

市街地再開発における新エネルギーの採用

経済学部 4年26組
菅原 舞

禍福は糾纏の如し

(史記より)

目次

序文

第一章 エネルギーと日本

- (1) 日本を取り巻くエネルギー事情
- (2) 新たなエネルギー採用の重要性

第二章 再開発地区におけるエネルギー選択の重要性

- (1) 大都市の特徴と都市再開発
- (2) 再開発エリアにおけるエネルギー選択の意義

第三章 下水汚泥利用ビジネスの可能性

- (1) 下水道の役割と下水処理および下水汚泥処理の現状
- (2) 汚泥消化ガスを利用した燃料電池発電システム
- (3) 下水汚泥消化ガス発電の優位性

第四章 下水汚泥エネルギーを用いた循環型発電ビジネスモデル

- (1) バイオマスエネルギーとしての新たな下水汚泥利用の可能性
- (2) 下水汚泥エネルギーの採用
- (3) 下水汚泥エネルギーの採用が他の枯渇性資源に与える影響

第五章 考察

- (1) 本論独自の観点
- (2) 下水汚泥消化ガスエネルギー採用への課題

第六章 結論

参考文献・URL

序文

たくさんの種類があるエネルギーの中で、私たちの生活は化石燃料という枯渇性資源を中心としたエネルギーに依存して成り立っている。化石燃料なし、エネルギーなしの生活で現在の生活水準を保つことは現代社会において極めて困難である。

「健康で文化的な最低限度の生活」を送るための衣・食・住を満たすためにも、企業から消費者に渡る上流から下流のあらゆる段階において何らかのエネルギーを消費した生産活動が行われている。その一方で、自国の資源が乏しい日本は、エネルギーを他国からの供給に頼らざるを得ないが、日本がエネルギーを依存している地域は限られている。このような地域の偏りは、政治的あるいは何らかの経済的要因によって日本のエネルギー確保が脅かされるリスクを含んでいるといえよう。さらに、ロシアが京都議定書を批准したことによって、**2008**年から**2012**年の間に日本は**1990**年比で**6%**（実質**12%**）の**CO2**を削減しなければならないなど、わが国日本を取り巻くエネルギー事情は非常に厳しい。

しかし、この状況を一国の経済の衰退の一要因と捉えるのではなく、ビジネスチャンスであると捉えるところに今後のエネルギーのあり方を導く一筋の光が見えてくるはずであると私は考え、新たなエネルギー資源に着目した。消費者行動や製品ではなく、真の意味で「上流」にあるエネルギー資源に着目したのは、上流にあるエネルギー自体が変わればもっとも下流にいる消費者へもその影響が与えられるだろうと考えたからである。

本論文では、下水汚泥処理の際に発生する消化ガスを利用した燃料電池発電を取り上げる。汚泥消化ガスという新しいエネルギー資源の採用によってエネルギー資源の安定的な確保が可能になるだけでなく、環境負荷が従来よりも小さいエネルギーを安定的に供給するところに本論分の目的をおいた。

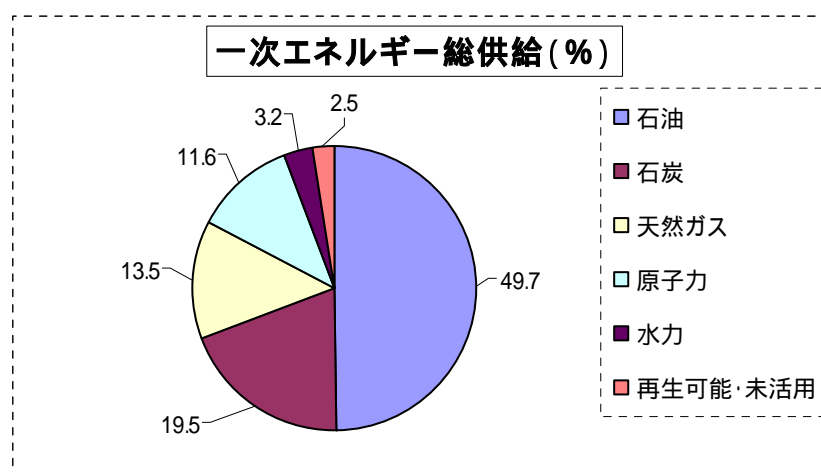
なぜ他のエネルギー資源よりも汚泥消化ガスが優れ、既存のエネルギー供給方法よりも燃料電池発電を採用したほうがいいのか。この論文を通して分析し、新たなエネルギー資源としての汚泥消化ガスの採用実現可能性を考えてみたい。

第一章 エネルギーと日本

(1) 日本を取り巻くエネルギー事情

自国でまかなえる資源に乏しい日本は、その95%以上を海外からの輸入に依存している。そのうち、人間によって変換・加工される前のエネルギーである一次エネルギーの供給に占める石油のシェアは50%を割り込んだものの、日本は依然として約半数を石油エネルギーに依存している。(資料1-1参照) また、ウラン輸入後は数年間利用が可能な「準国産」エネルギーである、原子力エネルギーを含めても日本のエネルギー自給率は約20%にすぎないとされている。¹

(資料1-1：資源エネルギー庁「2002年度エネルギー需給実績」より作成)



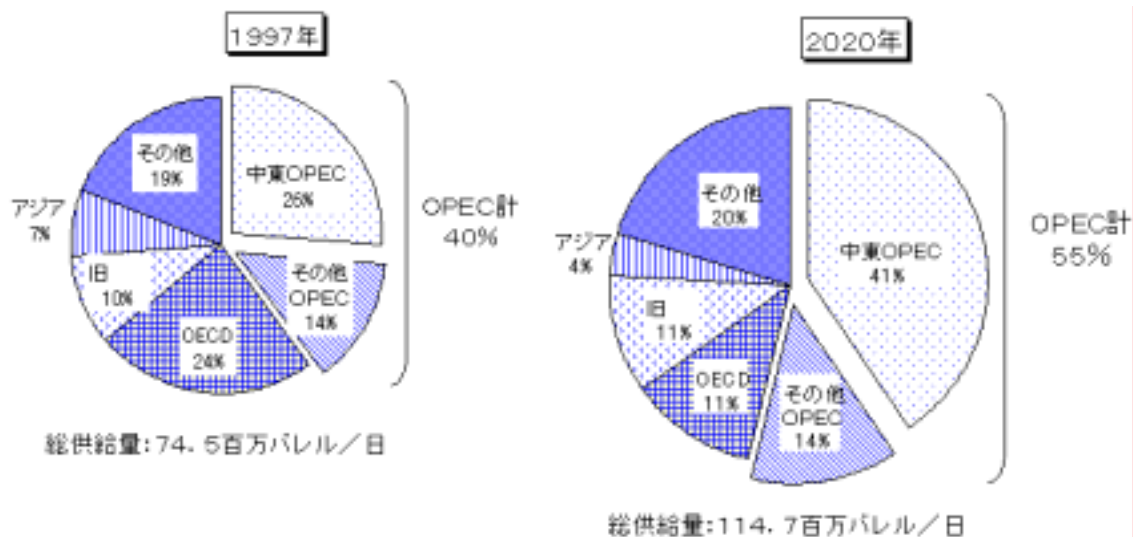
このように日本にとって欠くことのできない石油であるが、現在は総供給量の40%、2030年にはその61%をOPEC加盟諸国が供給すると見込まれている。さらに、世界の原油余剰生産能力の見通しによれば、1997年には40%だったOPECの閉める割合が2020年には55%に達する見通しである。(資料1-2参照) また、世界の石油の地域別供給のみとおしから、2000年には40%依存していたOPECに2030年には61%も依存すると見込まれている。(資料1-3参照) これは、中国やインドネシアなどの非中東左入国からの輸入が、これら産油国の国内需要の増加によって増加したこと、また中東地域は他の産油地と比較すると日本に近く輸送コストが小さいことなどが理由として考えられる。(資料1-4参照)² 採掘可能な地域だけでなく輸入先までもが偏在している石油というエネルギーに、自国のエネルギー総供給の半数近くを依存していることは民生・産業・運輸すべての分野で今後も発展を続けるためには非常にリスクが高いといえる。ゆえに、より安定的に供給されるエネルギーの採用が必要となるだろう。

¹：資源エネルギー庁「2002年度エネルギー需給実績」

²：同上

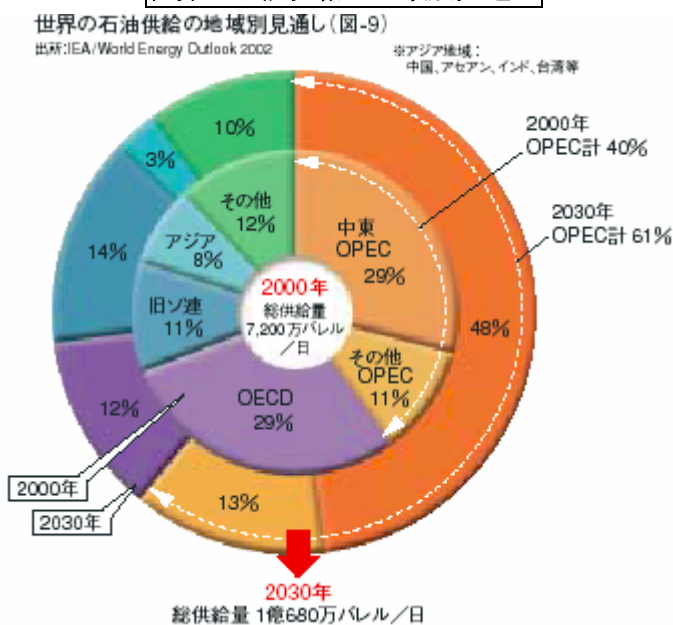
(資料1-2: 資源エネルギー庁「エネルギー白書2004」より)

世界の原油余剰生産能力の見通し



(資料1-3: 資源エネルギー庁「日本のエネルギー2005」より)

