

スライド 1



私の方からは地球環境という観点から見た下水処理の今日的課題とその課題解決の方向性について、これまで私たち水倶楽部が実施してきた研究集会のエッセンスも紹介しながらお話ししたいと思います。

スライド 2



本日は学生さんも10人程度来られておりますので下水道のいろはについても少しご紹介したいと思います。新興住宅地の普通の道路風景かと思いますが、下水道いろはかるたのいで「犬も歩けばマンホールです」

スライド 3



このマンホールもよく見ていただきますと、道路上の大きなものと敷地内の小さなものがあるのがわかります。各家庭内の排水設備から公共下水道に繋がる箇所を示していきまして、それを繋ぐのが取付管、こうした排水設備、取付管の部分が下水道では意外と大事であるということで、昨年1月当方の水倶楽部でも「排水設備と取付管の今日的役割」の研究集会を開催したところです。雨水は側溝へ、汚水を確実に下水道にというところが分流式下水道の基本になるところです。

スライド 4



同じく水道の止水栓とならんだ宅内の汚水ますを写しています。

スライド 5



もう一つのよくみる情景ですが、これは何を写しているかといいますと、浄化槽です。公共下水道が整備されましたので、この浄化槽は役目を終えたとみられますが、意外とそうではなく、トイレの水洗化が済んでいますので、なかなか公共下水道につないでくれないという問題が、近年下水道を整備した中小都市には多く残っているようです。浄化槽の地球環境上の問題も私の発表の中で触れてみたいと思います。

スライド 6



さて、私たち水倶楽部では古代ローマ時代の上下水道遺跡を見るためのツアーを組みました。マジョレ門城壁の上に3段に組みあがった水道水路が見えますが、当時百万人の人口があったといわれるローマではこうした水道水路が10本ほど整備され20kmから100km離れた水源からかなりの量の水が供給されていました。

スライド 7



そしてローマ帝国の首都であるローマにはクロアカ・マキシマと呼ばれる大下水溝が、水道施設が整備される前、紀元前6世紀から整備されていました。ローマの都市の低平地の都市開発のため水はけを良くすることが当初の目的でしたが水道施設の完成と同時に供給された水の排水を行うという役目が大きくなりました。このクロアカ・マキシマは下水道の元祖として教科書によく出てくるものであり、私たちも一度は見てみたいと思っていたものです。数年前までは一般見学のサービスもあったようですが、残念ながらその箇所が危険となったということで見学禁止となっていました。この写真は、ローマの遺跡の中心地区フォロ・ロマーノにある嘗ての見学入口です。

スライド 8



それではせめてクロアカ・マキシマのテヴェレ河への排水口をみようということになりました。これは排水口近くで撮った訪問メンバーの写真です。

スライド 9



テヴェレ河にかかっているパラティーノ橋の左岸側すぐ直下にクロアカ・マキシマの排水口があります。遊歩道がありますのでかなり近くから見るすることができます。

スライド 10



橋の上から撮った写真です。木の枝に邪魔されながらも2000年前に凝灰岩でつくられたアーチ状の石組みをみることができました。

スライド 11



古代ローマ帝国ではどこの都市にも水道と下水道が整備されていました。ミラノの地下鉄の駅構内に展示されていた下水渠の遺跡です。

スライド 12



これはローマの海上の入口都市、テヴェレ河河口にあるオスティアの遺跡に残っている公共水洗トイレの跡です。ローマ時代水道、下水道の整備とともに水洗トイレの使用がかなり一般化していたという記録です。このように水洗トイレというものはもし洗浄水にかなう十分な水の供給があれば万人がその使用を欲するものではないかというように考えられます。

しかし、ローマ帝国滅亡の後、戦乱の中世の時代に入りますと、水道、下水道は全く顧みられなくなります。多分都市の防衛上の問題から水道施設を保持できなくなったのだと思います。

