより様々なプロセスが存在し、人工的なメタン発酵装置のデザインには高濃度での攪拌技術に加え水分濃度、すなわち有機固形物の含有量と温度が非

⁸ Humanitarian News and Analysis, NEPAL: Biogas technology beginning to make its mark

常に重要な要素となる。IEA⁹では有機固形物含有量 10%以下を湿式、10–25%を半湿式、25–40%を乾式とし、さらに運転温度により 35–40 度の中温、55–60 度の高温と大別している。さらに pH や原料・廃棄物の種類、処理の規模、処理速度などを考慮してその混合方法を決め、それぞれの最適プロセスとコストを考慮したプラントデザインが選択される。

水分濃度については低いほど発酵菌の密度が高くまた温度が高いほど反応速度が高い。しかしまた高温や微生物密度が高いと微生物管理の高度管理技術を要するようになる。従って、欧州をはじめとする先進国においてはエネルギー収率を高めるべく高濃度有機物、高温での高度管理技術が開発されてきている。一方、中国の農村に見られるように途上国では原料を糞尿中心とした常温での単純でコストの安いシステムが普及してきている。

3. 2 バイオガスの原料

このようにバイオガスの生産・利用方法は一般に原料によって異なる。一番古くから使われているメタン発酵は下水・汚泥の処理であり。水分の多く含まれる湿式が一般的である。しかし濃縮して水分量を減らすことが技術的にかつ経済的に可能ならば濃縮して半湿式や乾式とした方がエネルギー回収率は良くなる。日本では下水汚泥の 3 割から 4 割が嫌気性消化を組み込んだシステムによって処理され最終的にコンポストまたは焼却処理されている。

農畜産物残渣としては動物の糞尿が最も世界で広く使われている原料であり、実際、牛の糞尿はメタン収率を増加させ、バイオガスだけでなく肥料も生成される。現在では有機農産物廃棄物を糞尿に付加する混合発酵によりバイオガスの生産性を向上させている。農畜産残渣の利用は特に途上国農村で加速しており動物の糞尿だけでなく人間の糞尿も利用されている。たとえば先に述べたようにネパールでは 15 万件、中国においては 2,600 万件を超える小規模プラントがあり、主に家庭用の灯や調理用に用いられている。

欧州の農家においては途上国より規模が大きく熱とともに電力も供給する熱電併給システム (CHP) が普及している。ドイツでは 2000 件を超える農家がこれを実施している。熱は発酵槽を暖めたり農場用に使われ電力は公共配電網を通して電力会社に売ることができると農家の収入となる。農家の収益となるため複数の農家が協力してプラントサイズの大規模化と様々な原料の混合発酵が普及してきている。一方ドイツではこの原料となる農畜産物残渣が少なくなるに従って農家ではバイオガス用エネルギー穀物としてトウモロコシ、大麦、牧草なども原料とするようになってきている。2002 年では平均的農場で 330kW の設備容量を持っている。

食料産業からの有機固体産業廃棄物もこれ単独ではメタン発酵が困難であるものの下水汚泥や糞尿と混合することによりこれらのメタン発酵も可能になってきている。特に油脂の多く含まれる廃棄物からバイオガス生産が大きい。また家畜などの屠殺場からの廃棄物残渣もバイオガス資源である。人間に危険を及ぼすような、たとえば狂牛病のリスクをは

⁹ IEA Bioenergy Implementing Agreement Task 37

らむ廃棄物は焼却されるが人間の食用にならない種類の動物や食用外部分など、またこれらを含む廃棄物もバイオガスの原料に適している。

都市廃棄物や一般家庭廃棄物も有機物を多く含んでいる。これら有機物を分離すればバイオガスや肥料として利用できる。特に生ゴミの分解率は 8 割とされその減量化、エネルギー生産効果大きい。むろんランドフィルとして廃棄された有機物からはバイオガスが利用されているが有機物を分離した方がバイオガスとしての利用やランドフィルへの影響も良好なためランドフィルへの有機物の混入を制限することが勧められている。欧州では 2014 年までにランドフィルにおける有機物含有量を 65% までと制限する目標を設定するなど廃棄物から有機物を分離してこれを原料とする方法が普及してきている¹⁰。比較的固体有機物の多く含まれる肥液を連続的に発酵槽に送り込む方法であるが都市ゴミからいかに効果的に有機物を分離するかが鍵となっている。

3. 3 バイオガスからバイオメタンの精製

バイオガスの主成分はメタンと二酸化炭素であるが微量の硫化水素や窒素、アンモニアなども含まれる。したがってバイオガスはその最終利用形態によってこれらの不純物を処理、すなわち精製する必要がある。すなわち調理用コンロやガス灯など炎の利用から自動車用燃料としての利用では精製の度合いが大きく違いこの違いがそのコスト競争力の要因となる。バイオガスを燃料として用いる場合、中でも硫化水素と二酸化炭素が大きな問題となる。すなわち微量の硫化水素は生産段階においても臭気や腐食の原因となるのでこれを除去するのが一般的である。通常は酸化鉄などと反応させて硫化鉄として脱硫するのが一般的であるが硫黄を食べる嫌気性微生物を利用した生物硫化水素除去システムも研究されている。

単なる炎や熱用ガスとしての利用はこの硫黄分を取り除くなどで直接利用が可能であるが天然ガス網への供給や自動車用燃料として用いるにはメタンとしての純度を高める必要がある。すなわち通常 3 割以上を占め、単位容量あたりの熱量を下げる二酸化炭素を如何に取り除くかがバイオガスのコスト競争力を決める重要な要因となっている。

