下水処理施設と都市ごみ焼却施設の連携に関する環境性・経済性評価

～ 都市型バイオマスエネルギー変換施設としての再定義 ～

特　集

大阪大学大学院　工学研究科附属高度人材育成センター
助教　中　塚　記　章 氏

●はじめに

本日のテーマの副題を「都市型バイオマスエネルギー変換施設としての再定義」としておりますが、新たな着眼点として静脈系と言われる下水処理施設と都市ごみ焼却施設の連携に対してこのような見方が設定できないかとチャレンジしている研究内容を紹介したいと思います。最初にお断りしておきたいのは、私は機械工学専攻燃焼工学研究室の出身で燃焼現象の研究をしてきたので、下水処理やごみの焼却の分野は新参者です。無知からの不適切な表現が含まれるかもしれませんが、その辺りをご了承いただきたいと思います。

●謝辞

最初に、本日の講演内容のための検討に協力してくださった方々に謝辞を述べさせていただきます。また、生産技術振興協会が事務局をされている「大阪のバイオマスエネルギーの有効利用を考える研究会」の検討内容が主要なコンテンツとなっております。この研究会の名称には「大阪の」と付いていますが、巽事務局長から最初に「なんぼかかって、なんぼ儲かるか。そうでなければ大阪の話にはならない」と言われましたので、コストの観点にしっかりと着目して研究を行ってまいりました。一方で、生産技術振興協会アライアンス委員会のバイオマス分科会では、大阪大学赤松先生が座長、私は幹事を担当させて頂いておりまして、この分科会の活動とも関連しています。大阪のバイオマスエネルギーの有効利用を考える研究会を始めたのは、人口が減少してくると都市ごみの発生量が減って、設備稼働率が低下するという問題があるからです。社会インフラとして容量に余裕をもって設計された高額な設備の稼働率が低下することは、回りまわって市民一人当たりの税負担増加にもつながります。すでに構築ずみの高度なシステムの稼働率を大規模集約型のバイオマスエネルギー利用施設としてとらえた時に、どのように稼働率低下を食い止めるかが課題です。

一方のバイオマス分科会では、木質バイオマスエネルギー変換施設を分散型の地域エネルギー利用拠点として成り立たせるためには、いかにシステム、これは機器構成という意味でのシステムだけでなく、法整備という観点での社会システムを設計していくかが課題です。大規模集約型と小型分散型という、相反する特徴を持ったバイオマスの利用を両面から見ていくということで、新たな価値観の創造を目指しているところです。また、普及シナリオについて研究されている木下先生と4年ほど前から連携させていただいています。燃焼工学研究室の赤松先生、林先生、そして博士前期課程の藏渕さん、白さん。ここに示している多くの方々のお知恵を借りて、本日の講演を進めたいと思います。

●なぜ「バイオマス」なのか

バイオマスとは生物資源の量を示す言葉で、再生可能な生物由来の有機性資源です。1億年もかけてつくられた化石資源を、百数十年で使い切ろうとしていることが問題であり、それによって様々な環境問題を引き起こしています。限りある資源やエネルギーを持続的に利用することが重要です。なぜバイオマス利用が重要かというと、バイオマスは適切に利用できれば再生可能な資源であり、持続可能な「循

講師　中塚　記章 氏

環型社会」の構築に資するということです。

●大阪のバイオマス有効利用促進のための戦略プラン

「大阪のバイオマスエネルギーの有効利用を考える研究会」では、まず数字を示しています。大阪府域の都市ごみの未利用排熱は国内第一位で、年間3万6,000TJ（テラジュール）を捨てています。これをお金に変換しようと計算してみたら800億円になりました。少し乱暴な計算かもしれませんが、熱量だけでみると毎年800億円分の排熱を、大気中や海に流しているというわけです。このことを理解したうえで、大阪のバイオマス有効利用促進のための戦略プランを検討しました。その中で書かれていることを紹介したいと思います。

●バイオマス利活用の現状と課題

バイオマス資源には様々なものがありますが、それを利活用できる既存施設にはどんなものがあるでしょうか。例えばマテリアル利用では、堆肥施設やセメント工場などが挙げられます。下水汚泥などもセメント工場でキルンの中に入れられ、セメントの材料として使われます。エネルギー変換では、廃棄物処理施設で発電設備が付帯され、それによってエネルギー変換が行われます。生ごみや下水汚泥の処理施設では、これらは生分解性であることからメタン発酵によって得られたガスを用いてガスエンジンにより発電されます。個別に高度化されている処理施設であるため、他の施設との相互連携を難しくさせるという現状があり、行政も動き始めているところです。