そして産業革命の時代を迎え再び都市が発展を始めたときに都市衛生上の観点から近代上下水道が出来上がってきます。

し尿を入れるか入れないかの論争を経て、最終的にし尿を受け入れかつ下水処理施設を併設する近代下水道が19世紀に出来上がってきました。

本日はそのへんの話は少し飛ばしまして、現代の問題、下水の高度処理の課題についてお話ししたいと思います。

スライド 13



これは個人の住宅から見つかったトイレ跡です。  
水洗化されていたと思われます。

スライド 14

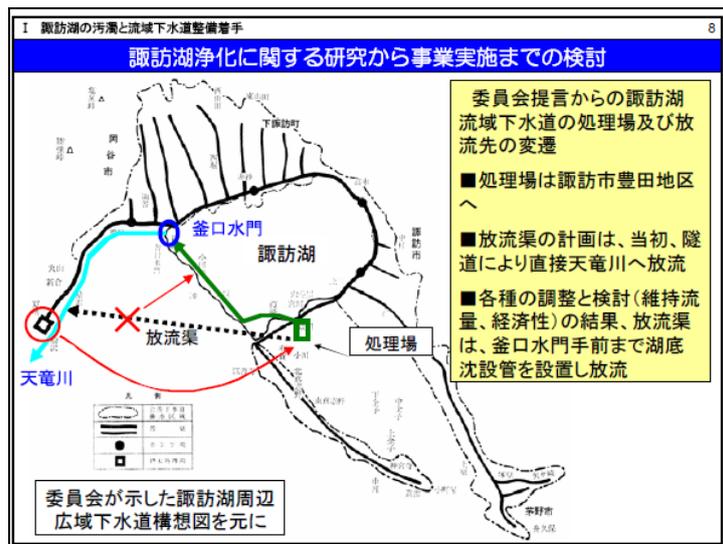


2009年に実施しました「諏訪湖の水質改善と下水道」に関する研究集会のエッセンスを紹介します。

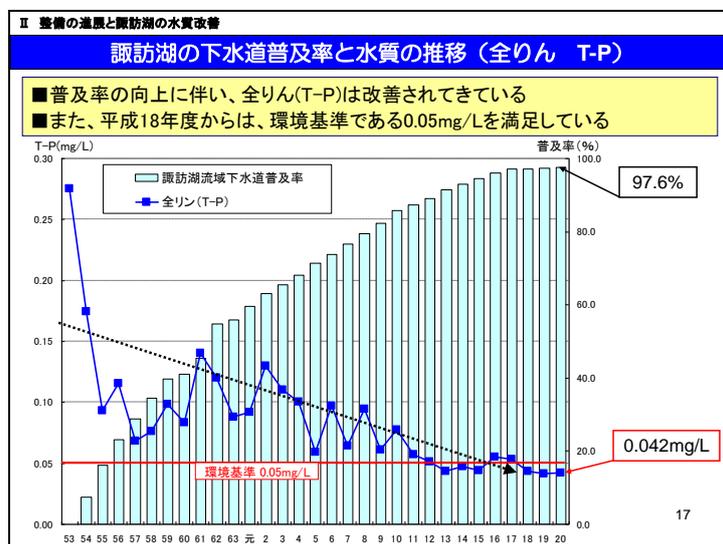
スライド 15



諏訪湖ですが、湖の周辺は随分と市街地が発展している様子が伺えます。



当時、昭和30年代後半からアオコの発生が大きな問題となっていました。この解決にどのような下水道計画で臨もうかということが大きな課題となっていました。天竜川の維持流量、経済性などを検討した結果、放流渠を釜口水門手前まで湖底沈設管を設置し放流することとなりました。私は、関係者ももちろんそうだと思いますが、諏訪湖の富栄養化制御の観点も含め最良の選択をされたものと考えています。



諏訪湖流域下水道のすばらしさはその計画の卓越性だけにあるわけではありません。流域の普及率の97%という随分と高い数値にも現れています。それだけ周辺の住民の方々の意識の高さ、あるいは行政の指導力の高さにも裏打ちされているものと思えます。その結果、現在ではリンについては環境基準を達するレベルまで水質改善が図られています。