実際、スウェーデンではバイオガスからメタン純度を 97% にまで上げて輸送用燃料としているが、日本においても長岡中央浄化センター、金沢市臨海水質センター、神戸市東灘処理場においてバイオガスのメタン精製を行っている。特に東灘処理場では 98% まで精製してスウェーデン同様天然ガス自動車用燃料として用いている。

このようにバイオガスをメタンガスとして利用するにはガス精製技術が重要であるが現在では主に二酸化炭素が水に溶解し易い性質を利用した高圧水法（液吸収法）、特殊な膜のガス透過速度の違いを利用した膜分離法、ゼオライトなどにおける圧力差でのガス吸着能力の違いを利用した吸着法が普及している。上記日本の例では精製手法として 1 番目の高圧水法を用いている。

¹⁰ EU Landfill Directive 99/31/EC

3. 4 水素発酵/バイオ水素の生成

水素はエネルギーの中でも最もクリーンな選択肢であり、燃料電池の燃料でもある。ところでメタン発酵においては、先にも述べたように水素生成プロセスが伴う。近年注目を浴びているのがこれを利用した有機物からの水素製造である。微生物を利用した水素生産プロセスは、再生可能資源であるバイオマス由来原料が利用可能であること、有機廃棄物の排出を伴わないこと、ほぼ常温常圧のプロセスであること等の点から環境負荷の少ない持続可能な社会にふさわしい技術の一つであろう。

微生物を利用した水素製造は光依存型と光非依存型の二つに大きく分類される。前者は微細藻類や光合成細菌など光合成微生物を利用したプロセスであり、後者は先に述べたメタン発酵に伴う嫌気性微生物を利用した水素発酵プロセスである。特に水素発酵は、光依存型に比べ細菌の増殖速度が早いことならびに、メタン発酵同様利用可能な有機物の範囲が広いことから期待されている技術である。

この水素生成プロセスでは水素と酸が約3対7の割合で生成されるがメタン発酵ではこの両者ともメタン生成に使われる。したがって嫌気性細菌を利用した水素発酵では元のバイオマスに含まれる水素化合物の3割程度しか水素を生成できないという限界がある。しかしながら水素を取り出さず全てメタンに変換した後、メタン改質による水素製造した場合はそのエネルギー効率は70%にとどまるため、たとえ一部でも水素を生成、残りをメタン発酵させる、すなわち水素発酵とメタン発酵を連続させた二段発酵の方がエネルギー収率が高いとされている¹¹。なおこの場合においても、現在の所、水素発酵がまだ競争力において電気分解や改質に劣るのは水素発酵における水素生産速度が低いことが大きな理由であるがこれはメタン発酵でも同様であり大きな課題となっている。

なお微生物を用いた水素製造には他に硫化水素から光触媒を用いて太陽光エネルギーを利用して水素を生成する方法も研究されている¹²。この技術では硫化水素から光エネルギーで水素が取り出された後の硫黄を嫌気性の硫酸還元細菌を用いて硫黄から硫化水素を再生するところに生化学反応を用いた特徴がある。

¹¹ 河野孝志、第3章 水素発酵の最新研究、「バイオガスの最新技術」

¹² 山崎他、http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/kagaku/h17/kagaku/data/K1747.pdf

4. バイオガス利用技術：世界主要国における開発動向

バイオガスの重要性は環境の観点からだけでなく経済性の観点からも重要になってきている。すなわちバイオガスの主成分であるメタンは天然ガスの主成分でもあるが、高騰する石油価格の連動で天然ガス価格も高騰する中、廃棄物などから放出されるバイオガスをただ燃焼して大気中に放出するより熱、電気および燃料として用いるという選択肢がますます重要になってきている。実際、欧州を中心にバイオガス開発を奨励する法律を制定する国がどんどん増えてきている。2007 年にはエネルギーに使用するために EU 各国で、20Mtoe 以上と推定される賦存量のうち 5.9Mtoe 近くのバイオガスが生産された。2006 年から 20.5%の伸びである。2006 年は 2005 年に比べ 13.6%の伸びであったことを考えると近年のバイオガスの伸びは環境問題やエネルギー価格の高騰を追い風に加速を続けているといえよう。

図 4-1 欧州のバイオガス生産の内訳 (2006~2007 年)

	2006			計	2007			単位ktoe 計
	ランドフィルガス	汚泥ガス	その他		ランドフィルガス	汚泥ガス	その他	
ドイツ	383.2	270.2	1011.7	1665.1	416.4	270.2	1696.5	2383.1
英国	1318.5	180		1498.5	1433.1	191.1		1624.2
イタリア	337.4	1	44.8	383.2	357.7	1	47.5	406.2
スペイン	251.3	48.6	19.8	319.7	259.6	49.1	21.3	330
フランス	150.5	144	3.6	298.1	161.3	144.2	3.7	309.2
オランダ	46	48	47.1	141.1	43.2	48	82.8	174
オーストリア	11.2	3.5	103.4	118.1	10.7	2	126.4	139.1
デンマーク	14.3	21	57.6	92.9	14.3	21	62.6	97.9
ベルギー	51	17.6	9.1	77.7	48.1	18	12.5	78.6
チェコ	24.5	31.1	7.8	63.4	29.4	32.1	17	78.5
ポーランド	18.9	43.1	0.5	62.5	19.1	43	0.5	62.6
ギリシャ	21.2	8.6		29.8	38	9.8		47.8
フィンランド	26.1	10.4		36.5	26.4	10.3		36.7
アイルランド	25.4	5.1	1.8	32.3	23.9	7.9	1.7	33.5
スウェーデン	9.2	17.1	0.8	27.1	9.2	17.1	0.8	27.1
ハンガリー	1.1	8	3.1	12.2	2.1	12.4	5.7	20.2
ポルトガル			9.2	9.2			15.4	15.4
スロバニア	6.9	1.1	0.4	8.4	7.6	0.6	3.8	12
ルクセンブルグ			9.2	9.2			10	10
スロバキア	0.4	6.9	0.4	7.7	0.5	7.6	0.5	8.6
エストニア	3.1	1.1		4.2	3.1	1.1		4.2
リトアニア		1.5	0.5	2	1.6	0.8		2.4
キプロス			0	0			0.2	0.2
EU	2007.3	867.8	1330.8	4898.9	2905.2	887.2	1330.8	5901.2