●研究背景バイオマスの分類

研究の背景として、大阪のバイオマス賦存量を見てみましょう。下水汚泥は産業廃棄物ですが、あえて産業廃棄物系から取り出して円グラフで示してみました。約半分が産業廃棄物、30％程度が下水汚泥、20％弱が一般廃棄物で、下水汚泥と一般廃棄物を合わせると大阪に賦存するバイオマスの半分くらいを占めます。それぞれが都市部でどのように処理されているかを見ると、下水処理場の下水汚泥は消化タンクに入れられ、ガスはガスエンジン発電に回されますが、残った消化汚泥は脱水、乾燥された後、焼却炉に投入され、排ガスは無害化されて煙突から出ていきます。一般廃棄物である都市ごみは焼却炉に投入、燃やされて、燃焼排熱の一部は蒸気として回収されて蒸気タービンで発電に利用されますが、まだまだ残っている熱量の多くが煙突から出ていきます。

●研究背景都市型バイオマス処理施設

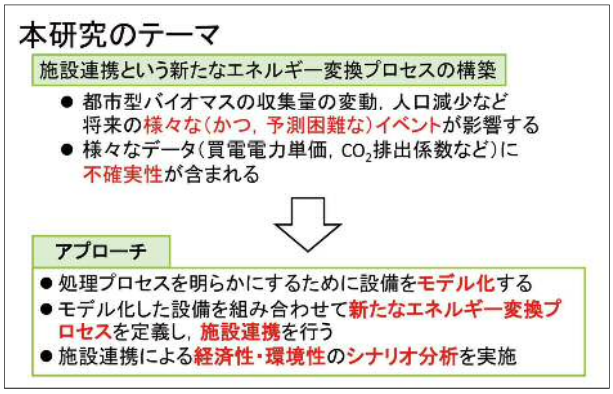
年間800億円の排熱が出ていくということと、未利用排熱の中でどんな排熱が利用しにくいかを聞いたところ、焼却灰に熱が多く含まれているが、火が出ないように水の中に入れて冷却していることから、その熱は利用できていないということでした。そこに着眼するとともに、人口減少社会における社会インフラの稼働率の低下、これらを統合的に解決すること手立てはないかというところで考えてみました。乱暴な話ですが、下水処理場と都市ごみ焼却施設を施設連携してみれば、双方に備わっている燃焼炉と燃焼排ガス処理設備のうち片方をなくすことができるのではないかということです。つまりその分のコストがかからないことになります。

●下水処理場とごみ焼却施設のエネルギープロセス変換プロセス

説明すると、濃縮した下水汚泥を脱水機に入れますが、これに利用しにくい焼却灰の熱を利用して、水分を50％まで乾燥させるような焼却灰乾燥機ができると想定します。そうすると脱水機から出た下水汚泥は、焼却炉に入り、焼却炉の燃焼排熱で発電された後に、燃焼排ガスは無害化されて煙突から出ていくことになり、ここの部分のプロセスはいらないことになります。ここで最大限のコストメリットを出しておいて、このような要素技術開発に振り向けることができれば、研究・開発費用を捻出できるのではないかというのが大枠の話です。

●年間コスト

そんなことができるのかについて試算した結果ですが、年間コストとして建築費が大きく低下します。なぜかと言うと、消化ガスを発生させる設備、ガスエンジン、排ガス処理設備、煙突が、焼却灰乾燥機という設備を利用することで不要になるからです。これらの部分の建築費とさらに維持費も大幅に低減でき、現状の年間コストの半分程度、額にして年間25億円程度コストを下げられるという試算結果が得られています。このような年間コストの低下分で新しい機器の開発や、連携させるためのコストも捻出できることになります。