世界の石油供給の地域別見通し



(資料 1-4 : 資源エネルギー庁「エネルギー白書 2004」より)

原油輸入先の偏在

(単位: 百万バレル/日)



資料: BP統計2003

資源の偏在や非安定性という面だけでなく、政策面から見ても、新たなエネルギーの採用が必要とされていることは明らかである。2004年にロシアが批准したことを受けて、京都議定書の発効が確実なものとなった。日本には208年から2012年の間に1990年比で6%のCO₂削減が求められている。しかし、1990年から2002年までにCO₂排出量が7.6%増加しているため、実際には13.6%の削減の必要がある。(資料1-5参照)そのため、従来のエネルギー資源よりもCO₂の排出量の少ないエネルギー、言い換えれば環境負荷の少ないという観点からの新たなエネルギーの採用も現在の日本にとっては不可欠なのである。

(資料 1-5 : 資源エネルギー庁「エネルギー白書 平成 15 年」より)

・京都議定書

「京都議定書では、対象となる温室効果ガスとして二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、一酸化二窒素 (N₂O)、代替フロン等 3 ガス (HFCs、PFCs、SF₆) の 6 種類を規定するとともに、同議定書の附属書 I に記載された先進国等 (附属書 I 国) が、それぞれ基準年 (原則として 1990 年。ただし代替フロン等 3 ガスについては 1995 年を基準年とすることもできる。) 比の温室効果ガス削減約束を設定され、第一約束期間 (2008 年から 2012 年) の 1 年当たりの平均排出量において、その約束を達成することとされている。。主な国・地域の削減約束は、日本が-6%、アメリカが-7%、EU は-8%、そしてロシアが±0%などとなっている」

(2) 新たなエネルギー採用の重要性¹

以上のようなエネルギー事情を抱える日本にとって、新たなエネルギーを採用することは重要な課題である。現在は政策面、技術面の双方から新エネルギー導入の準備が進められている。政策面では、2001年6月に資源エネルギー庁総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会が「新エネルギー導入目標」を掲げ、2010年度に原油換算で1910万klの導入

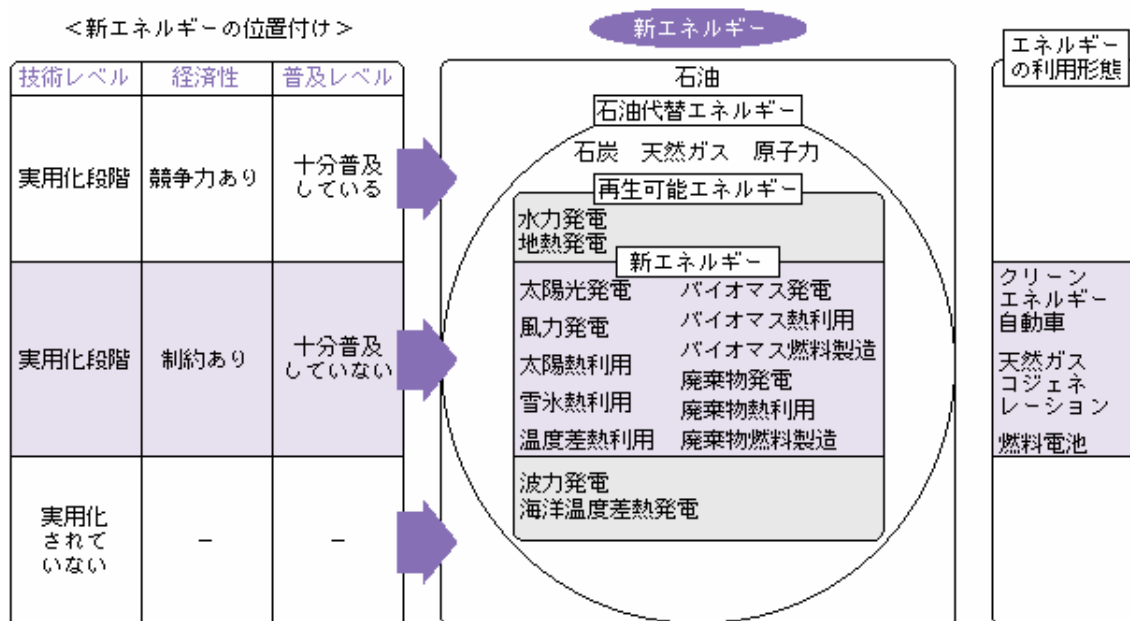
¹ : 以下、本項のデータはすべて資源エネルギー庁「エネルギー白書 平成 15 年」による

を目標とするなど、国を挙げての新エネルギー導入への取り組みが始まっている。さらに、**2003年4月**には電気事業者に一定量以上の新エネルギーなどを利用して得られる電気の利用を義務付ける **RPS法** が前面施行されたことを受け、利用義務量の全国合計値が **2010年度** で **122億 kWh** と試算され¹、本格的に新エネルギー採用の土台が固められつつある。

日本が今後さらに導入を推進すべき新エネルギーは、供給の安定性と環境負荷の小ささという **2つの点**において、既存のエネルギー資源よりも優れている必要がある。新エネルギーは以下のように定義され、発電分野・熱利用分野・その他の分野に分類される。(資料1-7参照)

◆ **新エネルギーの定義**

「新エネルギーは、「新エネルギーの利用等の促進に関する特別措置法」(新エネルギー法)において、「新エネルギー利用等」として、①石油代替エネルギーを製造、発生、利用すること等のうち、②経済性の面での制約から普及が進展しておらず、かつ、③石油代替エネルギーの促進に特に寄与するもの」と定義される。



¹ * : 資源エネルギー庁「エネルギー白書」

(資料1-7)

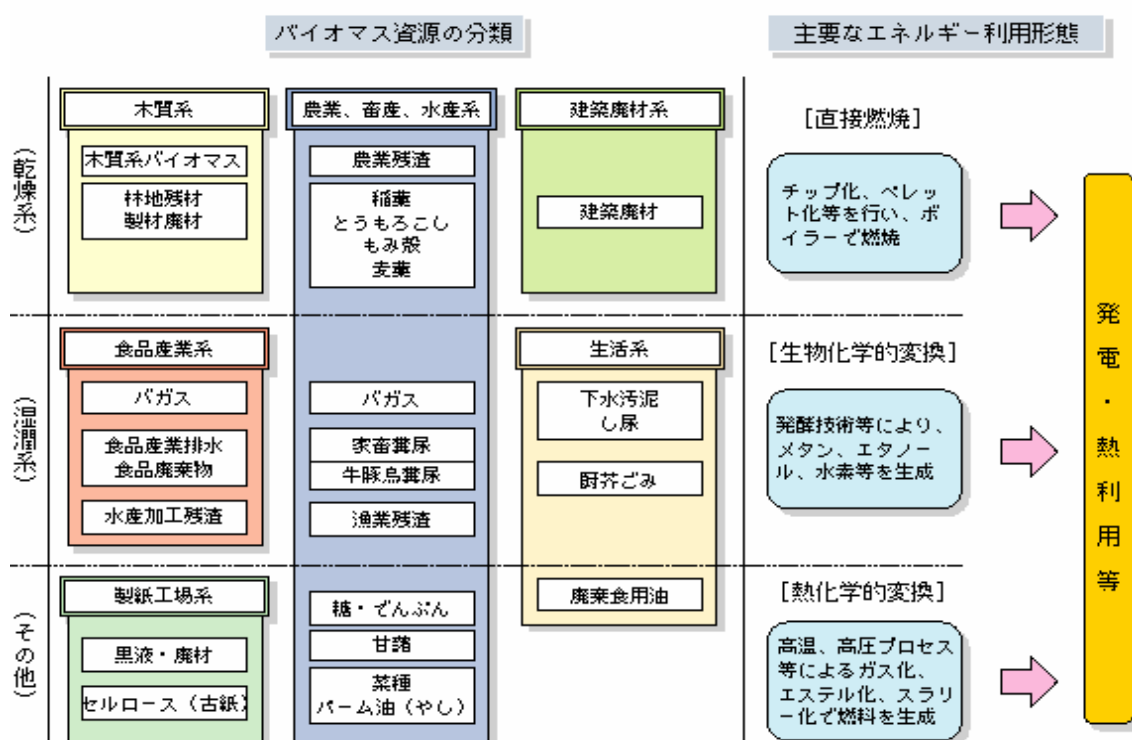
《A：新エネルギーの種類》

発電分野	熱利用分野	その他
太陽光発電	太陽熱利用	燃料電池
風力発電	未利用エネルギー (温度差、雪氷熱など)	クリーンエネルギー自動車
廃棄物発電	廃棄物熱利用	天然ガスコジェネレーション
バイオマス発電	バイオマス熱利用	バイオマス燃料製造

数ある新エネルギーの中で、本論文では「バイオマス」に焦点を当てたい。日本では、平成14年12月に「バイオマス・ニッポン総合戦略」が閣議決定されたことを受け、持続可能な社会の実現に向けてバイオマスをエネルギーや製品として総合的に活用することとなった。

バイオマスとは、「エネルギー減として利用可能な化石資源を除く動植物に由来する有機物」(資源エネルギー庁、2004)と定義される。生物によって合成されるため枯渇性資源とは異なり、焼却しても動植物が吸収したCO₂が放出されるため、大気中のCO₂濃度を増加させないカーボンニュートラルな再生可能エネルギーである。利用と同時にバイオマスを育成すれば、固定したCO₂の利用が可能になり、追加的なCO₂の発生を抑えられるという点で、バイオマスエネルギーは環境負荷の小さいエネルギー資源であるといえる。資料1-8はバイオマス資源を6種類に分類したものである。

(資料1-8：バイオマスの分類)



ここで、環境負荷についてのみではなく安定性という面も考慮すると、生活系バイオマスに分類される下水汚泥をバイオマス資源として利活用することが望ましいと考えられる。なぜなら、下水汚泥は下水道を利用する排水主体が存在する限り発生し続ける資源であるため、エネルギー資源としても、またそれを用いたバイオマスエネルギーとしても安定的に供給することが可能であるからだ¹。ゆえに、本論文では安定性と環境負荷という観点から、バイオマス資源である下水汚泥を取り上げて論じていく。

