

都市エネルギーシステムにおける都市系バイオマスの ポテンシャル



特 集

大阪大学大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻
教授 下田吉之氏

●はじめに

私は都市エネルギーシステムを研究テーマに、都市全体でのエネルギーの需給をシステムとして考えております。昨今、エネルギーの供給側が話題になっていますが、供給側と同様に需要側もシステムとして工学的にとらえることによって、エネルギーシステムの安定、環境保全に大いに役に立つと考えています。そこで、今までは精神論的に言われてきた省エネを、科学的に扱うことを研究しています。省エネだけではなく、都市の中には様々なエネルギー資源がありまして、本日はバイオマスについて紹介します。データに少し古いものがあるので、その辺りはご了承ください。

最初は都市系に限らず、バイオマスエネルギーにどれだけの期待がかけられているのかを紹介します。次に都市系バイオマスに対する、私自身の定義と特質、位置づけ。それをエネルギーに変換、利用する方法にはどのようなものがあるのか。また廃棄物からのエネルギー回収のポテンシャルについて、試算した事例を紹介させていただきます。そして、供給処理系の都市インフラの統合についても紹介したいと思います。

●バイオマスエネルギーへの高まる期待

再生可能エネルギーというと、太陽光発電や風力発電が話題になっていますが、次の再生可能エネルギーとして大事なリソースがバイオマスで、大きなポテンシャルがあります。もともと化石燃料は、1億年くらい前のバイオマスが土の中で化石化して得られたものです。何が問題かといえば、1億年を使ってつくられたものを100年で使ってしまおうという、時間サイクルの速さが問題なのです。いま言われているバイオマスは、100年程度の間を集められた太陽エネルギーを再循環可能、再生可能な速度で利用するというので、再生可能エネルギーとされているわけです。RITE所長の山地先生の本に載っていることですが、地球全体の光合成による1年間の純

生産量、エネルギーとして蓄えられる量が2,580EJ(エタジュール)。世界の一次エネルギー消費が年間560EJですから、使っているエネルギーの5倍くらいを地球上の生物は供給してくれています。全部を回収可能ではありませんが、人類の消費しているバイオマスは食物残渣やごみになったものを含め、エネルギー換算で211EJあります。これだけでも、人間が使っているエネルギーの半分弱くらいにはなっているわけです。

現在、バイオマスエネルギーが注目されつつあるのは、再生可能エネルギー発電の中で、出力がコントロールできる電源であるということです。というのも太陽光発電は昼間に集中して発電し、夜は発電できません。また、日射の変化で出力が変動するので、それに対応しなければなりません。風力も出力変動があります。経済産業省が今年まとめた長期エネルギー需給見通しの中では、これらは火力発電(ミドル・ピーク)の代替にしかならないと位置づけられています。FIT(買い取り制度)でメガソーラーが大量導入されました。初年度の2012年は、太陽光発電による電気はメガソーラーで発電されたもので、42円/kwhです。我々が家庭で買っている電



講師 下田 吉之氏

気は20数円。通常の発電所の原価は10円を割らないとビジネスにならないと言われていいますから、非常に高い値段で買ったことになります。大阪では実感しませんが、飛行機で九州の上空から下を見ると太陽光発電だらけになっています。これが出力変動するわけですから、その調整に電力事業者は非常に苦労されている状況にあります。FITの値段も下がってきた中でメガソーラーが更に大量導入されるには、新しい電力貯蔵技術が出てこない限りはおそらく難しいと考えます。かといって太陽光発電がなくなるわけではなく、都市の中で今後は、BIPV（建築設置）＋スマートコミュニティの形が主力になるのではないかと思います。従って、全体の発電量の中では、太陽光発電が主流を占めるようなことは多分ないだろうと考えております。

