

平成16年度

バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業・同事業調査
バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業調査

「水素分離膜を利用したバイオガス燃料電池
コージェネレーション事業調査」

成果報告書



目次

研究体制ならびに評価委員会	2
本調査事業の背景と目的	3
1 背景	3
2 目的	23
バイオガスの組成とその特徴	25
1 メタン組成のプラント別比較	26
2 硫黄分の詳細解析	29
メタン発酵槽内の微生物フロラと発生バイオガスとの相関解析の試み	34
1 研究背景	34
2 研究方法	36
バイオガスの脱硫ならびに水蒸気改質特性	45
1 脱硫特性	46
2 水蒸気改質特性	46
利用システムの選定	49
利用システムの仕様	51
1 利用システムのフロー	51
2 エネルギー収支	51
2 利用システムの仕様	52
概算事業費	54
1 概要事業費の算定	54
2 事業収支	54
経済性・環境性・CO ₂ 削減量の評価	
1 経済性	55
2 環境性	55
3 CO ₂ 削減量	55
資料	
調査の概要	56
調査の概要(英文)	57

研究体制ならびに評価委員会

研究体制

業務管理者	知的財産経営戦略本部ディレクター 田中 正男	
経理責任者	財務管理部会計課長 有井博文	
研究実施場所 及び 登録研究員	国立大学法人 山梨大学（本部） 〒400-8510 山梨県甲府市武田四丁目 4-37	
	氏 名	所 属 ・ 役 職
	小宮山 政晴	山梨大学大学院医学工学総合研究部・教授
	御園生 拓	山梨大学大学院医学工学総合研究部・教授
	竹内 智	山梨大学大学院医学工学総合研究部・教授
	楊 漢培	山梨大学大学院医学工学総合研究部・産学連携研究員

評価委員会における登録委員

氏 名	所 属 ・ 役 職
委員長 梅津 一孝	帯広畜産大学畜産学部・助教授
副委員長 佐野 慶一郎	山梨県環境科学研究所環境資源・環境計画学研究室・室長
委員 高橋 潤一	帯広畜産大学畜産学部・教授
功刀 能文	功刀技術士事務所・所長、八戸エリア産官学連携促進事業アドバイザー
石田 宏洋	株式会社テクノバ・特命プロジェクト部長、早稲田大学・非常勤講師
石井 迪男	株式会社サン・グローバル総合研究所・顧問
向山 茂徳	農業生産法人黒富士農場・代表

本調査事業の背景と目的

1 背景

地球環境問題の特徴は、問題が顕在化するまでに長期の時間を必要とすることである。そして、問題が顕在化したときには、多くの場合、被害が広範囲に及んでいることである。また、環境問題が単独で存在する場合はほとんどありえない。なぜならば、地球の多様な生態系における物質的な循環は、大気と水の大循環を駆動源としてつながっているため、一つの汚染が長期的に見ると他のものにも影響を与えることになるからである。一筋縄では解決できない環境問題の複雑さがそこにある。したがって、環境問題の本質を明らかにし、どのような問題解決の方策があるのかを見極めるためには、自然科学系はもちろんのこと、人文・社会科学系の知識を総動員する必要がある。環境学が分野横断科学あるいは学際科学、異分野融合科学といわれる所以である。これから、地球上で人類が循環型社会あるいは持続可能な社会を築いてゆくためには、可能な限り早期の段階で環境の変調を見つけ出すことである。そのためには、日常的な段階から、環境問題にセンシティブであることを心がけなければならない。

現在、地球規模の環境問題における焦眉の課題は、地球温暖化への対応である。地球温暖化のメカニズムは、二酸化炭素をはじめとし、メタンガスや一酸化二窒素、フロンガスなどの温室効果ガスの著しい増加によって説明されている。しかしながら、地球の温暖化が温室効果ガスをより多く排出させているのか、あるいは温室効果ガス（おもに二酸化炭素）の大量の排出によって更なる温暖化が助長されているのかは、現在でも明確な答えが得られていない。アメリカは京都議定書の批准を拒否している。その主な理由は、二酸化炭素の排出抑制によって企業活動が低迷することへの危惧からの批准拒否であるが、上述のような論調も理解した上で排出抑制を拒否していることも確かである。

地球温暖化は、個々人に精神的あるいは肉体的なダメージを直接与えるものではないので、地球温暖化防止のために、個々人で二酸化炭素の削減に努力しようという意識まで到達しにくい課題でもある。この点、地球規模の環境問題でしかも成功した環境政策として評価されているオゾンホールの問題とは、かなり異なっている。

南極の春先（8,9月）にオゾン濃度が毎年減少傾向にあることが観測され、その原因が人工的に作り出された「夢の化学物質：フロン」であることが明らかにされた。オゾン層の破壊によって、個々人が直接的に太陽の有害な紫外線を浴びて、皮膚ガンや緑内障などに罹りやすくなることが世界的に知られ、フロン製造の中止が世界の国々で合意されたのである。オゾンホールが顕在化するまでに 20

数年間を要し、オゾンホールが元に戻るまでには今後 50 年以上もかかるだろうといわれている。また、先に述べたように、環境を元の状態に戻すまでには、次世代にまで及ぶ長期の時間が必要となるのである。

二酸化炭素の削減については、京都議定書を批准した多くの国々において、各国に割り当てられた削減率をもとに、具体的な削減行動が提起される時期にさしかかっている。個々人の環境に対する意識を高め、地域会社や企業、学校や大学などすべてのレベルで二酸化炭素の削減に向けた取組が必要とされているにもかかわらず、削減に向けた具体的な政策は明示されていない。削減目標が達成できなければ、国際的な信用も失墜してしまうことになるだろう。

二酸化炭素削減の最も簡単な方法は、化石燃料に依存してきたこれまでの人間活動を方向転換し、化石燃料の使用を抑制することである。しかしながら、これまでの大量生産・大量消費・大量廃棄のライフスタイルはそう簡単に改めることができないのが現状である。

「人口問題の解決なくして環境問題の解決はない」といわれるように、60 億人を超えた現在の人口をどのように制御するのか（制御が可能なのかも含め）によって、人類と地球の未来は大きく異なってくる。また、人口問題は食糧問題であり、エネルギー問題でもある。単純に、化石燃料の利用を抑制するだけではすまない問題なのである。これも先に述べたことである。

ここでは、人口・資源問題からエネルギー問題を検討し、再生可能なエネルギーの将来予測について検討を加えた。以下にそれぞれの概略を示す。

- 地球規模の環境問題は、産業革命以降の急激な人口増加が主原因となっており、今後の人口推移はオーバーシュートと破局に向かって進む可能性があることを指摘している。
- 世界のエネルギー予測は、未来の社会構造を考える上で重要な要素の一つである。IEA(2002 年)のデータをもとに検討を加えた結果、エネルギー供給から見ると発展途上国におけるエネルギー需要が将来のエネルギー政策を左右すること、エネルギー源の種別では石油や石炭の利用から、天然ガスや再生利用可能エネルギーの利用にシフトしてゆくことが予測される。
- 日本を除く世界の国々では、原子力発電の利用を控える傾向にある。ところが、日本では将来的にも原子力発電所の建設が見込まれており、原子力への依存度が高くなる傾向にある。放射線廃棄物の管理やリスク管理の面から考えると、原子力への依存度を高めることは好ましいことではない。再生可能エネルギーの利用開発をすすめつつ、将来のエネルギー政策を検討する必要がある。
- 新エネルギー資源利用の世界的な動向を見ると、将来、バイオマスのエネル

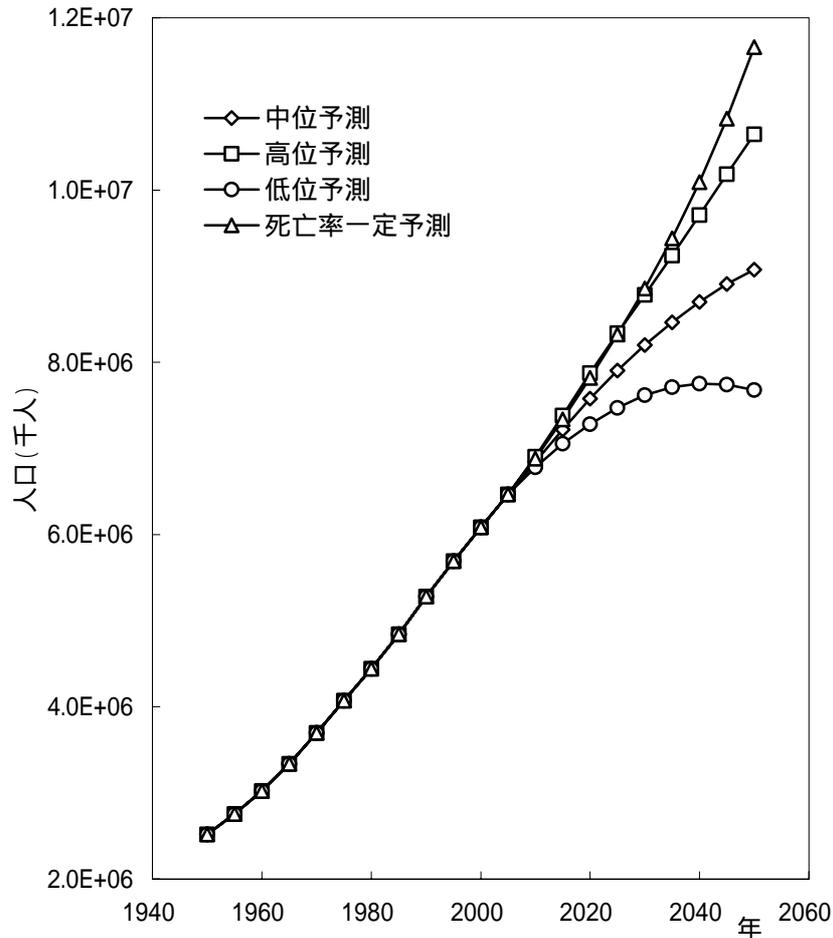
ギー利用が高くなると予測される。木質バイオマスや畜産バイオガスの利用動向を示した。畜産バイオガスは、熱エネルギーだけでなく燃料電池の原料としても再利用可能であり、今後の研究開発が期待される。

- 山梨県全体の 78%が森林面積であり、人手によって植林・管理されている人工林が面積の半分以上を占めている。人工林の収穫量は将来増加傾向にあり、木質バイオマスへの利用が期待される。また、ワインの原料として利用されるぶどうの絞りかすは農業廃棄物であり、バイオマスの原料となりうる。さらに、畜産廃棄物を利用したバイオガスの利用も行われつつある。
- バイオマスを利用した再生可能エネルギーは、カーボン・ニュートラルであることから地球温暖化を助長することなくエネルギーを取り出すことが可能であること、SO_xなどの汚染ガスをほとんど排出しないことなどから、将来の代替エネルギー源として開発が期待されている。

1.1 人口予測

1972 年、ローマ・クラブと MIT の共同研究の成果として「成長の限界」(メドウズ, 1972)が出版され、世界中の人々に大きな反響を巻き起こした。彼らは、人口と資本、食糧、天然資源、汚染が複合的に絡み合うモデルをシステムダイナミックス(島田, 1995)でシミュレートし、近代工業化以前には無尽蔵の資源を宿していると思われた地球が実際には物質的に有限な存在であること、さらに、これまで地球のほんの一部でしかなかった人間の活動が、地球を破局へ導く可能性があることを警告した。それから 20 年後の 1990 年に、最新のより詳細な統計データをもとにして、メドウズ達は「成長の限界」と同様のシミュレーションを実行し、「限界を超えて」(メドウズ, 1992)と題した著書を出版した。そこには、地球が破局へ向かうシナリオと、それを回避し持続可能な社会へ移行するためのシナリオが提示されている。中でも注目すべきことは、将来の人口増加と資源枯渇の予測である。図 I-1 に示すように、国連人口部による世界人口の予測に関し、いくつかの場合に分けてシミュレーション結果が示されている。死亡率一定の場合については除くとして、1999 年に 60 億人を突破した世界人口は、2030 年頃に 80 億人に達し、それ以降も増加の傾向にあることが予測されている。高位予測では、今後、人口増加の速度は減少し増加はゆるやかになるが、2050 年以降も増加し続けると思われる。しかしながら、低位予測では、人口は 2040 年頃ピークに達し、その後僅かに減少し始めることが示されている。

一方、今後 90 億人にも達するであろう人口を養えるだけの十分な資源が地球に蓄えられているとは言い切れない状況にある。図 I-2 は人口と資源の単純なモデルによる数値計算の結果である。このモデルの特徴は、資源の減少が人口に比



図I-1 世界の人口予測

出典 <http://www.un.org/esa/population/unpop.htm>
 Department of Economic and Social Affairs Population Division

例して減少すること、また、人口を左右する死亡率が資源の量によって決定されることである。したがって、資源が潤沢であると人口は増加し、資源が減少し始めると人口も減少することになる。このモデルから示されることは、初期の段階において資源が少しばかり減少しても、人口は増加し続けある時点でピークに達すること、そして、さらなる資源の減少によって、急激に人口も減少してゆく。最終的に、ある一定の資源は存在するが、人口は消滅してしまうという結果となっている。このような人口の急激な時間変動は、オーバーシュートと破局 (Overshoot and Collapse)として知られている。単純なモデルにおいて示された、人口・資源問題であるが、メドウズ達によって実行された大規模なシミュレーション結果も、同じような結果を示していることは興味がある。

図 I-3 は「限界を超えて」(メドウズ, 1992)に示されているグラフである。彼

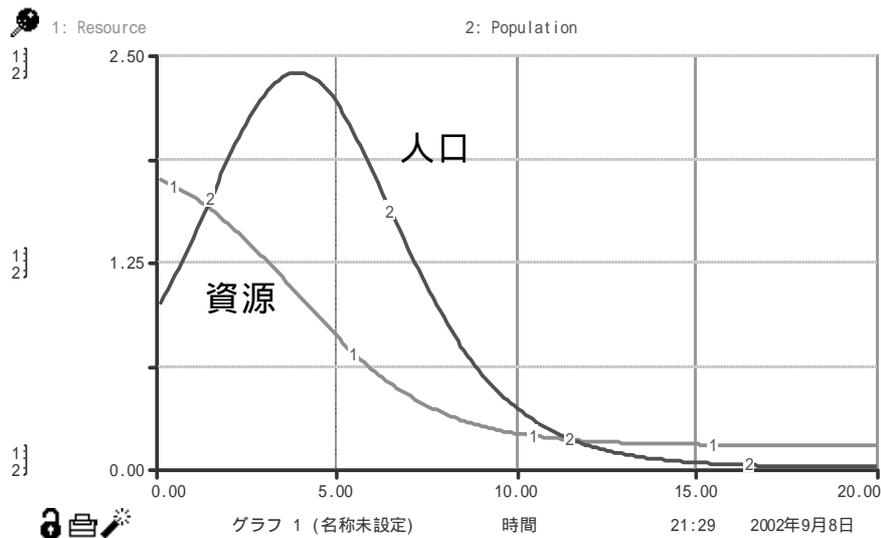


図 I-2 人口と資源の予測

らは、世界中の最新のデータを下に、現在の地球における5つのパラメータ（人口、資源、食糧、汚染、工業生産）について将来を予測した。図の網掛けの部分は、シミュレーションにおける過去の実績データである。この図で特徴的なことは、資源を除いて、ほかの全ての変動がある時点でピークに達し、それ以降減少していることである。食糧と工業生産は人口の急激な増加に追従するかたちで増加しているが、人口がピークに達する前から減少し始めている。これは、人口の増大を支える食糧が不足し、工業生産もそれに引っ張られて増加が抑えられているからである。人口は2030年過ぎにピークに達し、その後減少する。それにもなって、食糧と工業生産は大幅に減少していることが分かる。資源全体は、人口の増加によって減少するが、ある値に落ち着く傾向にある。人口は2100年以降も減少する傾向を示している。

世界人口の1年間における正味の増加は約8000万人であり、それを食糧需要に換算すると年間2000万トンにもものぼる(ブラウン、1998)。ところが、それを補う食糧供給は1日につき7万1千トンと予測され、需要に供給が追いつかない状況にある。その主要な原因とされているのが、土地の疲弊による生産力の低下である。化学肥料等の投入にも限界があり、土地の回復は困難と見られている。それに加え、地球規模の温暖化がもたらす砂漠化の拡大による耕作可能面積の減少や、地域的な気候変動による冷害の発生など、食糧の自給率を下降させる要因はいたるところにある。それに加え、発展途上国では民族紛争や国政の失敗による内乱が絶えず、社会的弱者である老人と子供の飢餓状態は想像に難くない。一方では、資源の枯渇が現実味を帯びてきた現在でも、先進国における大量生産・大量消費・大量廃棄は留まる様子もない。このような二極分化による南北格差は、

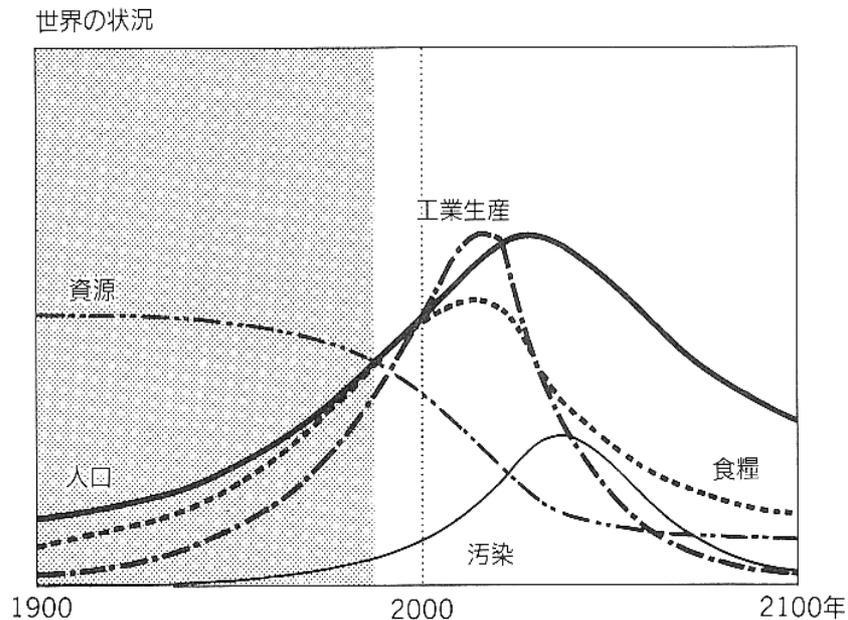


図 I-3 各種パラメータの将来予測

今後も拡大してゆくと予想される。

現在の人間活動は、ラブロックがガイア理論として展開している「地球生命圏の自律的な再生能力」(ラブロック、1984年)、いわゆる地球の治癒力を超えるほど急速に増大している。地球規模の環境問題は、多くの要素が複合的に絡み合って顕在化している。そのため、人間活動の環境への影響を調査するためには、顕在化している事象の主要な特性を抽出して環境をモデリング化することが必要である(Ford, 1999)。人口と資源の問題も同様であり、要素還元的に考察することも重要な課題の一つであるが、要素全体を一つのシステムとして捉え、そこから特徴的な性質を抽出してモデル化し、より簡単なモデルに書き換えることによって考察することも必要である。