●なぜバイオマスエネルギー利用の普及シナリオの研究を始めたか

このような研究を始めた理由について、もう少し詳しく話したいと思います。研究開発における「死の谷」ということがよく言われますが、これに類する言葉が気になって調べてみました。「魔の川」というのがあって、これは基礎研究から応用研究までの間の難関・障壁です。そして一番有名なのが「デスバレー（死の谷）」で、応用研究からニュービジネスあるいは、製品化（パイロットライン）までの間の難関・障壁です。「ダーウィンの海」という言葉もあるようで、これはニュービジネスあるいは製品化までいったものが、実際の事業化に至るまでに大きな難関・障壁が存在するというものです。我々は大学で基礎研究や応用研究をがんばっているのですが、そこで出てきた技術シーズを、例えば持続可能な社会、低炭素社会、自然共生社会、循環型社会といったビジョンにつなげていくまでの難関（断絶）をいかに乗り越えるかということ、そのことこそを研究しないといけないのではないのか。つまりはライフスタイルの変化が市民の方々に受け入れられるのかどうか、また、政府の政策の行方や技術進歩、経済情勢なども踏まえる必要があります。中でも経済情勢は読みにくいわけで、例えば化石燃料の値段の変化などは当然考慮していかねばなりません。このようなことは、技術シーズと同じくらい重要ではないかと気づき、皆さんの協力を得ながら研究会としての研究を始めました。

●施設連携の動機（施設の役割の捉え方）

施設の捉え方として現状はどのようになっているか。下水汚泥、都市ごみは個々の施設で処理されていて、現状１として、下水汚泥、都市ごみは減容されるべきものという前提があります。私が生まれる前に決まったことで、埋立地のひっ迫によるところがあったものかと思いますが、都市ごみは灰にして埋めることとし、下水汚泥もそのまま埋め立てては場所をとるので、消化をして一部はガスとして減容して、消化後に埋め立てることにしたのだろうと思います。現状２として、それぞれの施設に高度な焼却炉や発電設備などが設置されてきました。現状３としては、処理プロセスで発生するエネルギーの一部を回収することになっています。これらを再定義しました。それは下水汚泥、都市ごみを都市型バイオマス資源として利用し、エネルギー変換をしましょうということです。減容されるべきものという理念を頭の中から一度取り出してみて、都市型バイオマス資源、エネルギー資源なのだと考えます。再定義１としては下水汚泥、都市ごみは都市型バイオマスだと見なします。再定義２として、焼却炉、排ガス処理設備、発電設備などは高度に統合する余地はないのか。再定義３としては、エネルギー変換プロセスにおける未利用廃熱の利用によって、高い発電効率と高い減容化率の維持を目指すことができないのか。このように考えています。これらをもとにして大量未利用排熱と社会インフラ稼働率低下をくい止める独創的な手段として、下水処理場と都市ごみ処理施設の施設連携を着想しました。

●都市型バイオマス設備モデル化手法

それをどのように定量的に評価していくかが重要になってきますが、それについては、木下先生の研究内容である普及シナリオの知見を最大限に活かさせていただきました。簡単に説明しますと、投入物があって、設備プロセスに入っていき、生産物ができる時に、例えばエネルギーが投入されて副産物ができる。このようなものを形式化して関数で表します。例えば脱水時のプロセスをどう考えるかという場合に、有機物と水分が混ざったものを、脱水によって水分を除くのですから、時間当たりの重量は取り除いた水分だけ減少します。有機物は組成変換やロスがないものとして、後段のプロセスへと流れていくということです。当然、その脱水プロセスにはエネルギーが必要になってきます。