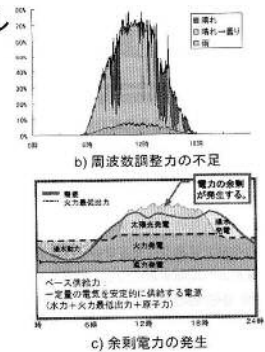
一方で需要に対してコントロールできる再生可能エネルギーは何か。それはバイオマス、水力、地熱です。ベース代替ということで、原子力発電とか、あるいはCO₂排出で問題になっている石炭火力を代替できるのは、これらの3つしかありません。その中で国内の水力資源のほとんどはすでにダムとして使われていて、中小水力が注目を浴びてはいますが、そんなに大きな量を占めない。無理をすると自然破壊にもつながります。地熱も場所が限られていることと、同様に地熱資源の保全の面からもそんなに大きくは伸びません。それに対してバイオマスは、もちろん自然環境や生態系の保全を考慮するという前提はありますが、光合成で固定しているというポテンシャルの大きさから考えると、大きな期待がかかっています。さらに燃料としての貯蔵が可能というのも、大きなポテンシャルです。

●変動する再生可能エネルギーの電力系統内での問題

これが太陽光発電の問題を解説した資料です。太陽光発電は、全体的には朝に立ち上がって夕方に落ちていくというカーブを描きますが、実際にはカーブがギザギザで変動しています。電気には同時同量という大原則があり、需要と供給が一致していないといけません。このギザギザを何で補うか。実際には水力にかなり頼っていますが、周期の長い調整では主にLNG火力に頼っています。昼間太陽光発電の発電変動に対応して、調整能力の高いLNG火力

変動する再生可能エネルギーの電力系統内での問題

- 変動する出力に応じて、何かを変動させなければ需給バランス＝周波数が保てない。
- 昼間太陽光発電の発電変動に対応して調整能力の高いLNG火力を稼働させる必要より、調整困難な原子力、石炭火力が稼働しづらくなる。また、LNG火力の空きによるエネルギーの無駄が生じる。



横山:エネルギー・資源学会誌(2015-5)

を稼働させる必要性から、調整困難な原子力や石炭火力が稼働し難しくなります。また、LNG火力の部分負荷運転によるエネルギーの無駄が生じます。

●長期エネルギー需給見通し（エネルギーミックス、2015年7月）における再生可能エネルギー

エネルギーミックスとして騒がれた長期エネルギー需要見通し（2015年7月）の中で、再生可能エネルギーに対してどれくらい期待されているかをまとめてみました。環境省がまとめている2050年度までの「導入見込み」と合わせてみると、両者はだいぶ違っているのですが、経済産業省の需給見通し（2030年導入見込み）の中で太陽光は、あと15年で直近年（環境省報告書）の5倍くらい伸びるとしています。風力発電はこれからFITの効果が出てくるのですが今の数倍程度。バイオマスは直近年が230（億kWh）と出ていますが、そのうち製紙工場から出てくる黒液と廃材関係が199（億kWh）。従って現在バイオマスといわれているほとんどが、黒液廃材関係となっています。長期エネルギー需給見通しでバイオマスは394～490（億kWh）と、2倍くらいになっていますが、黒液廃材は伸びない中で、その他のバイオマスが直近年の30（億kWh）から200（億kWh）程度に伸びるということで6倍～10倍程度の伸びが期待されます。水力はそんなに伸びません。地熱は3倍くらい伸びるのですが、今後の伸びからすると黒液廃材以外のバイオマスに大きな期待がかかっています。これは電力として利用するものに限られていて、じつはバイオマスは熱としても使えるため、量の面からもかなりの期待が持たれます。

●バイオマス発電の導入見通し

今回の長期エネルギー需給見通しの中身をもう少し細かく見てみます。この表の赤で記されたのが、本日のテーマでもある都市型のバイオマスに該当しますが、一般木材・農作物残さ、バイオガス、一般廃棄物等などが、バイオマス発電として大きな伸びが期待されています。