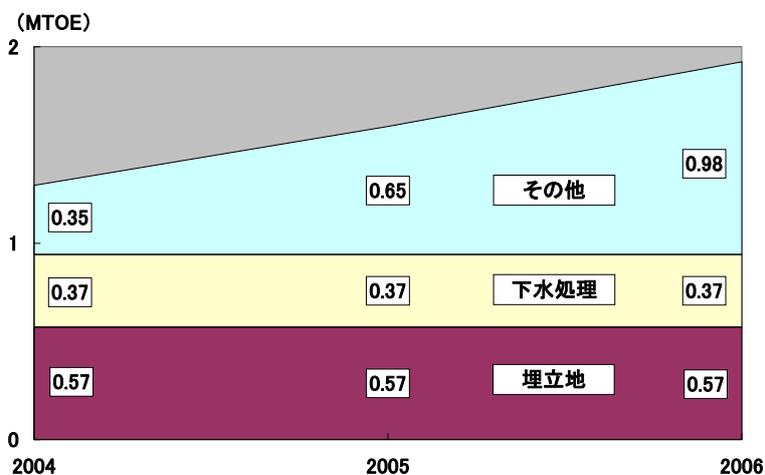
(出所) EurObserv' ER

4. 1 ドイツ

ドイツにおけるバイオガス利用の増加を担っているのは、畜産農家における小規模の電熱併給によるもので、2006 年では 3,500 件に達している¹³。これはバイオガスからの電力供給を支援する電力の固定価格買い取り制度によるものである。また、全バイオガスの用途としても電力供給業者による CHP (熱電併給) が太宗を占めている。

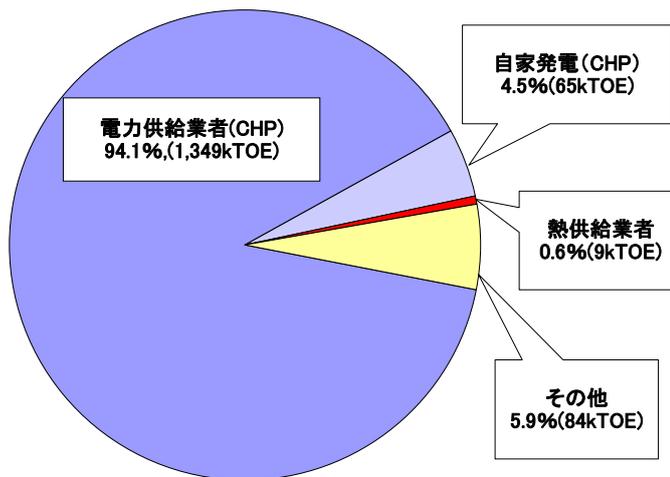
¹³ EurObserv' ER

図 4-2 ドイツにおけるバイオガス生産の内訳 (2004~2006 年)



(出所) EurObserv' ER

図 4-3 ドイツにおけるバイオガスの内訳 (2005 年)

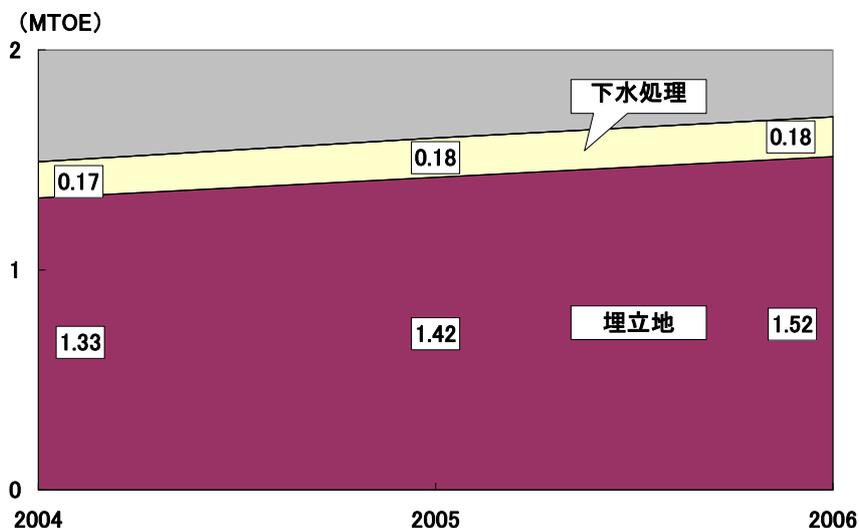


(出所) IEA Energy Balance OECD(2007 版)