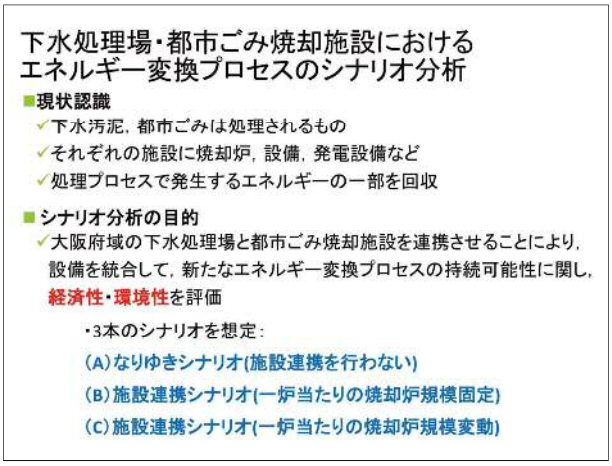
●モデル化を行った設備

次に１つ１つを関数の形でモデル化していきますが、一例を挙げると下水処理場では最初沈殿池、最

終沈殿池、遠心濃縮機、濃縮タンク、消化タンク、脱水機があって、それらの実測データをヒアリングで出していただき、どのような重量変化、あるいはエネルギーの変化があるのかを実測データから持ってきます。脱水機は先ほど述べたように、脱水前後で固形分の質量が変化しないというモデル化を行いました。都市ごみ焼却施設については、焼却炉では焼却、減容というプロセスがあるのですが、灰の排出量などをモデル化しました。蒸気タービン発電機では発電されますから、これはバイオマスとして導入された、都市ごみの低位発熱量に発電効率を掛けると、発電量になるというところからモデル化を行っています。連携後に新たに出てくるものとして、焼却灰乾燥機というものがあったとすれば、焼却灰と下水汚泥を混合させることによって、その熱で下水汚泥の水分が蒸発して、そのぶん低位発熱量が上昇します。このようなところをモデルによって算出します。詳しくは後で紹介します。

●下水処理場・都市ごみ焼却施設におけるエネルギー変換プロセスのシナリオ分析

下水処理場と都市ごみ焼却施設には先ほど述べたような現状認識がありますが、シナリオ分析の目的として、大阪府域の下水処理場と都市ごみ焼却施設を連携させることにより、設備を統合して、新たなエネルギー変換プロセスの持続可能性に関して、「経済性」「環境性」を評価します。シナリオとして、A、B、Cの3つを設定しました。シナリオAは「なりゆきシナリオ」で、今のままで下水処理場と都市ごみ焼却施設との施設連携を行わないことを、シナリオ比較のベースデータとして設定します。シナリオBは「施設連携シナリオ」。既存の都市ごみ焼却施設に脱水した下水汚泥を投入しようとすると、焼却炉の容量を超えてしまうので、焼却炉の増設が必要になります。今回調査したところ、既存の焼却炉で日量175t規模のものが3炉あるため、もう1炉を追加し175t規模を4炉とするとしてシナリオ評価したものが、シナリオBです。そしてシナリオCですが、仮に焼却炉を今からつくると考えると、最初から下水汚泥も脱水・乾燥・処理できる容量の196t規模の焼却炉3炉入れておけばよいという計算になります。このような何もない所で、新たに焼却炉を設計する場合はこうなるというイメージで、シナリオCを設定しました。この3つのシナリオ



を設定した上で、それぞれの経済性・環境性を評価しています。

●下水処理場とごみ焼却施設のエネルギー変換プロセス

先ほども述べたように下水汚泥は、脱水機に入り、下水処理場にある焼却炉、ガスエンジン発電機などは一切使わず、さらに消化も行わないという前提を置いています。消化も減容化の1手法だったのであれば、自燃する水分で燃焼させて灰にできるのであれば、簡略化できるのではないかということです。もちろん消化を行い、消化汚泥を乾燥させて、焼却炉に投入するという、もう1つのシナリオも成り立ちうるのですが、まず導入として極端なパターンから比較してみようと、このような前提にしています。

水分量ですが、水分80%というところの今回調査対象とした下水処理場の、流入してくる下水汚泥の量で見てみると、11万8,652kg／日の水が含まれています。これを水分50%にすると、たったの2万7,832kg／日になりますから、その差分を焼却灰からの排熱で乾燥させることができるかどうかです。もちろん難しいのかもしれませんが、煙突から出ていく直前の、まだ熱を持った排ガスからの熱交換もあり得るのではないかと思っています。

●下水汚泥の低位発熱量

下水汚泥を乾燥させることとは、どんなことかを少し述べたいと思います。これは燃焼工学の教科書に載っているのですが、下水汚泥の低位発熱量を探しました。高位発熱量のデータはあっても、低位発熱量のデータはなかなか見つかりません。下水汚泥の有機分の元素組成が算出できずに困っていましたが、オランダの研究所が低位発熱量を下水処理場か