第二章 再開発地区におけるエネルギー選択の重要性

この論文では、大都市の再開発地区に焦点をあて、そのエリアの開発の際に安定的供給が可能であるだけでなく、環境負荷の小さいエネルギーを企業が採用するインセンティブについて考察していく。第一に、昼間の人口の集中が考えられるので多くの人がそのエネルギー利用するということが、第二に、ある程度まとまったエリアが開発されるため必要なインフラの整備が比較的容易に実現されうるということが、一般の地域ではなくあえて都市再開発地区を選んだ大きな理由である。本章では、日本における大都市再開発の現状をふまえて再開発地区におけるエネルギー選択が果たす役割について述べていく。

(1) 大都市の特徴と都市再開発

「一定地域の政治・経済・文化の中核をなす人口の集中地域」と都市は定義される。² 日本では人口 50 万人以上で地域の政治および経済の中心となりうる都市は政令指定都市に定められ、現在では全国で 14 都市がそれに指定されている。本論文では、そのような大都市の中でもより多くの人口が集中し、政治・経済の中心となっている東京 23 区を取り上げる。

メガロポリスとも呼ばれる東京は、他の大都市と同様に東京都だけでなく周囲の 6 つの県を含めた首都圏として発展している。実際に東京 23 区で生活している人数、つまり夜間人口と昼間人口との差が大きいことが大都市の最も大きな特徴といえる。(資料 2-1 参照) 都市への人口の集中は、都市そのものの形は変えないものの、その時代のニーズに合わせて都市の中身を変えてきたともいえよう。ゆえに、『都市再開発』とは、広い意味では『ある時代に一度人間の手で作られた街を新しい時代に合うように作り直したり、改修・保存したりすること』³であるとされる。

¹ : 下水汚泥バイオマスについては第 3 章で述べることにする。

² : 「広辞苑」より引用

³ 愛知県豊田市ホームページより引用

(資料 2-1 : 杉並区役所ホームページより作成)

東京都における昼間人口と夜間人口の差 (平成 12 年)

	昼間人口	夜間人口	流入超過人口	昼間人口密度	昼間人口指数 (夜間人口=100)
港区	837,658	159,336	678,322	41,183	525.7
千代田区	855,172	360,136	819,156	73,468	2374.4

都市再開発の枠組みの中で大きなプロジェクトとして近年実行されてきたものが市街地再開発事業である。この事業によって「都市の中で低層の木造建築などが密集し、道路等の公共施設の整備が遅れている市街地や活気を失っている中心市街地を再生し、安全で快適な魅力ある都市環境を生み出す」¹ことが目的とされている。(資料 2-2 参照) 東京 23 区内では、港区六本木六丁目地区の再開発事業であった六本木ヒルズや丸の内一帯の再開発など、近年多くの地区で市街地再開発事業が行われている。このような市街地再開発によって快適な都市環境が生み出されるだけでなく、その再開発エリアへの観光客の著しい増加により昼間人口の増加および日中のエネルギー使用量の増大が考えられる。さらに、平成 13 年 5 月に都市再生本部 (内閣府) が発足し、民間による都市再生プロジェクト立ち上がりの支援が決定され、都市再生緊急整備地域として東京都が指定されたことを受け、今後ますます大都市への (昼間) 人口の集中が進むといえよう。

(資料 2-2 : 愛知県豊田市ホームページより引用)



資料 2-2 が示すように、市街地再開発が行われればそのエリアの既存の建築物を壊し新たな共有化された建築物が建設される場合が多い。仮にそのエリアで再開発と同時に新たなエネルギーを採用し新規のインフラが必要とされるならば、再開発工事の際に同時にインフラのための工事を行うことが可能であり、改めてインフラ整備のための工事を行う

¹ : 愛知県豊田市ホームページより引用

よりはコストが小さい。ゆえに、市街地再開発はその再開発エリアでのエネルギー選択を見直す絶好のチャンスであるという点で、新たなエネルギーを選択する意義は大きいといえる。

(2) 再開発エリアにおけるエネルギー選択の意義

昼間の大都市への人口の集中は、言い換えれば日中の大都市におけるエネルギー使用量が夜間に比べてきわめて大きく、昼間と夜間の発電量の間乖離が生じていることを意味している。

この乖離は、再開発の対象となっているエリアにおいて従来の発電方法で供給される電力ではなく、新たな環境負荷の少ないエネルギーを用いて発電された電力が供給されるならば、極めて大きい環境負荷の削減に結びつく可能性を示している。再開発エリアは範囲が限定されるため、おおよその昼間人口と夜間人口、電力需要量などの把握が比較的容易であると考えられる。そのため、その地区で新たなエネルギーが採用された場合でもその使用量や使用度合いを把握しやすい。ゆえに、東京 **23** 区という大都市全域ではなく個々の再開発エリアに限定することで、より確実な値のエネルギーの需要を把握することが可能となり、またそのように細分化された地域がそれぞれ新たなエネルギーを選択することにも再開発エリアにおけるエネルギー選択の意義があるといえよう。

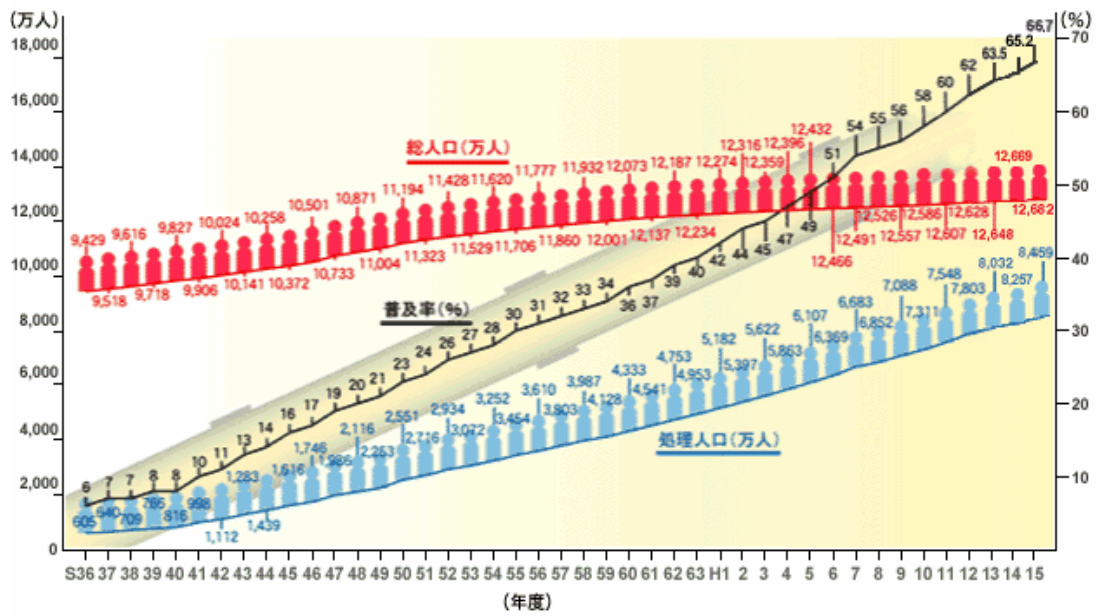
第三章 下水汚泥利用ビジネスの可能性

平成 **16** 年 **3** 月 **31** 日の時点で、日本全国の下水処理人口普及率（下水道利用人口／総人口）は **66.7%**、汚水処理のみに限定すれば **76%** に達している。特に人口 **50** 万人を超える政令指定都市での普及率は **98.1%** に達し、東京 **23** 区においては **99.9%** と、日本の大都市での下水道利用率はきわめて高いといえる。（資料 **3-1** 参照）¹本章では、このように普及率の高い下水道が新たなエネルギー発生源となりうるという点に着目し、下水汚泥を用いたビジネスの実現可能性について考えたい。

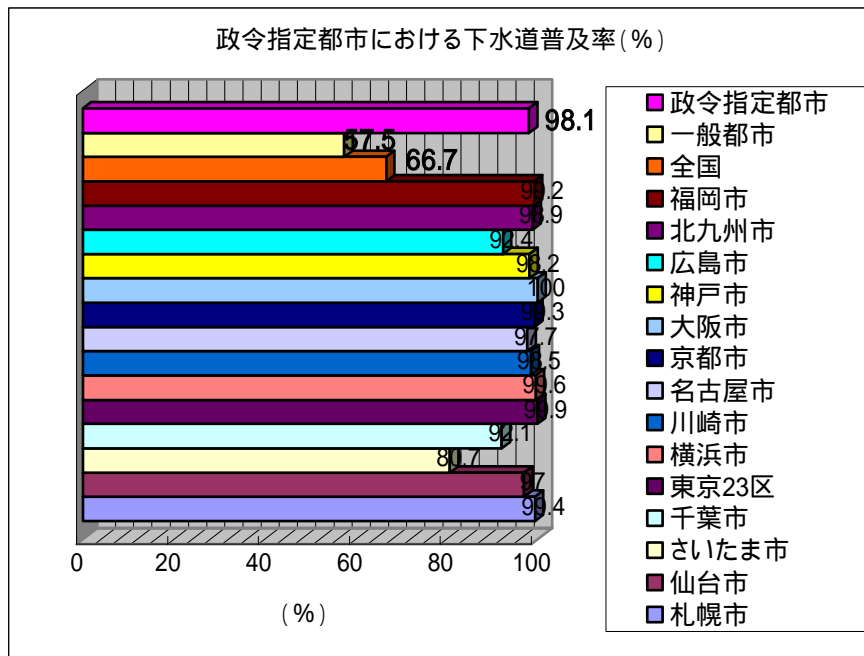
¹ 日本下水道協会ホームページより

(資料 3-1 : 日本下水道協会 平成 15 年度統計より引用・作成)