このように、現実の社会活動をモデル化しシミュレーションするには、さらに多くのパラメータを設定する必要がある。とはいえ、ここで示された二つのモデルにおけるシミュレーションが、人口のオーバーシュートと破局を迎えるかもしれないという点で同じ結果を導き出していることは注目に値する。これらのモデルの妥当性に問題があることを認識しつつも、地球は破局的な道を進みつつあるということを考慮しておくことは、今後の議論にとって有益であろう。

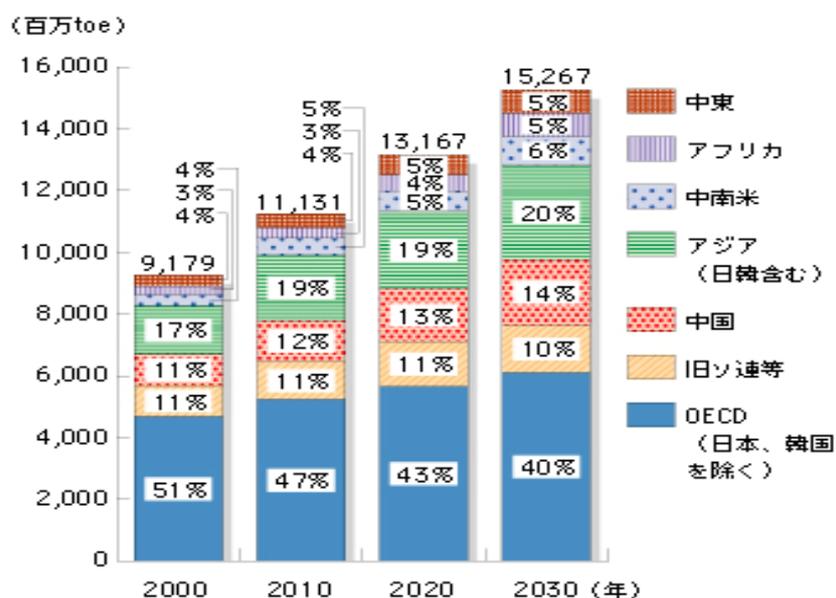
1.2 エネルギー予測

1.2.1 エネルギー供給の将来予測

国際エネルギー機関(IEA)の見通しによれば、世界の一次エネルギー供給量は、

今後も着実に増大すると予測されている(図4参照)。2030年における世界の一次エネルギー供給は、152.7億TOE(石油換算トン、TOE: Ton Oil Equivalent)であり、対2000年比で66%増になると予測されている。先進国のエネルギー供給が全体に占める割合は、2000年の51%から2030年の40%に減っているように見受けられるが、絶対量にすると、約14億トンの増加となっていることがわかる。世界人口の2割を占める先進国が、世界で供給されるエネルギーの約半分を独占していることから、先進国における一人当たりのエネルギー供給量は、発展途上国のそれにくらべはるかに多いことがわかる。エネルギーの供給においても、南北間の二極分化がさらに拡大しつつある。

地域別に見ると、中国・アジア地域・中南米など発展途上国におけるエネルギー需要の増大が予測されている。先進国OECDにおける2000~2030年の年平均増加率が約1.0%であるのに対し、発展途上国では約2.9%と約3倍の増加率が予測されている。中国やインド、アフリカでは、将来、急速な人口増加が予測されていることから、エネルギー需要もそれに同期して増加してゆくものと推察できる。



資料: IEA「World Energy Outlook 2002」

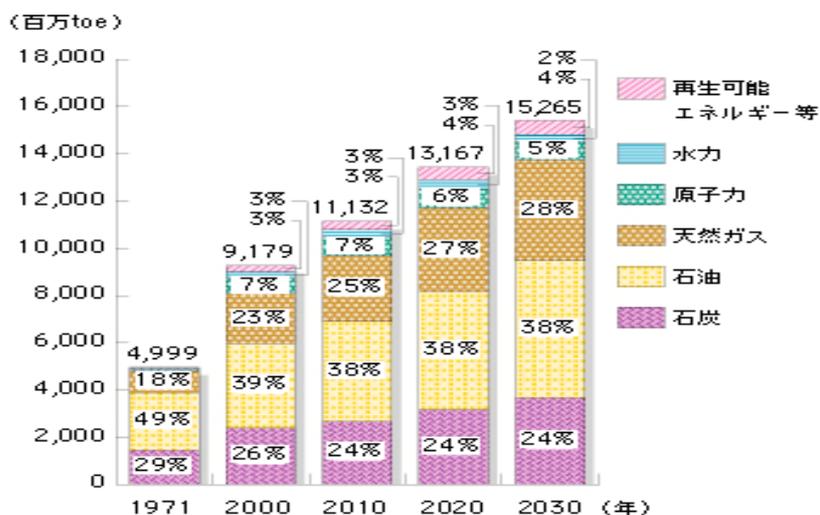
図 I-4 エネルギー供給の将来予測

1.2.2 エネルギー源の種別に分類した需要予測

次に、エネルギー源の種別に分類した需要予測を見てみよう(図 I-5 参照)。各種エネルギー源の中で最大の伸びを示しているのは天然ガスである。2000年には全体の23%の約21億トンであったが、2030年には28%の約42億トンが

ら、絶対的な増加も2倍となり、今後30年間で平均2.4%増加すると見積もられている。石炭や石油は全体的な割合から見ると、横ばい状態であるが、絶対量は石炭の場合には約24億トンから約37億トンに、また、石油については約37億トンから約58億トンへと着実に増加すると予測されている。水力発電は、約6.4億トンから約5.6億トンの増加となり、横ばい状態である。過去に造られた大規模ダムは改修がひかえていることや河川の生態系を激変させるような大型ダム開発は敬遠されつつあり、むしろ小中型ダム発電が普及してくるかもしれない。いわゆる新エネルギーとして今後も期待される再生可能エネルギーも横ばい状態であり、石炭や石油、天然ガスと肩を並べるまでには、多大な時間と革新的な技術開発を待たなければならないようである。原子力については、6.4億トンから7.6億トンと低めの需要増加が想定されている。これは、近年、原子力政策がドイツや北欧で再検討され、将来的に原子力を廃止していこうとする政策が反映されているためと考えられる。しかしながら、日本政府の将来に向けたエネルギー政策については、今後も原子力発電所を新たに増設する方向で検討されている。

これは、将来原子力に依存しないエネルギー政策を推し進めてゆこうとする世界的な動きとは逆行している。



資料：IEA「World Energy Outlook 2002」

図 I-5 エネルギー源の種別で見た供給予測

1.2.3 部門別エネルギー利用予測

図 I-6 に4部門におけるエネルギー利用について、各エネルギー源の割合を、1971年と2000年、2030年について示す。

輸送部門

交通部門においては、これまでも石油を用いた輸送手段が中心であった。自

動車をはじめとして飛行機や船舶など石油に依存した社会であることが示されている。この部門では、将来的にも石油の地位は揺るがないと考えられる。

2030年には石油が9割以上のシェアを持つと予測される。

発電部門

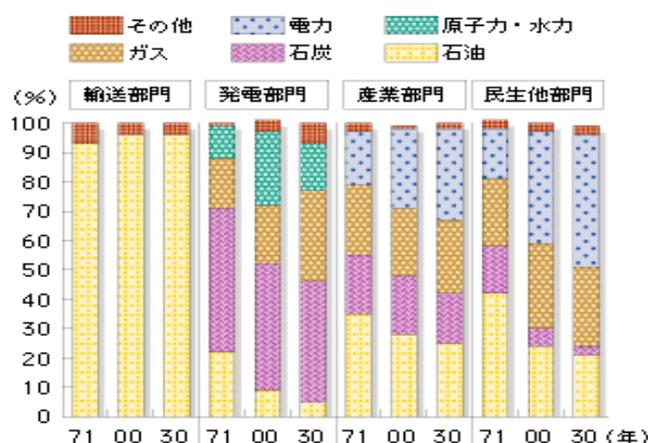
石炭が約50%のシェア占めており、過去から現在、将来にわたってもその傾向が続くと予測される。石油の割合は現状から半減の4%程度にまで落ち込む一方で、天然ガスの割合が大幅に増加し、31%に達すると予測される。さらに原子力発電所が20世紀後半まで増設されたことによりシェアは増えてきたが、原子力依存社会からの脱皮を目指した国々もあり、今後そのシェアは縮小する傾向にある。その他の発電が将来伸びる傾向にあり、新エネルギーとしての再生可能エネルギーの増加が予測される。

産業部門

石炭と天然ガスのシェアは横ばいであるが、電力のシェアが増大し、石油のシェアは減少してゆくと予測される。

民生他部門

天然ガスのシェアは横ばいであるが、石炭と石油は減少し、電力が大幅に増加すると予測される。



資料：IEA「World Energy Outlook 2002」

図 I-6 各部門におけるエネルギー源の推移

1.3 日本政府の原子力発電政策

現在、日本の原子力発電所の数は、アメリカ、フランスに次いで世界第三位であり、国内の総発電電力量の31.2%を閉めている。また、原子力発電は二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギーである、というスローガンのもとに、日本

政府はこれまで原子力発電所の増設を進めてきたし、将来に向けてもこの政策を変更することはないだろう。本当に、原子力発電は二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギーなのだろうか？

核分裂の際に放出されるエネルギーを利用するので、直接的に二酸化炭素が放出されることはない。しかし、二酸化炭素の代わりに核分裂の際には中性子が放出される。核燃料であるウランの核分裂連鎖反応から生じた中性子のエネルギーは非常に高く、発電炉の壁に衝突して新たな放射性物質を生み出す原因となっている。また、核分裂後の使用済み核燃料は人間にとって非常に危険な物質である。ストロンチウム 90 やセシウム 137 などの高レベル放射性元素やプルトニウム 239 が漏れ出して被害を与えないように安全に管理しなければならない。つまり、原子炉の定常的な運転と管理には、化石燃料を燃やして作り出された電力が必要であり、使用済み核燃料を安全に管理するためにも膨大なエネルギーが必要なのである。例えば、青森県の六ヶ所村では、地数百mの地点に放射性廃棄物を長期間貯蔵するための大規模な施設があり、常時、監視が続けられている。それに加え、放射性物質の能力が半減するまでの期間は天文学的な時間（ウラン 238：45 億年、プルトニウム 239：2 万 4 千年）であり、現在の高度な先端技術を駆使しても放射能を無力化することは不可能である。このように、原子力発電所は多大なエネルギーを使用しつつ運転されていることを理解しなければならない。さらに、強い放射能あるいは弱くても長時間放射能を人間が被爆すると死に至る危険が高く、極めて危険な物質を次世代までも管理しなければならない。また、地震や人的災害によって、原子炉が崩壊するようなことが発生すると、その周辺は壊滅的な被害を受けるだけでなく、世界的にも甚大な影響を与えることになるだろう。アメリカのスリーマイル島や旧ソ連のチェルノブイリにおける原発事故あるいは JCO の臨界反応事故は、それを私たちに示している。

OECD 諸国において、原子力発電所を増設することによって二酸化炭素の排出抑制を実現しようとしている国は日本だけである。1989 年以降における世界と主要先進国において、原子力発電所が稼動中・建設中・計画中の数をグラフにしたものが図 I-7 に示されている。

世界的に見ると、稼動中の原発は約 400 基弱存在し、1989 年以来その数は変動することなく 1996 年まで横ばいの状態である。建設中と計画中の数が減少していることから、途中から建設や計画を中止したあるいは廃炉になっても新たに建設しないという状況であることが分かる。特にドイツにおけるエネルギー政策は 1990 年から劇的な方向転換を遂げ、原子力依存体制を放棄したことが示されている。また、1995 年以降、アメリカやイギリスも原子力発電所を新たに建設する計画はない。ところが、世界の動きとは逆の方向をたどっているのが日本と

フランスである。それでもフランスは、全体的に原子力発電への依存が減少傾向にある。日本では建設中の原発が完成し、稼動を始めていることが示されており、計画中也含めると総数は 60 基に近づきつつある。しかしながら、狭い国土でしかも地震大国の日本では、大規模災害を未然に防ぐ方法は確立されておらず原子炉の致命的な破壊を否定することはできない。最近の 10 年以内においても、次に示すように重大な放射能汚染につながりかねない大事故が起こっている。

89 年の福島第二原発三号炉の再循環ポンプ破損事故

91 年の美浜原発二号炉の蒸気発生細管破断事故

95 年 12 月の高速増殖炉「もんじゅ」のナトリウム漏出事故

97 年 3 月の動燃東海再処理工場での火災・爆発事故

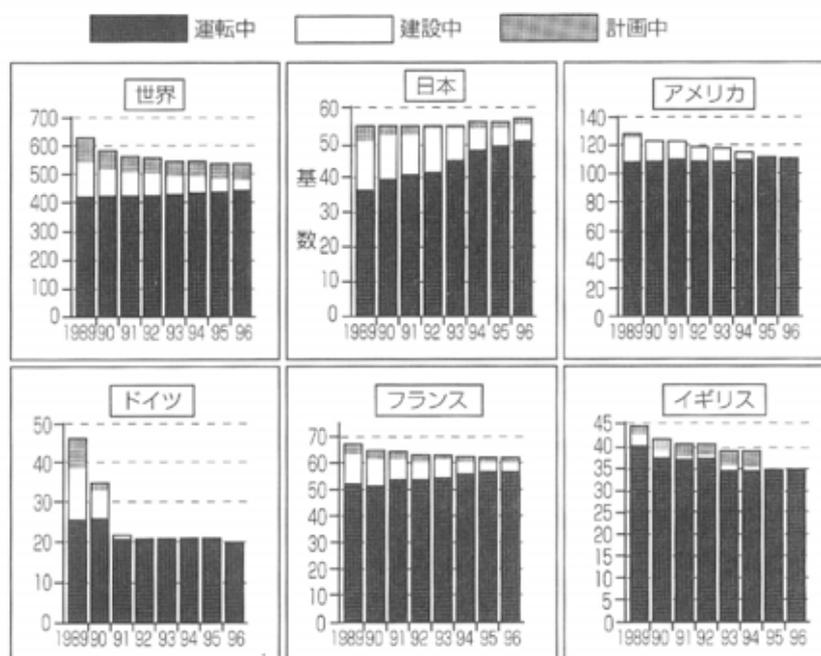


図 I-7 世界と主要各国における 1988-96 年の原子力発電所数の推移

以上のように、原子力発電は二酸化炭素の排出抑制に顕著に貢献しているとは言えず、むしろ自然災害や人災によって重大な放射能汚染を引き起こすかもしれないという危険とまさに隣り合わせのエネルギー源といえるであろう。

経済産業省の資源エネルギー庁から、2100 年までの「超長期」のエネルギー需給見通しが発表された。その中で、今後のエネルギー政策では省エネルギーと地球温暖化防止が重要であること、そのためには、二酸化炭素の排出量を現在の半分にすることが必要であり、そのためにも、原子力によって、今後総発電量の 32% くらいまでを賄う必要があると試算している。その理由として、百万キロワット級

の原発建設コストは約 3000 億円であり、それと同程度の発電を実現するために、太陽光発電では約 6 から 7 兆円、風力発電では約 1 兆円が必要となることを挙げている。しかしながら、建設コストと同程度あるいはそれ以上に、稼働コストが重要であることを無視している。また、稼働時に使用する電力は、化石燃料の燃焼によって発電されたものであるから、原子力発電が二酸化炭素を排出しないという表現は、国民に対する欺瞞と受け取られても仕方ないだろう。中でも、原子力発電では上述したようなリスクや放射性廃棄物の管理をどのように稼働コストに反映させてゆくのかは、今後の原子力エネルギー政策の動向を左右する重要な課題といっても過言ではない。

日本政府のエネルギー政策において、その時代を担う主力エネルギー源は、水力発電から火力発電へと移行し、そして原子力発電へのエネルギー依存が現在増加しつつある。水力発電に利用されてきたダムは砂に埋もれ、火力発電は化石資源の枯渇により利用できなくなるかも知れず、最後の主役の座が原子力発電に回ってきたのであるが、将来、主役の座を確保できるかどうかは、世界的に見てもかなり厳しい状況にあることが理解された。

それでは、将来に向けてどのようなエネルギー政策が必要とされるのであろうか。最も有力な候補は、太陽電池や風力発電、バイオマスに代表されるような新エネルギーである。将来これらの新エネルギーの中でどれが主役となるかという意味では、いずれの新エネルギーにおいても次代を担う主役となれる可能性は小さい。しかしながら、少なくとも原子力発電が抱えるような、人類に決定的な打撃を与えるような事故はまず起こらないし、それぞれが小さい発電量であるとはいえ数量で発電量をカバーでき、地域密着型のエネルギー資源である。何よりも制御可能であるという利点を持つ。さらに、バイオマス発電はカーボン・ニュートラルといわれる特徴を持っている。すなわち、地球上の植物は、大気中の二酸化炭素を固定化する機能をもっている。メタンなどのバイオガスやバイオディーゼル燃料などを燃焼させたときに発生する二酸化炭素は、もともと大気中に存在していた二酸化炭素が固定化され、それが燃焼によって大気中に排出されただけなので、合計量は変化しないという意味である。一方、地中から掘り出された化石燃料などの燃焼によって発生した二酸化炭素が、もとの地下資源となるまでには地学的な長期の時間（数十、数百万年）を必要とするので、このような場合はカーボン・ニュートラルとは言わない。

また、地球の表面を流れるエネルギーを有効に利用する技術も開発されつつある。その代表例が、風力発電や太陽光発電である。現在、風力発電は次世代を担うエネルギーとして注目され、ドイツやアメリカ・カリフォルニア州の発電量は目を見張るものがある。また、太陽電池パネルを利用した発電は、世界的に認知

されているとはいいがたいが、半導体技術のトップを行く日本では、補助金制度も整備されており、太陽光発電が将来も新エネルギーの旗手として注目されていくことになるだろう。

このように、太陽から地球に流れてくるエネルギーを利用すると、地球温暖化を引き起こすことなく、今まで捨てられてきたエネルギーを有効に使うことが可能となる。新エネルギーの本体そのものは、水力や火力、原子力発電には太刀打ちできないほど小さい。しかしながら、数量や安全性、制御可能性から見ると、圧倒的に新エネルギーが有利である。まさに「山椒は小粒でピリリと辛い」のごとくである。エネルギーの総量は、本体発電量×数量によって決まる。また、地域密着型であることは、地域の特長を生かした発電方法を選択できるということの意味している。今後、新エネルギーに関する数量の圧倒的な増加が見込まれており、原子力発電の代替を担うまさに新エネルギーになると期待される。次節以降、新エネルギーの可能性について検討してみよう。

1.4 世界における再生可能エネルギー資源の利用

現在、再生可能エネルギーの中で圧倒的に優位を示しているのは、水力発電である。総発電量の3割を占めている。今後もダムを使った水力発電は増えると予測されているが、総発電量に占める割合は、WEC(2020)によると、2割弱になるだろうと推察されている。水力発電は、川をせき止め水のポテンシャルエネルギーを利用して発電するため、ダムの上流に土砂が堆積すると発電機能が損なわれてしまう。さらに、河川環境を大幅に改変してしまうため、川やその周辺に棲息する動植物に大きな影響を与えることになる。そのため、アメリカでは、ダムを破壊して元の川に戻すという試みが行われている。

風力発電は、現在世界的に見ても新エネルギーの代表格として、その導入が進められている。将来の総発電量に占める割合は6割に達するようになると予測されている。他の新エネルギーに比べ、発電機器の設置や稼働時の運用管理が比較的容易であることが、将来における利用可能性を大きく伸ばしている要因である。