●バイオマス熱利用としての見通し

もう1つ、バイオマスには熱としての利用があります。再生可能エネルギーとして石油換算で6,700万kl程度が見込まれている中で、熱としての利用が5分の1にあたる約1,300万klです。熱利用の中では、太陽熱55万klに対しバイオマス等は667万klと非常に大きな期待がされていて、河川水・海水・下水をくみ上げてのヒートポンプ熱利用とほぼ同程度の期待度です。これらのほとんどは廃棄物・下水汚泥焼却熱など、都市で使うシステムです。

●都市系バイオマスの特質と位置づけ

都市系バイオマスの定義は、都市活動、つまり都市における人間の活動、オフィス業務、商業活動によって発生するバイオマスです。私は都市の中のエネルギー利用として、地域冷暖房の研究に携わってきました。その中に工場の廃熱を利用するケースがあります。特に製鉄所などは非常に大きな廃熱を発生するので、これを使えないかと研究していました。ただ工場は移転することがあります。今のような経済状況になってくると、都市に近い工場はどんどん撤退している。大阪近辺に以前は多くの高炉がありましたが、今では大半が無くなっています。このように生産活動に起因する熱利用は継続性に問題があります。それに対して都市活動によって発生するバイオマス、それを処理している下水処理場、清掃工場などは、都市活動がある限り必ず継続するものです。だからエネルギーを利用するインフラをつくっても、継続利用が担保されています。また、これらは熱の需要地に近くて熱利用が可能です。熱を運ぶことは大変です。下水処理システムである下水処理場、ごみ処理システムの清掃工場は、エネルギーの大量消費者でもあります。エネルギーの観点から見ると、これだけのエネルギー回収ポテンシャルを有しているながら、処理するためにエネルギーを使い、

有効利用可能なエネルギー源を使えていないのが現状です。従ってこれら両面の要素を含む、都市全体におけるエネルギー収支を改善していくことが大きなポイントになります。下水・ごみ処理システムが変わると、エネルギーとして取り出せるポテンシャルも変わります。

●大阪府のマテリアルフロー (万t)

これは大阪府の中でどれだけ物質が入ってきて、出ていっているのかを示しています。20年くらい前にやった研究ですが、数字で表してみました。大阪府内での年間資源投入は人口一人あたり20tになります。大阪府の人口は870万人ですから、ものすごい量の物資が毎年入ってきます。半分以上は製品として外に出ていきます。問題になるのは、1年間に入ってきた4分の1は都市の中に溜まっていることです。これはいつかごみになって出てくるので、それをどうするのが課題となります。特に金属資源ですが、鉄などは鉄鉱石として取り出してくるよりも、技術的な課題はあるにせよ都市に溜まったものをリサイクルした方がよいのではないかと考えられます。都市型のバイオマスで言えば、たとえば建築や家具に使っている木材などは、かなりの量が溜まっているわけです。同じく流入の4分の1は消費と廃棄になっています。何が消費かというとなら燃料や食料の消費です。廃棄は一般廃棄物、産業廃棄物としての廃棄があります。バイオマスとしてとらえられるのは食料として消費される分と、一般廃棄物、産業廃棄物の一部ということになります。実際には燃料消費と同じ重さに匹敵する量のバイオマスが流れています。単に重量だけでは比べられないも



の、エネルギー資源としてある程度の熱量を持ったものが、都市を右から左へと流れていっていることは確実です。

●大阪府のエネルギーフロー

エネルギーのフローを見てみると、電力、固形燃料、石油、ガスという形で都市の中に入ってきて、産業、民生、運輸といった分野で消費されて、廃熱となって出ていくという流れになります。この大きなエネルギーフローの中で廃棄物は、単に処理されるために燃やされているのがほとんどですが、エネルギー資源として数%程度のポテンシャルをもって燃やされています。残念ながらその熱量のうち、発電に利用されているのは1~2%しかない状況です。この図の中には、燃やしていない下水関係のバイオマスは出てこないで、エネルギーフローの中で未利用資源として燃やしているものは廃棄物を燃やしているものということになります。