(資料 3-1 a : 下水道普及率の推移)



(資料 3-1 b : 政令指定都市における下水道普及率)

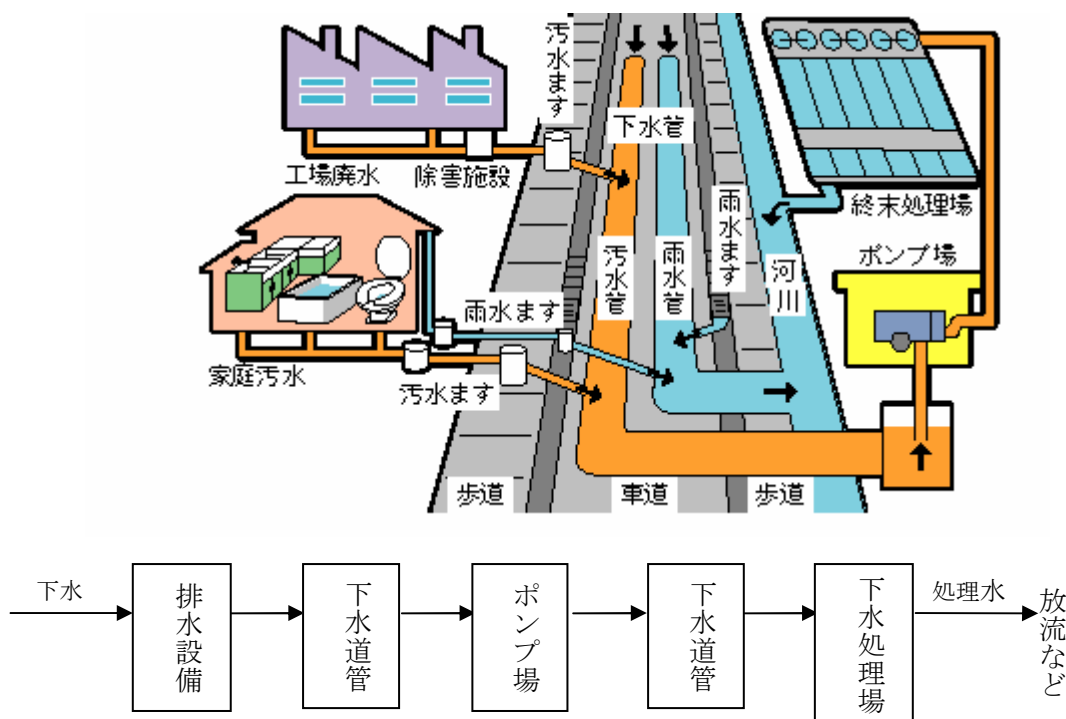


(1) 下水道の役割と下水処理および下水汚泥処理の現状

下水道は主に生活環境の改善、浸水の防除、そして公共用水域の水質保全という 3 つの役割を果たすために整備されている。市街地の雨水を排除し処理後の汚水を河川に放流するための公共下水道、2 以上の市町村からの下水を受け処理するための流域下水道、市街地の雨水および雑排水を排除するための都市下水路が、それらの下水道の役割を担っている。これら 3 つの役割を持つ下水道の中で、本論では汚水処理のための下水道を取り上げることにする。

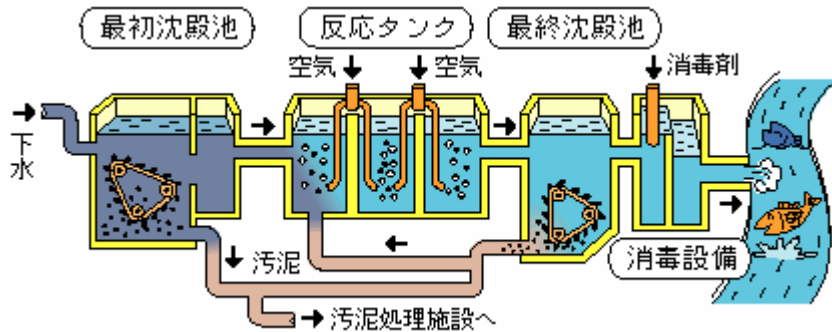
¹初めに一般的な下水処理の流れについて説明する。各家計（経済主体）から発生した汚水は排水管などの排水施設を通り、終末処理場へ送られる。終末処理場とは、個々の処理施設を組み合わせた総体であり、まず汚水はその中の水処理施設で処理される。資料 3-2 は現在日本の多くの市区町村で採用されている下水道の仕組み、および汚水処理の流れの概要を示したものである。（資料 3-2：日本下水道協会ホームページより引用・作成）

(資料 3-2@：下水道の仕組み)



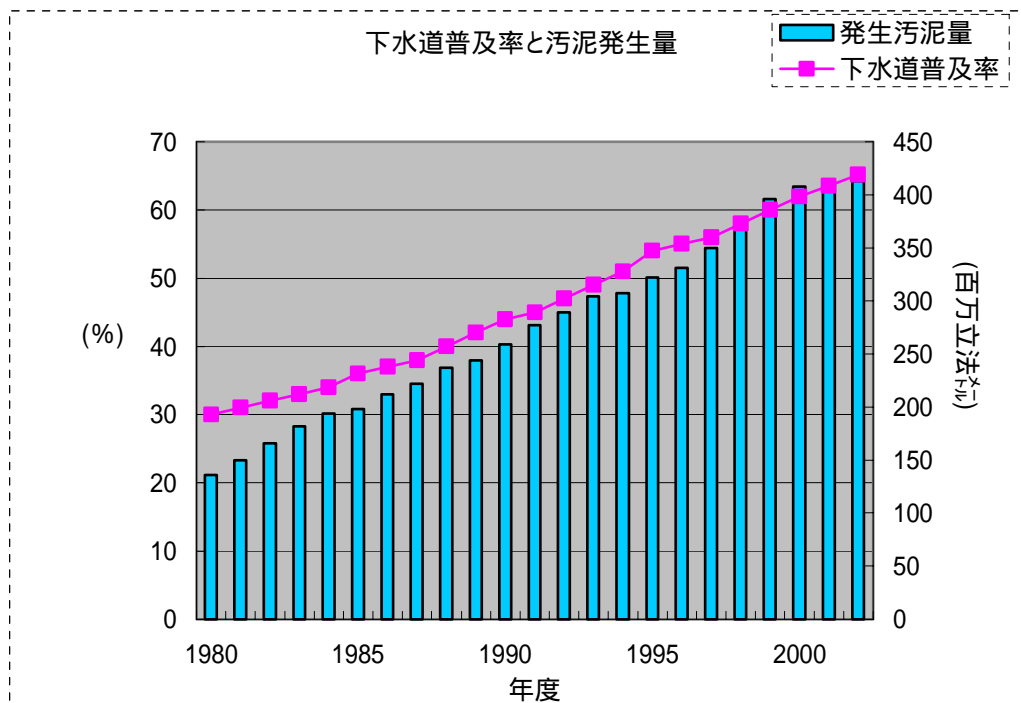
¹ 以下、国土交通省 都市・地域整備局下水道部監修「日本の下水道」より一部引用

(資料3-2 ⑥) : 汚水処理の流れ



各家計、および経済主体から発生した下水は下水道管を通して集められ、処理場で何度も濾過された後、処理水は河川へ放流されるか他の用途に用いられる場合もある。現在の日本でのほとんどの下水処理は生物処理法によっておこなわれ、浮遊生物法（活性汚泥法）と固着生物法が存在するが、なかでも「下水中に浮遊する程度の小さな微生物の塊（活性汚泥）を生じさせて、それにより有機物を分解する」前者が多く採用されている。いずれの方法が採用されても、その過程における下水汚泥¹の発生は避けられない。

(資料3-3 : 「下水道普及率と汚泥発生量の推移」 日本下水道協会統計より作成)



年度	1980	1985	1990	1992	1994	1996	1998	2000	2002
普及率%	30	36	44	47	51	55	58	62	65.2

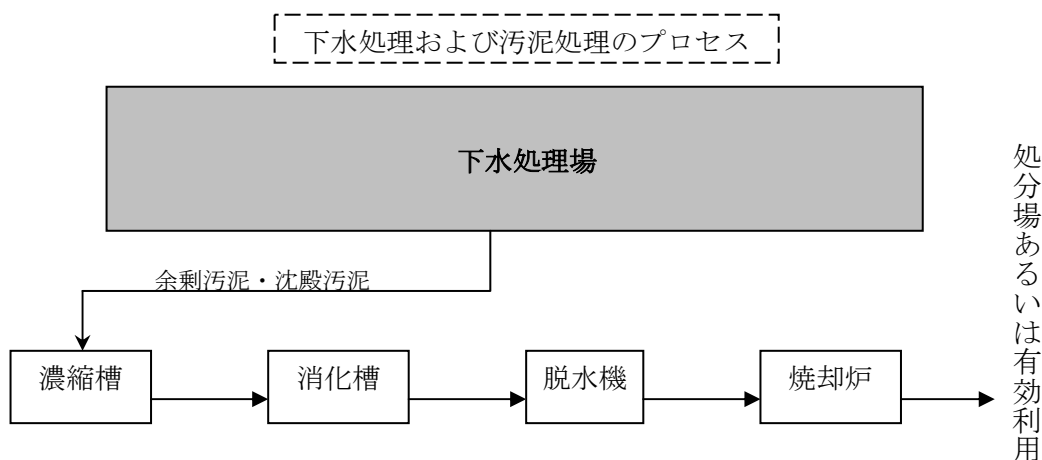
¹ 汚泥：水中の浮遊物質が重力や生物の作用あるいは凝集剤の作用によって沈殿、堆積し泥状になったものをいう。(国土交通省「日本の下水道」より引用)

発生量 (百万 t)	136	198	259	289	307	331	374	408	413
---------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