また伝統的なバイオマスは、古くから引き継がれてきた草木を利用したエネルギーであり、木炭などはその代表的なバイオマス利用である。現在では開発途上国などでおもに利用されているが、持続可能なエネルギー利用を目的としてはいない。一方、近代的なバイオマスとは、木質バイオマスや家畜の糞尿や食品廃棄物を利用したバイオガス生成、さらには化石燃料の代替としてのBDF(バイオディーゼル燃料)など、現在の先端技術を駆使したバイオマスの利用である。IPPC(2050)で示されているように、近代的バイオマスについては、持続可能な開

発を旨とした取組として今後も期待されている。

表 I-1 世界の再生可能エネルギーの現在の利用量と将来の利用可能推定量 (TWh/yr)

再生可能 エネルギー	現在の 利用量	利用可能推定資源量			
		Johansson et. Al. 2020	Swisher et. al 2030	WEC, 2020	IPPC, 2050
太陽光	54		1395	489-1952	
風力	3.2		4931	20148	
水力	2281.2	6000-9000	7077	8295	
地熱	37-57	>53	1499	178-405	
海洋	0.6		247	48-240	
伝統的バイオマス	4170		8003	7031-7269	
近代的バイオマス	543				約 35000
合 計	7052	6000-9000	23152	37249	>72249*

出典：IPPC[1996]

* : WEC の 2020 年での他の再生可能エネルギーの再利用可能推定資源量が 2050 年でも利用可能とした場合の合計（実際にはこれ以上利用可能と考えられる）。
（環境展望 1999-2000 実教出版(1999) 和田武：温暖化防止のための日本のエネルギー・シナリオ p.91 から転載）

1.5 日本における再生可能エネルギー資源の利用

日本の国土における特徴は、平地の面積が少なく山岳地帯から流れ出す急峻な河川をいくつも抱えていること、世界に名だたる火山国であるということである。このような地の利を最大限に活かしたエネルギー利用が行われてきた。表 2 に示されているように、再生可能エネルギーにおける、大水力発電の発電量は他を圧倒している。これは、急峻な河川をダムでせきとめ、治水対策も兼ね備えた日本ならではの特徴といえるであろう。しかしながら、前節でも述べたように、ダムの最大の欠点は、土砂がダム内に堆積すると発電はおろか治水対策までもが不可能となり、人間が作り出した遺物と化してしまうことである。無駄な公共事業として日本全国のダム建設が見直しを迫られ、計画の中止や大幅な縮小を余儀なくされているが、再生可能エネルギーの面から考えても、今後のダム建設は推進すべきではないだろう。

地熱発電は小規模な発電として出発しているが、2010 年の見通しでは 1996 年度実績の 300 倍の規模となることが予測されている。火山国として、全国至る所で利用可能な発電であることから、地域活性化としても魅力ある取組が期待される。

太陽光発電や風力発電は、現在でもその導入が行われており、将来にわたって

も再生可能エネルギーの主角を担うと考えられる。この二つの発電は、比較的容易に設置が可能であることに加え、稼働時における運用管理も手間がかからないことから、全国各地においてその導入が進められてきた。最近では大型の風車を目にする機会が増え、観光施設としての魅力も備わっており、国民の環境意識を高める役割も担いつつある。また、政府のエネルギー政策として太陽光電池パネルの設置については補助金制度を設けるなど、国民の負担を軽減し再生可能エネルギーの有効利用を推進している。太陽電池パネルは半導体の製造技術と深い関わりがあるので、その技術を持ち合わせていない国々における太陽電池パネルの普及は容易ではない。世界的に見ても、太陽光発電を強く推し進めているのは日本であり、技術立国の推進という観点から今後もエネルギー政策を展開してゆくという現れでもある。

年間利用可能量の推定から見ると、バイオマスは将来有望な再生可能エネルギーと見ることができる。太陽光発電や風力発電は自然エネルギーを利用した「発電」に主眼がある。それに比べバイオマスは発電というよりはむしろ、燃料として再利用することによりエネルギーを確保できることに大きな利用可能性がある。さらに、地球規模の環境問題である地球温暖化の原因として二酸化炭素の排出抑制が注目を集めている。バイオマスは、そもそも自然界にある植物を扱うために「カーボン・ニュートラル」であるという他の再生可能な発電には見られない特徴を持っている。また、未来の車として開発が進められている燃料電池車の燃料として利用できる可能性も備えている。このように、バイオマスは魅力ある再生可能エネルギーとして今後ますます注目されてゆくと予測される。

1.6 バイオマスエネルギー

動植物に由来する有機物として利用可能なエネルギー源をバイオマス（生物起源）エネルギーと呼んでいる。バイオマスが再生可能なエネルギーとして注目される最大の理由は、「カーボン・ニュートラル」という点である。地球大気中の二酸化炭素量がバランスよく一定に保たれるということを意味している。例として森林を考えてみよう。山に植林された小さい苗木は、土壌の養分と大気中の二酸化炭素を元に成長してゆく。木が生長するということは、大気中の二酸化炭素を固定化していると言い換えてもよい。大木となった木々は切り倒され、加工され人々に利用される。必要がなくなると壊されあるいは朽ち、燃やされて二酸化炭素と水に分解され、大気中に戻ってゆく。このように、地球大気と土壌による炭素循環の機構に組み込まれた仕組みがカーボン・ニュートラルである。

一方、化石燃料も元は古代の植物ではあるが、カーボン・ニュートラルには含めないのである。その理由は、化石燃料が地殻の中に生成されるまでには地学的

な時間を必要とするからである。つまり、地上で化石燃料を燃焼させたときに発生した二酸化炭素が動植物によって固定化され、地殻の中で化石燃料となるまで

表 I-2 日本の再生可能エネルギーの推定資源量

	1996 年度実績	2010 年度見通し (対策ケース)	推定利用可能 資源容量	推定年間利用 可能量
太陽光発電	5.7 万 kW(1.4 万 kl)*1	500 万 kW(122 万 kl)*1	8.5 億 kW*4	8500 億 kWh*4
風力発電	1.4 万 kW(0.6 万 kl)*2	30 万 kW(12 万 kl)*1	3 億 kW*4	3900 億 kWh*4
中小水力発電	991 万 kW*3			800 億 kWh*7
大水力発電	820 億 kWh*3	1050 億 kWh*3		800 億 kWh*8
地熱	120 万 kl*3	3800 万 kl*3	6600 万 kW*5	2000 億 kWh*5
海洋 エネルギー	232kl*2		3600-5200 万 kW*6	2000 億 kWh 以上*6
太陽熱	104 万 kl*1	450 万 kl*1	1700 万 kl*5	1700 万 kl*5
バイオマス	490 万 kl*1	592 万 kl*1		4700 万 kl 以上*9
環境熱	3.3 万 kl*1	58 万 kl*1	4060 万 kl*5	4000 万 kl*5
廃棄物発電	89 万 kW(82 万 kl)*1	500 万 kW(662 万 kl)*1		500 万 kl 以上*10
計	685 万 kl*1	1910 万 kl*1		28900 万 kl 以上*11

○環境熱は、海水、河川水、下水、地下街等の身の回りのあるエネルギーでヒートポンプを用いて活用できる。

○バイオマスは全ての私物資源を意味するが、実績では「ごみ処理メタン発酵ガス利用」「工場廃液発酵メタンガス利用」「水質系廃棄物燃料利用」「畜産廃棄物メタン発酵ガス利用」「バガスボイラー(製糖工場)」の合計を指す。

○廃熱エネルギーとは、工場廃熱、LNG 気化冷熱利用などの廃棄されてきたエネルギーである。

○廃棄物エネルギーとは、ごみ焼却発電、RDF 燃料利用などによって得られるエネルギーである。

○中小水力発電は、大規模なダム建設を必要としない発電容量 3 万 kW 以下のものを指す。大水力は将来も現在と同程度と推定。

出典

*1: 資源エネルギー庁・石炭・新エネルギー部新エネルギー対策課[1998]「新エネルギーの現状と今後の課題及び導入促進策」『産業と環境』1998 年 8 月

*2: 新エネルギー財団[1997]「新エネルギー開発利用実態調査報告書」

*3: 資源エネルギー庁・長官官房企画調査課[1998]「わが国の長期エネルギー需給見通し」『産業と環境』1998 年 8 月号

*4: 和田武(立命館大学 教授) 推定値

*5: 通産省[1993]「ニューサンシャイン計画ハンドブック」

*6: 新エネルギー財団[1997]『新エネルギー』

*7: 久保田喬「中小水力は現在の大型水力発電と同程度の資源量はある」(日本学術会議 50 周年記念第 48 回理論応用力学講演会・パネルディスカッション「再生可能エネルギー」における報告。)

*8: 大水力発電は現状維持とした。

*9: 坂井正康[1998]『バイオマスが拓く 21 世紀エネルギー』森北出版

*10: 廃棄物発電は、将来の廃棄物の減少と発電利用率の向上を見越して現状維持とした。

*11: 発電量 1 億 kWh=原油 1 万 kl として換算した。

(環境展望 1999-2000 実教出版(1999) 和田武: 温暖化防止のための日本のエネルギー・シナリオ p.95 から転載)

には膨大な時間がかかるので、現在の大気中に排出されると短時間で大気中の二酸化炭素量が増加することになる。地球温暖化の原因は温室効果ガスの急激な増加が原因と考えられており、二酸化炭素は温室効果ガスの中で地球の温暖化に大きな影響を与えるガスとして注目されている。

バイオマスエネルギー資源は、原料の面から見ると、人間活動によって排出される廃棄物系と栽培作物としての植物系とに分類される。さらにバイオマスの利用目的に応じて図 I-8 に示すような形態に細分される。

廃棄物系バイオマス

木質系では林地における残材や製材工程で排出される廃材が主である。かつて植林された林野が、林業の衰退により整備することが不可能となり放置されている。放置された残材は、木質バイオマスの原料として利用可能である。農業系では稲藁をはじめとしてとうもろこしやもみ殻など、農業残渣がバイオマスの原料となる。建築廃材系も乾燥系に入るが、木質系以外の混入物が多いため、バイオマスの原料として利用するよりも、チップにして廃棄物固形化燃料(RDF)としての利用が望まれる。

食物（栽培作物）系バイオマス

植物系バイオマスは、サトウキビやナタネなどの栽培植物を燃料に転換して利用するものである。エネルギー利用目的として栽培される作物は、食物の成長過程に準じた消毒や施肥などの管理に時間と資金を必要とすることから、既存の燃料などと比べ高コストであるという経済性の問題やバイオマス燃料を利用する際の技術的課題などがある。

食物バイオマスの利用方法には、大きく分けて直接燃焼と CH_4 （メタン）発酵などの生物化学的変換、ガス化や炭化などの熱化学的変換による燃料化などがある。我が国において現在利用されているバイオマスエネルギーは廃棄物の焼却によるエネルギーが主である。その他製紙業などの過程で排出される黒液やチップ廃材、農林・畜産業の過程で排出される木くずやバガス（さとうきびの絞りかす）、家庭や事務所などから出るゴミ、廃食用油などを燃焼させることによって得られる電力・熱を利用するものなどがある。特に黒液というパルプ化工程からの廃液や、チップ・製材工程からの廃材などを熱需要に活用する形態を中心に導入が進展している。

家畜の排せつ物や食品廃棄物から CH_4 ガスを生成する技術はある程度確立されてきてはいるが、普及に向けては、収集・輸送や CH_4 発酵後の残さ処理などが課題となっている。しかし、既存の収集・処理システムが確立して

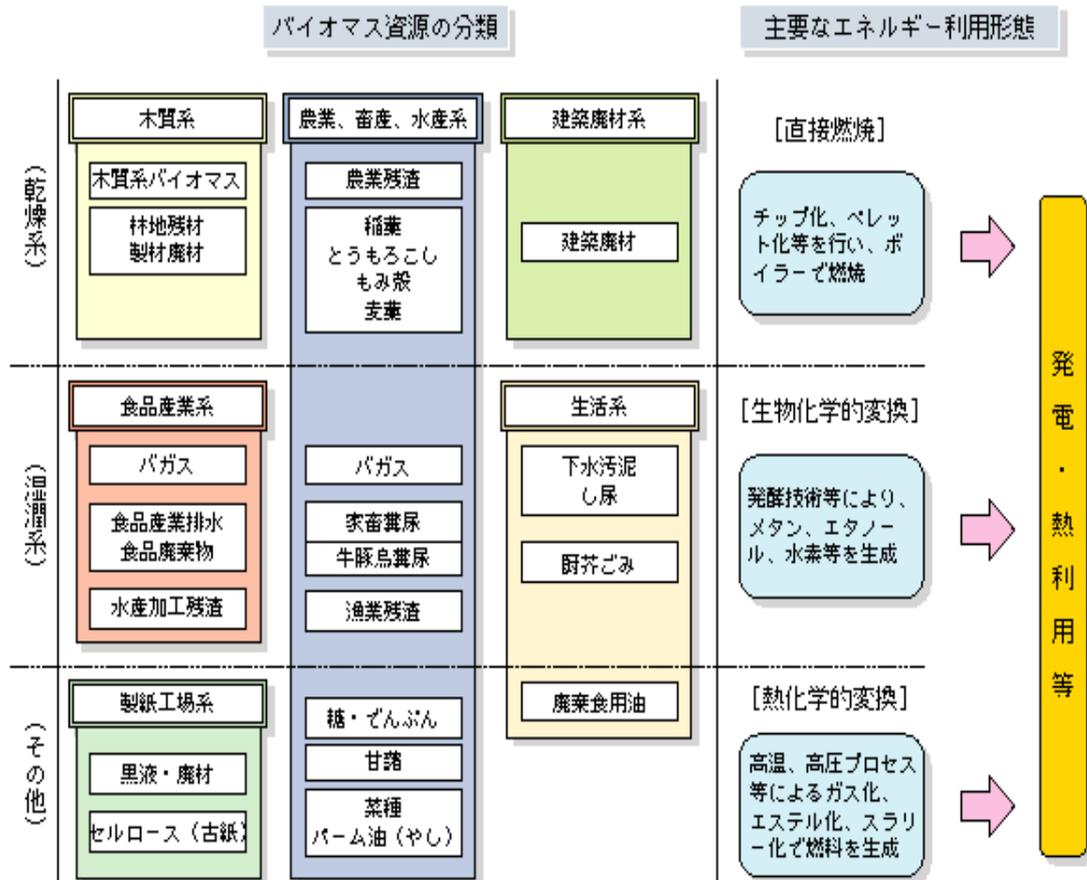


図 I-8 バイオマス資源の分類及び主要なエネルギー利用形態

いる下水汚泥については、下水処理場の一部においてCH₄ガスを生成し電力・熱に変換する施設の設置が行われている。

廃棄物系と植物系に分類されるバイオマスエネルギーは、焼却による熱利用が主たる利用となっている。いわゆる温水の利用であるが、この熱を再利用するコージェネレーションは、低温となるにしたがって変換効率が下がり、利用できなくなる。一方、生物化学的変換として知られるメタン発酵は、昔からよく知られている技術であるが、発展途上の技術でもある。家畜の種類(豚や牛、ニワトリ)や発酵温度(高温・中温・低温)の条件によって菌相が異なること、さらには、食品廃棄物の利用では、いろいろな残渣が投入されるために、廃棄物の種類が均質でないため発酵に影響を与えることなど、今後、確立すべき技術的課題が残されている。メタン発酵ではメタンガスと液肥が生成される。メタンガスは燃焼用ガスとして利用されるのはもちろんであるが、水蒸気改質によってメタンから水素を取り出すことも可能である。燃料電池の燃料は水素であるが、それを効率よ

く生産する技術としてバイオガスを見直す必要があるだろう。また、液肥は栽培食物あるいは家畜の飼料を育成させる上で利用が可能である。一方、廃食用油をディーゼル発電の燃料に改質する技術（BDF：バイオディーゼル燃料）はほぼ確立されており、将来の普及が期待されるところである。

このように、バイオマスのエネルギー利用形態は、発電や熱利用だけではない。いくつかの技術を組み合わせることによって、多様な利用が可能である。そこにこそバイオマスの真価が発揮されるのではないだろうか。

1.7 山梨県のバイオマス

山梨県の総土地面積は 44.6 万 ha であり、そのうち森林面積は 34.8 万 ha で全体の約 78%に相当する。全国平均が 67%であることから、豊かな森林資源を有する森林県ともいえる。森林のうち 54.6%が民有林、44.0%が県有林であり、国有林は僅か 1.4%に過ぎない。県全体の森林蓄積量は 5500 万³m³であり、民有林の蓄積量は 65.6%であり、県有林では 33.1%となっている。樹種別に見ると全体の 68.2%が針葉樹であり、広葉樹は 31.8%である。人工林は全体の 53.4%を占め、天然林は 46.4%にとどまっていることから、植林によって蓄積量が保たれているとも考えられる。

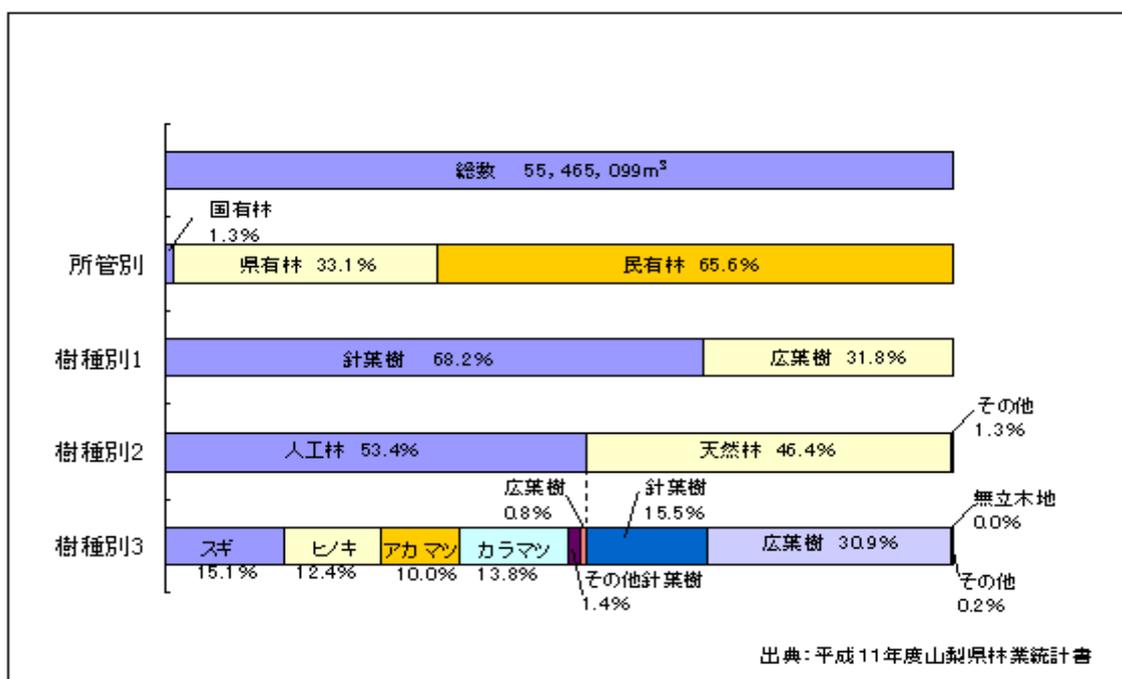


図 I-9 山梨県における樹種別・所轄森林蓄積量

県有林の蓄積量・収穫量の予測を図 I-10 に示す。森林資源において、人工林と天然林の蓄積量の和は、平成 43～47 年をピークとして緩やかな増加傾向にある。人工林の収穫量は平成 28～52 年にかけて急激に増加すると予測されている。平成 58～62 年の収穫量は、予測初期の平成 13～17 年に比べ 5 倍くらいの増加と見込まれている。今後、山梨県でバイオマスの普及をはかるうえで、人工林の収穫量の増加は明るい材料である。