●大阪府の産業部門（廃棄物焼却を含む）エネルギーフロー

次に産業部門のエネルギーフローを見てみます。じつはこの中で気体300℃以上、これはそのまま発電に使えるというものですが、発電に利用できる資源はほとんどが廃棄物焼却炉から出てきています。今や産業関係の工場のエネルギーフローは、これだけ省エネが厳しく言われている中で最適化されていて、そんなにエネルギーとして価値があるものは捨てていないのです。捨てているのはどこかというところ、ごみ処理場（清掃工場）と下水処理場になります。

●バイオマスのエネルギー変換法

バイオマスのエネルギー利用先としては、発電、熱利用、輸送燃料となります。エネルギー変換には3つの変換法があります。物理的変換としての1つが固体燃料として直接燃焼すること。石炭火力発電所で木質バイオマスを混ぜて燃やしていますが、微細に粉碎できないため、ポテンシャルとしては1~3%程度にとどまっているようです。この1~3%ですら、日本の石炭火力発電所ではわざわざ海外から燃やすだけの木質バイオマスを輸入している状態だそうです。また熱化学的変換で熱分解というのがあって、伝統的には木炭がありますが、下水汚泥や

厨芥の炭化というものもあります。今注目されているのが低温で炭化させる半炭化で、これをやると下水汚泥の発熱量が上がるとともに、臭いが減ります。これで石炭火力の代替ができないかということです。原子力発電所の停止以来、石炭火力発電所が増えていてCO₂のコントロール上は非常に大きな問題になっています。環境省からもこれ以上つくりたくないよと電力事業者に要請されている状況で、石炭火力のインフラを低炭素の条件で使っていくにはバイオマスを燃やすしかないのですが、ある程度大きな量でバイオマスを燃やしていくためには、バイオマスの転換技術も必要になってきます。廃棄物のガス化炉とか液化というのも研究されています。

●生物化学的変換

本日のメインのテーマはたぶん生物化学的変換で、バイオガス生産です。都市系バイオマスは下水に代表されるように含水率が高いですから、エネルギーをかけて乾燥させるよりは、生物の力を借りてエネルギー源を取り出すことになります。大きなポイントはガスエンジンの技術と燃料電池の技術が発達して来たことです。40%くらいの発電効率が出てくるようになって、これによって高い変換効率でエネルギー転換ができるようになってきました。特に燃料電池は、どちらかというスケールメリットがないシステムですから、バイオマスを分散型で処理していこうとすれば、この燃料電池技術の進展は重要といえます。ただ反応の副産物として硫化水素やアンモニアが排出されるため、オンサイトで処理しようとするとう問題が出てきます。環境省が燃料電池を使ってオンサイト発電ができないかと20年前くらい前に検討していましたが、最後に問題になったのが廃液の行く場所がないということでした。近所に農地があれば肥料としてそのまま投入できるのですが、都市の場合にはそんな農地がないわけで、ここをうまくできればバイオマスの地理的にコンパクトな再生・循環システムが組めることになります。

ドイツやアメリカの一部では、都市ごみの直接埋め立てをしています。そこから自然に発生するバイオガスを収集し、発電やコージェネレーションの燃料として使用している事例がかなりあります。大阪市の鶴見緑地は元々ごみの山で、花博の開催の前に漏れてくるメタンガスを処理するのに苦労されたよ

うですが、それを利用するところまでには至りませんでした。薄くてゆっくり出てくるものを取り込むという余裕は、日本のシステムには合わないのかもしれないかもしれません。神戸市東灘区の処理場では、メタン比率50%～60%しかないものを精製して、自動車燃料や都市ガス管への投入も行うようになってきました。ただし追加的なエネルギーをかけて精製するところに、私は無理があるように感じていて、出てきたものをそのまま飲み込めるようなシステムをつくる、そうした技術開発の方がよいのではないかと考えています。