下水道普及率の上昇に伴い、それに比例する形で下水汚泥の発生量も増加している。(資料3-3参照) 現在、汚泥発生量を削減する技術が開発されているものの、汚泥が全く発生しなくなるわけではなく、今後も下水道の普及率上昇に伴ってますます発生量が増えることが資料から読み取れる。では、その汚泥はどのように処理されているのだろうか。

下水処理施設から汚泥処理施設に送られてきた汚泥は、濃縮、消化、脱水の工程を経てから焼却後、有効利用あるいは埋め立て処分される。(資料3-4参照)このように多くの過程を経ることは汚泥の最終処分までにそれぞれの段階でコストがかかり、汚泥発生量の増加は汚泥処理コストを増大させるともいえるだろう。

(資料 3-4 : 国土交通省「日本の下水道」より作成)



汚泥の有効利用の割合は年々増加し、平成 14 年度の汚泥処理の内訳を見ると、汚泥の有効利用（リサイクル）の割合が 60%に達しようとする一方で、残りの約 40%の汚泥が依然として埋め立て処分されている。有効利用されない下水汚泥は産業廃棄物に分類され、産業廃棄物最終処分場へ廃棄処分される。一般廃棄物と同様に産業廃棄物の最終処分場も有限であり、平成 14 年 4 月 1 日現在の最終処分場の残存容量は全国で 1 億 7,941 万 m³であるとされる。全国で見れば、対前年比 332 万 m³の増加であるが、人口の集中する首都圏では産業廃棄物最終処分場の残余年数 1.1 年とされ、更に厳しい状況に置かれている。産業廃棄物排出全体における下水汚泥の割合は、約 19%で、重量に換算すると 7,786 万 t/年である。これは業種別に見ても農業に次ぐ第二位の排出量である。(資料 3-4 参照)

ここで、下水汚泥の排出量と最終処分量との相違を明確にしたい。汚泥排出量とは、下水処理場から汚泥処理場へ運ばれる汚泥量を指し、最終処分量は汚泥処理の工程を経て産業廃棄物最終処分場へ廃棄処分される汚泥の量を指す。下水汚泥の場合、最終処分量は排出量の 1.1%に過ぎない。98.9%は中間処理の段階で減量化されている。(資料 3-5 参照)

(資料 3-5 : 環境省「平成 13 年度産業廃棄物の排出及び処理状況等」より作成)

処理区分	処理実績(千 t/年)	割合(%)
排出量	7,7862	100
①再生利用量	1,469	1.9
②中間処理による減量化	75,538	97
①+②=減量化合計	77,007	98.9
最終処分量	854	1.1

しかし、産業廃棄物減量化の目標量が環境省から告示され、産業廃棄物の排出量の総量、およびそれに占める最終処分量の割合を削減しなければならない。今後、更なる下水道の普及により汚泥発生量が増加することが見込まれるため、汚泥有効利用の割合を高める必要がある。では、汚泥の有効利用としてどのような用途に用いられているのだろうか。

現在の有効利用の内訳は、建設資材、緑農地利用の順に続き、それらの割合が有効利用される汚泥の大半を占める。汚泥が建設資材として有効利用されるまでには、濃縮→消化→脱水→乾燥の工程を経ることが必要であり、その後焼却された汚泥はその焼却灰がセメント原料やレンガなどに、また **4** つの工程の後に熔融されスラグとなった汚泥は路盤材やタイルとして用いられる。一方、緑地・農地利用される汚泥は乾燥工程を経た後、炭化して炭化製品として利用され、あるいはコンポスト化されて肥料として用いられる。さらに焼却→焼成の工程を経ることで園芸用土壌として有効利用されることもできる。これらの方法は現在の利用法の大半を占めるが、非常に多くの工程を経て初めて製品となるため、総合的に見ればかなりのコストがかかるといえよう。ゆえに、**2** つ目の工程である消化槽において有効利用することが可能な、嫌気性消化ガスを利用した「消化ガス燃料電池発電システム」を本論文では取り上げ、その有用性について分析していきたい。

(2) 汚泥消化ガスを利用した燃料電池発電システム¹

下水汚泥エネルギーは、バイオマスエネルギーに分類され「バイオマス・ニッポン総合戦略」によってその利活用が促進されている。現在、下水汚泥の嫌気性処理による消化ガスの発生は全国の **26%**の汚泥処理場ですでに実施されている。そして、「合計で **250,000** 万 Nm^3 /年を超える消化ガスの発生、そしてそれに伴う **5,000~6,000 T J**/年のエネルギー量が得られると推計されている。従来は消化槽の加温や汚泥焼却炉の補助燃料としてのみ利用されていた消化ガスを、このシステムの導入によって標準燃料に用いる」という点は非常に新しく興味深い点である。さらに、今後の下水道普及率の上昇に伴って、より多くの汚泥処理場で嫌気性処理が採用されれば供給可能なエネルギー量も増加するといえよう。

汚泥処理の工程で必然的に発生する嫌気性消化ガスを燃料として燃料電池発電に利用することはエネルギーのコストの面を考えても非常に効率的である。また、このシステムの実用化は、汚泥発生量を削減するだけでなくクリーンエネルギーという観点からも今後ますます導入がすすめられるべきシステムと考えられる。消化ガスとは、下水汚泥の嫌気性処理で発生する発酵ガスのことであり、メタン **60~65%**、**Co2** が **35~40%**、その他硫化水素、アンモニア、塩化分を微量に含む。つまり、このシステムはメタンガスを燃料として、燃料電池で発電するものである。以下の資料はこの燃料電池システムの構成を示している。

(資料 3 - 6 参照)

¹ 本項は、東芝レビュー vol. 55 (2000)を参考にした。データ等は全て同書による。

(資料 3-6 : 東芝レビューvol.55, 2000 より引用)

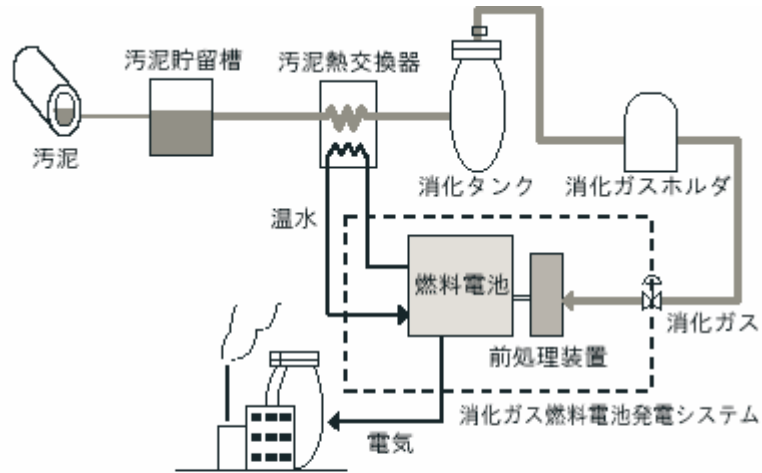
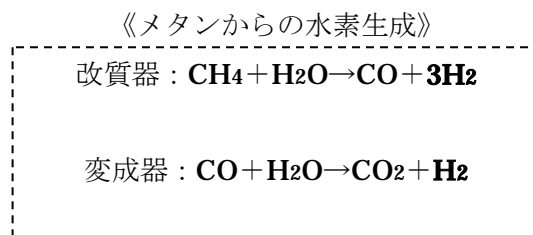


図 2. 消化ガス燃料電池発電システムの構成 消化ガス燃料電池発電システムは、前処理装置と燃料電池から構成される。
System configuration of plant running on ADG system applied to sludge treatment plant

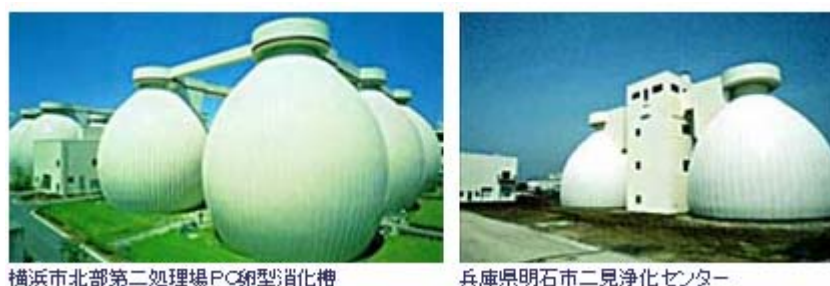
「燃料電池は外部から供給された水素と酸素を触媒作用により電気化学的に反応させ、燃料から直接電気エネルギーと熱エネルギーを同時に取り出すエネルギー変換装置である」(株東芝、2000) と燃料電池は定義される。汚泥消化ガス燃料電池は、消化ガス内に含まれるメタンを改質器・変成器を通して蒸気を用いて水素を供給し、酸素は空気から取り入れている。(資料 3-7 参照)

(資料 3-7 : 東芝レビューvol. 55 より作成)



消化ガスが自らエネルギー資源となりえたのは、燃料電池には有害である硫化水素、アンモニア、塩化分を除去する前処理装置やメタンからの変換効率の優れた改質器・変成器の開発、および効率的に消化ガスを発生させる PC(=プレストコンクリート)卵形消化槽の開発など、技術的に大きく進歩したことが深くかかわっている。(資料 3-8 参照)

(資料 3-8 : 鹿島建設(株)ホームページより引用)



技術の進歩により汚泥消化ガス燃料電池発電システムの実用化が可能になったが、消化ガスそのものによる発電は決して新しいアイデアではなく、「1980年代には、ガスエンジン発電機による消化ガス発電が実用化され、現在全国 21ヶ所の下水汚泥処理場に導入」(株東芝、2000) されている。次の資料(資料 3-9) は消化ガスの燃料電池発電とガスエンジン発電とを発電効率、有害物質の発生などの点から比較したものである。

(資料 3-9 : 東芝レビューvol. 55 より作成)