II 整備の進展と諏訪湖の水質改善

**汚濁した諏訪湖の水質改善状況**

- 下水道の整備とともに、水質が改善
- 透視度が回復(整備前は透視度"ゼロ")
- アオコの発生が減少
- 泳ごう諏訪湖イベント開催

昭和46年の状況(下水道整備前)

昭和62年の状況  
供用開始から8年経過

平成21年の様子  
供用開始から30年経過

18

アオコの発生の状況を下水道整備前、整備後8年後そして現在の様子を比較しています。ぐんときれいになったのがわかるかと思います。

II 整備の進展と諏訪湖の水質改善

**泳げる諏訪湖を目指して**

- 昭和33年までは、諏訪湖で水泳大会などを行っていた
- 平成12年、水質が改善されてきたことによる「泳ごう諏訪湖」イベント開催

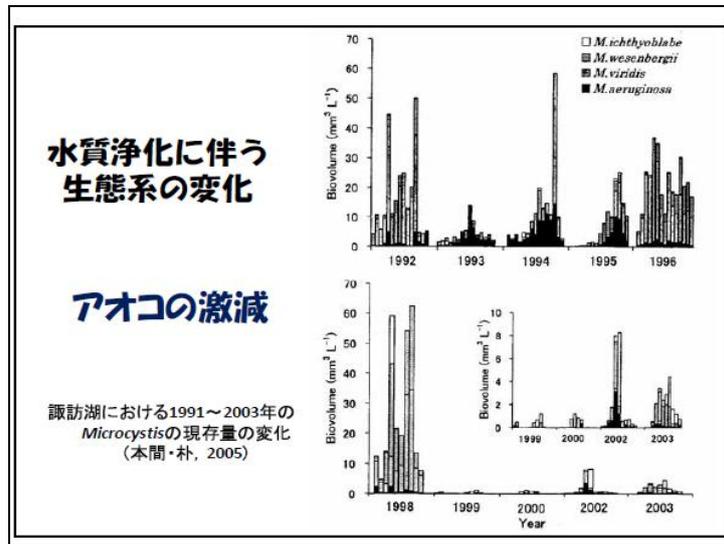
かつての水泳大会の様子

昭和16年諏訪湖畔

平成12年度「泳ごう諏訪湖」  
(諏訪環境まちづくり懇談会主催)

19

平成12年ではかつての水浴場としての諏訪湖が復活しています。



これはその時に信州大学の花里先生が発表されたデータですが、1999年を契機としてそれまでのアオコの発生がピタリと収まった様子を示しています。

徐々にきれいになっていくというよりは、突然アオコの発生がなくなり透明度が増すという現象が起きる、これを先生は水質が変わることにより生態系構造が大きく変わる「レジームシフト」という用語で説明をされていました。

## 研究集会「下水の高度処理とリン資源の回収」2008.12.12

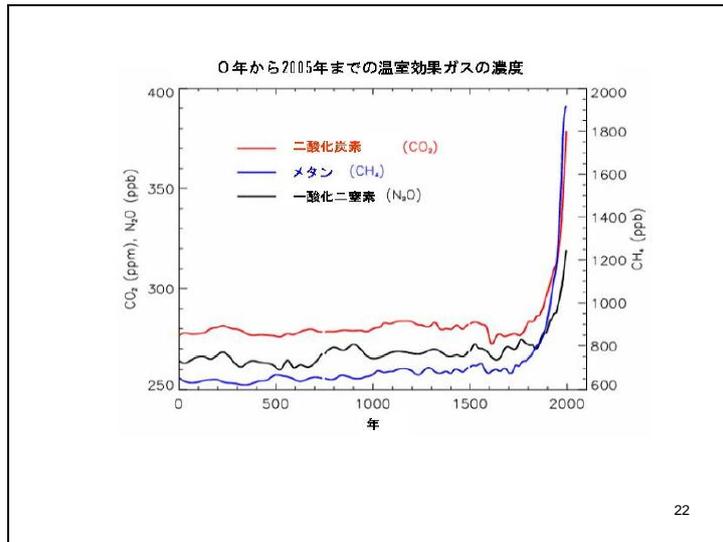
### 総合討議

- リン肥料の価格の高騰、その2割程度のリン量が下水道に集約
- 焼却灰、溶融スラグに濃縮されているリン成分の回収が課題(8割の汚泥が焼却溶融)
- 下水道回収リンの品質および価格(二つの開発技術の例)
- 回収残渣の処分・利用技術
- 回収リンの流通販売機構