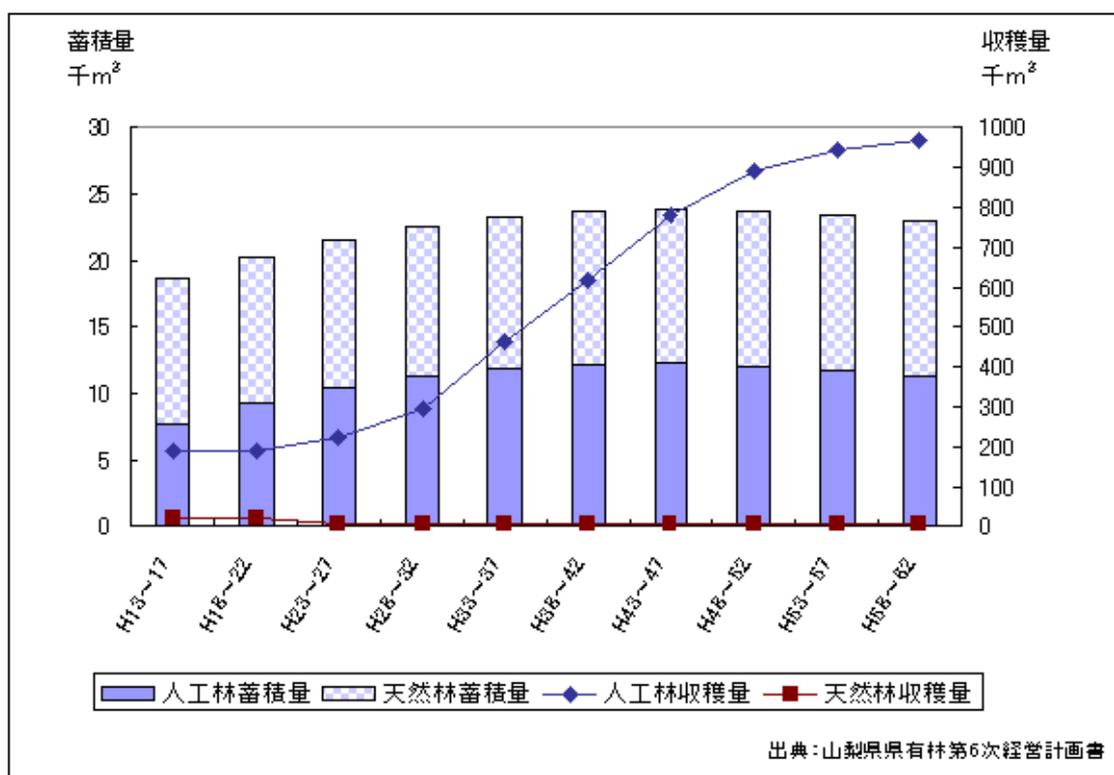


図 I-10 山梨県における県有林の蓄積量・収穫量の予測

山梨県の農業データによると、耕地面積は 2.6 万 ha であり、総面積に占める割合は僅か 5.9%に過ぎない。狭い耕作面積を利用して生産された農業産出額の約 6 割を占めているのが果実である。特にぶどう・ももの生産額は群を抜いている。特にぶどうはワインの原料として用いられるが、その絞りかすは、農業廃棄物となってしまう。これをバイオマスとして利用できると考えられる。また、これらの果実の県外への出荷により、果樹園には地力の衰えをカバーするために大量の肥料が投入され、土地の窒素過多が危惧されている。

畜産（肉用牛、乳用牛、豚、鶏など）の割合は 1 割強である。八ヶ岳や富士山麓を利用した取り組みが行われている。平成 11 年に「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」が制定され、糞尿の適正な処理が義務付けら

れた。そのため、山梨県上九一色村の富士ヶ嶺(ふじがね)バイオセンターのバイオガスプラントのようなモデル事業に示されるような取り組みが全国的に広がると思われる。バイオマスを利用した再生可能エネルギーは、次世代の新エネルギーのひとつとして期待されており、山梨県でもバイオマス利用の取り組みが始まりつつある。

2 目的

本調査事業では、山梨県畜産試験場敷地または山梨県上九一色村に設置されているメタン発酵施設に水蒸気改質燃料処理装置、水素膜分離装置ならびに PEFC 型燃料電池を設置し、畜産廃棄物バイオマスより発生するメタンを水蒸気改質して得る水素を燃料として燃料電池により発電して施設内の電力として供給し、またオフガスおよび燃料電池より発生する熱を水蒸気改質器加熱、メタン発酵槽加温ならびに施設における給湯用途等の熱需要に活用することを目的として、そのためのフィージビリティスタディ (FS) を行う。

バイオガスの燃料電池発電はいくつかの事業者により試みられているものの、いずれも安定的運用に至っているとは言いがたい。これには種々の理由が考えられるが、その一つとして、バイオガスの性状が通常の燃料電池燃料である都市ガスなどと大きく異なっていることが挙げられる。燃料電池そのものは水素で発電するのであるが、その水素を発生させる水蒸気改質ならびに水素生成工程が確立していないのである。多くのバイオガスプラントでは発生するメタンとCO₂は通常赤外線法によりモニターされているが、水蒸気改質特性(すなわち水素生成工程)に大きく影響する他の成分に関する検討は少ない。

従って、まず現在稼働中のメタン発酵施設より発生するバイオガスの性状を、とくにイオウ化合物含量に注目しながらガスクロマトグラフ法により実験的に正確に把握する。次に、上で把握したバイオガス組成に基づき、模擬ガスを作成し、これを実際に水蒸気改質して、その水素生成特性を実験的に把握する。また現在都市ガス燃料用の燃料電池などで使用されている脱硫システムがバイオガスに対してどの程度有効かも判定する。さらにこのバイオガス組成と、メタン発酵槽内の微生物フローとの相関解析も試みる。

このようにして把握したバイオガスの性状より、これを水蒸気改質するための最適燃料電池システムを選定する。とくに水素分離膜方式の燃料電池を中心に、これに適した水蒸気改質システムを想定し、さらに本システムに対して、経済性、環境性、省エネ性などに関する評価を行う。

以上の結果を総合して、本事業の事業化の可能性を最終的に評価する。

参考文献

1. 竹内智、人口・資源モデルの基礎的解析、システムダイナミクス、No.3、p.74, 2003.
2. Andrew Ford: *Modeling the Environment* (Island Press, Washington, D.C., 1999).
3. L.R.ブラウン、浜中裕徳(監訳)『地球白書 1998～99』(ダイヤモンド社、1998年)
4. 林智、西村忠行、本谷勲、西川栄一『サステイナブル・ディベロップメント』(法律文化社、1991年)
5. M. L. Deaton and I. I. Winebrake : *Dynamic Modeling of Environmental Systems* (Springer Verlag, New York, 2000).
6. W. Lutz, W. Sanderson, and S. Scherbov: *The end of population growth*, *Nature*, **412**, 2 August, pp. 543 (2001).
7. D.H.メドウス, D.L.メドウス, J.ランダース, W.W.ベアランズ三世, 大来佐武郎(監訳)、『成長の限界』(ダイヤモンド社、1972年)
8. D.H.メドウス, D.L.メドウス, J.ランダース, 茅陽一(監修), 松橋隆治, 村井昌子(訳)『限界を超えて』(ダイヤモンド社、1992年)
9. J.E.ラブロック『地球生命圏』 - ガイアの科学 (工作舎, 1984年)
10. 佐藤聡夫『自然の数理と社会の数理 I,II』(1987年初版, 日本評論社,1991年)
11. STELLA and STELLA Research software: High Performance Systems, Inc. (株)パーシティブエブ
12. 島田俊郎編『システムダイナミクス』(日科技連、1995年)
13. 植田和弘、喜多川進 監修『循環型社会ハンドブック』(有斐閣、2001年)
14. IAE『World Energy Outlook 2002』
15. 和田武、温暖化防止のための日本のエネルギー・シナリオ『環境展望 1999-2000』(実教出版、1999)
16. <http://www.Un.org/esa/population/unpop.htm>
17. 資源エネルギー庁 <http://www.enecho.meti.go.jp/>
18. (財)山梨総合研究所
http://www.yafo.or.jp/self/self3/self3_html/chapter1.htm
19. 「都道府県の姿」 - 山梨県
<http://www.toukei.maff.go.jp/shityoson/map2/19/agriculture.html>
20. 秋田魁新報 2005年平成17年5月2日夕刊 科学 資源エネルギー庁 2100年までの展望

バイオガスの組成とその特徴

畜糞や食品廃棄物、下水汚泥などの基質をメタン発酵させて得られるバイオガスは、ほぼメタン 60%、二酸化炭素 40%からなるが、その詳細は基質、消化温度などによって異なることが想定される。表 II-1 に、異なる基質から得られたバイオガスの組成を示した。各バイオガス中のメタン組成は、牛糞と下水汚泥では似かよっているものの、豚糞では他より高い値を示している。

表 II-1. 基質の異なるバイオガスの組成

成分	組成 (%)		
	帯広大学	M 養豚場	上越市汚泥リサイクルパーク
H ₂	検出されず	検出されず	0.14
CH ₄	60.2	66.9	61.4
CO ₂	39.8	33.1	38.5

さらに興味深いのは、上越市汚泥リサイクルパークのバイオガス中に水素が認められることである。図 II-1 に、同バイオガスの脱硫前後のバイオガス組成を示す。メタン発酵は一部水素生成を伴うといわれているが、本調査でバイオガス中に水素の存在を確認したのはこの上越市汚泥リサイクルパークのバイオガスのみであり、他のバイオガス中には、ガスクロマトグラフの検出限界内で、水素の痕跡は認められなかった。

プラントによってバイオガスの組成が異なることから、バイオガスを用いて安定的に燃料電池を動作させるためには、その組成の詳細ならびに基質や消化温度、季節による変動を把握する必要がある。そこで本調査では、本調査の対象施設である山梨県畜産試験場および富士ヶ嶺バイオセンターのバイオガスプラントに加えて、基質や発酵条件の異なる国内外のいくつかのバイオガス組成も比較した。

1 メタン組成のプラント別比較

図 II-2~5 に、本調査で解析したバイオガス中のメタン分率を示す。図 II-2 は富士ヶ嶺バイオセンターで得られたバイオガスで、平成 16 年 9 月から 12 月にわたってほぼ週 1 回ガスを採取し、分析を行った。本バイオガスプラントは 9 月当初の時点で竣工して試運転を始めたばかりであり、ここに見られるメタン分率の変化は、季節的要因というよりもプラントスタートアップ時の変動と見るほうが適当であろう。

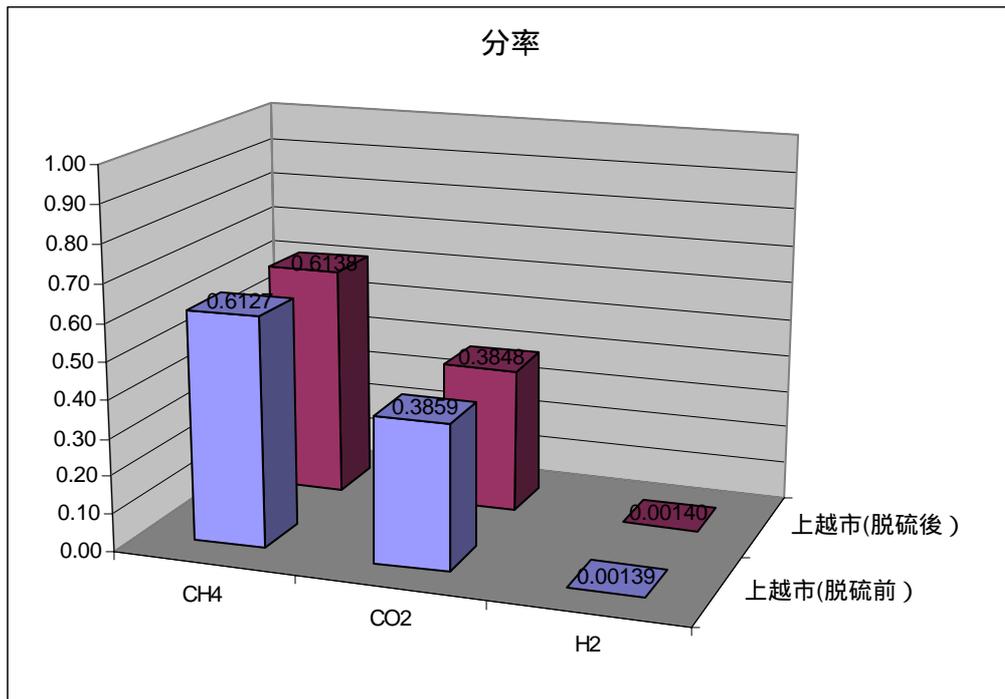


図 II-1 上越市汚泥リサイクルパークにおけるバイオガスの組成

ここに見られる微小変動を別にすれば、バイオガス中のメタン分率はスタートアップ当初からほぼ 60%を示しており、バイオガスを得るといふバイオガスプラントの主要目的からすると、本プラントは比較的短期間で所定の性能を発揮していると言えるべきである。

メタン分率の詳細を見ると、11月にわずかな落ち込みが見られる。この理由がなにかは定かではない。また脱硫前後を比較すると、スタートアップ当初の9月は脱硫後のガス中のメタン分率が高く、プラントが落ち着いてきた10月以降は低くなっていることが注目される。

図 II-3 は、山梨県畜産試験場に設置されているバイオガスプラントからのバイオガス中のメタン分率の経時変化である。本プラントはこの時点ですでに2年以上運転されてきており、メタン分率も 61.5%付近でほぼ安定している。

図 II-4 は、帯広畜産大学に設置されているバイオガスプラントからのバイオガス中のメタン分率の経時変化である。このバイオガスプラントも長期にわたって安定運用されているものであり、メタン分率は 60.7%付近で安定している。図 II-5 に、帯広畜産大学(牛糞)、酪農学園大学(牛糞)、T養豚場(豚糞)、M養豚場(豚糞)、上越市汚泥リサイクルパーク(下水汚泥)のバイオガスプラントから得られたバイオガス中のメタン分率を比較した。基質によってメタン分率に違いがあり、牛糞ならびに下水汚泥の場合にはほぼ 60%程度であるが、豚糞の

