

都市建物内メタン発酵による生ごみと厨房排水からのエネルギー回収

～あべのハルカスを事例として～



特 集

竹中工務店 環境エンジニアリング本部

加藤 利崇氏

●はじめに

本日話す内容ですが、日本でいちばん高い建物「あべのハルカス」の地下にバイオガス設備を設けて、ビル内で出る生ごみからバイオガスをとって発電や熱を利用するという事です。メタン発酵といえば、50tとかの規模がないと経済的に成り立たなかったものを、今回は生ごみ3tという小規模なものでありながら、経済的に成り立ち、投資回収が10年以下ということで、商業ベースで導入ができたのが特徴です。

●ビルにおける生ごみ処理の現状と問題点

ビルのごみは非常にたくさん出てきて、例えばあべのハルカスでも、1日当たり10t以上のごみが出ています。非常に高いビルですが1フロア当たりの面積は広くなく、それが積層してビルを構成しているわけです。300mの道路が縦に通っていると考えればよいかと思えます。その道路を使いごみを運搬するイメージですが、ここでは道路はエレベーターになってくる。ごみと売るもの(商品)がエレベーター内に混在することになるわけです。話のはじまりは2008年のことでした。生ごみをいかにビル内で把握するのか、そこからいかに経済的にメタン発酵をするのか、大きくその2つの技術があります。背景には、ビルのごみを搬送する際にエレベーターの占拠をしないこと。また、生ごみは結構重たく、ビニール袋が破れて通路を汚し、エレベーターに臭気がこもる。この厄介なことを防ぐことの解決方法としてディスポーザというシステムを使うと、エレベーターを使わずにクローズな状態で搬送されるので臭気の拡散もありません。そうしたメリットはありますが、我々ごみの世界で勉強してきたものからするとディスポーザは悪魔の代物です。なぜかといえば好気処理して捨ててしまうだけで、リサイクルではないという思いがあります。ディスポーザを使いながらも、何とかリサイクルできないかという思いがありました。

●食品廃棄物等をめぐる現状と課題

食品廃棄物分野を見てみると、外食産業約24%、食品卸売業約45%というように特に外食産業でリサイクルが進んでいません。CASBEEという建築の環境評価システムがあって、生ごみ処理装置をビル内に入れると評価点が上がるため導入が進みましたが、臭気が出るという問題があります。ビル内で飼料や堆肥をつくる方法もありますが、都市部では全く消費する所がない。一部ではせっかく堆肥化したのにどこに行ったかと聞くと、焼却場に行っているということにもなっています。都市部として考えるなら、やはり生ごみはエネルギー利用の方法を考えたいと思います。

●ディスポーザ利用とリサイクルの両立ニーズ

そこで超高層ビルにおけるディスポーザの利用と、メタン発酵によるエネルギー利用を検討したいと思ったわけです。今回の核となる話をまず話したいと思えます。通常、メタン発酵の経済性を考えると、発酵残渣の処理が大変でお金もかかる。これも何とかできればという思いもあって、大きなビルで厨房除害設備、いわゆる厨房排水を好気処理するシステ



講師 加藤 利崇氏

ムがあるということで、同じようにそこで処理すればいいのではないかと考えたわけです。

一方で厨房除害設備に目を向けてみると、厨房排水を好気処理して放流するわけですが、ここで汚泥がいっぱい出てきます。これがハルカス規模になると10tローリーで週に2台くらいの量が出てくることになります。下水処理場でやっているように、ここで出てくる汚泥をメタン発酵すれば消化処理なので、ある程度消えてくれる。ただいったん好気処理された後の汚泥は、ある程度消化しますが、効率がよくないということで、好気処理する前にスカムとして回収してやればいいのではないかと考えました。スカムとして回収したものをメタン発酵槽で分解する。スカムで回収すると、当然ここ（ばっき処理槽）の負荷がガクッと減ります。

メタン発酵は消化処理なのでSS (suspended solidの意味。遊離固形分) が好気処理に比べて非常に少ないということで、加圧浮上で浮かせたものを、生ごみと一緒に発酵槽に入れてやる。そうするとここ（ばっき槽）の負荷が減ってくるので、発酵残渣を入れてもそのまま放流できてしまうくらいのバランスになることが分かりました。このようにメタン発酵と厨房除害設備をうまく組み合わせることによって、汚泥の外部搬出がいらなくなる。つまり汚泥の外部処理コストが大幅に減り、経済的に成立することが分かりました。従来からある技術であり、それを組み合わせただけだと思っていたのですが、やってみると意外と難しく、出来上がって2年間くらい苦労して今年4月頃からやっとうまく処理できるようになりました。