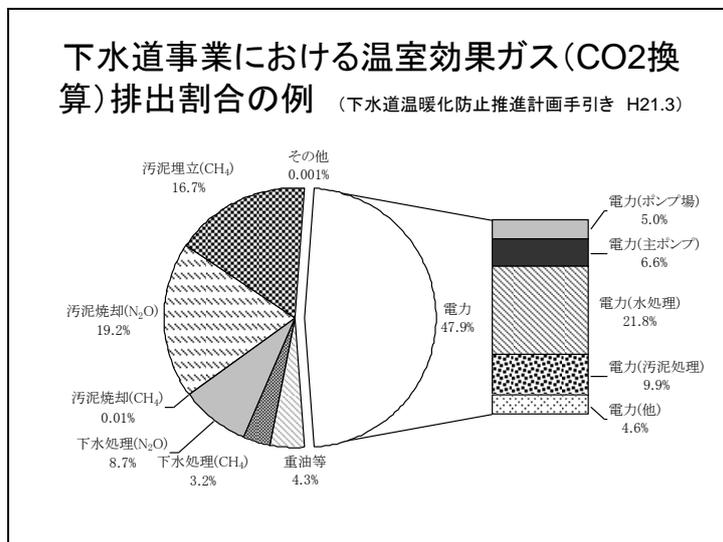
高度処理とリン資源の回収という観点からも2008年に研究集会を開いております。そのときのまとめがここに箇条書きにされています。

リンは数年前から国際的に戦略的な物質と位置付けられていまして、下水道に集約されているリンをどのように回収再利用をするかが焦眉の課題となっています。リンの除去技術はそれほど難しいものでなく、焼却灰からの回収も経済的な範疇に入ってきていますので、あと少しの努力で下水道回収リンがもっと一般的に市場にでてくるのではないかと期待しています。そうしたことは下水からリンを除去する高度処理も同時に推進されるということを示していることと思われます。

そこで私は高度処理の課題はリンというよりは専ら窒素をどう扱っていくかにかかっているのではないかと考えています。



これは温室効果ガスの大気中濃度の過去からの推移を示しています。和田先生のご講演にもありましたように二酸化炭素以外にメタンおよび一酸化二窒素の上昇も大きな問題になっているように思えます。

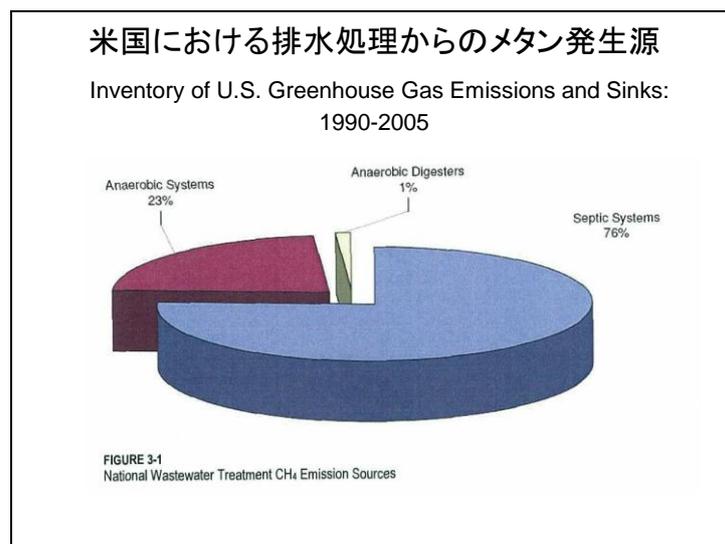


この図は花木先生が委員長をされてつくられました「下水道温暖化防止推進計画の手引き」に出ているものですが、我が国の下水道からの温室効果ガスの発生の総和値を基にその割合を示したものです。