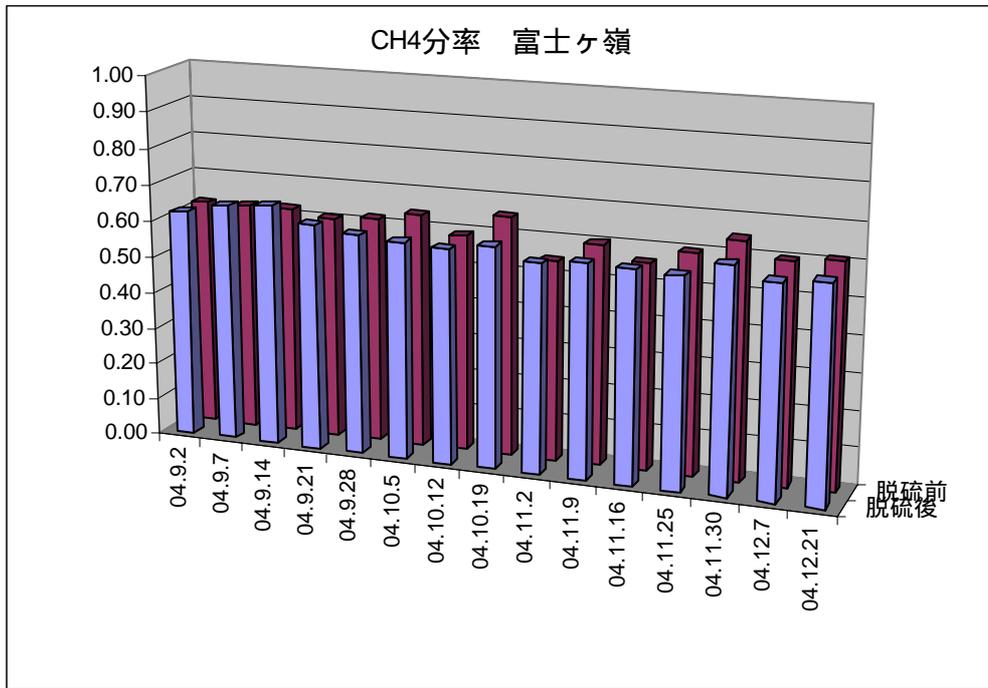


図 II-2 富士ヶ嶺バイオセンターにおけるバイオガス中のメタン分率の径時変化

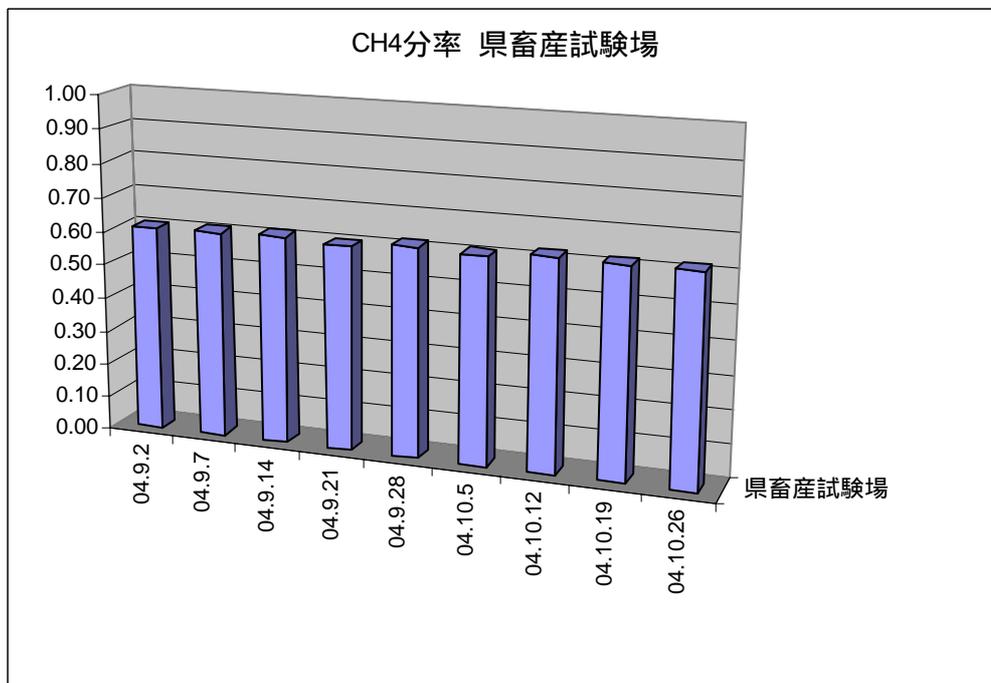


図 II-3 山梨県畜産試験場におけるバイオガス中のメタン分率の径時変化

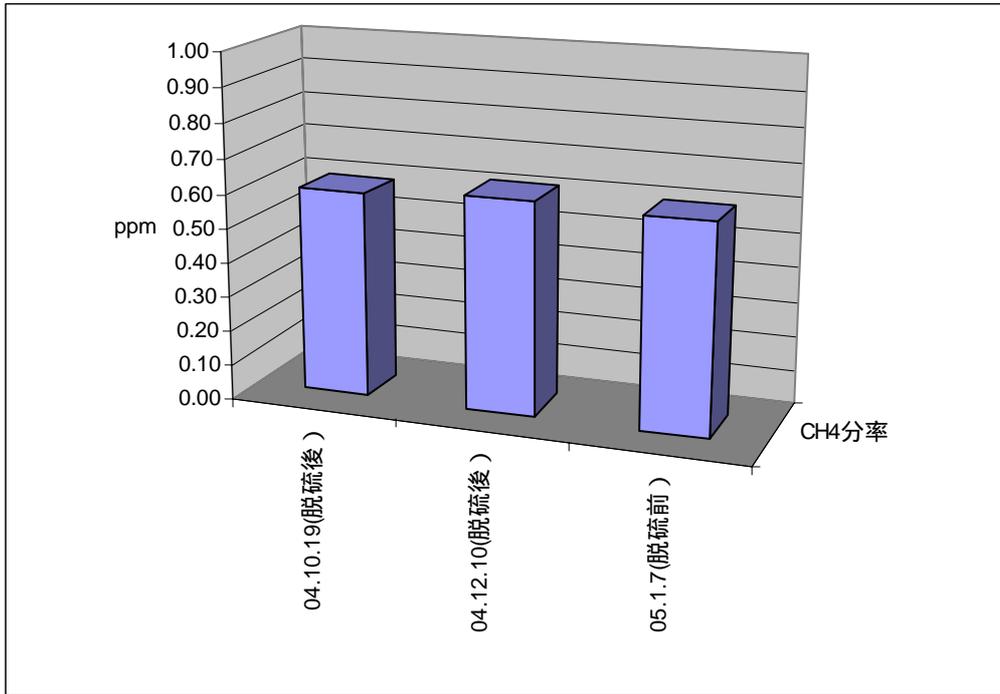


図 II-4 帯広畜産大学におけるバイオガス中のメタン分率の経時変化

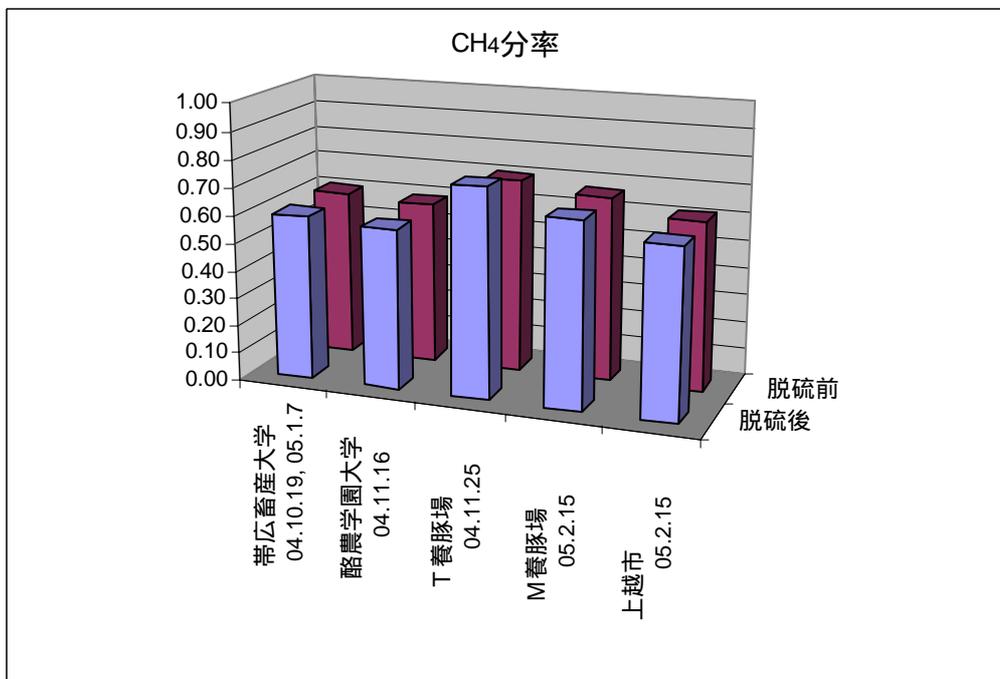


図 II-5 いくつかのバイオガスプラントにおけるバイオガス中のメタン分率の比較

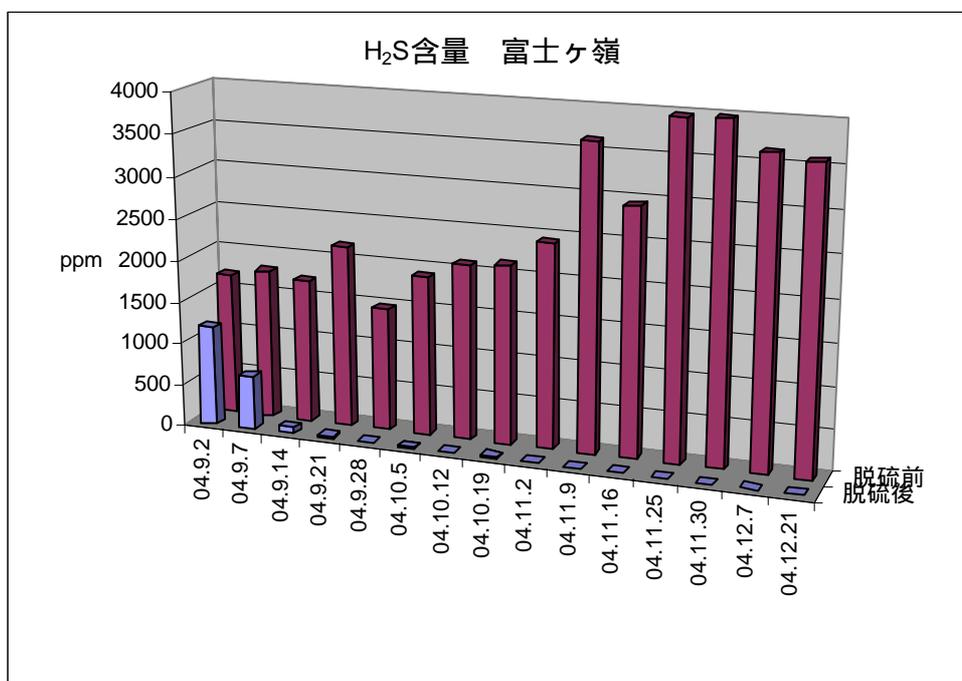
場合には70%程度に上昇することがわかる。これはメタン発酵槽中の微生物フロラが、基質によって大きく異なり、それがメタン分率の違いとして発現しているものと考えられる。同じことが水素発生についても言うことができ、またバイオガス中のイオウ化合物分布についても同様である(後述)。

2 硫黄分の詳細解析

バイオガスを燃料電池に使用する際の大きな問題の一つは、そのイオウ含有量の高さである。したがって、その内容ならびに詳細を知ることは、燃料電池発電システムの燃料処理装置の設計に必要不可欠である。

図II-6~8は、本調査で解析したバイオガス中の硫化水素分率である。富士ヶ嶺バイオセンターは、プラントの立ち上げ中であつたこともあり、脱硫前のバイオガス中の硫化水素分率は9月はじめの約1700ppmから、ほぼ安定したと考えられる12月の3600ppmまで、約3ヶ月かけてゆっくりと上昇している(図II-6)。脱硫後の硫化水素分率は、プラントスタートアップ当初は約1200ppmと高かったが、1ヶ月ほどで安定し、10月以降はほぼ一桁で推移している。一方山梨県畜産試験場のバイオガス中の硫化水素分率(図II-7)は、ほぼ120ppmで安定しているものの、10月下旬になんらかの外的要因によると思われる変動が見られる。

いくつかのバイオガスプラントからのバイオガス中の硫化水素分率を図II-8に示す。ここでも、バイオガス組成がプラント(すなわちその運転条件)に依存す



図II-6 富士ヶ嶺バイオセンターにおけるバイオガス中の硫化水素含量の経時変化

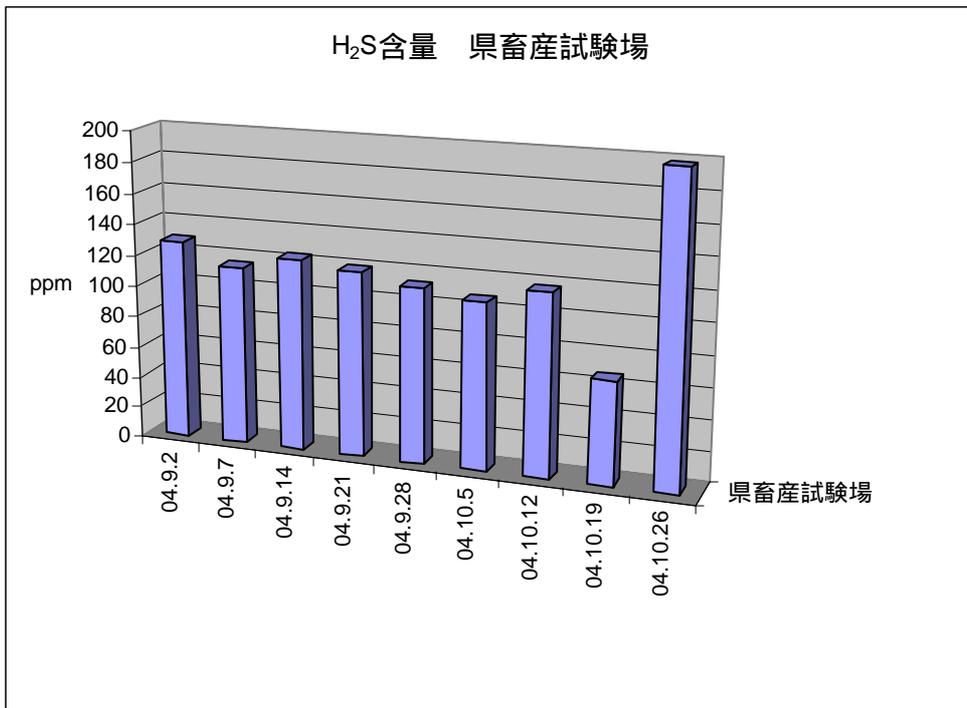


図 II-7 山梨県畜産試験場におけるバイオガス中の硫化水素含量の径時変化

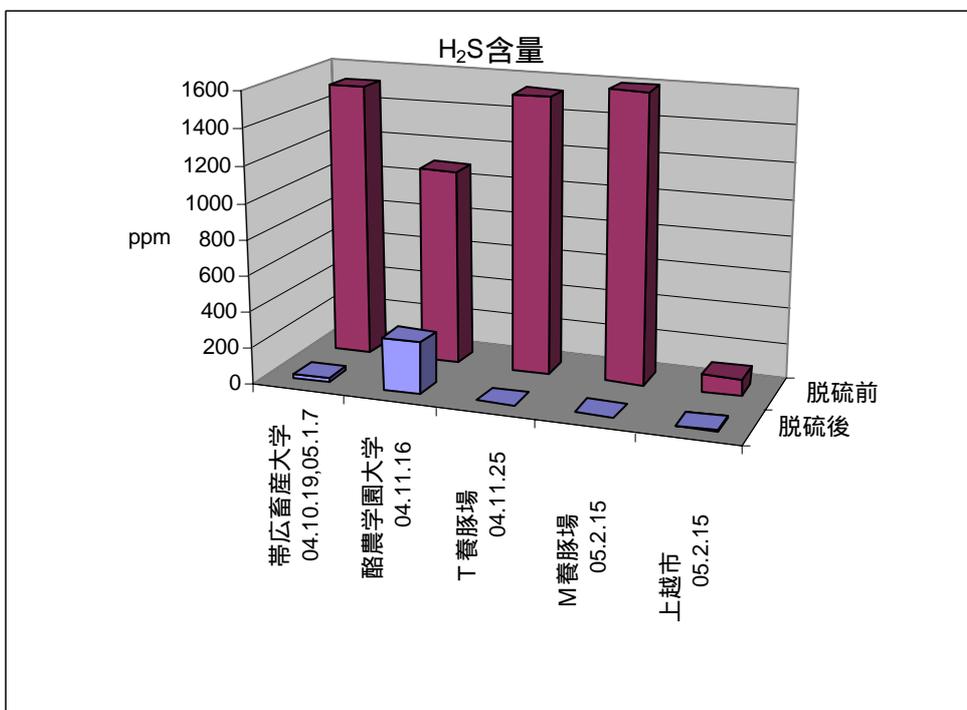


図 II-8 いくつかのバイオガスプラントにおけるバイオガス中の硫化水素含量

ることが明らかである。とくに上越汚泥リサイクルパークの脱硫前の硫化水素量の少ないことが注目される。また脱硫後は、酪農学園大学のバイオガスプラントからのものを除いて、数 ppm から 25 ppm の範囲まで低下していることがわかる。

図 II-9~11 に、硫化水素以外の有機イオウ化合物の合計分率を示した。富士ヶ嶺バイオガスプラントは、スタートアップ時の変動のためか、周期的な変化を示しているように見える（図 II-9）。さらに、これら有機イオウ化合物は脱硫深度が浅く、良くて9割程度までしか脱硫されていないことがわかる。山梨県畜産試験場のバイオガス中の有機イオウ化合物含量は、他の成分同様安定しており、ほぼ 0.8 ppm である（図 II-10）。図 II-11 は、いくつかのバイオガスプラントからのバイオガス中の有機イオウ化合物の合計含量である。脱硫前の含量がプラントによって大きく異なること、それにもかかわらず、脱硫後は 0.7 ppm 以下まで脱硫されていることがわかった。

以上の結果より、バイオガスを燃料電池用の燃料として使用する場合には、都市ガスを燃料とする場合（有機イオウ化合物含量のみ 3 ppm）に比較して、有機イオウ化合物の総量は少ないものの、都市ガスにはない多量の硫化水素が含まれることに留意した燃料処理装置を設計する必要があることが明らかとなった。

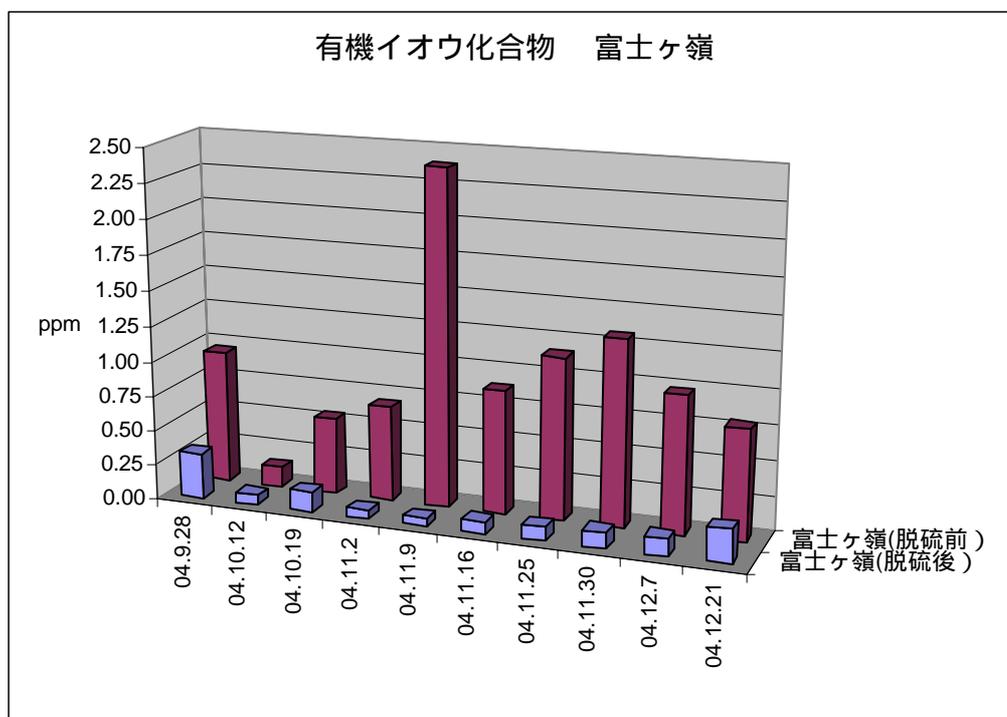


図 II-9 富士ヶ嶺バイオセンターにおけるバイオガス中の有機イオウ化合物含量の径時変化

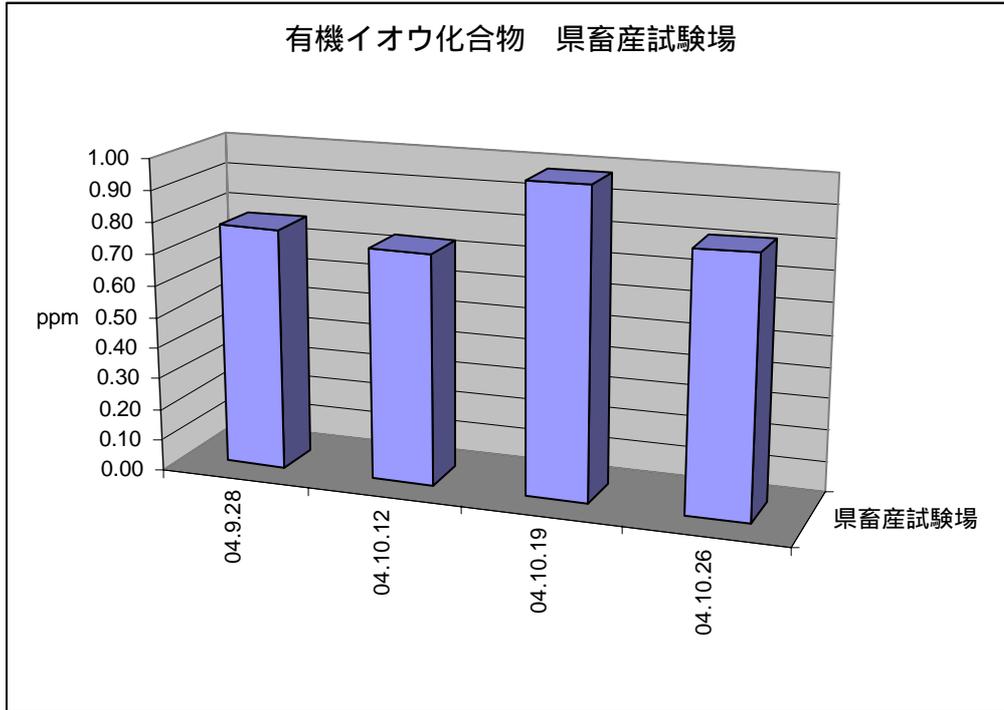


図 II-10 山梨県畜産試験場におけるバイオガス中の有機イオウ化合物含量の経時変化

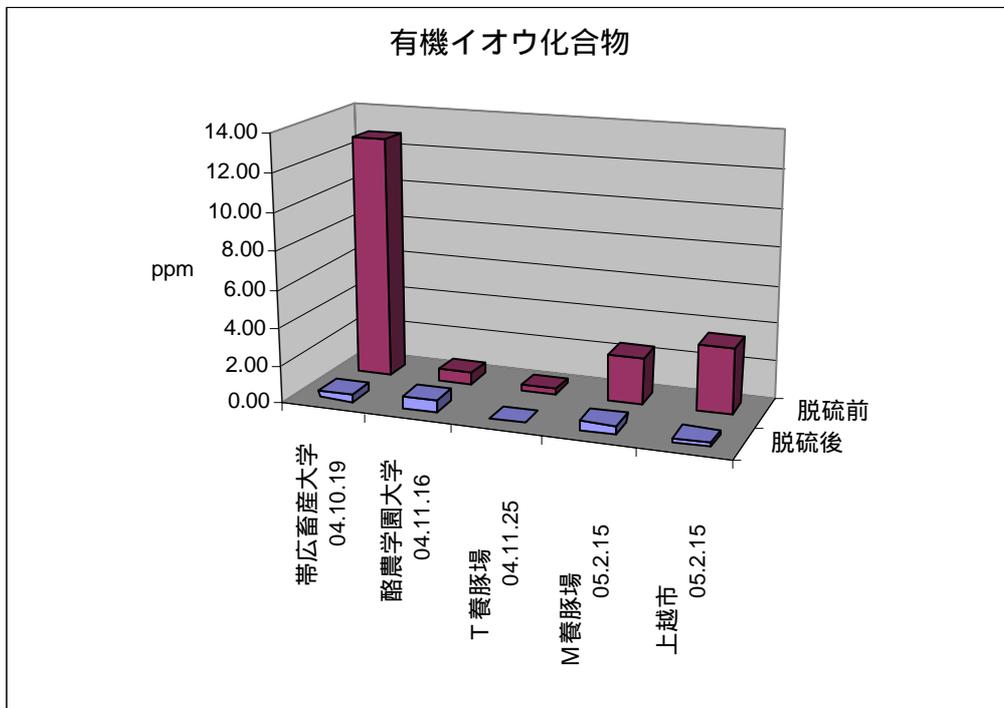


図 II-11 いくつかのバイオガスプラントにおけるバイオガス中の有機イオウ化合物含量

表II-2に、表II-1に示したバイオガス中の硫黄分の詳細を示す。

表 II-2. 表 II-1 に示したバイオガス中の硫黄分の詳細。

イオウの型	Content (ppm)					
	帯広大学 ¹		M養豚場 ²		上越市汚泥リサイクルパーク ²	
	脱硫前	脱硫後	脱硫前	脱硫後	脱硫前	脱硫後
無機イオウ						
H ₂ S	1531	24.6	4011	5.4	99.6	3.5
有機イオウ						
CH ₃ SH	11.66	0.50	0.92	検出されず	0.70	0.01
C ₂ H ₅ SH	0.99	0.36	0.40	0.07	0.33	0.17
その他 ³	0.35	0.33	1.28	0.40	2.61	0.18