この写真が土の中に埋めたごみからバイオガスをとっているドイツの事例ですが、その山自体を積極的にエネルギーの丘として、再生可能エネルギーのショーケースのようにしています。斜面にはこのように太陽光発電、その上には風力発電が回るという形で、次の写真には、出てくるバイオガスを集める塔が写っています。

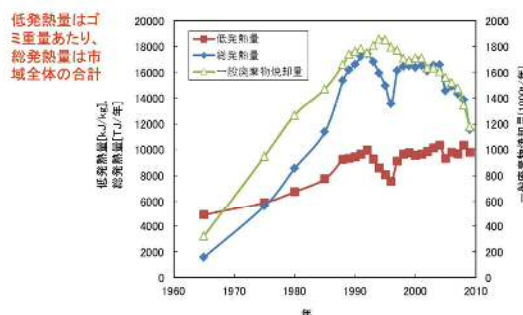
●廃棄物からのエネルギー回収

都市型バイオマスの中で、廃棄物の話をしたいと思います。廃棄物の場合、熱量としてはかなりありますが、排気ガスの性状から腐食の問題があって、あまり高い温度の蒸気の回収ができません。廃棄物発電の発電効率は平均で10%くらい、最高でも20%くらいにしかありません。固形燃料を燃やす石炭火力は40%くらいですから、発電だけではメリットが低いと言えます。熱利用自体は省エネルギー効果、CO₂排出削減効果ともに大きいのですが、1カ所の清掃工場から都市にどのように運んでくるのが大きなポイントになります。一方で、ドイツを含めた北欧は地域暖房が一般化していて、戸建て住宅にもあるし、集合住宅やオフィスでは水道管やガス管と同じように熱配管がつながっていて、そこから暖房用の熱が送られてきます。ただし都市の廃棄物には、プラスチックなどのバイオマスでない、非バイオマスも入っているので、バイオマスの評価には気を付けなければいけません。

●清掃工場の立地と熱需要

先ほど触れた清掃工場の立地の件ですが、大阪市の状況を見ると都市の熱需要とは離れた所に清掃工場がつくられています。この地図上に示されたプロ

清掃工場焼却排熱の利用



ットが清掃工場の位置です。赤い色分けが熱需要の大きさを示しています。御堂筋沿いの熱需要がいっぱいある地区の近くには、清掃工場が森之宮の1カ所だけがあったのですが、これもすでに閉鎖されています。あとは都市から離れた所に立地していて、熱は都市ガスとは違って非常に薄いエネルギーですから、ポンプ動力を使って運ばないと使えないわけで、地理的な大きな問題があります。清掃工場を、ごみを最後に処理する場として考えていたから、住んでいる場所より遠くに置くという昔の都市計画の考え方が背景にあったわけです。

これは森之宮清掃工場と周辺の写真です。すでに清掃工場は閉鎖されていますが、稼働中の当時は周辺住宅団地の暖房給湯用に、周辺の工場にも熱を供給していました。この特徴は、都市に近く、下水処理場と清掃工場が隣同士という、日本でも稀有な立地状況にあったわけです。東京に光が丘という所がありますが、ここは米軍基地返還後の1990年頃に一気に都市をつくったので、都市の真ん中に清掃工場ができました。そこから高層ビルに廃熱を送って、熱利用が可能になったという事例です。ただし暖房用に廃熱利用をしようとする問題が1つ出てきます。建物の中で温水を引き回して送るシステムなので、放熱器が床置きになります。部屋の床の一部を放熱器に占領されるのが、日本人にはなかなか受け入れられないという問題です。日本独特とも言えることで、中国ではエアコンでも床置きの冷蔵庫みたいに大きな室内機が置いてあるし、ヨーロッパでは室内のラジエーターは当たり前のように面積を占領しています。日本ではバイオマスストーブもそうですが、熱を出す装置を部屋が受け入れられるかどうかの問題が熱利用の1つのバリアになっていま