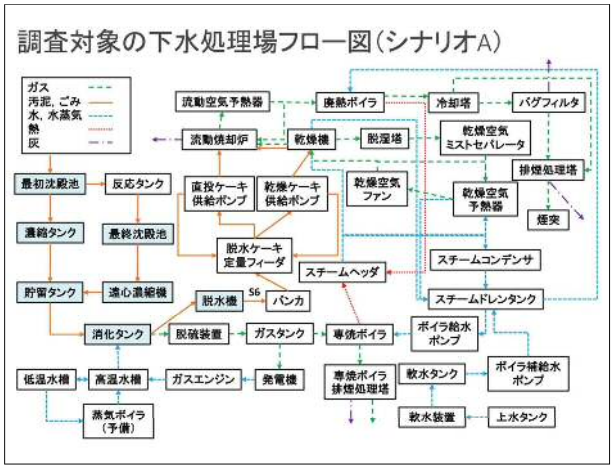
らのサンプルとして公表していました。この点で示しているものが実際のデータで、グラフを見ると二極分化しています。乾燥後のものか乾燥前（水分80%）のものしか当然ありません。水分を50%にまで乾燥して下水汚泥を利用することまでなされていないので、当然そのような分析データは存在しません。

●デューロンの経験式（低位発熱量）

ここに我々の燃焼工学分野で、組成が完璧に分からない燃料の発熱量の推算の際に用いる経験式の知見を導入しました。この式を見ていただくと、低位発熱量というものは、高位発熱量ー水が蒸発する時に奪う潜熱群、もっと言いますと有機分に含まれる水素分子が水になって、凝縮することなしに蒸発潜熱を持ち逃げする分、これらを引いたものが低位発熱量だという式があります。実は最初から下水汚泥に含まれる水分と、低位発熱量の関係は比例するという、一次関数であることが分かります。ということは、あとは定数を統計的に処理することによって求めればよいだろうと考えました。今回の場合ですと、乾燥された汚泥のサンプリングデータの中から高位発熱量を求めまして、そこに2.44という蒸発の潜熱に関わる定数を足し合わせた値、－16.1 というのが比例定数として出てきます。そうするとY切片の値も決まり、このような値になります。これらのモデル化によって、水分50%にまでなった時の下水汚泥が、どのような低位発熱量を持っているかが推算できる。これがモデル化の1つの手法になります。

●調査対象の下水処理場フロー図、都市ごみ焼却施設物質フロー図（シナリオA）

もちろん全てのプロセスをモデル化するというところで、全てのプロセスをピックアップする必要があります。その連携を全てフロー図で描き表す必要があります。下水処理場のフロー図はこれだけあります。これなしでは、どこにどれだけの関数があるのか見えませんから、フロー図をまず作成することが必ず必要になります。同様にこちらが都市ごみ焼却施設のフロー図で、下水処理場のものより少なくなりますが、全ての物質の質量およびエネルギーの流れを図示しています。



●施設連携シナリオ（シナリオB、シナリオC）

これらを統合します。都市ごみ焼却施設の灰ピットの中から灰を取り出してきて、脱水機を出た下水汚泥と混合させて下水汚泥を乾燥させるプロセスを経て焼却炉に投入します。もちろん最初から焼却炉に入っていた都市ごみはそのままで、そこからボイラーを経て蒸気タービン発電で発電する。このように統合すればどんなフローになるかも合わせて作成しています。

●水分80%→50%に必要な熱量

話が前後しますが、最初の水分を飛ばすために必要な熱量が排気だけでまかなわれるかという、熱量のバランスの問題があるかと思いますが、先ほど話した11万8,652 kg／日を2万7,832 kg／日に減らすために必要な熱量というものを、潜熱と顕熱、全水分を100℃まで加熱し、さらに蒸発させる時の潜熱を計算します。そうすると焼却炉に投入された都市ごみと、乾燥後の下水汚泥として投入された発熱量の6.5%を乾燥に回すとよいということが言えます。これを焼却灰だけで行うのは少し難しいのかもしれませんが、これができるとエネルギーの面で成立するということになります。もっと言えば例えば下水汚泥を脱水して、ストーカ式の焼却炉にそのまま入れて発電までできる、つまり自燃していることが前提です。そのために乾燥させなければいけない水分が50%ではないはずです。技術革新による焼却炉の性能向上などで、70%程度乾燥させれば自燃するという研究プロジェクトもあると聞いています。この辺りのバランスは、実際にどのような焼却炉を考え、どのような熱目標を想定するかというところで設計要素になると思います。申し上げたいのは、

完全に絵空事の数字のバランスではないことだけは強調したいということです。

●大阪府域の下水処理場、都市ごみ焼却施設に関するデータの収集

今回のヒアリングで得られた数字を紹介します。調査対象となった下水処理場は流域処理人口が約81万人、都市ごみ焼却施設は日量487tで、これらは道路を挟んで隣接しています。