●ディスポーザとは

次に業務用ディスポーザについて話します。業務用ディスポーザは家庭用と違います。家庭用ディスポーザは生ごみ1kgに対し水が20ℓくらいで、かなり薄い状態で流します。これを業務用でやってしまうと大量の水が必要になります。そのため業務用は使用水量を極力減らすため、固形分濃度が高く、自然に排水しても配管を流れません。業務用はディスポーザ1台ごとにポンプが付いていて、圧送することになります。水槽までの間に合流させると圧力が抜けるので、ディスポーザ1台に排水槽まで1系統の配管が必要になります。ビル内にディス



ポーザを10台設置したら、10系統の配管が必要になるという問題があります。

もう1つ言うと、ディスポーザ排水を100m落下させると何が起るかということです。家庭用は生ごみ1kgに対し水20ℓと言いましたが、業務用は生ごみ10kgに対し水20ℓを基本として流します。これを100m落下させると、下に落ちた状態では、からからに乾いていた状態の固形物が落ちてきます。実験で高さ100mの所から落としたり、初めに固形物がぼとぼと落ちてきます。1分程度してから水が流れてくる。恐らく落ちてくる間に風圧で水が吹き飛び管壁に付き、残った固形物がすんと落ちてきて、その後から管に沿って水が流れてくる。そうすると何が起るかというと、あっという間に管は詰まります。そこを何とかしなければなりません。

●排水管に求められる性能① 排水たて管内の圧力変動を抑える方法

この写真は八王子にあるUR都市機構の超高層住宅実験タワーで、ここでごみの落下実験をしました。タワーは100mの高さがあり、各フロアはグレーチングになっていて、いちばん上から下までが見えることになっています。ディスポーザが10台、配管が10系統あっては困るわけで、集合管化してやれないかと考えました。集合管化するのに最初に考えたのが伸頂通気といって1本、上にだけ通気をとるタイプで、この時の基準値が管内±400パスカルに対して、3,000近い値が観測されて、これはまずいということになりました。そこで落ちてくる水を羽に当てて回すことで速度を落とすという減速継手を付けたり、途中で通気をいっぱい抜いてみるとか、

そんな試験をしました。そうすることで、減速継手の設置や、途中で通気を抜いてやると管内圧力が大幅に緩和されるという結果が出ました。

●排水管に求められる性能② 排水横主管の搬送性能の確認

横引きも、普通に流しても業務用ディスポーザでは流れません。そのためポンプ圧送が必要となります。

話を戻すと、ハルカス側でごみ問題の検討を進める中で、環境モデル事業という環境に関連した補助金制度があるので、応募に際し何か目玉になるものがないかということで、メタン発酵によるアイデアが採用されることになりました。採用されたのはよしとしても、場所が用意されていないので、どこにつくろうかということになりました。当初は中水処理が入っていたのですが、その中水処理が活性汚泥法だったので、それを膜方式にすることによって縮小して場所を空ける工夫と、厨房排水も加圧浮上装置によって汚濁物を一部メタン発酵を入れる工夫で、厨房除害設備のばっき水槽も小さくできるということで、場所を確保できました。

そこまではよかったのですが、上の階のディスポーザを置く場所が、平面的に見て対角線に近い所であったのです。本当はディスポーザ排水を上階からそのまま垂直に排水槽に落としかつたのですが、これもかなわない。したがって、落下させた後に70m横引きしないといけない。何とか70m横引きできるようにしようということで、とぐろを巻いて配管をつかって、いろんな試験をしたわけです。さきほど分離してしまうという話をしましたが、分離してしまったものをいったん小さな水槽に溜めて、そこからさらにポンプで圧送するというシステムを開発したわけです。これで200ℓくらいの容器を置いておけば、大きな水槽をつくらなくても済むことになります。大きな水槽をつかってポンプアップしようとする、水槽の隅がなかなか流れなくて嫌気になって硫化水素が出るとかの問題もあるので、このようなシステムをつくりました。

●排水管に求められる性能③

この結果が分かりにくいので、少し説明をさせていただきます。ものを流すには、概ね毎秒0.6mの流速を確保する必要があります。これは50の配管

と75の配管で試験をしているのですが、単なる水なら流れてくれるのに生ごみにすると途端に流れなくなります。75の配管でも流速0.3m/sにしかならず流れない。管を50にするとさらに流れないということです。ここで何をしたかという、図の丸印とかダイヤの印、50ℓ流す試験と75ℓ流す試験をしています。200ℓ流すと、75の配管ではピストンのように押し出てこないのですが、50の配管にするとピストンのように落ちて出てくる。だから径の小さい配管で圧送しないといけないということです。プラントの世界では満管でのポンプ圧送は当たり前ですが、建築の世界ではそれをやったことがないようです。流れにくい場合はとにかく配管を大きくするというのが通常の見え方でしたので、このような試験を通して圧送しないと流れませんと説明をしたうえで、建築の中でポンプ圧送をやってみたということです。