4. 2 英国

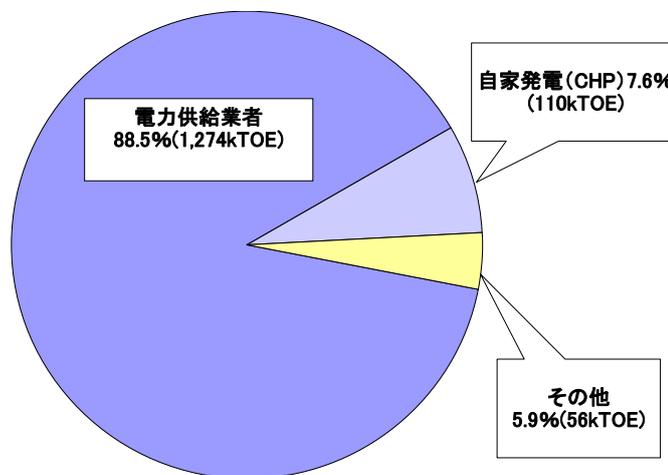
英国では埋立地 (377 施設)、下水処理場 (125 施設) においてバイオガスが生産され、埋立地ガスが増加している。利用形態としては埋立地であることから CHP(熱電併給)ではなく電力用がほとんどである。また再生可能エネルギーとして再生可能エネルギー利用証書の対象でもあることが増加の一因でもある。

図 4-4 英国におけるバイオガス生産の内訳 (2004~2006 年)



(出所) EurObserv' ER

図 4-5 英国におけるバイオガスの内訳 (2005 年)

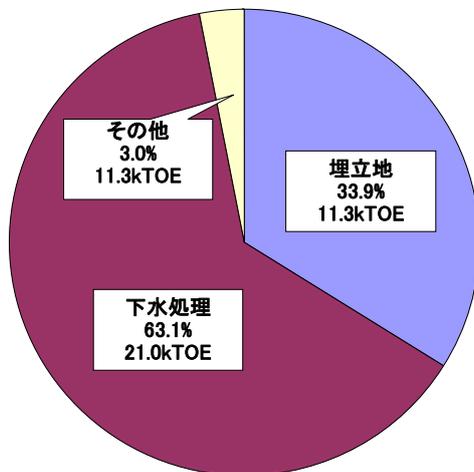


(出所) IEA Energy Balance OECD(2007 版)

4. 3 スウェーデン

スウェーデンでは埋立地 (139 施設)、下水処理場 (70 施設) においてバイオガスが生産され、下水処理場からのバイオガスが多い。熱利用や発電用だけではなく、バイオガスの 12%が輸送用燃料として用いられていることがスウェーデンの特徴である。

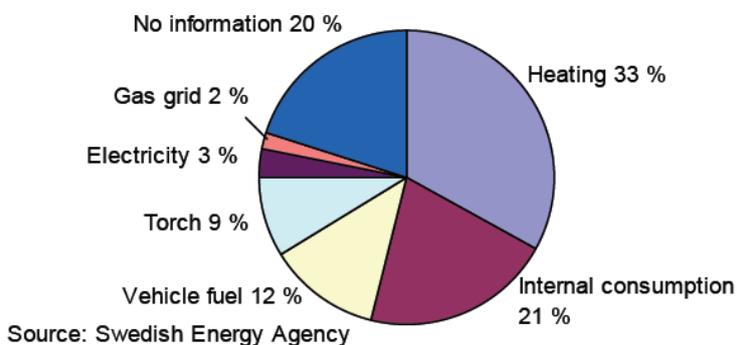
図 4-6 スウェーデンにおけるバイオガス生産の内訳 (2006 年)



(出所) EurObserv' ER

図 4-7 スウェーデンにおけるバイオガス利用の内訳 (2005 年)

Biogas utilization (GWh) in Sweden 2005



(出所) Svenskt Gastekniskt Center AB¹⁴

ただ、輸送用燃料としては純度のより高いメタンガスが必要とされ、硫黄化合物などに関する品質規制も通常のバイオガスより厳しい。このため、バイオガスからバイオメタンに精製する設備が必要となる。バイオメタン精製設備では精製されたバイオメタンは Wobbe 指数¹⁵、熱量が天然ガスと等量になるようにプロパンガスで熱量・密度等が調整され、天然ガスのパイプライン網に注入される。消費者に輸送する同一の天然ガスパイプ

¹⁴ ” BIOGAS – a renewable fuel for the transport sector for the present and the future” (<http://www.sgc.se/Rapporter/Resources/Biogasinfo07.pdf>)

¹⁵ 燃焼器のノズルから噴出するガスの速度が、ガスの比重に影響を受けることを補正した燃焼性指標。ウォッベ指数が定められた燃焼性の範囲を逸脱すると、燃焼が不安定となり不完全燃焼や赤熱不足といった現象が生じる。

イン網に、LNG による天然ガスとバイオガスを精製したバイオメタンが供給されることになる。

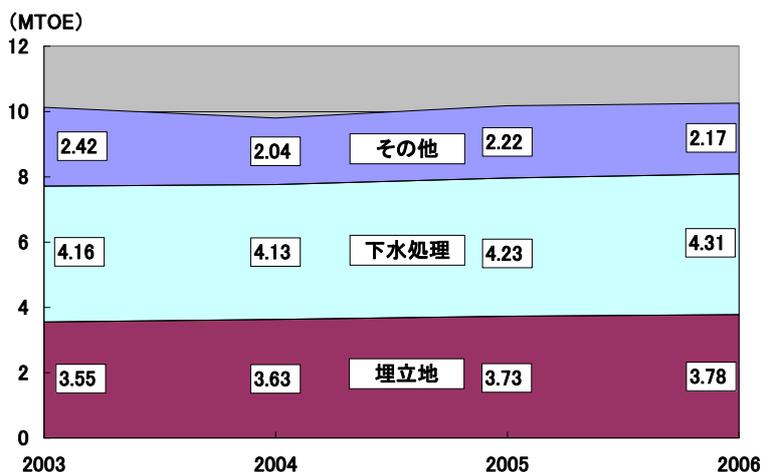
輸送用燃料としてのバイオメタンは 1992 年に使用を開始、1996 年から本格的な導入が始まった。現在は自動車、バス、トラック、鉄道列車¹⁶で使用されている。自動車用としては 200 気圧に圧縮され CNG（圧縮天然ガス）自動車において使用されるが、近年はバイフューエルカー（Bi-Fuel Car）が増加している。バイフューエルカーはガソリンとガス（天然ガス/バイオガス）の二種類の燃料を利用できるので、ガスの供給ステーションの無い地域でも、ガソリンを利用して走行できる。