¹ バイオ脱硫 ² 乾式脱硫 ³ 近似値

メタン発酵槽内の微生物フロラと発生バイオガスとの相関解析の試み

1 研究背景

主に大気中CO₂濃度上昇に起因するとされる急激な地球温暖化現象は、人類社会の存続にもかかわる深刻な問題である。国際的なCO₂排出量削減を定めた京都議定書は 2005 年 2 月に発効したが、世界のCO₂放出量は増加の一途をたどっている。人為的に放出されるCO₂のほとんどは化石燃料由来であるので、放出CO₂量削減のためには再生可能なエネルギー資源の開発が急務である。

現在、実用化されている再生可能エネルギー資源技術の一つに、有機廃棄物の発酵によるメタン生産が挙げられる。炭素源として利用される有機物としては、牛・豚・鶏などから出る畜産廃棄物や生ゴミなどが利用されている。メタン発酵の主体となるメタン細菌は嫌気性であることもあり、実際に発酵槽内ではどのような菌種が発酵を行っているのかについては不明であることがほとんどであり、どのような条件でどのような発酵が行われるのかという知識は経験的に得られたものしかない。メタン発酵において発生するバイオガスは発酵槽内の微生物フロラに依存するため、その解析は発生ガスの量的・質的な性状を示すひとつの指標となると考えられる。

メタン発酵の主体であるメタン生成細菌とは、古細菌 (Archaea) に属するさまざまな細菌の総称である。古細菌は、高温・無酸素といった極限環境に生息するものが多く、真正細菌 (Bacteria) と比べて知識の蓄積は非常に浅い。メタン生成細菌は古細菌のなかでもユーリアーキオータ (Euryarchaeota) というグループに分類される絶対嫌気性菌で、酸素に対する感受性は非常に高い。彼らは空気中の酸素にふれると死んでしまう。従って、単離・培養などの全ての操作は窒素ガスなどを充填させて酸素を遮断した特殊な設備中で行う必要があるため、詳細な研究は困難を極める。全ゲノム塩基配列が明らかにされている

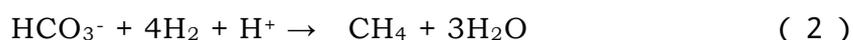
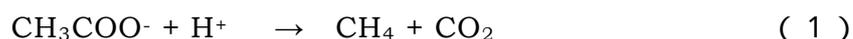
Methanobacterium thermoautotrophicum deltaH や *Methanococcus jannaschii* のようなものもあるが、近年の DNA 分析技術の向上によって、膨大な数の未同定種が存在することが知られるようになってきた。すなわち、環境からとった試料から全 DNA を抽出して塩基配列の違いを調べてみると、既知の配列とは異なる非常に多様な DNA が得られることがわかったのである。これは環境中には今まで知られていなかった多くの微生物がいるということを意味している。しかし、この DNA の持ち主である細菌自体は単離も培養もできないので、これらは VNC (Viable but non-culturable) 微生物と呼ばれている。VNC 状態の細菌は環境中の全細菌の 95 % を占めるとも見積もられている。従って、現在メタン生成細菌として知られているもの以外にも非常に多くの未同定菌種がメタ

ン発酵を行っていることが予想される。

メタン生成細菌の分類学的知見が不十分なのに対して、メタン生成の代謝系についてはある程度知られている。メタン発酵は以下のようにまとめられる複数の経路を通る複雑な代謝系の総体であり、メタンを直接生成するメタン生成細菌以外にも、非常に多くの細菌がかかわっていることがわかっている(中村 1998)。

高分子有機物 → 低分子有機酸・分子状水素 / CO₂・エタノールなど → メタン

メタン生成細菌自体は各有機廃棄物中の高分子有機化合物を直接利用することはできない。利用する資源によって、彼らは二つのグループに分けられる。すなわち、酢酸を原料として(1)式によってメタンを作り出す酢酸資化性メタン生成細菌および水素を利用する(2)式による水素資化性メタン生成細菌である。



酢酸資化性のグループは *Methanosaeta* 科および *Methanosarcina* 科に限定されるのに対し、水素資化性グループには *Methanobacteria* 科や *Methanococcus* 科を始め十を越える多様な科が含まれることが知られている。なお、彼らが利用する酢酸や水素はいずれにしろ他の細菌によって作られる。たとえばプロピオン酸の分解といった嫌気代謝過程(3)によって、酢酸や水素を作り出す種々の細菌がいなければメタン発酵は進行しない。



しかしこの反応は吸エルゴン反応であり、メタン生成菌が水素を消費する(2)式と共役することによってしか進まない。

その他、嫌氣的に酢酸を生成する経路は多数知られているし、一般に水素発酵といわれる細菌の水素生産も、菌種や環境条件によって NADH 経路、ギ酸経路、ピルビン酸 アセチル CoA 反応における直接発生経路などによることが知られているが(図 III-1)、いずれも詳細については不明な点が多い。

メタン発酵槽中ではこれらの様々な微生物が緊密に連携して、各種の有機物資材を最終的にメタンと CO₂ に分解しているのである。従って、メタン発酵の効率はそのような微生物が存在してどのような代謝が行われているのかによって大きく

影響されると考えられる。現在のところ、ほとんどがVCNであるそれぞれの菌種を単離培養して代謝活性を調べることは不可能であるので、全微生物DNAを抽出し、塩基配列の違いによって分離することで得られるDNAパターンから発酵槽内の微生物フロアを推定し、さらにそれらの情報をメタン発酵の効率化につなげることができると思われる。

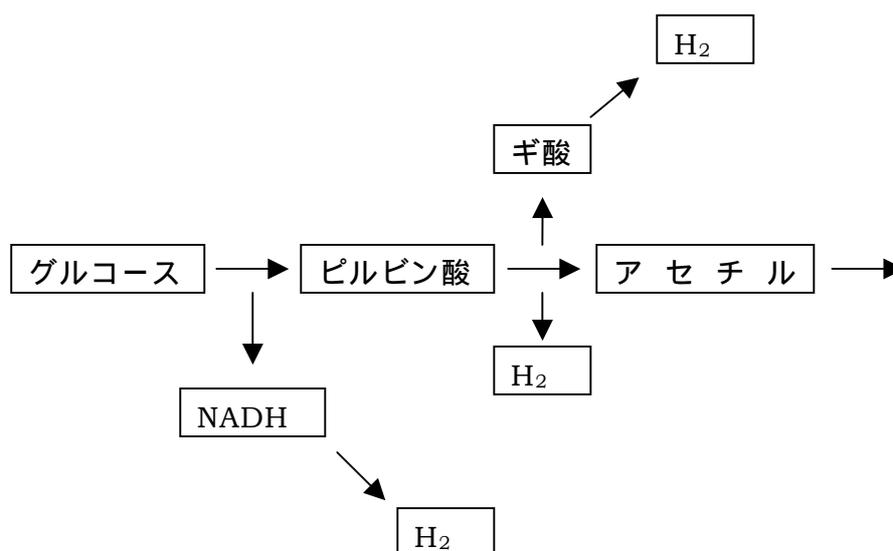


図 III-1. 水素発酵の三経路 (谷生 2004 改図)

2 研究方法

本研究では、各種のメタン発酵プラントの運転条件と発生バイオガスの定性的・定量的な関係を知るためにメタン発酵槽内の微生物フロアを指標とする。

各種のメタン発酵プラントから経時的に発酵槽内消化液を得、全 DNA 抽出後に 16S rDNA を PCR (ポリメラーゼ連鎖反応) によって増幅する。得られた全 DNA 断片を DGGE (変性剤濃度勾配ゲル電気泳動法) によって分離し、DNA バンドをパターン化する。発酵槽内では、多数の細菌が複雑に相互作用した結果としてメタンを主体とするバイオガスが生産されているため、それぞれのバンドを個別に同定するよりも、全体のパターンを認識することが肝要である。このフロアパターンと発生バイオガス組成を、投入資材・発酵温度・回転速度などの現行制御パラメータを勘案した上で比較し、特にバイオガスに含まれるイオウ成分に注目して、さまざまな運転形態のメタン発酵プラントにおける発酵槽内微生物フロアと発生バイオガス性状との関係性を調べることを目的とする、

メタン発酵槽内の発酵液は、上記の古細菌や真正細菌および原生生物や真菌類などのさまざまな生物に加え、牛の消化物やその他の有機物が雑多に混じり合っている。このような複雑な混合物からの DNA 抽出は一般に困難である (Anderson and

Lebepe-Mazur 2003)。これらの生物は堅い細胞壁を持つものが多く、物理的な力には非常に強い。細菌の細胞壁は、真正細菌ではムレイン、メタン生成細菌を含む古細菌ではシュードムレインと呼ばれるペプチドグリカンという糖タンパク質であるが、真核生物ではセルロース他でいずれも化学的・物理的に強固な化合物である。さまざまな化学成分よりなる細胞壁を破壊する方法としては、化学的な溶解よりは物理的な方法をとるのが効果的である。細菌細胞を破砕する方法として、微細なビーズと共に激しく振動させてその力で細胞壁を壊す beadbeat 法が開発されている (Hensiek *et al.* 1992)。そこで、今回は直径 0.1 mm のガラスビーズを用いて、beadbeater によって細胞を破壊することにした。

また発酵液中には、核酸にゆるく、あるいは強固に結合して抽出を妨げるような様々な物質が含まれているのが通例であり、場合によっては抽出された核酸を分解するような成分が含まれていることもある。たとえば、一般に生物体に含まれるさまざまなフェノール性物質は、細胞外の酸素にふれると重合してポリフェノールとなり、DNA に強固に結合して不溶化してしまう。従って、このような試料から核酸を抽出する場合には、効率よく細胞を破砕した上に、さらにポリフェノールのような物質が DNA と結合する前に吸着するなどして取り除く必要がある。細胞破砕後の核酸抽出・純化のために、夾雑する種々の化学物質を除去する方法はいくつか考案されている。比較的好く使われるのは、吸着剤として不溶性の高分子ポリビニルピロリドン (PVPP) を懸濁して、特にフェノール性の物質を取り去る方法である。PVPP によってあらかじめフェノール物質が取り去られるので、抽出時に酸素にふれてもポリフェノールが作られることはない。また、その他の夾雑物質も吸着されるので、核酸を比較的きれいな状態で得ることができるのである。今回は最初の抽出時と、一時処理が終わった後に二重に PVPP 処理を行うことで、十分に夾雑物質を取り去る方法をとることにした (Rochelle *et al.* 1992)。

2.1 材料

発酵槽から取った消化液は、空気にふれないようにしてプラスチック容器にいっぱいになるように入れ、冷やしながら研究室に運んでから冷蔵し、なるべく早く抽出を行うように心がけた。今回は、上九一色村プラント (2004 年 9 月 28 日)、帯広畜産大プラント (2004 年 10 月 12 日)、酪農学園大プラント (2005 年 3 月) から取った消化液を試料とした。

2.2 DNA 抽出

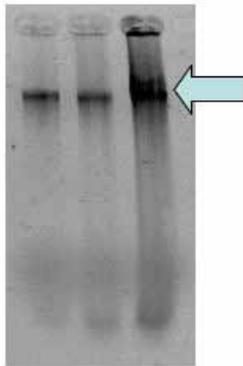
2mL チューブに 100 μ m ナイロンメッシュをセットし、各消化液をなるべく

空気に触れないようにして注ぎ入れ、1 mL のろ液を得た。洗浄液として TE buffer (10 mM Tris-HCl (pH 8.0), 1 mM EDTA) を 1 mL 加え、9000 × g、5 分間遠心分離した。上清を取り除き、同じように TE buffer を加え遠心分離することで沈殿を洗った。この際沈殿物質と洗浄 buffer が混ざり合うように十分に攪拌した。この作業を上清がほぼ透明になるまで 3~4 回繰り返した。透明になった上清を取り除き、沈殿に PVP-40 0.1 g、および 1 M Tris-HCl (pH 8.0) 1 mL を加え、よく攪拌した。9000 × g、5 分間の遠心分離を行い、上清を取り除いた。その後、沈殿に直径 0.01 mm ガラスビーズ 1 mL、抽出 buffer (10 mM Tris-HCl (pH8.0) 5 mM EDTA、1 % SDS、10 mM 2-MeEtOH) 1 mL を加え、Bead beater 処理 (120 sec、2500 rpm)を行った。9000 × g、5~10 秒間遠心分離してガラスビーズおよび細胞破片などを沈殿させ、ガラス製パスツールピペットを用いて上清を新しい 2 mL チューブに移した。混在する RNA を分解するための RNase 処理として、10 mg/mL RNase A を 1 μL 加え、室温で 15 分間放置した。その後、さらに PVP-40 を 0.1 g 加え、全体が均一になるように 15 分間よく攪拌した。DNA 抽出のために、等量のクロロフォルム・フェノール (1:1)溶液を加え、さらに 10 分攪拌を行った後、9000 × g、5 分間遠心分離した。DNA を含む上層を、パスツールピペットを用いて新しい 1.5 mL チューブに移し、750 μL のイソプロパノールを加え、-20 °C で 1 時間以上放置し、DNA を沈殿させた。11,000 × g、5 分間の遠心分離を行い、DNA を沈殿として回収した。沈殿を 70 %および 99 %のエタノールで洗い、9000 × g、1~2 分間遠心分離してから上層を取り除き、遠心乾燥機で沈殿を完全に乾燥させた。乾燥させた沈殿を 10 μL の TE buffer に溶解し、DNA 標品とした。この標品 5 μL に 3 μL の loading buffer を加え、小型水平電気泳動装置 Mupid (Advance)でアガロース電気泳動し、目的の DNA 断片が増幅されているか否かを確認した。泳動は 1.5 %アガロースゲル (Sigma Type II agarose、1 ×TBE (0.89 M Tris-borate; pH 8.3, 20 mM EDTA)) を用い、7.7 v/cm、45 分で行った。泳動後、ゲルを取り出して 2 μg/mL エチジウムブロマイド溶液中で 15 分間染色し、蒸留水で軽く洗浄後に Molecular Imager FX (BioRad)でレーザースキャンによって核酸のバンドを可視化して解析した (図 III-2)。

最終的に得られた DNA 沈殿には若干の着色があり、まだ多少の夾雑物があることを示しているが、この DNA 画分をアガロースゲル電気泳動したところ、いずれも、高分子の位置に DNA が一本のバンドとなって検出され、DNA は比較的きれいにとれていることが分かった。RNase 処理によって、rRNA はほとんどなくなっていることから、この標品は高分子 DNA のみを含むものだと考えられる。

DNA抽出

1 2 3



- ・ Bead-Beaterによる細胞破碎
- ・ SDS-クロロフォルム/フェノール抽出
- ・ PVPPによる不純物除去
- ・ RNaseによるRNA除去

1	上九一色村プラント発酵槽 1	2004. 9. 28
2	上九一色村プラント発酵槽 2	"
3	帯広畜産大プラント	2004. 10. 12

図 III-2. DNA 抽出法とその結果

2.3 PCR (ポリメラーゼ連鎖反応)

PCRとは、耐熱性DNAポリメラーゼを用いてDNAの特定の部分のみを増幅する方法である。今回はPCR-DGGE (ポリアクリルアミド濃度勾配変性ゲル電気泳動法) 解析のターゲットを 16S rDNAの前半部分としたので、PCRによって目的部分を増幅するために必要なプライマーといわれるオリゴヌクレオチドの塩基配列を決めるために日本DNAデータバンク (DDBJ, <http://www.ddbj.nig.ac.jp/>) のデータベースより、大腸菌およびメタン生成細菌の 16S rDNA遺伝子を検索した (図III-3)。

PCR プライマーは 5'末端にリン酸基、3'末端に水素基を持つ ~ 数十塩基程度の長さの合成オリゴヌクレオチドであり、目的部分に相補的に結合するように、forward 部分と reverse 部分が設定される。大腸菌の塩基配列から取った真正細菌用と、*Methanococcus* などの methanogen から得た古細菌用 (配列データ省略) の PCR プライマーセットの forward 側 5' 末端に、いわゆる DGGE クランプといわれる GC に富んだ 40 nt の鎖をつけた DGGE プライマーを用意した (表 III-1)。この DGGE クランプをつけることによって、PCR 産物の電気泳動時に塩基配列の違いによる泳動速度の差を作ることができる。