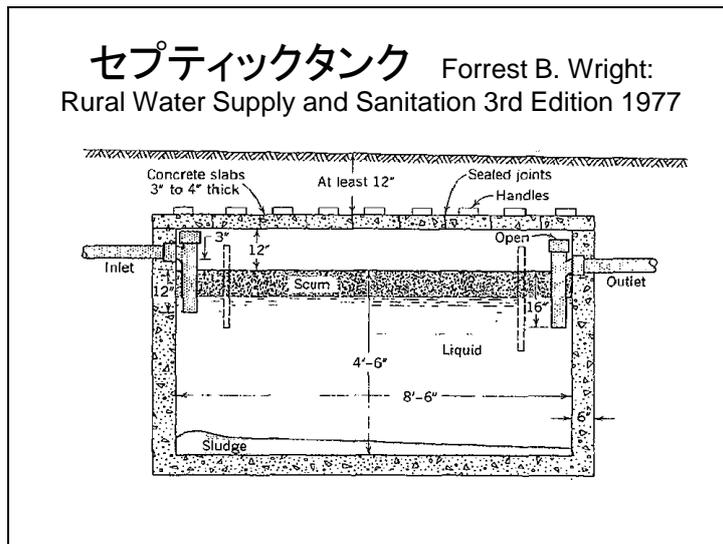
右側半分が電力や重油などの化石燃料起因の二酸化炭素発生となっていますが、左側は汚泥

埋立、汚泥焼却それに下水処理から発生するメタン、一酸化二窒素起源の割合が示されています。ここに示されていますように、下水道事業におきましては省エネルギーなどで右側の部分を小さくすることももちろんですが、左側の部分のメタン、一酸化二窒素に起因する部分の削減に重点的に取り組んでいく必要があることが示されているかと思えます。

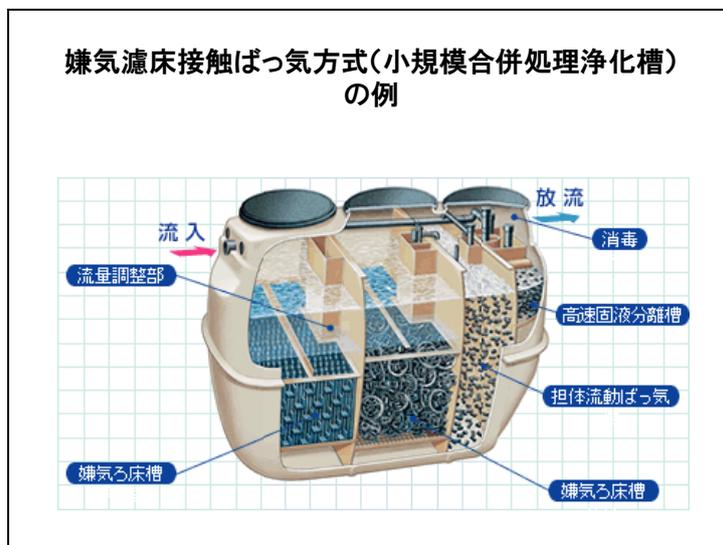
スライド 24



これは米国における排水処理からのメタン発生状況の見積もりデータです。下水道の集合処理がサービスされていない区域のセプティックタンクからの発生が4分の3となっています。その他は集合処理でも嫌気性ラグーンなどの嫌気性処理から発生するのが23%、そして汚泥消化タンクから放出漏出されるメタン量が1%と見積もられています。



米国で使用されているセプティックタンクはこのようなもので、滞留時間が半日から1日の貯め槽でここで嫌気性分解が起こりますので、かなりメタンが出てしまいます。米国では約2割の人口がこのタイプの個別処理によっているのですが、排水処理からのメタンということでは、その4分の3がここから出てくるということになります。



これは日本の代表的な合併処理浄化槽ですが、この前半部分は嫌気性分解が意図されているので、ここからも同様にメタンがかなりの量でてくることとなります。個別処理の技術の大半はこのメタン発生の問題を解決できていないということをよく知っておく必要があります。