供給ステーション数もバイオガスの供給量とほぼ平行して増加し、2007 年の一般車用ステーションは 86 ヶ所、バス用が 27 ヶ所となっている。なお、全国のガソリンスタンド数は 3800 ヶ所である。CNG 自動車の導入台数と供給ステーション数の増加により、天然ガスを含めた全体の供給量は増加するが、バイオガスの供給量の方が供給拡大のスピードが速く、2006 年に天然ガスの供給量を超えた。

4. 4 米国

米国におけるバイオガスは廃棄物処理の面から進められてきた。埋立地ガスについては 43 州で 450 件以上のガス供給を行っており、100 件以上の農場バイオガスシステムが稼働している。バイオガスの利用用途は電力会社や独立発電事業者による発電用途が半分以上を占め、1/3 程度が産業用のガスとして使用されている。

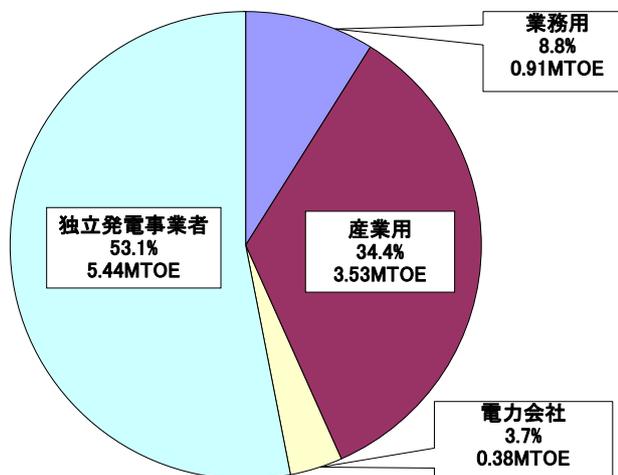
図 4-8 米国におけるバイオガス生産の内訳（2003～2006 年）



(出所) EIA, "Renewable Energy Annual, 2006"

¹⁶ 2005 年より、混合燃料を使用する列車もスウェーデン中部のリンシェーピング市からヴェステルヴィーク市まで（全長約 120km）導入されている。既存のディーゼル列車に、バイオガス燃料バスに使われているエンジンと同じものをボルボ社が提供している。

図 4-9 米国におけるバイオガス利用の内訳 (2006 年)

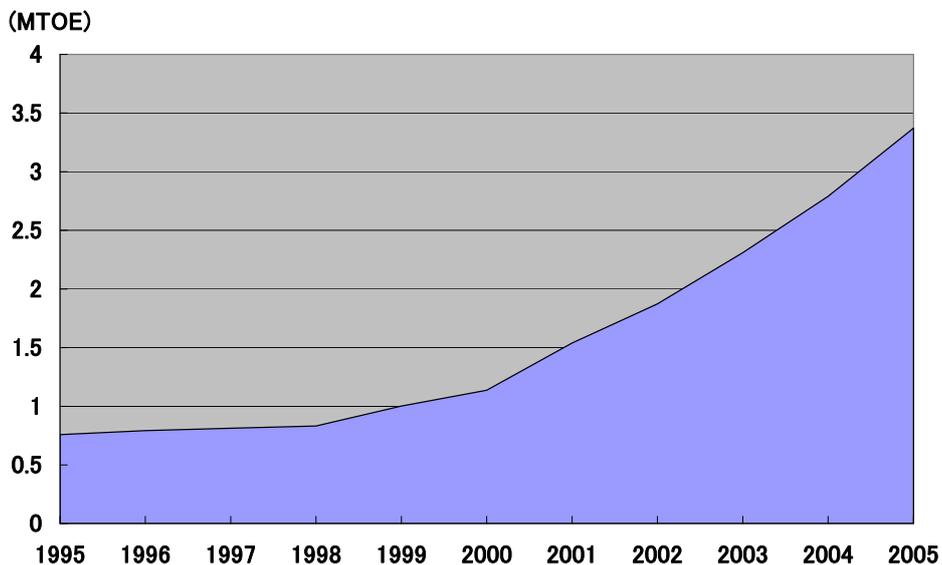


(出所) EIA, "Renewable Energy Annual, 2006"

4. 5 中国

中国におけるバイオガス利用は 1990 年代末頃から急速に普及してきており、2005 年末時点では、3.4MTOE (80 億 m³) の利用となっている。中国でのバイオガス発生源には家庭用メタンガス、大型家畜家禽養殖場メタンガス、工業有機排水メタンガスがある。特に広西壮族自治区、四川省、湖南省、雲南省、江西省での普及が進んでおり、農業における収益の増加に生活環境の改善を結びつけた農村地域でのバイオガス生産量が多い。2007 年末時点の全国における家庭用バイオガスタンクの設置は 2,600 万世帯に達しており、2010 年には 4000 万世帯での導入を目標にしている。中国でのバイオガス利用は、薪の節約につながるため、森林破壊の回避の点からも重視されている。