1	aaattgaaga gtttgatcat ggctcagatt gaacgctggc ggcaggccta acacatgcaa
61	gtcgaacggg aacaggaaga agcttgcctt ttgctgacga gtggcggacg ggtagat
121	gtctgggaaa ctgccgatg gaggggata actactggaa acggtagcta ataccgcata
181	acgtcgcaag accaaagagg gggacctcg ggcctctgc catcggatgt gcccagatgg
241	gattagctag taggtgggg aacggctcac ctaggcgacg atccctagct ggctgagag
301	gatgaccagc cacactggaa ctgagacacg gtccagactc ctacgggagg cagcagtggg
361	gaatattgca caatgggctc aagcctgatg cagccatgcc gcgtgatga agaaggcctt
421	cgggttgiaa agtactttca gcggggagga agggagtaa gttaatacct ttgctcattg
481	acgttacccg cagaagaagc accggctaac tccgtgccag cagccgagg aataccggag
541	gtgcaagcgt taatcgggat tactgggctt aaagcgcacg caggcgggtt gttaagtcag
601	atgtgaaatc cccgggctca acctgggaac tgcatctgat actggcaagc ttgagctctg
661	tagagggggg tagaattcca ggtgtagcgg tgaaatgcgt agagatctgg aggaataccg
721	gtggcgaagg cggccccctg gacgaagact gacgctcagg tgcaaaagcg tggggagcaa
781	acaggattag ataccctggg agtccacgcc gtaaacgatg tcgacttggg ggttgtgccc
841	ttgagggcgtg gcttccggag ctaacgcgtt aagtcgaccg cctggggagt acggccgcaa
901	ggttaaaact caaatgaatt gacgggggcc cgcaaaagcg gtggagcatg tggtttaatt
961	cgatgcaacg cgaagaacct tacctggctt tgacatccac ggaagttttc agagatgaga
1021	atgtgccttc gggaaccgtg agacaggctc tgcatggctg tcgtcagctc gtgtgtgaa
1081	atgttgggtt aagtcccgcg acgagcgcaa cccttatcct ttgttggcag cggtccggcc
1141	gggaactcaa aggagactgc cagtataaa ctggaggaag gtggggatga cgtaagicta
1201	tcattggcctt tacgaccagg gctacacacg tgctacaatg gcgcatacaa agagaagcga
1261	cctcgcgaga gcaagcggac ctcataaagt gcgtcgtagt ccggattgga gtctgcaact
1321	cgactccatg aagtcggaat cgctagtaat cgtggatcag aatgccacgg tgaatacgtt
1381	cccggcctt gtacacaccg cccgtcacac catgggagtg ggttgcaaaa gaagtaggta
1441	gcttaacctt cgggagggcg cttaccactt tgtgattcat gactgggggtg aagtcgtaac
1501	aaggtaacgg taggggaacc tcggtttgga tcacctcctt a

図 III-3. 大腸菌 16S rDNA 塩基配列。下線部をプライマーとして太字部分を増幅する。

表 III-1. PCR プライマーと GC クランプ (Myers *et al.*, 1985)。

名称	塩基配列 (5'-3')	備考
9F	Agtttgatcctggctc	真正細菌用 forward
9FA	Tctggttgatcctgcc	古細菌用 forward
520R	Accgcggctgctggc	兼用 reverse
GCclamp	cgccccgcgcgccccgcgccccgtccccgcgccccgcgccccg	Forward の 5'側につける

0.2 mL PCR チューブに、PCR Master Mix (Promega) 12.5 μ L、DNA 標品 1 μ L、forward および reverse プライマーをそれぞれ終濃度 10 mM になるように加え、さらに蒸留水を 9.5 μ L 加えて終量が 25 μ L になるようにし、反応液とした。反応チューブをサーマルサイクラー (Thermal Cycler 2720、Applied Biosystem) にセットし、すぐに反応を開始した。PCR 条件は以下のように設定した。

< PCR 反応 >

予備加熱	94	5 分	} 25 サイクル
熱変性	94	30 秒	
アニーリング	55	30 秒	
伸長反応	68	1 分	
追加反応	68	7 分	

反応後、PCR 増幅産物を回収するために、反応液を別のチューブにとり、クロロフォルム・フェノール (1:1) 溶液 25 μ L を加えた。2 分間激しく攪拌し、9,000 \times g、1~2 分間遠心分離した。上層を新しいチューブに取り、再度クロロフォルム・フェノール (1:1) 溶液 25 μ L を加え、同様に攪拌・遠心分離を行った。上層を新しいチューブに移し、3 M 酢酸ナトリウム 5 μ L および、イソプロパノール 25 μ L を加えた。-20 で一時間以上放置し、PCR 産物をアルコール沈殿させた。11,000 \times g、5 分間遠心分離し、沈殿した DNA を回収した。沈殿を 70 % および 99 % のエタノールで洗い、9,000 \times g、1~2 分間遠心分離してから上層を取り除き、遠心乾燥機で沈殿を完全に乾燥させた。乾燥した沈殿を 10 μ L の loading buffer (0.05 M EDTA、50 % Sucrose、1 % SDS) に溶解した。このうちの 3 μ L を取って小型水平電気泳動装置 Mupid (Advance) で電気泳動し、抽出 DNA と同様の条件でチェックを行った (図 III-4)。

GC クランプをつけずに 9F-520R 間の増幅を行った結果、いずれの試料においても、期待される 511 塩基対長付近に濃いバンドが得られた。これは、今回得られた DNA 試料が PCR 阻害物質などを含んでおらず、また PCR プライマーも十分機能していることを示している。なお、データは示さないが GC クランプをつけた C9F、C9FA プライマーを用いた場合にも同様の結果を得ている。

2.4 DGGE 電気泳動

DGGE は、ポリアクリルアミドゲル中に DNA 変性剤であるホルムアミドと尿素の濃度勾配を作り、塩基配列の違いによって二本鎖 DNA の一本鎖への乖離の度合いが異なることを利用して、長さは同じでも配列の異なる DNA 鎖を分離する方法である (Meyers 1982、石井他 2000)。この方法を用いることにより、消化液中の各種微生物から抽出された DNA をそれぞれ大腸菌などへのクローニング・塩基配列解読をすることなく分離することができる。今回は、恒温器付きミニスラブ電気泳動装置 (AE-6510 レゾルマックス・二連ミニスラブ、ATTO) を用いて PCR 産物の DGGE 電気泳動を行った。ゲルは 10 % アクリルアミド (acrylamide/bis-acrylamide 37.5 : 1 w/w) とし、変性剤は 7 M 尿素および 40

PCR増幅

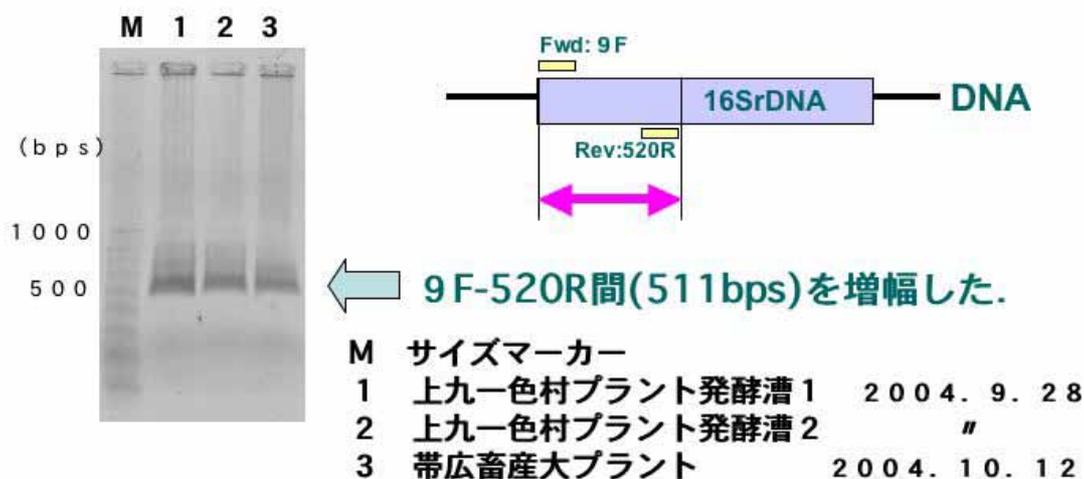


図 III-4. PCR 増幅産物のチェック

%ホルムアミド (AG501-X8 樹脂、Bio-Rad による脱イオン化済) を 100 %とした相対濃度で表す。泳動 buffer にはイオン強度を考慮して 0.5 x TAE (20 mM Tris-acetate; pH 7.4、10 mM acetate、0.5 mM EDTA) を用いた。アクリルアミドストックとして、0 %変性剤溶液 (10 %アクリルアミド、0.5 x TAE) および 80 %変性剤溶液 (5.6 M 尿素、32 %ホルムアミド、10 %アクリルアミド、0.5 x TAE) を用意し、両液を適宜混合することによって目的の変性剤濃度を得た。

濃度勾配ゲル作成器に変性剤勾配の始点および終点濃度のアクリルアミド溶液を入れ、1/2000 容量の TEMED および 1/200 容量の 10 %過硫酸アンモニウムを加えて重合を開始させると同時に、両液の混和・濃度勾配作成を開始した。設定量がゲル板に流し込まれたところで空気が入らないようにコームを挿入し、25 に設定した恒温器中で、5 時間以上かけてアクリルアミドを十分に重合させた。DW で軽く水洗したのちゲル板を泳動槽にセットし、泳動 buffer およびゲルが 60 になるまで恒温器からの温水を循環させた。上記のように PCR を行った試料 7-10 μ L をウェルに入れ、100 v、25 mA (7.1 v/cm) で 2 時間の泳動を行った。泳動終了後、ゲルをアガロース電気泳動同様 2 mg/mL エチジウムブロマ

イド溶液に 15 分間浸漬し、染色された DNA を観察した。ゲル中の変性剤濃度は、まず 0 - 80 %濃度で泳動して DNA バンドの分離の様子を調べ、徐々に分離濃度範囲を狭めて最終的に 40 - 60 %とした (図 III-5)。

古細菌の 16S rDNAに相補的なC9FAプライマーを用いてPCR-DGGEを行った場合、各試料で共通に見られるバンド以外に試料毎に異なるバンドが何本も見られた。また、真正細菌用のC9Fプライマーを用いた場合にも、試料毎に異なるバンドが存在することが認められた。このパターンを発生バイオガス組成と比較してみると、矢印で示した古細菌DNAのDGGEバンドとH₂S成分との間に関係があるように見える。すなわち、矢印位置にブロードなバンドが見られる酪農学園大および帯広畜産大プラントの試料は、上九一色村プラントに比べてH₂S成分が少ないことがわかる (表III-2)。なお、帯広畜産大プラントの当該試料ガス組成値は脱硫後のものであるが、同プラントの 2005 年 1 月 7 日脱硫前試料に含まれるH₂Sは 1531 ppmで、上九一色村プラントの値の 2180 ppm、3576 ppmよりかなり低く、酪農学園大プラント試料 (2004 年 11 月 16 日) の 1093 ppmとの中間程度であった。さらに、このバンドはH₂S濃度が最も低い酪農学園大プラント試料で最も濃くなっていることから、このバンドのGC含量が高いと考えられるDNAを持つ細菌が、燃料電池へのバイオガス利用の際に障害とな

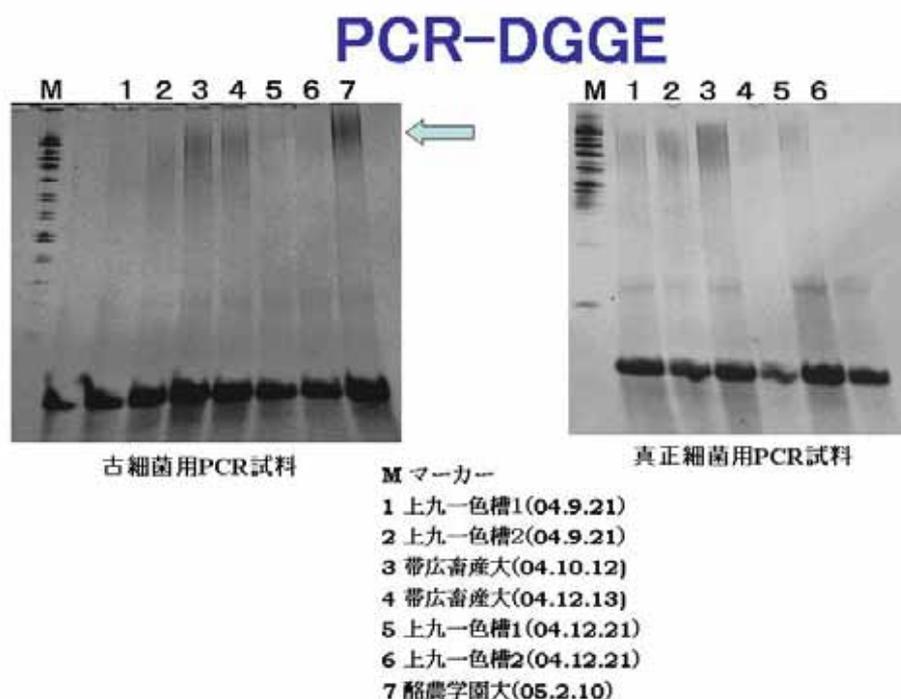


図 III-5. 各試料の PCR-DGGE 結果

表 III-2. 各試料の脱硫前バイオガス組成

試料名	CH ₄	CO ₂	H ₂ S(ppm)	有機イオウ(ppm)	備考
1 上九一色槽1(04.9.21)	0.607	0.393	2180	0.95	
2 上九一色槽2(04.9.21)	0.607	0.393	2180	0.95	
3 帯広畜産大(04.10.12)	0.599	0.404	23.8	0.43	脱硫後
4 帯広畜産大(04.12.13)	0.619	0.381	24.6	1.20	脱硫後
5 上九一色槽 1(04.12.21)	0.614	0.386	3576	0.79	
6 上九一色槽 2(04.12.21)	0.614	0.386	3576	0.79	
7 酪農学園大(05.2.10)	0.588	0.412	1093	0.62	ガス組成は 04.11.16

るH₂S生産と関わっている可能性は十分に考えられる。このバンドを切り出してDNAを抽出し、塩基配列を決定して遺伝子データベースに当たることにより、これがどのような細菌のものなのかを知ることができるであろう。しかしいずれにしろ、今回用いたDGGE装置は、ゲルサイズが9 x 8 cmと小さいために十分な分解能が得られていないといえる。今後はより分解能の高い泳動装置を用い、さらに複数のプライマーセットによるパターン解析を行うことで、より精度の高い相関分析が可能となるであろう。

引用文献

Anderson, K.L. and Lebepe-Mazur, S. (2003) Comparison of rapid methods for the extraction of bacteria DNA from colonic and caecal lumen contents of the pig. *J. Appl. Microbiol.* 94: 988-993.

Hensiek, R., Krupp, G. and Stackebrandt, E. (1992) Development of diagnostic oligonucleotide probes for four lactobacillus species occurring in the intestinal tract. *System. Appl. Microbiol.* 15: 123-128.

石井浩介、中川達功、福井学. (2000) 微生物生態学への変性剤濃度勾配ゲル電気泳動法の応用. *Microbes and Environments.* 15: 59-73.

Myers, R.M., Fischer, S.G., Lerman, L.S. and Maniatis, T. (1985) Nearly all single base substitutions in DNA fragments joined to a GC-clamp can be detected by denaturing gradient gel electrophoresis. *Nuc. Acid Res.* 13: 3131-3145.

Rochelle, P.A., Fry, J.C., Parkes, R.J. and Weightman, A.J. (1992) DNA extraction for 16S rRNA gene analysis to determine genetic diversity in deep sediment communities. FEMS Microbiol. Let. 100: 59-66.

谷生重晴. (2004) バクテリアはなぜ水素を発酵で発生するのか、またエネルギー生産利用における問題点はなにか。水素エネルギーシステム 29: 2-6.

バイオガスの脱硫ならびに水蒸気改質特性

1 脱硫特性

II章2項で詳述したように、バイオガスを燃料電池用の燃料として使用する際の大きな問題は、そのイオウ濃度の高さである。そこでここでは、バイオガスプラントで脱硫後のバイオガスを想定して、その脱硫特性を測定した。使用した脱硫剤ならびに脱硫条件を表 IV-1 に、また脱硫容量を表 IV-2 に示す。

表 IV-1. 模擬バイオガスの脱硫条件

H ₂ S濃度 (N ₂ バランス)	57.3 ppm
GHSV	1875 h ⁻¹
有機イオウ濃度 (CH ₄ バランス)	3.0ppm
GHSV	5675 h ⁻¹
吸着剤	MnO ₂

表 IV-2. Mn 系脱硫剤の脱硫容量

H ₂ S	115.3 mg-S/g-adsorbent
有機イオウ	31.8 mg-S/g-adsorbent

ここでMnO₂系の脱硫剤を用いたのは、通常バイオガスの乾式脱硫で用いられている酸化鉄系の脱硫剤では、II章2項でも見たように、H₂Sで数ppm、その他の有機イオウで1 ppm弱が除去されずに残るからである。MnO₂系の脱硫剤では、上記の容量範囲で使用する限り、FPD検出器を備えたガスクロマトグラフの検出感度 (10 ppb程度) 内でイオウ成分の流出は観測されなかった。

2 水蒸気改質特性

II章2項に記したように、バイオガス中の炭化水素はメタンのみである。メタンの水蒸気改質では、次の二つの反応が生起する。



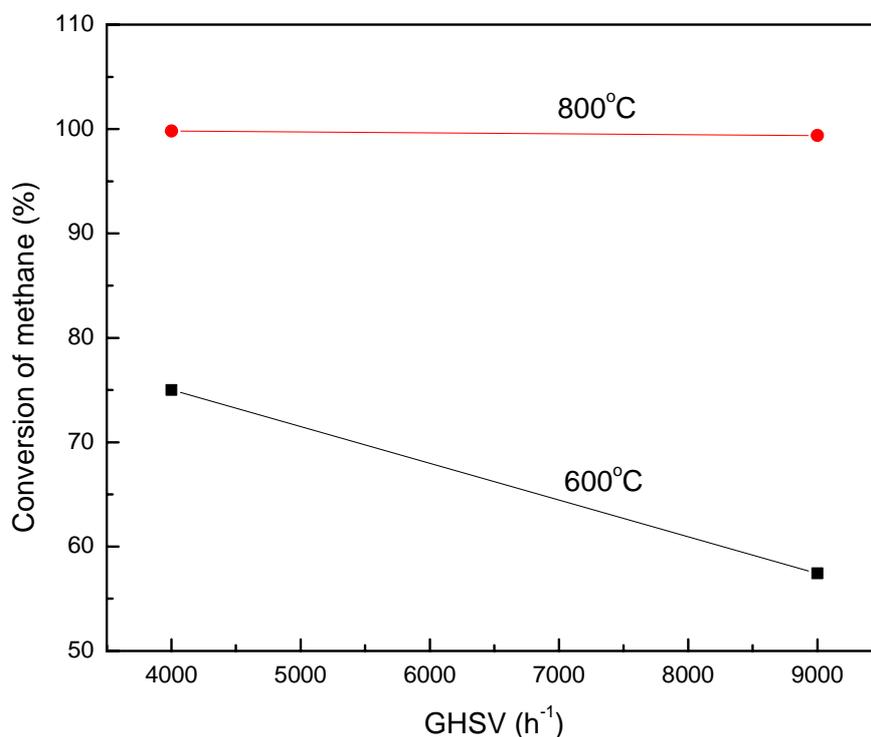
式 (1) は合成ガス生成反応であり、式 (2) は水性ガスシフト反応である。ここでは水素分離膜の使用を想定しているため、第2段のシフト反応は試みなかった。表 IV-3に模擬バイオガスの水蒸気改質条件を示す。ここでは模擬ガスとして、富士ケ