### 高度処理実施処理場(5箇所)の 単位電力消費量

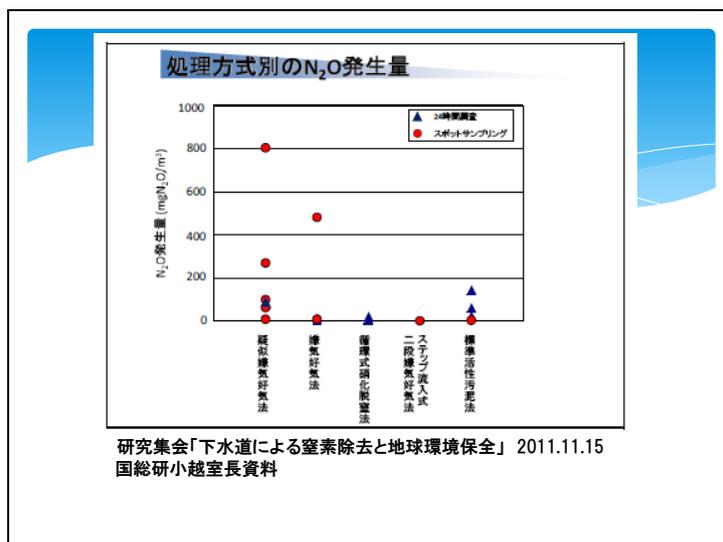
Unit electric power consumption for advanced wastewater treatment plants

単位: kWh/m<sup>3</sup>-処理水量

| 項目                        | 窒素・りん除去法の<br>範囲 | 窒素・りん除去法の<br>平均値 | 標準活性汚泥法の<br>平均値 |
|---------------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 流量<br>[m <sup>3</sup> /d] | 1,733~141,395   | 37,651           | 51,496          |
| 単位消費電力量<br>(水処理系のみ)       | 0.297~1.07      | 0.362            | 0.194           |
| 単位消費電力量<br>(全処理場)         | 0.551~1.26      | 0.684            | 0.401           |

出典: 下水の高度処理と国土保全 佐藤和明 土木研究所資料第3727号 (2000)

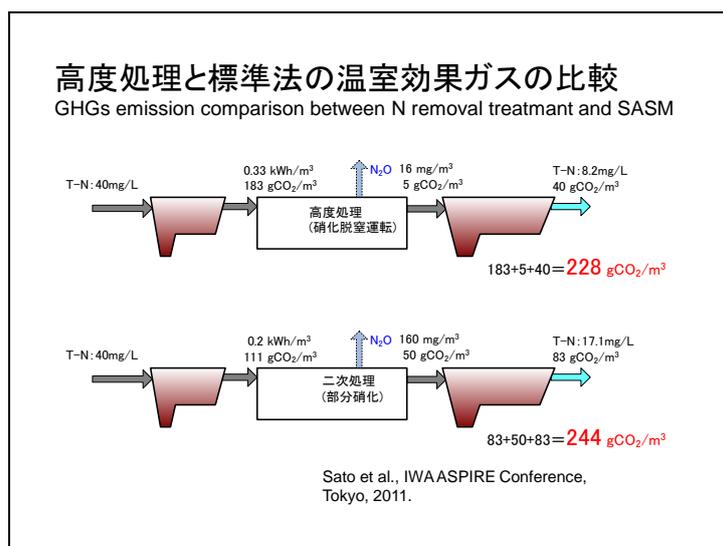
これは過去に私が調べました高度処理の消費電力量を通常の標準活性汚泥法のものと比較したものです。真ん中の段の水処理だけの1m<sup>3</sup>当たりの消費電力量を比較してみましょう。標準活性汚泥法の0.2kWh/m<sup>3</sup>という値は100か所近くの値を平均したものですので信用のおける値です。これに対して高度処理の0.36kWh/m<sup>3</sup>という値は5か所の平均ですので参考値程度のものでしょう。しかし、高度処理は窒素の酸化でそれだけエアレーションを必要としますので、通常の2次処理に比べて約1.5倍の電力消費がみこまれることとなります。それはそれだけ温室効果ガスの二酸化炭素を排出するシステムということになります。