●年間コスト

先ほど説明したシナリオで計算したコストがこの表です。下水処理場に焼却炉や煙突などが不要になる分、建築費や維持費を低減することによって、最大で年間28億円、50%以上というものすごいコスト低減となります。それはとりもなおさず1つ1つの機器設備が高額だということなのです。下水処理場でのヒアリングで一番驚いたのは消化タンクで、機械設備でなく土木の設備として扱われた際のコストには目を見張るものがありました。そのコストに見合う、消化や消化ガス発電なのかどうかという観点でのコスト試算が重要であろうと思います。私が新参者だからこそ、そう思うのかもしれませんが、減容化するため当時の技術として、消化タンク設備が必要だという社会ニーズがあったとは思います。それが現在の技術レベルから見て、今でもコスト的、環境的に成立し、さらに持続可能なものなのかどうかを見直す機会があってしかるべきではないかと思います。

●年間CO_2排出量

環境性の面から年間のCO_2排出量を見積もってみました。これはカーボンニュートラルを考慮に入れる前のものです。都市ごみを燃やした時のCO_2、下水汚泥を燃やした時のCO_2、これはどのように乾燥させるか、どのように燃やすかにはよらないから、差がないわけですが、このようなバランスになります。都市ごみの焼却、下水汚泥の焼却によって出てくるCO_2はほとんど全てを占めることが見て取れると思います。プラントを建設する時に出るCO_2やプラント動力に必要なCO_2を見積もったのですが、それらに対して都市ごみが燃える時のCO_2は支配的です。まずこの量のバランスを前提として認識した上で、シナリオB、Cの統合シナリオを考えた時には11kt - CO_2／年の低減効果があり、これは全体のCO_2排出量の6.6%に相当します。環境的にも持続可能であろうという数字になっていますが、その理由については、発電量が増えるということで説明できます。

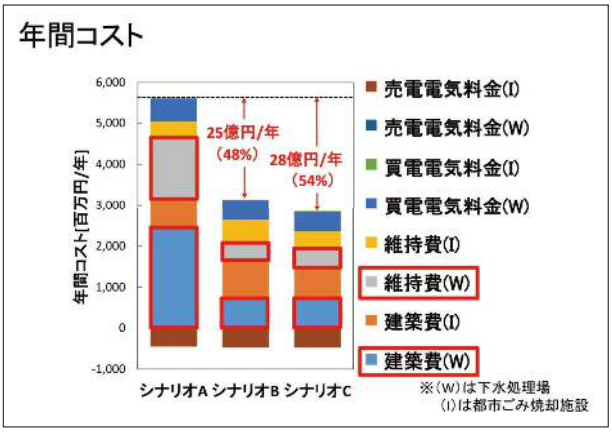
それを少し整理して申し上げます。都市ごみ焼却施設の発電量は、そこに下水汚泥も入ってくるから増えますが、下水汚泥の消化ガス発電が減るのではないかと思われがちですが、実は調査した下水処理場の消化ガス発電の発電量は、小さくて見えてこないような量のバランスになっています。しかし、下水汚泥を全量乾燥させ投入できて、高い発電効率の都市ごみ焼却施設の発電設備で発電すると、下水汚泥の全てのエネルギーを発電設備に回していけることになりますから、発電量は個々の設備で発電するよりも増えます。従ってこの設備が適切に統合できれば、コスト的にも環境的にも持続可能なものとして成り立ちうると言えます。

●稼働率

人口減少によって設備稼働率の低下が問題になると申し上げましたが、先ほどから申し上げている2つの設備の統合には、もう1つ大きな意義があります。下水処理量は今でも増えています。調査対象の下水処理場では、2012年に39万m^3／日ですが54万6,300m^3／日にまで増やすという計画があります。今回これを評価対象30年間として、2041年末までに線形的に増加させるという仮定を置いています。そして都市ごみ処理量は、リサイクルや人口減少などから減っていきます。増えていく下水汚泥と減っていく都市ごみという、2つの都市型バイオマスを扱う施設を統合させればそれらは相殺しあって、設備稼働率の低下をくい止められる特徴があるのではないかと考えています。実はここにも、シナリオを2つ（1人1日当たり都市ごみ排出量固定、排出量変動）を設定しています。