●あべのハルカスにおける配管設計

これが実物を撮った写真です。中継槽が設置してあって、いったん落ちて混合されて、ポンプで送られます。減速継手はこんな形状のものです。結合通気管は通気管と本管を結ぶことによって、空気をぐるぐる回すわけです。これによって管内の圧力を抑えるということです。なぜ管内の圧力を抑えるかというと、急に管内圧力が大きく変化すると、臭気防止のための封水が切れてしまって、水槽の臭いが逆流してくるという問題があるからです。この設備は導入してから1年間くらい測定していますが、特に問題なく稼働しています。1年後に見てみましたが、特に配管の閉塞が進んでいることもなく順調な状態です。



●ビルにおける厨房除害設備の問題点

次にメタン発酵の話になります。中水の汚泥はこんな状況です。これは東京都の資料ですが、汚泥が出ない厨房除害設備が一時期出てきて、そんなことはないはずと東京都が調査したそうです。すると、こっそりと夜中に汚泥を流すバイパス配管があるとか、そんな事実があったそうです。なぜこんな話をするかという、うちではそんなに汚泥は出ていないと話す方も結構いるようですので、紹介してみました。皆さんには釈迦に説法の話だと思いますが、嫌気性処理の長所と短所を書き出してみました。ここに書いてあるように、嫌気というのは素晴らしいと伝えたかったわけです。

●厨房排水処理汚泥の削減方法

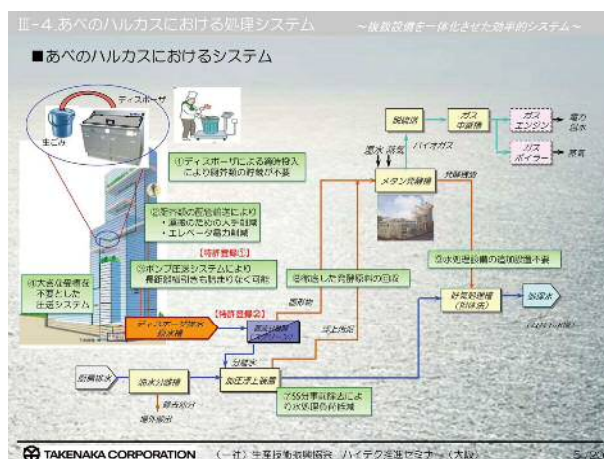
これはメタン発酵と厨房除害設備をうまく組み合わせさせてやりましょうということです。当初は中水処理した後の汚泥も入れようと思っていたのですが、ハルカスの中水の元になっている雑排水は非常にきれいなため、汚泥排出なしの中水利用ができています。

●ディスポーザ排水と厨房排水からメタン発酵原料を濃縮

もう1つの課題は、ディスポーザ排水から発酵させる原料をいかに回収するかということです。生ごみをディスポーザで破壊するとこんな状態になります。これは一発で加圧浮上装置で浮かせることができないので、スクリーンで分離して、スクリーンでの固形分としての回収と、スクリーンの液分は厨房排水と一緒に加圧浮上装置で浮かせる。このような形でSSにして70%~80%の回収ができています。今回のミソになったのが、出雲のメーカーによる回転円盤型スクリーンです。脂ぎったこのようなものを詰まらない状態できちんと分離できるということから、この技術がキーテクノロジーとなっています。いろんな所で使われている装置ですが、少し見方を変えてみると、違う用途が出てくるものだと感じました。

●あべのハルカスにおける処理システム

最終的に組み上げたのが、ここに描いたフローのシステムです。いろいろ細工があって、当初はディ



スポーザでゴミを入れることになると、どれだけ流すかの量が分からない。ディスポーザだと生ごみを流し放題ではないかという意見もあったので、計量しないと蓋が開かない形にしています。ディスポーザからの排水は、固液分離して、固形物は発酵槽に、液分は厨房排水と混ぜる。混ざった液も加圧をかけて、浮上汚泥をメタン発酵槽に入れる。発酵した残渣は、厨房除害の好気処理槽に入れて下水道に放流します。発酵状態がよくなれば、これで汚泥の外部搬出がほぼ不要になります。