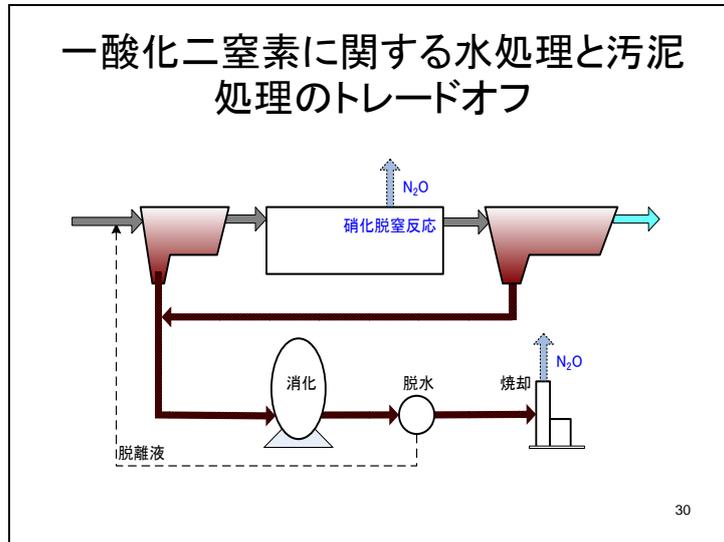
しかし、高度処理を温室効果ガスの発生という観点から正確に評価するためには水処理から発生する一酸化二窒素の量が問題となります。この図は各プロセスからの一酸化二窒素の発生量の比較の図です。三角形のプロットが24時間データですので重要なプロットです。標準活性汚泥法より循環式硝化脱窒法が低い値になっていることがわかります。この関係は世界の常識と逆です。すなわち世界では、硝化脱窒が生じない2次処理では殆ど一酸化二窒素は出ないで、高度処理になるとこれが出るという理解が一般的となっています。硝化反応および脱窒反応と付随して一酸化二窒素がでるといのが発生理論ですからそういうことになります。

わが国では標準活性汚泥法でも硝化反応が一部進行することが一般的となっていて、多分それが原因で一酸化二窒素が発生しているのだと思います。そして我が国の窒素除去法からの一酸化二窒素の発生が極めて低い例が出ているということは一酸化二窒素の発生をコントロールできる硝化脱窒法がある条件で成立するというを示しているものと思います。

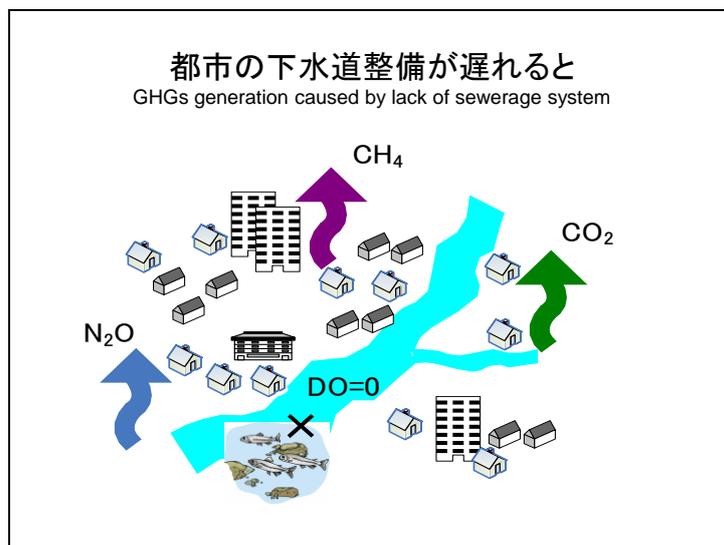
スライド 29



もし2次処理と高度処理がそうした関係であるならば、水系に出た窒素は一定の割合で、IPCCの報告では1%あるいは0.5%の割合で、一酸化二窒素に変換されるという関係がありますので、それを勘案しますと水処理で多く消費される電力量起源の温室効果ガスは処理プロセスおよび放流先の水域からの一酸化二窒素の発生量の関係でこれが相殺されることとなります。窒素除去に関する高度処理の合理性を論ずるとき、大きな根拠となる比較であると思います。