図 4-10 中国におけるバイオガスの一次エネルギー供給量推移 (1995~2005 年)

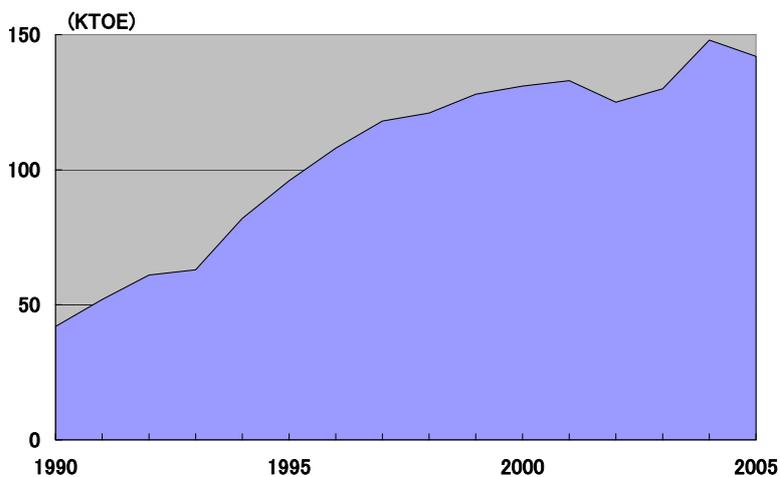


(出所) IEA Energy Balance Non OECD(2007 版)

4. 6 日本

日本においても実証実験等を通じてバイオガス設備の導入が行われており、導入量も増加している。バイオガスの生産は主に畜産分野、食品・生ごみ分野、下水分野で取組みが行われている。

図 4-11 日本におけるバイオガスの一次エネルギー供給量推移 (1995~2005 年)

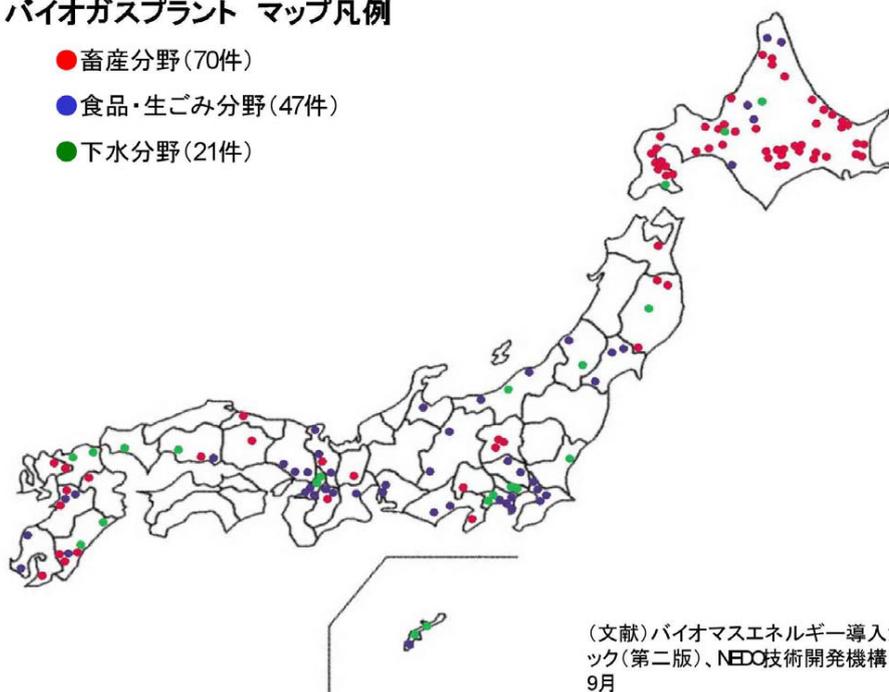


(出所) IEA Energy Balance OECD(2007 版)

図 2-12 日本におけるバイオガスプラント¹⁷

バイオガスプラント マップ凡例

- 畜産分野 (70件)
- 食品・生ごみ分野 (47件)
- 下水分野 (21件)