●あべのハルカスにおける機器配置状況

実際の配置はこんな形になっています。バイオガスで使っているエリアはそんなに広くなくて、メタン発酵槽2つと原料槽、加圧浮上装置を入れるスペースでできているということです。先ほどの講演の中で濃縮のことがありましたが、ディスポーザ排水をそのまま入れてしまうと非常に大きな水槽になってしまうので、これをスクリーンと加圧浮上でうまく濃縮をしています。これは高温発酵にしています。理由はコンパクトにできることと、油脂対策として、油の分解には中温より高温の方がよいということで高温を採用しています。さすがに高温だけあって、発酵の安定性からは中温よりは落ちると感じています。日々のわずかな変動に対しては発酵の安定性に弱いというのが、これまで感じているところです。

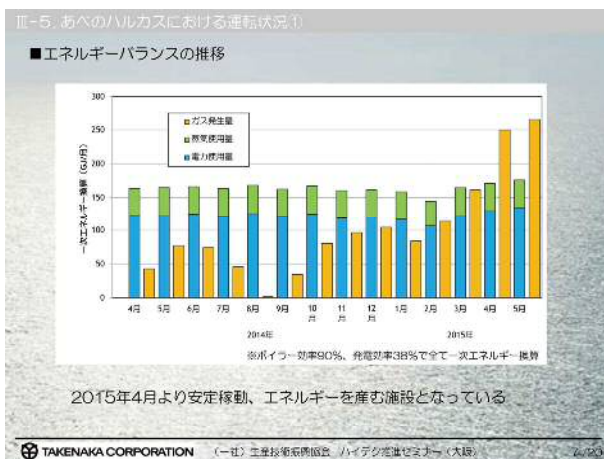
●エネルギーバランスの推移

これが苦勞の痕跡です。グランドオープン後の推移を表しています。2014年3月から運転を開始してガスが出始めたと思ったら落ちて、また出始めた

と思つたらまた落ちて、2015年4月から安定的に出るようになりました。このグラフのオレンジ色がガス発生量を1次エネルギーに換算したものです。緑色が蒸気の使用量、水色が電気の使用量。従って生ごみ3t、実際にこの期間では生ごみは2t程度が毎日投入されていますので、そのくらいのレベルでもエネルギー的にプラスになっているということです。

●あべのハルカスにおける運転状況

これはガス発生量とスカム投入量、生ごみ投入量を示したのですが、何が原因だったかというところと油分が全ての元凶だったということです。油はメタン発酵ではガスがたくさん出て、しかもメタン濃度が高くなります。ハルカスのバイオガス中のメタン濃度は、通常60%といわれるものが70%。これはやはり油の影響だとされますが、油も少量だと非常にいいガス発生源なのに、量が増えるとすぐにだめになってしまいます。もっと言えば植物性油はいいが、動物性油はよくないようで、人間と同じように機器も胃もたれするのかなと感じているところです。4月、5月の日々のエネルギーバランスを見てみると、安定的にガスが出ていてエネルギー的にもプラスになっていて順調です。



●最近1カ月の各種数値の変動

これは1カ月の各種数値を並べたグラフです。メタン濃度は70%程度にずっと上がっています。生ごみではノルマルヘキサン (n-hexane) 抽出物の負荷が少し大きい状態で、ここは注意が必要なところだと思います。よく見ると、ここが少しおかしいことになっています。じつは設備上の問題があって改

造することになり、1日投入を止めたのですが、その後の動きが不安定になってしまいました。1日投入を止めると、再び安定するまでに1週間ほどかかってしまいました。ものが変わるとメタン発酵も違う状況になることが分かりました。というのは、ハルカスでは投入した生ごみの8割くらいはその日のうちに分解されているようです。つまり間欠的に原料を投入すると、ガスの発生量も時間ごとに変動します。

●法的な課題

法的な課題に触れておきます。廃棄物処理法の面から考えると、一般廃棄物を処理する施設となります。従って見方を変え、一般廃棄物処理施設ではないかという話になります。そうすると日量5tを超えると設置に許可が必要になります。今回は3tだから、そこには該当しない。次に業という問題があります。これは業ではなく、テナントに対するサービス事業ではないか、そんな見方がされるわけです。一般廃棄物処理施設とか一般廃棄物処理業という話になってくると、ここだけの問題ではなくなってきます。建築基準法が絡んできて都市計画審議会にかけるとか、そんなことが必要になってきます。