項目	燃料電池	ガスエンジン
発電効率 (%LHV*)	38 (送電端)	30 (送電端)
排熱回収効率 (%LHV)	40	36
熱供給形態	標準 60°C温水 (高温水/蒸気対応可)	100°C蒸気 85°C温水
NOx (ppm)	5 以下	80 以下
SOx (ppm)	微量	15 以下
CO ₂ (C-ton/年)	240	300
騒音 (dB(A))	65	95
始動時間	3 時間	15 秒

*LHV : 低位発熱量

発電効率や排熱回収率、騒音の面においてもガスエンジンと比較して優れている消化ガス燃料発電システムであるが、中でも NOx (窒素酸化物)、Sox (硫黄酸化物)、CO₂ の発生量がガスエンジンよりも著しく小さいという点が燃料電池の最も優れた点であると考えられる。特に NOx や Sox は酸性雨の原因になるとも考えられ、排出が規制されている。1997年、それらの排出に対する環境規制をかけているアメリカ合衆国ではニューヨーク州のエンカー処理場で、世界で始めて燃料電池発電システムが実用化された。つまり、消化ガス燃料電池発電システムの採用は、従来のガスエンジンを用いた発電方法よりも環境負荷の小さい方法として今後の採用拡大が期待される。

(3) 下水汚泥消化ガスエネルギー利用の優位性

水道水を使えば必ずといっていいほど排水する。そのため汚泥消化ガス発電の原料となる下水汚泥は比較的安定して供給されるといえよう。さらに排水主体のある地域を再開発エリアに限定することによって、供給量の把握が容易になるだろう。また、前項で述べたとおり、消化ガス発電に燃料電池を用いれば非常に環境負荷の小さい発電が可能になる。下水汚泥は汚泥処理の過程で必然的に発生するものであるため、資本費用や運営費用等を除けば、エネルギー原料コストそのものはかからないとも考えられる。

エネルギー原料が安定的に供給される、あるいは環境負荷が小さく実用化の目途もついているという観点からは太陽光や風力による発電も挙げられる。なぜ太陽光や風力による発電ではなく下水汚泥エネルギーの方が優位であるといえるのだろうか。

まず、太陽光発電について述べる。日本全国の太陽エネルギー分布を見ると、冬期に日照時間の短い北海道・東北・北陸（日本海側）のみが全体より1割程度小さくなっているだけで、エネルギー分布という点では大きな差はない。また、太陽光発電導入実績から、特に住宅用の設備が急速に普及していることが明らかである。（資料3-10参照）この高い普及実績の背景には、経済産業省が実施している住宅用の補助金交付事業があり、太陽光発電導入の半数近くがこの補助金制度を利用しているという。

（資料3-10：日本エネルギー学会「エネルギー便覧」より作成）

わが国における太陽光発電導入実績（万kWp*）

年度	1994	1995	1996	1997	1998	1999
太陽光発電合計	3.1	4.3	6.0	9.1	13.3	20.5
住宅用合計	0.2	0.6	1.3	3.3	5.7	11.2
新築	0.2	0.3	0.5	1.3	2.5	5.0
既築	0.0	0.3	0.8	2.0	3.2	6.2
非住宅用合計	2.9	3.7	4.7	5.8	7.7	9.3
公共施設	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
一般施設	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4
その他	2.8	3.6	4.4	5.5	7.2	8.6

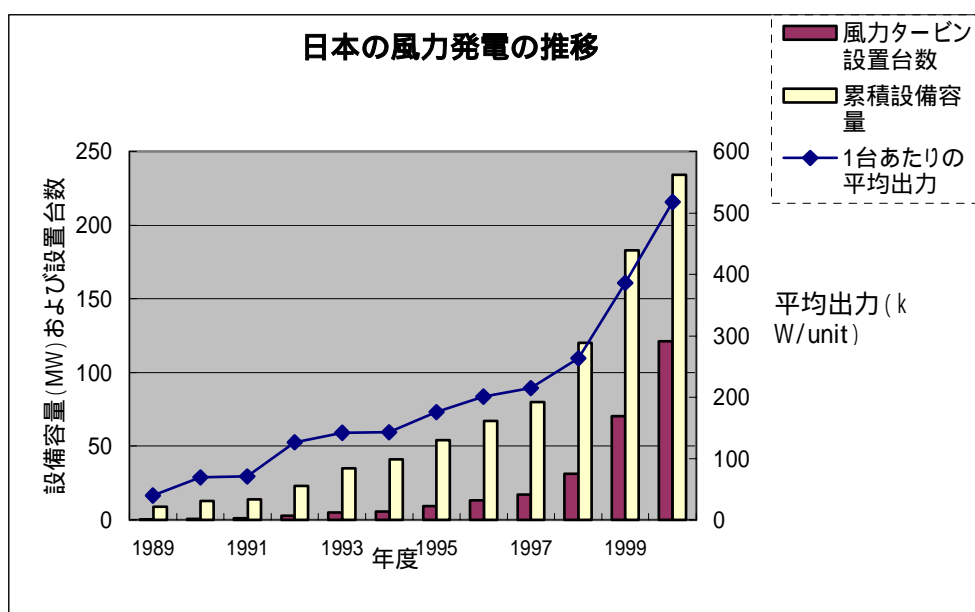
*kWp：キロワットピーク。標準試験条件において太陽電池が出力する電力の大きさ。

汚泥消化エネルギー発電は実用化が開始されて間もないことから太陽光発電量と比較可能なデータはない。しかし、太陽光発電は現段階では各建物への太陽電池発電システムの設置が必要であるうえ、大都市のオフィスビルのような大型の建物であっても床面積が限られているため限られた量の太陽光しか利用できない。このことも日住宅用の一般施設における太陽光発電量が極めて小さい、つまり一般施設への導入が進んでいないことの一員となっているとも考えられる。さらに、太陽光は天候に左右されるため、毎日安定して電力を供給できるとは言いがたい。大都市の中心部であっても採用可能という点ではどの発

電方法よりも優れているが、安定的な電力の供給という点で汚泥消化ガスエネルギーの方が優れているといえる。

次に、風力発電について考える。風力資源が利用可能な地域は海洋上、海岸など非常に限られている。しかし、風の力によってタービンを回し発電するという方法は、景観等の問題を除けば極めて環境負荷が小さく、日本に限らず世界でも風力発電設備容量は増加している。(資料3-11参照)

(資料3-11：日本エネルギー学会「エネルギー便覧」より作成)



資料3-11は日本における風力発電普及の推移を表したものである。特に、1999年から2000年にかけての伸びは顕著であり、設備容量が前年比72%増加して累積設備容量が121MWに達した。1台あたりの平均出力も増加しているため、日本でも風量発電による電力供給が今後増えると予想される。しかし、風力発電は発電場所の点で非常に制約があり、大都市の一部の再開発エリアのために電力を供給するとなると電力の輸送コストが大きくなることも懸念される。東京23区という大都市を考えた場合、陸上よりも海上で発電する方が電力供給場所には近い。現在、一般に陸上よりもより平均風速が高くかつ安定的にかぜが吹く、洋上の風力エネルギーを利用するウィンドファームが開発されつつある。しかし、「陸上と比較して基礎費用及びメンテナンス費用が増加」し、「陸から洋上サイトまでの電力ケーブル費用が莫大となる」(日本エネルギー学会、2004)とされ、さらに洋上から電力供給地域にいたるまでの送電ロスも対象が内陸になればなるほど大きくなるとも考えられる。よって、洋上風力発電の実現は現段階では困難であるといえよう。

太陽光発電も風力発電も環境負荷が小さいという点では、どちらも非常に優れており、今後さらに普及していくだろう。しかし、大都市の一部の再開発エリアのみに焦点を当てた場合、安定的に環境負荷の小さい方法で発電した電力を供給し、そのエリアが全国のど

の地域に存在してもほぼ変わりなく電力供給が可能であるという点からは、汚泥消化ガス燃料電池発電システムの採用が最適であり、それによってそのエリアの人口に見合った電力の供給が可能になるといえる。ゆえに、本論文では汚泥消化ガス燃料電池発電システムを採用することとする。

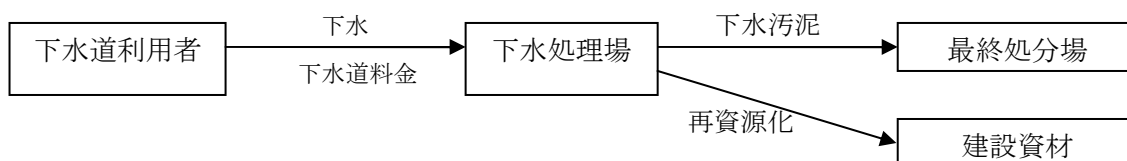
第四章 下水汚泥エネルギーを用いた循環型発電ビジネスモデル

実際に都市再開発の際に下水汚泥エネルギーが採用されたとき、電力供給者、電力消費者、そして社会全体にどのような形で便益をもたらすのか。本章で分析していく。

ここでは、典型的な日本の大都市の一地区を再開発地区として想定し、その地区内において下水汚泥エネルギーが採用されるものとする。

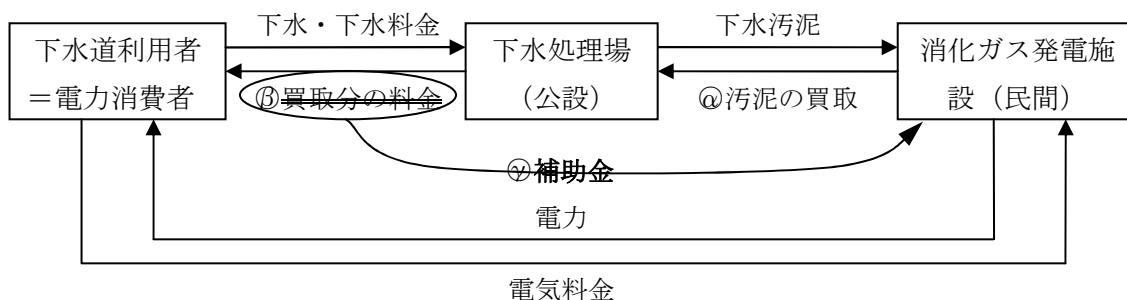
(1) バイオマスエネルギーとしての新たな下水汚泥利用の可能性

理論モデルによる分析の前に、従来の下水汚泥処理方法と本章で提案する循環型発電方式との相違点を、図を用いて明らかにする。



(図4-1: 従来の下水汚泥処理方法)