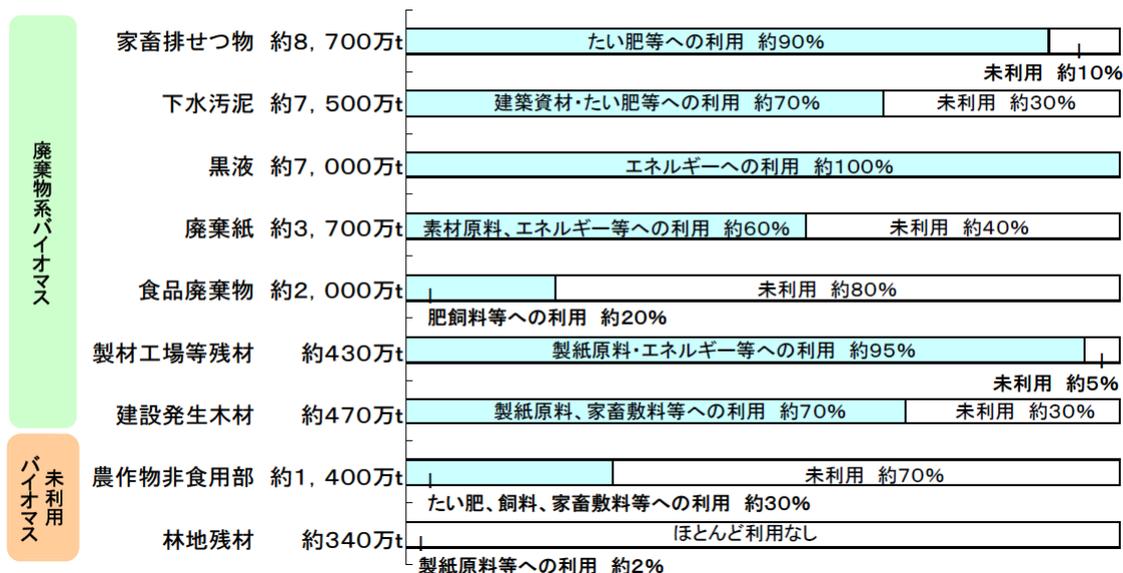


(文献) バイオマスエネルギー導入ガイドブック(第二版)、NEDO技術開発機構、2005年9月

バイオガスの原料となる家畜排せつ物や下水汚泥に未利用分があり、集約型バイオマスである食品廃棄物の利用も十分な余地がある。

図 4-13 日本におけるバイオマス賦存量・利用率 (2006 年)

我が国のバイオマス賦存量・利用率(2006年)



(出所) バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議資料

¹⁷ http://www.biogas.jp/pdf/b_siori.pdf

日本におけるバイオガスの利用は熱源や発電用であるが、先に触れたように燃料電池用の水素源や輸送用燃料としての取組みも行われている。燃料電池への応用は世界初として 1998 年にサッポロビール千葉工場において開始され、ビール製造に伴う有機性排水を嫌気性廃水処理によるバイオガスを燃料の水素源とした燃料電池による発電システムが導入されている。このバイオガス利用燃料電池で得られた電力と熱は工場内で使用され、有機排水のリサイクルと同時に、電力原単位 6%、燃料原単位 6%の削減が可能な高効率なエネルギー利用が利点となっている。他方、燃料電池システム及びメタン・水素精製のための前処理費用が高く、コスト削減が課題となっている。

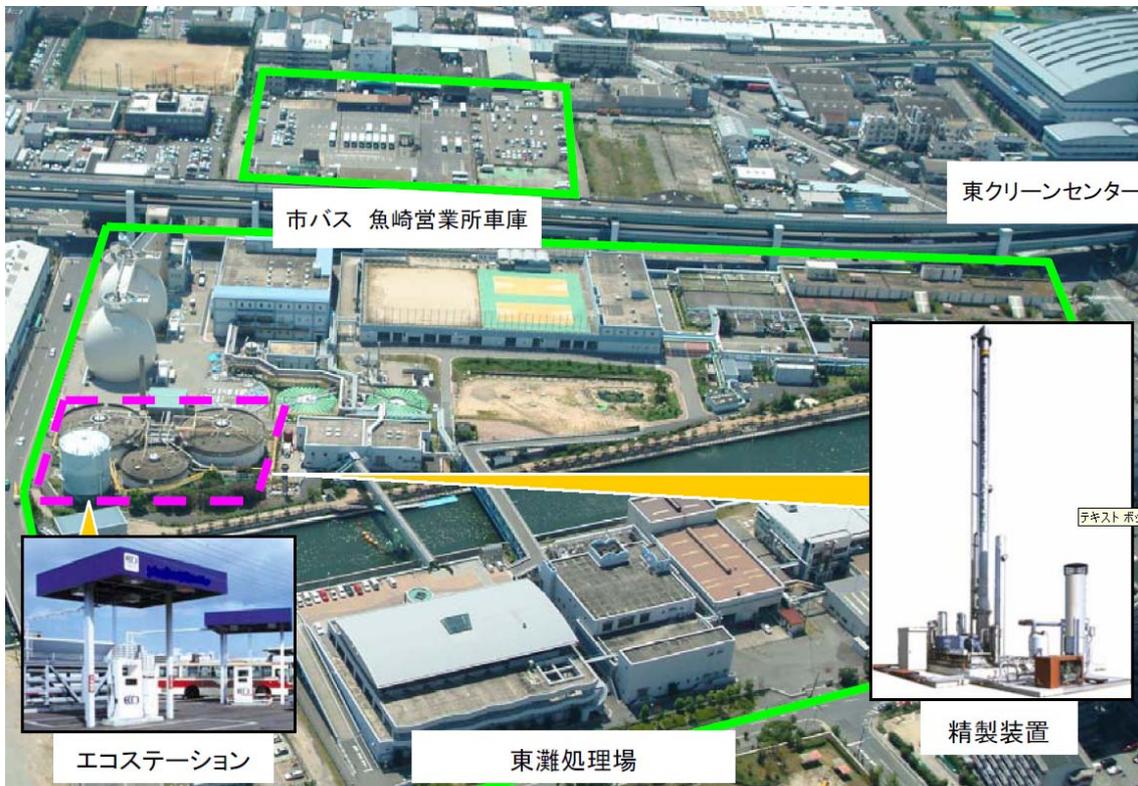
図 4-14 バイオガスの燃料電池への応用例



(出所) 新エネルギー財団ホームページ(<http://www.nef.or.jp/award/kako/h10/99syo10.htm>)

日本におけるバイオガスの輸送用燃料としての取組みは、神戸市において実証実験として 2006 年 10 月より開始され、2008 年 4 月に同市東灘処理場の敷地内にガス精製設備、ガスタンク設備、エコステーションを整備し本格的な供用を開始している。この下水処理場のバイオガス発生量は日量 8,000m³ 程度あり、純度 98%の精製メタンガスが日量約 5,000m³ 得られる。このうち 3,000m³ を下水処理場で使用し、残り 2,000m³ を CNG 自動車に供給することになっている。これは、市バスの 1 日当たりの走行距離を 50km とすると 40 台分の燃料に相当し、市バスへのバイオガス供給による二酸化炭素の排出量削減効果は年間約 1,200t に相当する。