他にも規模的な課題があります。今回のハルカスでは生ごみ3tという規模設定ですが、3tもの多量なごみが出てくるビルはそれほどないので、なかなか次の適用につながりそうにありません。そのため、1t程度でもできるようにしようと検討を進めています。また、街区内のいくつかのビルをまとめてやるという方法も考えているのですが、そうすると確実に業になってくるのではないのか。当初はそう思ったのですが、東京都と話をした時に、廃掃法でいえば「再生利用する場合、市町村長が認めた一般廃棄物のみの処分を業として行う者であって、市町村長の指定を受けた者は許可不要」という文言があり、地元自治体さえOKであればできると助言してもらいました。そう言っていたので、今は前向きになっています。

●何に苦労したのか

もう1つ苦労した点がありました。先ほど実験時の写真を見ていただき、ディスポーザから70%～

80%の回収ができていると言いましたが、稼働してみたらこれが40%程度しか回収できていなかったのです。なぜだろうと見直してみるとディスプレイ原水槽に貯留している間に可溶化、つまり溶けてしまうということが1つ。もう1つが、この水槽からスクリーンにくみ上げるのに羽の付いた攪拌型のポンプを使っており、羽の攪拌の中で溶けてしまうということです。20m³くらいの原水槽をつくったのですが、原水槽をやめて直接100m下のタンクからポンプ圧送で発酵槽にもっていくということで、原水槽バイパス工事をしました。それで75%程度の回収が達成できているということです。厨房排水では、油脂分はテナントのグリストラップで回収すれば回収が容易なのですが、地下まで到達するまでの間にエマルジョン化してしまいます。(エマルジョン：水または油が、微細な液滴となって他相の中に分散し、乳化状をなす状態。) エマルジョン化した状態の油脂分を除去するのは至難の技で、発酵に使いたいものまで一緒に除去されてしまうなど、苦労しているところです。

●原因解析に基づいた恒久的設備改造とルール運用

これはどれだけ改造したかを表したものです。まずはテナントのグリストラップを清掃してもらおうと、グリストラップ清掃キットをお客さんに紹介して、配ってもらい、それでなるべく油を減らそうとしました。これをやることによって厨房排水のn-Hex抽出物が大幅に減少しました。これが180mg/lくらいを切るくらいになると、設備に設置したグリストラップでは外部搬出が不要となります。通常の厨房除害設備では150mg/lとか200mg/lとかで設計しているので、通常の状態まで持ってくることであれば、外部への汚泥類の搬出なく稼働させられます。先月は搬出がほとんどなく、うまくいっていたのですが、少し気を緩めると厨房排水中のn-Hex抽出物値が上昇し、最近また増えてきている傾向もあるようです。それから厨房排水原水槽に落ちてきて、そこから加圧浮上装置で浮かせて発酵槽にもっていくのですが、この加圧浮上装置にタイマーを付けています。あまりにも油が多い時には入れないよ

うにと、投入部制御ができるようにしています。この厨房排水の原水槽に加圧装置を付加して、無理やり油を浮かせるようにしています。この写真で線が入っているのが見えると思いますが、油水分離槽を現場で付けたのですが、上がそういう状態なので増強して、より多くとれるように防護措置を講じています。

もう1つ、生ごみの分別の面から言えば、ディスプレイを利用するにあたって繊維性の強い、例えばパイナップルみたいなものは入れてはいけないというルールにしたのですが、あまりにもルールが細かすぎるということでルールを緩和し、感覚的に分かる分別でいいようにしました。口に入れられないものは、入れないでくださいというレベルに緩和しました。

●経済性のシミュレーション結果

経済性ですが、これは私どもで試算をしたものです。年間3,500万円くらいのメリットが出ているということで、インシヤルが3億円ですから補助金がなくても9年間くらいで投資回収が可能だろうということです。一般化してみると、例えば生ごみ3tを入れるとバイオガスが600Nm³くらい出てきます。そうすると管理運転費用が年間5,000万円くらいかかり、それに対して生ごみリサイクル費用3,240万円、厨房除害・中水汚泥処理費4,000万円がかかり、余剰ガス売却の価値が1,200万円あるだろうとして計算しても、これくらいの投資回収年数になると思われます。補助金を入れれば5～6年でペイするレベルを目指してやってきたので、だいたい思惑どおりの数値にはなっているのかなと思っています。

●まとめ

排水試験などは関東学院大学の塚先生に予期せぬことにも対応していただき、大変お世話になりました。ハルカスの方は近鉄さんが持株会社化したことから、近鉄不動産の管理ということで、バイオガス設備に関しては近鉄ビルサービスが対応して運転していただいています。今回のデータ等の提供に対して感謝をいたします。ありがとうございました。