表 IV-3. 模擬バイオガスの水蒸気改質条件

CH ₄ /CO ₂ モル比	60/40
スチーム/CH ₄ モル比	3/1
触媒	Ni/ α -alumina
空間速度 (反応物 / 触媒体積比)	4000 h ⁻¹ 、 9000 h ⁻¹
反応温度	600 、 800

嶺バイオセンターのバイオガスを想定したCH₄/CO₂比 6:4 のものを用いた。

図IV-1 および表IV-4 に模擬バイオガスの水蒸気改質結果を示す。水蒸気改質反応は一般に非常に速い反応であり、ここで用いた触媒と反応条件では、GHSV = 4000 h⁻¹においてほぼ平衡転化率に達する。表IV-4 および図IV-1 からわかるように、反応温度 800 °C では、メタン転化率はほぼ 100%であり、またこのとき、H₂/CO比がほぼ 3 であることから、ここでは反応 (1) が優勢であり、反応 (2) の水性ガスシフト反応はほとんど起こっていないことがわかる。



図IV-1. 模擬バイオガスの水蒸気改質結果

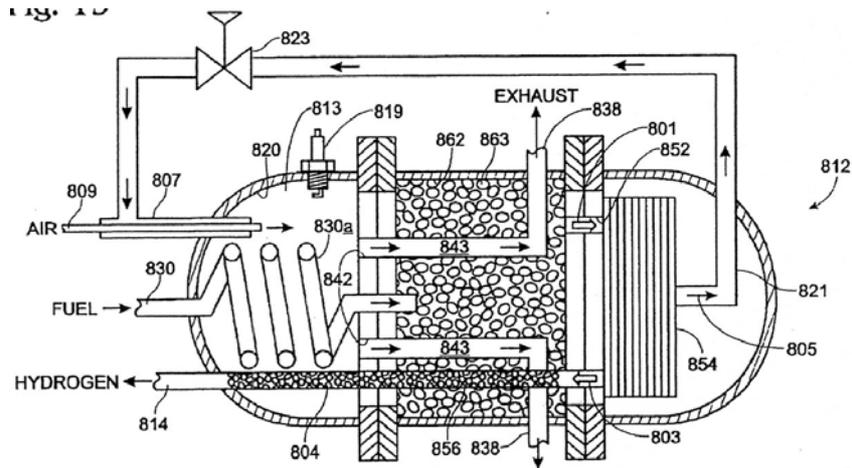
表 IV-4. 模擬バイオガスの水蒸気改質結果

成分	組成 (%)			
	600		800	
	4000 h ⁻¹	9000 h ⁻¹	4000 h ⁻¹	9000 h ⁻¹
H ₂	59.6	55.1	63.6	64.2
CO ₂	24.4	26.2	16.9	15.6
CO	10.0	7.4	19.5	20.1
CH ₄	6.0	11.3	0.0	0.1

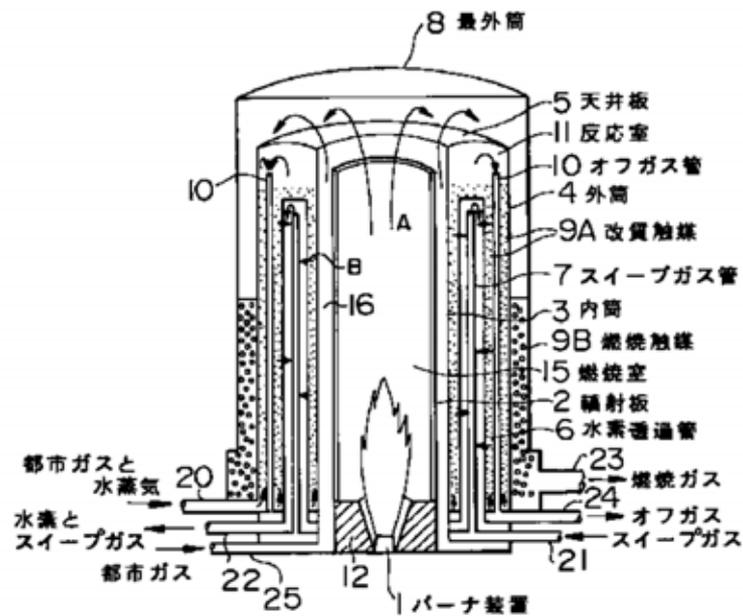
以上より、改質温度800℃、GHSV = 4000 h⁻¹程度であれば、バイオガス中のメタンをほぼ100%水素に変換できることが明らかとなった。なお本調査では水素分離膜の利用を想定しており、上記改質後のガスは、水素分離膜によって水素と他のガスとに分離され、水素は燃料電池にまた他のガスはオフガスとして反応器やボイラーでの燃料として使用される。

利用システムの選定

本調査では、水蒸気改質後の生成ガスから水素分離膜によって水素を分離する方式を検討した。水蒸気改質ガスの膜分離には、平衡型と非平衡型の二種類がある。前者は水素分離膜が反応器の下流にあり、後者では反応器の中にある。図V-1および図V-2に、それぞれの方式の模式図を示す。表V-1は、両方式の比較である。



図V-1. 平衡型膜分離方式の模式図（出典：US 6,221,117 B1）



図V-2. 非平衡型膜分離方式の模式図（出典：特開平9-2804）

表V-1. 平衡型および非平衡型膜分離方式の比較

	平衡型	非平衡型
反応温度	高	低
反応圧力	中	中
反応速度	高	低
スweepガス	不要	要
水素純度	高	高

利用システムの仕様

1 利用システムのフロー

本コージェネレーションシステムは、(1) 脱硫器、(2) 水蒸気改質器、(3) 水素分離膜、(4) 燃料電池からなる。本システムのフローを図VI-1に示す。図中青く彩色した部分が、本システムに係る部分である。

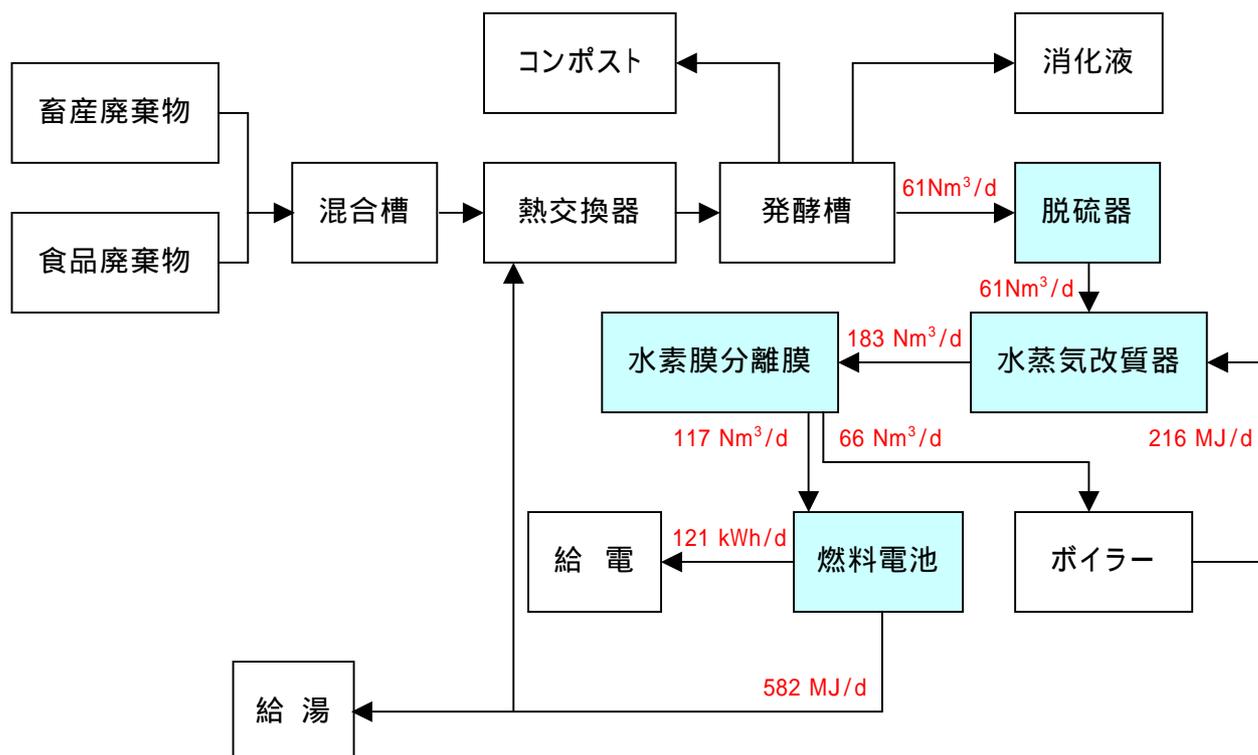


図 VI-1. 利用システムのフロー

2 エネルギー収支

本コージェネレーションシステムに係る主なエネルギー収支は以下の通りである。

(1) 電気エネルギー

使用ガス量	61 m³/d
メタン濃度	60%
メタンガス量	61 × 0.6 = 36.6 m³/d
水素発生量	117 m³/d (800 での水蒸気改質により、メタンの3.2倍量の水素を得る。図IV-1、表IV-4参照)
発電形式	PEFC型燃料電池

発電効率	40 %
発電量	$117 \text{ m}^3/\text{d} \times 2.94 \text{ kWh} \times 0.4 = 138 \text{ kWh}/\text{d}$ (水素1 m ³ 当り理論発電量2.94 kWh)
補機電力使用量	16.8kWh/d
余剰電力量	$138 - 16.8 = 121 \text{ kWh}/\text{d}$

(2) 熱エネルギー

オフガス発生量	66 m ³ /d
CO含有率	20 %
オフガス発熱量	$66 \text{ m}^3/\text{d} \times 12.6 \text{ MJ} \times 0.2 \times 0.8 = 133 \text{ MJ}/\text{d}$ (ボイラ効率80 %)
発電廃熱回収量	$117 \text{ m}^3/\text{d} \times 2.94 \text{ kWh} \times 0.47 \times 3.6 \text{ MJ} = 582 \text{ MJ}/\text{d}$ (回収効率47 %)
改質器使用量	216 MJ/d (熱交換による回収分を相殺)
余剰熱量	$133 + 582 - 216 = 499 \text{ MJ}/\text{d}$

3 利用システムの仕様

(1) 脱硫器

入口メタン濃度	60% (バランスCO ₂)
入口硫化物濃度	硫化水素 5 ppm、有機イオウ 1 ppm
出口硫化物濃度	10 ppb 以下

(2) 水蒸気改質器

入口メタン濃度	60 % (バランスCO ₂)
入口硫化物濃度	10 ppb 以下
反応ガス流速	2.54 m ³ /h
反応温度	800
S/C比	3
メタン反応率	100 %
出口水素含量	64 %

(3) 水素分離膜

入口ガス流速	7.11 m ³ /h
入口水素含量	64 %
出口水素含量	100 %

(4) 燃料電池

発電熱効率(LHV)	40 %
総合熱効率	87 %
発電出力(送電端)	5.7 kW
排熱回収量	6.7 kW

概算事業費

1 概要事業費の算定

燃料電池コジェネー式	15,000千円
設置・配管等費用	900千円

2 事業収支

収支（期間10年）	
電力節約額	+ 6,625千円 ($121\text{kWh}/\text{d} \times 365\text{d}/\text{y} \times 10\text{y} = 441,650\text{kWh}$ $441,650\text{ kWh} \times 15\text{¥}/\text{kWh} = 6,624,750\text{¥}$)
ガス節約額	+ 4,924千円 ($582\text{ MJ}/\text{d} \times 365\text{d}/\text{y} \times 10\text{y} = 2,124,300\text{MJ}$ $2,124,300\text{MJ} \div 43.14\text{MJ}/\text{m}^3 \times 100\text{¥}/\text{m}^3 = 4,924,200\text{¥}$)
メンテナンス	- 2,000千円（200千円/年）
償却費	- 14,310千円（10年償却、残存価格10%）
合計	- 4,761千円
事業費に対する補助金割合による10年間の総収支の変化	
補助金率 0%	- 4,761千円
補助金率50%	+ 3,189千円
補助金率90%	+ 9,549千円

経済性・環境性・CO₂削減量の評価

1 経済性

予定電力出力	121 kWh/d
予定熱出力	582 MJ/d
買電相当額	¥1,815/d (662 千円/y)
買ガス相当額	¥1,349/d (492 千円/y)

2 環境性

騒音	55 dB @ 2 m (超低騒音ディーゼル発電機 : 60.4 dB @ 7 m)
発生NO _x	1 ppm以下 (ディーゼル発電機 : 970 ppm)

3 CO₂削減量

バイオガス消費による削減量	3,400 kg-CO ₂ /y (使用バイオガス61 Nm ³ /d ÷ 一頭当排泄物量0.067 m ³ /d ÷ バイオガス発生量30m ³ /m ³ = 乳牛30頭 乳牛30頭 × メタン排出係数5.41 kg-CH ₄ /頭 /y = 162 kg-CH ₄ /y 162 kg-CH ₄ /y × 21 = 3,400 kg-CO ₂ /y)
電力利用による削減量	15,800 kg-CO ₂ /y (出力電力121 kWh/d × 365 d = 44,165 kWh/y 排出係数0.357 kg-CO ₂ /kWh × 44,165 kWh/y = 15,767 kg-CO ₂ /y)
熱利用による削減量	9,800 kg-CO ₂ /y (熱出力582 MJ/d × 365d/y = 212,430MJ/y 212,430MJ/y ÷ 43.14MJ/m ³ × 排出係数 1.99 kg-CO ₂ /m ³ = 9,799 kg-CO ₂ /y)
合計CO ₂ 削減量	29.0 t-CO ₂ /y

資料

調査の概要

件名：平成16年度成果報告書 バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業・同事業調査 バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業調査 「水素分離膜を利用したバイオガス燃料電池コージェネレーション事業調査」

本調査では、山梨県畜産試験場敷地または山梨県上九一色村に設置されているメタン発酵施設に水蒸気改質燃料処理装置、水素膜分離装置ならびにPEFC型燃料電池を設置し、畜産廃棄物バイオマスより発生する水素、ならびにメタンを水蒸気改質して得る水素を燃料として燃料電池により発電して施設内の電力として供給し、またオフガスおよび燃料電池より発生する熱を水蒸気改質器加熱、メタン発酵槽加温ならびに施設における給湯用途等の熱需要に活用することを目的として、そのためのフィージビリティスタディ（FS）を行った。検討項目とその結果は以下のとおりである。

(1) バイオガスの性状把握

バイオガスの燃料電池発電はいくつかの事業者により試みられているものの、いずれも安定的運用に至っているとは言いがたい。これには種々の理由が考えられるが、その一つとして、バイオガスの性状が通常の燃料電池燃料である都市ガスなどと大きく異なっていることが挙げられる。燃料電池の駆動には燃料（都市ガスやバイオガスなど）から水素を抽出せねばならず、そのための水蒸気改質工程ならびに水素精製工程が、バイオガス燃料に関しては必ずしも確立していないのである。多くのバイオガスプラントでは発生するメタンとCO₂は通常赤外線法によりモニターされているが、水蒸気改質特性ならびに水素精製工程に大きく影響する他の成分に関する検討は少ない。

そこで、まず現在稼働中のメタン発酵施設より発生するバイオガスの性状をガスクロマトグラフ法により実験的に正確に把握した。バイオガス原料（基質）の異なる種々のバイオガスプラントからのバイオガスを分析し、またいくつかのプラントに関してはその経時変化も記録した。

(2) バイオガスの水蒸気改質特性把握

上で把握したバイオガス組成に基づき、模擬ガスを作成し、これを実際に水蒸気改質して、その水素生成特性を実験的に把握した。さらに、現在都市ガス燃料用の燃料電池などで使用されている脱硫剤システムが、バイオガスに対してどの程度有効かの判定も行った。

(3) バイオガス組成とメタン発酵槽内の微生物フロラとの相関解析

さらにこのバイオガス組成と、メタン発酵槽内の微生物フロラとの相関解析も試みた。

(4) 利用システムの選定・システムの概略設計

上で把握したバイオガスの性状より、これを水蒸気改質するための最適反応系（脱硫システム、水蒸気改質システム、水素分離システム）を選定した。さらに、これに適した燃料電池システムも選定した。とくに平衡型水素分離膜方式の燃料電池を中心に、これに適した水蒸気改質システムの最適化を行った。

(5) 利用システム設置に係わる仕様及び事業費の積算

上で選定・設計したシステムの設置に係わる仕様を検討し、これに必要な事業費を積算した。

(6) 経済性、環境性、省エネ性の評価等

本システムに関して、経済性、環境性、省エネ性などを検討した。

(7) 事業化可能性の最終評価

以上の結果を総合して、本事業の事業化の可能性を最終的に評価した。

調査の概要(英文)

Title : Biomass and Other Non-utilized Energy Demonstration Project/
Feasibility Study "Feasibility Study on Biogas Fuel Cell Cogeneration using
Hydrogen Separation Film" (FY2004) Final Report

The present study aims at examining the feasibility of operating a fuel cell for co-generation (power as well as heat) at the biogas plant installed at the Yamanashi Animal Husbandry Experimental Station or Kamikuishiki Village, Yamanashi Prefecture. The plan is to install steam-reforming fuel processor, thin-film hydrogen separator and PEFC fuel cell to be run by biogas. Produced electricity and hot water will be consumed on site. The following points were examined.

(1) Analysis of biogas properties

Fuel cell power generation using biogas as a fuel has been experimented by a few enterprises with limited results. One of the difficulties lies in the fact that biogas properties are very different from the common fuel cell fuels such as city gas. Driving fuel cell requires the extraction of hydrogen from the fuel such as city gas or biogas, but this fuel processing step is not necessarily established for biogas. Many biogas plant monitors only the amount of methane and CO₂ by infrared

on-line monitor, but other minor components that might affect its fuel processing performance are not well examined.

Thus, first step of this feasibility study is set to establish the properties of biogas, obtained from various biogas plants, by gas chromatographic analysis. Biogases produced from various substrates (raw materials) were collected and analyzed, with its time variation for some of the representative biogas plants.

(2) Examination of the biogas steam-reforming characteristics

Based on the biogas characteristics examined above, a simulated biogas will be prepared and tested for its steam-reforming characteristics. Furthermore, desulfurization systems that are currently employed for city gas fuel cells will be tested and judged for their effectiveness when used for biogas desulfurization.

(3) Correlation analysis between biogas composition and microorganism flora

Correlation analysis was attempted in order to establish the relation between the biogas composition and the microorganism flora within the methane fermentation vessel.

(4) Selection of the systems to be employed and their approximate design

Optimum systems for the biogas steam reforming, including desulfurization, steam reforming and hydrogen separation, are selected. Furthermore, the optimum fuel cell system is also selected. The use of fuel cell equipped with equilibrium-type thin-film hydrogen separator in mind, steam reforming system is optimized.

(5) Specifications and cost estimation for the installation of the fuel cell system

Specifications of the systems selected above are examined, and the cost necessary for the installation of the fuel cell system is estimated.

(6) Financial, environmental and energy-saving aspects

Financial, environmental and energy-saving aspects on the selected system are examined.

(7) Final evaluation on the feasibility of the project implementation

With the comprehensive analysis of the above results, the feasibility of the project implementation is evaluated.