●稼働率（ごみ処理量の変動）

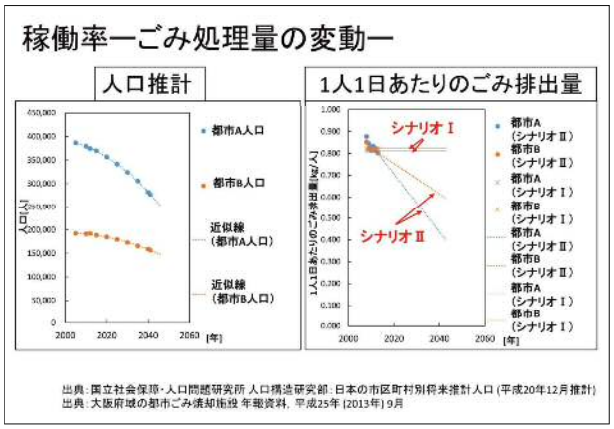
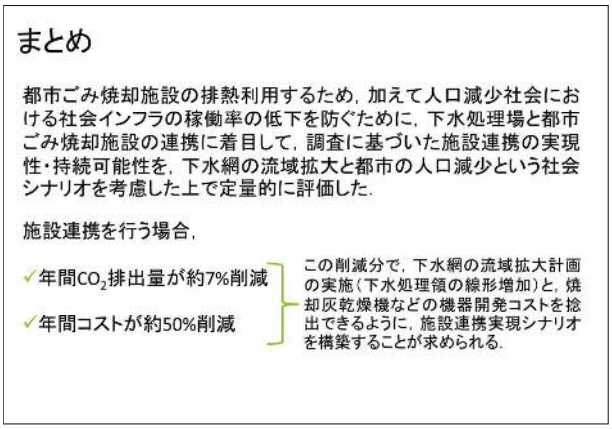
そして2つの市域にまたがっている都市ごみ焼却場ですので、都市Aと都市Bの人口推計を国立社会保障・人口問題研究所のデータから持ってきています。2つの都市の人口が減少して、例えばシナリオIとして1人当たり都市ごみ排出量は変化しないと考えますと、シナリオAで下水処理場は流域がどんどん拡大して下水汚泥が増えていくと仮定すると、今回の試算では2026年くらいに下水処理場は焼却炉を新しく設置しないと、下水汚泥を処理でき



ない事態になります。一方でシナリオＡの都市ごみ焼却施設は、１人当たり都市ごみ排出量は変化しないと仮定した場合に人口減少の分だけ減っていきます。例えば今の設備稼働率90%程度であっても、それが30年間に70%くらいまで低下するということが分かります。

●稼働率

統合させるとどうなるのか。ここにシナリオＢとシナリオＣ、この２つを立てた理由があります。今ある３炉を生かして、同じものを１炉追加する場合は、最初は設備容量が過剰です。ですから70数%の設備稼働率になるのですが、稼働率の低下は低い。ただ設備稼働率30%のシナリオＡで焼却施設が低下していくのと変わらない程度にしかならないのですが、最初から統合することを前提に焼却炉の規模を設定し、例えば調査開始年の2012年時点で同じと設定します。このグラフにあるように、30年間の設備稼働率の低下は90%～80%弱くらいまで食い止められる。ここに約10%程度の設備稼働率の違いが生じます。このようなもう１つの相性の良さが下水処理場と都市ごみ焼却施設にあることが分かりますし、当該設備連携による設備稼働率の適正化には、当初から設備連携を前提とした設備容量の設定を行うことが有効だといえます。当たり前といえばそれまでですが、そのようなことが分かります。

●まとめ

最後にまとめさせていただきます。都市ごみ焼却施設の排熱利用をするため、加えて人口減少社会における社会インフラの稼働率低下を防ぐために、下水処理場と都市ごみ焼却施設を連携させることに着目して、調査に基づく施設連携の実現性・持続可能性を、下水網の流域拡大と都市の人口減少という社会シナリオを配慮した上で、定量的に評価をしました。施設連携を行う場合、年間CO_2排出量が約7%削減され、年間コストが約50%削減されるということが示されました。この削減分で、下水網の流域拡大計画の実施と、焼却灰乾燥機など機器の新規開発のコストが捻出される可能性があり、これらが成立しますと、本日示したシナリオが実現できるのではないのかと考えております。