図 4-15 神戸市バイオガスプロジェクト



(出所) 神戸市ホームページ(<http://www.city.kobe.jp/cityoffice/30/031/pdf/bio.pdf>)

5. まとめ

バイオガスの利用技術開発動向を概観した。日本でも東京ガスが 2008 年 4 月よりバイオガスを購入することを発表したところであり、バイオガスの再生可能エネルギーとしての供給がこれからますます期待されている。

バイオガスの優れているところはバイオマスの中でも生態系の有機物循環をそのまま利用し、原料を選ばないところにある。現在セルロース系エタノールによるバイオ燃料が目指している食料や環境と競合しないバイオマスエネルギーの典型的利用技術の先取りとも言える。

欧米先進国では有機系廃棄物の有効利用としても、またエネルギー回収率の高さからみてもバイオマス利用技術の中では、バイオガスは特に普及拡大を続ける技術であろう。しかもっと重要であるのは今回も紹介した中国をはじめとする途上国での拡大であろう。実際、中国のバイオガスだけでも 2020 年目標では現在の日本の都市ガス需要をはるかに凌駕している。このように中国、インドなどエネルギー需要の急拡大を続けるこれらの国々

では先進国よりもバイオガスへの需要も大きい上に、地球の将来への影響も大きい。これらの国々は農村でバイオマスの直接燃焼をエネルギー源としていたのをバイオガスに転換するだけでも生態系やエネルギー安全保障への貢献は未知数であるもののプラスに働くことは間違いないであろう。

先進国におけるバイオガス開発技術におけるバイオテクノロジーの進歩もさることながらこれら途上国における単純で有効なバイオガス利用の拡大はバイオマス利用技術の中でも特に注目される場所である。

参考文献

- IEA Energy Balance OECD(2007 版)
- IEA Energy Balance Non OECD(2007 版)
- IEA , Biogas Production and Utilization, IEA Bioenergy task 37
- Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste
- Climate Change 2007 The Physical Science Basis, IPCC 2007
- “Biogas Production and Utilisation”
(<http://www.iea-biogas.net/Dokumente/Brochure%20final.pdf>)
- EUFORES, “EurObserv’ ER”, (<http://www.eufores.org/index.php?id=29>)
- Renewable Energy Foundation, “UK Renewable Energy Data”
(http://www.ref.org.uk/Pages/4/uk_renewable_energy_data.html)
- Svenskt Gastekniskt Center AB, ” BIOGAS – a renewable fuel for the transport sector for the present and the future”
(<http://www.sgc.se/Rapporter/Resources/Biogasinfo07.pdf>)
- Margareta Persson, Svenskt Gastekniskt Center AB, “Biogas upgrading and utilization as vehicle fuel”
(http://www.ramiran.net/doc07/Biogas%20III/Margareta_Persson.pdf)
- Kaoru Yamaguchi, “Biogas Utilization in the World” presented at “International Forum on Renewable Energy development and New Rural Construction in Guangxi” (21 July 2008; Nanning, Guangxi Province, China)
- Svenskt Gastekniskt Center AB, “Gasformiga drivmedel -nu och i framtiden”
(<http://www.sgc.se/rapporter/display.asp?ID=1181>)
- Gasföreningen
(<http://www.gasforeningen.se/FaktaOmGas/Fordonsgas/statistik.aspx>)
- Humanitarian News and Analysis, NEPAL: Biogas technology beginning to make its mark (<http://www.irinnews.org/report.aspx?ReportID=75719>)
- Bruno Sander Nielsen, Danish Biogas Association,

- “Biogas in Nordic countries - a brief and Nordic Biogas Conference”
(http://www.sgc.se/nordicbiogas/resources/Bruno_Sander_Nielsen.pdf)
- Hannna Savola, Biogas systems in Finland and Sweden, iiee Theses 2006:18
 - Björn H. Halldórsson, “Metan Ltd. “The case for Methane:Biogas for (Municipal and Private) Vehicles”
(http://www.metan.is/bindata/documents/Driving_sep07A_00064.pdf)
 - EIA, “Renewable Energy Annual, 2006”
(<http://tonto.eia.doe.gov/FTP/ROOT/renewables/rea2006.pdf>)
 - Alternative Energy Promotion Center
(<http://www.aepcnepal.org/gen/bio.php>)
 - バイオガス事業推進協議会、「バイオガス事業の栞」
(http://www.biogas.jp/pdf/b_siori.pdf)
 - バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議、「国産バイオ燃料の大幅な生産拡大」
(http://www.maff.go.jp/j/biomass/b_energy/pdf/kakudai01.pdf)
 - 新エネルギー財団ホームページ(<http://www.nef.or.jp/award/kako/h10/99syo10.htm>)
 - WB, Waste Management in China: Issues and Recommendations, May 2005
 - 環境省、2006 年度（平成 18 年度）の温室効果ガス排出量（確定値）について
 - 橋本沙織、都市ゴミの嫌気性消化の課題
(<http://www.maizuru-ct.ac.jp/civil/shikura/Sotsuken/Hashimoto.pdf>)
 - 神戸市ホームページ(<http://www.city.kobe.jp/cityoffice/30/031/pdf/bio.pdf>)
 - 監修：西尾ほか、「バイオガスの最新技術」
 - 中国国家発展改革委員会「再生可能エネルギー 11 時 5 年計画」、海外電力 2008.6
 - 山崎他、下水処理場をモデルケースとした太陽光利用水素生産システムの構築
(http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/kagaku/h17/kagaku/data/K1747.pdf)

お問い合わせ：report@tky.ieej.or.jp