す。

デンマークのコペンハーゲン郊外では、地域熱供給のネットワークができています。街の真ん中から見ると発電所とごみ焼却場が近くで並んでいて、こうなると市街地に配管を引き回すことができます。発電所と清掃工場で90%を超える熱を送っており、冬の寒い時期にはバイオチップによる補助ボイラーが稼働。コペンハーゲンでは発電廃熱を含めば、化石燃料を燃やすことなく暖房ができています。日本では冷房も同時に考えてしまいます。暖房だけに使うシステムなら100℃の温水でネットワークが組めるのですが、冷房で使おうとすると200℃～300℃の高温水のネットワークになり、これが技術面からのもう1つのバリアになります。暖房だけで使うと、日本の場合は冬の寒い期間が短すぎるために、インフラ投資がなかなか回収できないという課題があります。

●清掃工場焼却廃熱の利用

清掃工場の焼却廃熱ですが、1960年代に比べて廃棄物が5倍、廃棄物あたりの発熱量が2倍、総発熱量が10倍くらいになっています。その内訳をみると、紙ごみが大きなウエートを占めています。我々が行った試算では、徹底的に紙や容器包装物のリサイクルをやってしまうと、ごみの量も減りますが発熱量が減ってしまいます。自燃しなくなる、火をつけても燃えないという発熱量になります。だから今後は廃棄物焼却ができなくなるのかということ、問題は厨芥の回収なのです。ごみの中で発熱量を落としている大きな原因は、厨芥中の水です。厨芥を別に回収してやれば、ごみの量も減り、発熱量は高いまま維持できることになります。エネルギー回収を考えるには、厨芥を別にすることが大きなポイントになります。

●分別とエネルギー変換技術による大阪市のエネルギー削減量変化

いろんなことをやって、どれくらい省エネルギー量が得られるかを見たのがこのグラフです。やはり熱利用が入ってこない、廃棄物の大きなエネルギー回収ポテンシャルにはならないということです。今より発電効率を上げたい場合、熱利用を徹底的にやりつくすことができれば、さらに2倍になるとい

うことになります。

●供給処理系インフラの統合

厨芥類は別に分別すると言いましたが、どうやって分別するかということ、アメリカなどで行われているように、ディスポーザーで粉碎して下水処理システムの中に入れられないかということです。もちろん別に回収することも可能です。下水処理システムは水質管理、廃棄物処理システムは廃棄物減量・無害化をする。もちろん下水処理も廃棄物処理も身の回りの衛生環境を向上させる。その目的のために設計され、100年くらい運用されてきたわけです。エネルギーの立場から見ると、エネルギー資源を運んでいるのに、そこから実際にエネルギー資源を取り出していない、都市の中ではあまりよろしくないシステムということになります。これを多目的最適化できないかということになります。

下水の持つ優資源を最大限活用できないかということで、我々は計算してみました。発生源（住宅地）から処理場に至る間にもメタンガスやCO₂が出ているとか、かなりの有機分が使われています。だからオンサイト処理、できれば住宅地でディスポーザーを付けて下水処理システムに有機資源を集中させて、住宅地に近い所でメタンガスに変え、発電して使うといったクローズなシステムを組みたいと思っています。その場合に、インフラコストの問題や先ほど触れた液肥の処理といった問題として残っています。このシステムで厨芥がなくなるとどうなるかということ、廃棄物が高い熱量で燃えるようになり、エネルギー回収システムが変わる。厨芥がなくなれば、ごみが腐りませんから廃棄物収集が週2回も来なくてよくなるなど、いろんなシステムが変わります。