従来の下水汚泥処理方法(図4-1)では、下水処理場で生じた汚泥は建材として利用される以外は、最終処分場に廃棄される。前章で述べたように、建設資材への再利用は下水汚泥の約30%にとどまっているため、この処理方法では下水道利用者から最終処分場までワンウェイの流れになってしまう。



(図4-2: 発電への下水汚泥エネルギーの採用)

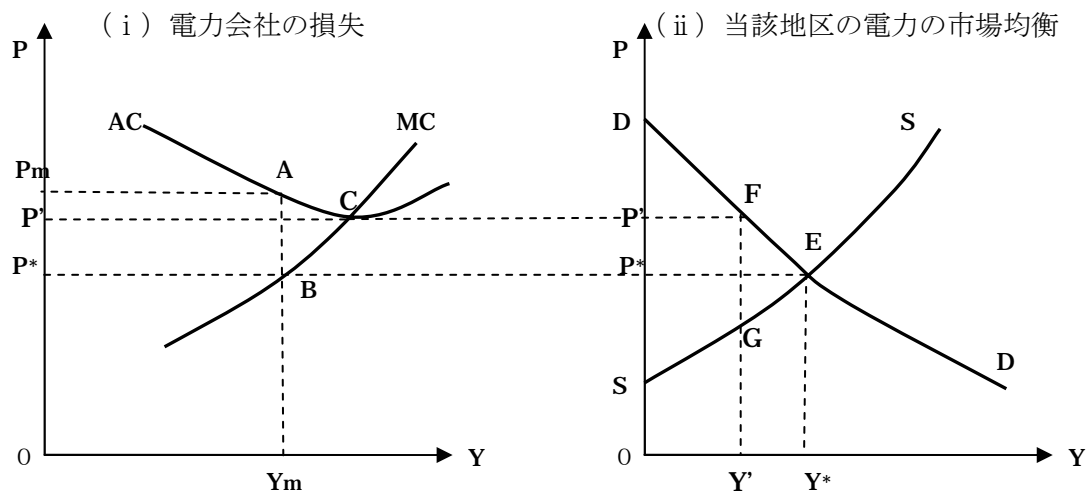
一方で、下水汚泥を用いた発電（図4-2）が採用された場合、下水道利用者のもとへ下水汚泥が電力として供給され下水道利用者＝電力消費者となる。現在、横浜市北部汚泥処理場では処理場内で発生した消化ガスを用いて燃料電池発電が実用化しているが、発電施設は公設である。ここでは、下水処理場で発生する下水汚泥は全て消化ガス発電施設で発電のために用いられるとし、処理場内にあるメタン発電施設のみを私企業が運営することとする。必ずしも電力消費＝下水道利用とはならないものの、同再開発地区の住人および労働者らが電力を消費し下水道も利用すると考えれば、下水汚泥エネルギーの利用によって循環型発電のビジネスモデルが構築されうるといえよう。このビジネスモデルの最も特徴的なのは、①→②→③という矢印の流れである。まず初めに下水処理場で発生した下水汚泥は、メタン発電のための資源として電力会社（消化ガス発電施設）に買い取られる。（①）その際公的機関（下水処理場）に支払われた下水汚泥費は、下水道利用者に還元されるのではなく（②）、消化ガス発電を成り立たせるための補助金の財源として用いられる。（③）なぜ補助金が必要とされるのかについては次項で述べる。下水道利用者には、下水道料金値下げというような目に見える形で下水汚泥エネルギー利用の便益が還元されるわけではない。しかし下水汚泥を資源として認識し、その売上分をまた補助金の財源として用いることによって下水汚泥エネルギー利用という新たな発電分野の存続が可能となる。この点こそが当ビジネスモデルの最大の特徴であり、下水道利用者から電力消費者までの資源・エネルギーの循環を可能にしている。

（2）下水汚泥エネルギーの採用

ここでは、下水汚泥エネルギーの採用について、理論モデルを用いて分析していく。

モデル導入にあたり、いくつかの仮定をおく。

- ①再開発地区における一日の電力の需要量は一定で、電力会社は需要量を把握しその量を供給しているものとする。
- ②この再開発地区では、すべて下水汚泥を用いたメタン発電によって電力が供給されるものとする。
- ③このモデルにおける電力会社は、大幅な政府規制を受けた公的企業ではなく、政府規制を受けない私企業とする。
- ④自然独占が生じているため、下水汚泥を採用する電力会社の新たな参入は考えない。



(図4-3：下水汚泥エネルギー採用の部分均衡分析)

<p>(i) より</p> <p>AC：電力会社の平均費用曲線</p> <p>MC：電力会社の限界費用曲線</p>	<p>(ii) より</p> <p>DD：電力の需要曲線</p> <p>SS：電力の供給曲線</p> <p>P*(¥)：市場均衡価格</p> <p>Y*(kW/d)：最適電力供給量</p> <p>E：市場均衡点</p>
-------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

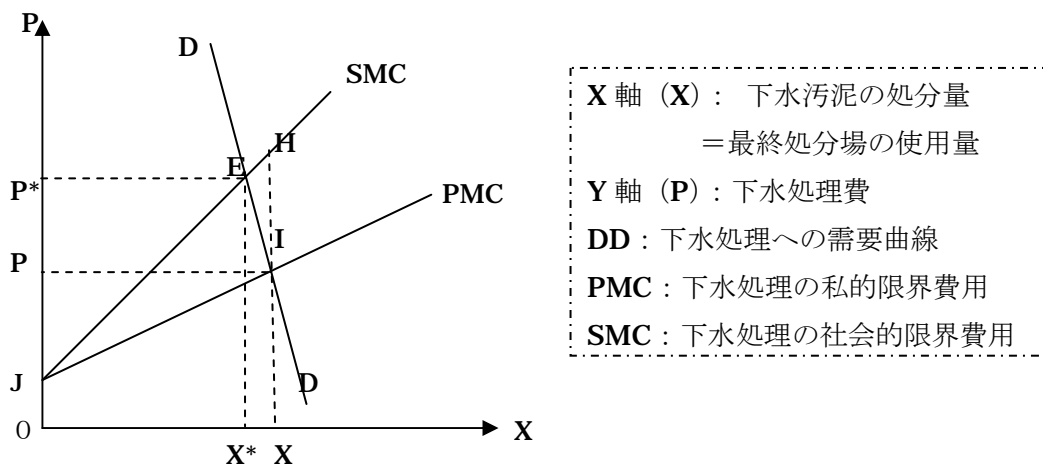
初めに (ii) を用いて電力市場の市場価格と供給量について解説する。縦軸は電力の価格 (¥)、横軸は電力需要量および供給量 (kW/d) をあらわす。この市場における需要曲線 **DD** は、電力の市場価格とその価格のもとでの電力消費者の電力需要量との関係を表している。先に仮定①に示したように、この地区における電力需要量は電力会社によって把握され、その量が供給される。ゆえに、**D=S** となる価格 **P*** で **Y*** の電力が供給されることとなる。この場合、需要量と供給量とが一致するので超過需要および超過供給は生じない。つまり、市場均衡点 **E** においては消費者余剰 $\triangle DEP^*$ と生産者余剰 $\triangle SEP^*$ の和が最大となり、社会的厚生が最大化されるといえる。

次に (i) を用いて下水汚泥エネルギーを採用することで生じる電力会社の利潤および損失について述べる。電力産業は莫大な設備が必要とされるなど、固定費用が巨額な産業であり、平均費用が逡減する部分で生産が行われる。市場価格を所与として行動する完全競争企業は、限界費用=市場価格となる量を供生産することによって利潤を最大化する。(生産量≠供給量) しかし費用低減産業である電力産業において市場価格 **P*** で生産を行っ

た場合、平均費用 $AC >$ 限界費用 MC となり、固定費用が生産者余剰を上回るため、 $\square PmABP^*$ の損失が企業に生じる。この損失が発生し続ける限り、私企業である電力会社が下水汚泥エネルギーを採用するインセンティブは生まれない。仮に電力会社の利潤がゼロとなる、点 C ($AC=MC$) が選択された場合、生産量は Y' 、市場価格は P' となる。仮定①が適用されないならば、電力会社は価格 P' で Y' 量の電力を供給することになる。この再開発地区における電力需要量は Y^* ($>Y'$) であるため、実際の需要量よりも少ない電力しか供給されないことになり、 $\triangle EFG$ の厚生損失が生じてしまう。そのため、市場価格 P^* での Y^* 量の電力供給がもっとも望ましいといえる。市場価格 P^* での電力供給を実現するためには $\square PmABP^*$ の損失を政府あるいは公的機関からの補助金によって補填する必要がある。その補助金は一般財源からまかなわれるのではなく、図4-2で示したように下水汚泥の売上額を充てるものとする。補助金によって $\square PmABP^*$ が補われることで市場均衡価格 P^* での電力供給が可能になるだけでなく、下水道利用者が排出した下水が電力利用者のもとへ電力として供給される、エネルギー循環型発電のビジネスモデルの構築が可能となる。

(3) 下水汚泥エネルギーの採用が他の枯渇性資源に与える影響

下水汚泥エネルギーを採用し新たなエネルギー循環型発電のビジネスモデルを構築することは、環境負荷の少ないエネルギーを広めるという点だけでなく、下水汚泥の最終処分場への廃棄量を減らすという点においても社会に大きな便益をもたらしているといえよう。なぜなら、下水汚泥を埋め立て処分するには下水処理の工程だけでなく、汚泥処理場においても極めて多くの工程を経るため下水道料金に含まれる下水処理費用を超えた部分が税金によってまかなわれ、外部不経済が生じていると考えられるからである。ここでは、外部不経済の発生という観点から、図4-4を用いて下水汚泥エネルギー採用の便益を分析する。