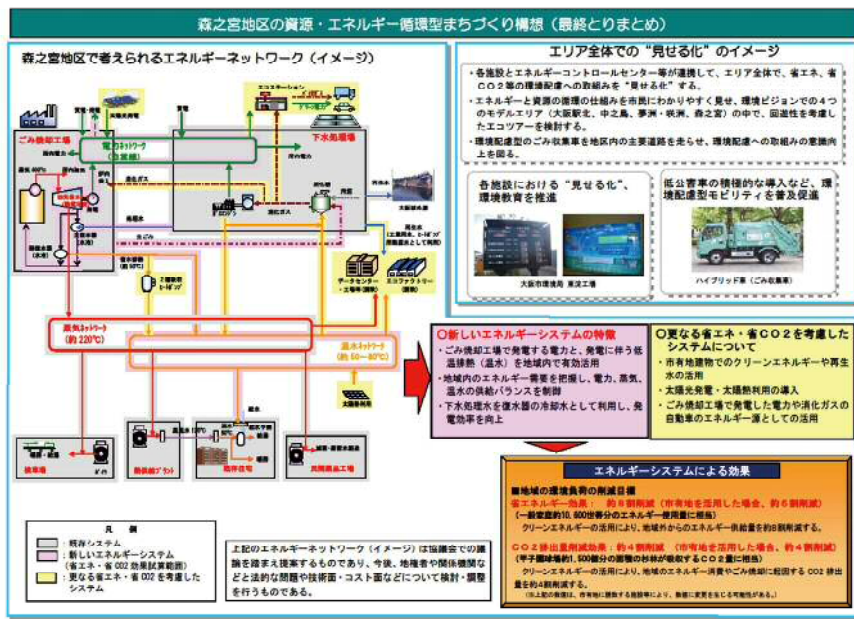
●森之宮地区資源・エネルギー循環型まちづくり構想

森之宮地区を対象に2010年頃、私が委員長として関わった取り組みがありました。森之宮地区資源・エネルギー循環型まちづくり構想というものがあった、この段階では森之宮の清掃工場を建て替えることになっていました。建て替えた時にどうエネルギーを使うかということで、清掃工場と下水処理場を連携させる。その中には厨芥類をそこで燃やさず、

中浜下水処理場で処理するという計画も入っていました。出てきたエネルギーを地域に供給する。熱を使うインフラはすでに住宅地までつながっているので、熱利用ができるテンシアルはあったわけです。イメージ図の左側が清掃工場、右側が下水処理場。生ごみが下水処理場の方に行く。下水処理場では消化ガス発電を行うのですが、加温によるものです。発電の廃熱でやる場合もありますが、ここでは清掃工場の中で出てきた熱の一部が使えないかも検討しています。消化ガスの発電から出てきた廃熱と、清掃工場から出てきた発電にともなう廃熱を蒸気のネットワークと温水のネットワークでつなぎ、付近の工場や住宅で使うシステムです。非常に先進的な計画だと私は思っていたのですが、2011年に市長が交代したことによって清掃工場の閉鎖が決まり、このプランがなくなってしまいました。大阪市のホームページを調べたら、この資料がまだホームページに載っていました。このような都心で熱需要の近い所で、清掃工場と下水処理場が隣り合わせにあるという所は日本でもなかなかないわけですから、こうした構想を次のまちづくりにぜひ生かしていただきたいと思っています。

●まとめ

都市内のごみと下水というバイオマス資源を、都市の物質循環に付随して発生するエネルギー資源として、他のエネルギー資源と同等に位置づけをして、エネルギーとして最適化する必要があります。都市内供給処理施設の統合化の観点からすると、汚水の浄化、廃棄物の減容・無害化、エネルギー消費の3者を最適化するシステムの組み替え、配置が必要になってきます。都市が縮小傾向にある中でシステムの転換を入れていくことは難しいテーマになりますが、それだけに長期のプランをつくり、最先端の技術を入れながらシステムを転換していくことが大事だと思っています。そのためにシステムの将来構想、熱として使うためのインフラ整備についても考えていく必要があります。技術の話によっては、熱でなく電力として使う、あるいは燃料として取り出すようなことが次のテーマとして出てくるかも知れませんが、そうした利用のことを考えていかなければなりません。



出典: 大阪市ホームページ 森ノ宮地区資源・エネルギー循環型まちづくり検討協議会