(図 4-4 : 下水処理に伴う外部不経済の発生)

はじめに、現状での下水処理の私的限界費用と社会的限界費用との乖離について説明する。下水処理への需要はほとんど価格に左右されることがないと考えられるため、需要曲線 **DD** の傾きは垂直に近くなっている。下水道の価格設定の内訳は前章で述べたとおりであるが、現時点では一般に処理費には最終処分場に埋め立てる費用は含まれていない。ゆえに、下水処理費用には処分場使用価格は反映されていないと考え、下水処理の私的限界費用として **PMC** をおく。しかし、実際には下水を処理するだけでなく処分場に廃棄するまで何らかのコストがかかっているため、社会全体にとっての下水処理の限界費用は **SMC** で表される。つまり、下水処理に対する私的限界費用と社会的限界費用とは乖離しているといえる。図 4-4 は、ある都市再開発地区における下水処理に伴う外部不経済の発生、および汚泥エネルギー採用による総余剰の最大化を表している。

下水汚泥処分のコストを考えない場合、需要曲線 **DD** と私的限界曲線 **PMC** が交わる (**X**, **P**) が最適な最終処分場使用量および下水処理費として考えられる… (i)。しかしながら、現実には汚泥の処分コストを含めた **DD** と **SMC** の交点 (**X***, **P***) が最適価格での処分量である。

(i) の場合、社会にとっての総余剰は、消費者 (下水道使用者) 余剰 $\triangle DIP$ と生産者 (下水処理者) 余剰 $\triangle JIP$ を合わせた $\triangle DJP$ から、外部不経済発生分の $\triangle JIH$ を引いた面積、つまり $\triangle DEJ - \triangle EHI$ の面積で表される。汚泥処分のコストを考慮しないことによって $\triangle EHI$ の厚生損失が発生していることが明らかである。では、循環型発電ビジネスモデルの採用がこの損失をどのようにして消滅させるのだろうか。

ビジネスモデルの採用は、社会的限界費用曲線 **SMC** を私的限界費用曲線 **PMC** の方へシフトさせ、**E** (**X***, **P***) から **I** (**X**, **P**) に近づくと考えられる。なぜなら、下水汚泥は廃棄処分されるのではなく、エネルギー資源として利用されるため、下水汚泥処分費用が必

要とされなくなるからである。そのため、汚泥処分によって生じうる外部不経済を内部化することなく、 $SMC=PMC$ とすることで社会の総余剰を最大化することが可能であるといえよう。図4-4に示したように都市再開発地区において循環型発電を取り入れることは、外部不経済の発生を抑制しその地区における社会的総余剰を大きくする。また、そのような下水汚泥廃棄量の少ないエリアの存在は、社会全体の最終処分場使用量を減少させ外部不経済の発生を抑えることにつながる。よって、このような再開発地区の存在が社会全体に与える影響は大きく、都市再開発において下水汚泥エネルギーを採用することがいかに社会に便益を与えるかということをあらためて証明することができたといえる。

第五章 考察

(1) 本論独自の観点

「環境負荷が小さく、安定的供給が可能なエネルギーの採用」ということが論文全体を通しての私の主張である。その目的実現のために、そのエネルギーを採用する地域・採用されるべきエネルギーを絞って考察してきた。大都市の再開発地区に限定したエネルギー導入を提案した理由は、昼間人口と夜間人口との乖離からも明らかであるように、大都市には居住人口の数倍の人が毎日通勤、通学、娯楽のために来ているため、より多くの人々が新たなエネルギー源によって得られた電力を利用する可能性が十分にあるということである。また、建物一つの建てかえではなく再開発地区全体をターゲットとしたのは、仮に電力供給のための新しいインフラの整備が必要であったとしても、再開発地区であればその敷設が比較的容易であると考えたためである。一方で、採用すべきエネルギーを下水汚泥消化ガスエネルギーに限定した理由は、上水道利用者（その地区で生活する人の大半と考える）は上水道利用量とほぼ同量の下水を排出するため、比較的安定してエネルギー源である下水汚泥の獲得が可能であり、風力や太陽光のように特定の地域及び気候に左右されずに下水汚泥が供給されるからである。さらに、卵型消化槽を採用すると下水汚泥消化ガスは NOx, SO 排出が他の燃料電池と比較しても極めて少ないという観点から非常に優れており、 CO_2 排出面とあわせてまさに環境にやさしいエネルギー源であると考えられる。このような理由から採用すべき新エネルギー及び地区を選択し、本論独自のアイデアとした。

(2) 下水汚泥消化ガスエネルギー採用への課題

現段階では、下水汚泥エネルギー消化ガスは一部の下水処理場内でのみ発電に利用されるのにとどまっているが、「一般的な下水処理場においては、場内で必要な電力量の約30%をまかなうこと」¹が可能であり、「下水処理能力 $88,400 \text{ m}^3/\text{日}$ の下水処理場では $160KW$ の発電が可能」²という報告もされている。しかし、大半の下水処理場では卵型消

¹：日揮株式会社ホームページより引用

²：同上

化槽をはじめとする汚泥消化ガス発電のための設備は導入されていないため、そのような設備の導入および電力供給先までのインフラの整備などを含めると、固定費用が莫大なものとなる。このコスト面での問題をいかにして克服するかが最大の課題であるが、この発電方法による電力供給をビジネスとする民間企業の参入を促すための補助金の可否、およびより小さなコストで電力供給が可能となるための技術革新なども考慮しなければならない問題となるであろう。つまり、下水汚泥消化ガス発電の採用のためには政府、企業、そしてエネルギーを最終的に選択する消費者の意識が重要なポイントとなると考えている。

第六章 結論

今まで証明してきたとおり、下水汚泥から発生する消化ガスを用いた燃料電池発電は、汚泥自体の供給と電力の供給が共に安定しており、電力およびエネルギー供給の安定性という面で非常に優れている。また、環境負荷についても汚泥がカーボンニュートラルの性質を持つだけでなく、従来の燃料電池発電に比べて **NOx**、**SOx** 等の有害物質発生が抑制されること、さらには汚泥消化が効率的に行われる消化槽で汚泥処理を行うことによる汚泥最終処分量の減少・消滅とそれに伴う産業廃棄物最終処分場使用量の削減など、この発電システムの採用によって総体的に見て社会全体の環境負荷を減らすことが可能である。

さらに、消化ガス燃料電池発電施設のみを民間が運営することは固定費用が巨額な平均費用低減産業であるために損失の発生につながり、民間のみの力では運営することができない。しかし、政府から損失額分の補助金を受けることによって運営の存続が可能となるうえ、その補助金額がある一定額以上小さくならないよう設定されれば、民間企業は何とかして自らの利潤を増やそうと技術革新に励み、限界費用をより低くするものと考えられる。よって、汚泥消化ガス燃料電池発電施設を民間企業が運営することは政府の補助金政策によって可能になり、補助金のかけ方によっては民間企業に技術革新のインセンティブを与えるものとなる。

本論文では、エネルギー需要の把握が比較的容易である点、そして新たなエネルギーの採用によってより多くの人々が環境負荷の少ないエネルギーを利用する点から都市の市街地再開発エリアにおける汚泥消化ガス発電エネルギーの採用を提案した。実際にそのような地域が存在すれば、再開発による利便性の向上がもたらす価値に環境に配慮した街づくりという価値も加わり、その再開発エリアの価値が更に増すことも考えられる。

今回は汚泥消化エネルギー燃料電池発電システム導入のコストについての議論は見送ったが、今後さらに研究が続き導入・維持管理のコストが小さくなれば民間企業の汚泥消化ガス燃料電池発電市場への参入が促され、消費者にとってより良い価格形態が築かれることとなるだろう。ゆえに、日本のエネルギー供給を安定的かつ「環境にやさしい」ものとするためにもこのシステムの導入がもたらす便益は大きいといえるだろう。

《参考文献・URL》

- ・「バイオマス産業社会」
原後雄太・泊みゆき 築地書館 (2002.11)
- ・「循環型社会キーワード」
(財)クリーンジャパンセンター編 (財)経済調査会 (2002.1)
- ・「新版下水処理と水環境－ミクロの世界から地球環境まで」
亀田泰武・渡部春樹・金井重夫・野村充伸 山海堂 (2000.7)
- ・「浄化槽革命－生活排水の再生システムを目指して」
石井勲・山田國廣 合同出版 (1994.2)
- ・「環境に配慮したまちづくり－地方自治体の責任」
尾島俊雄・村上公哉 早稲田大学出版部 (2000.7)
- ・「水とエネルギーの循環経済学－大量消費社会を終わらせよう」
田島代支宣 海鳥社 (2001.4)
- ・「21世紀のエネルギーベストミックス－天然ガスベースの分散型複合システム」
石井彰・藤和彦 ぎょうせい (2002.2)
- ・「エネルギー便覧－資源編」
(社)日本エネルギー学会編 コロナ社 (2004.5)
- ・「ルポ 東京再興」
島田章 日本経済新聞社 (2002.5)

- ・鹿島建設(株)

<http://www.kajima.co.jp/>

- ・横浜市下水道局

<http://www.city.yokohama.jp/me/cplan/mizu/>

- ・米国農務省

www.usda.gov

- ・東京都下水道局

www.gesui.metro.tokyo.jp/

- ・日本下水道協会

<http://www.jswa.jp/>

- ・資源エネルギー庁

<http://www.enecho.meti.go.jp/>

- ・経済産業省

<http://www.meti.go.jp/>

- ・環境省

<http://www.env.go.jp>

- ・ 東京都杉並区

<http://www.city.suginami.tokyo.jp/>

- ・ 東京都港区

<http://www.city.minato.tokyo.jp/>

- ・ 東芝レビュー

www.toshiba.co.jp/tech/review/

- ・ 日揮株式会社

www.jgc.co.jp