一酸化二窒素は汚泥焼却から出るものが現在当面の削減対象となっています。それは通常の800℃の焼却では汚泥に含有される窒素の10%近くが一酸化二窒素に変換されてしまうからです。現在850℃の高温焼却で対応がなされていますが、それでも3%近くの窒素が一酸化二窒素に変換されます。水処理では先ほど触れましたように、0.3%とか0.5%のオーダーですので1オーダー高いということになります。ですので、現状の数値を前提とすれば汚泥消化起因の窒素を水処理で処理の方が温室効果ガスの関係からはより望ましいということになりそうです。



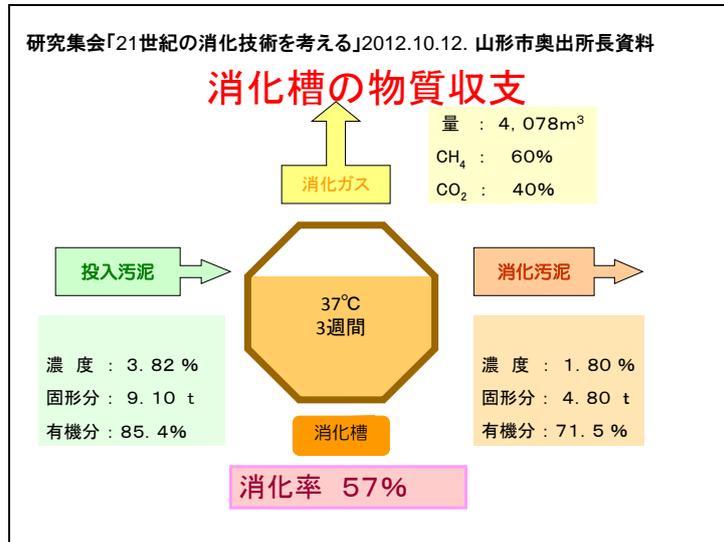
これまでの話を少しまとめてみますが、人口が集中した都市域で下水道の整備が遅れるとメタン、一酸化二窒素の発生を大きく許してしまうということになります。有機物はちゃんと二酸化炭素に、そして窒素は利用あるいは適正に処理するといことが必要かと思ひます。

スライド 32

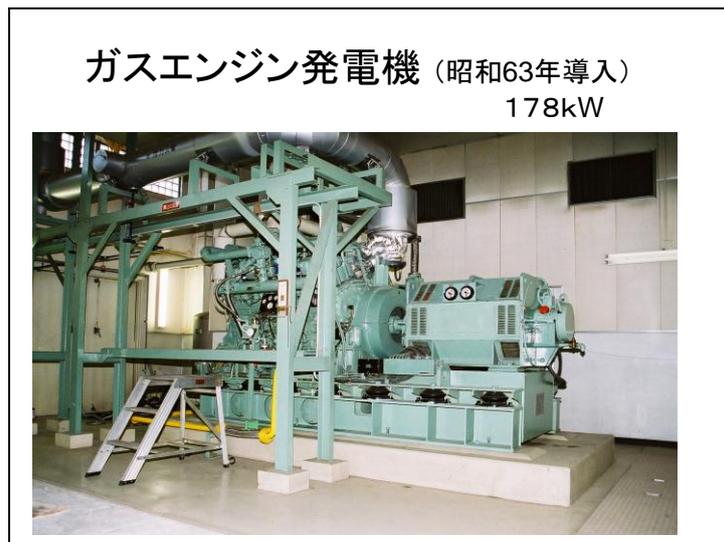
### 温室効果ガスからの視点

- 温室効果ガスの観点よりの浄化槽との比較
- 下水道システムからの温室効果ガス発生
- 下水道の省エネルギー化、エネルギー回収
- 下水道システムに流入してくるC源(有機物)はエネルギー回収して二酸化炭素へ、N源は回収利用あるいは窒素ガスに
- 下水道システムにより温暖化問題、資源問題の解決を図ろう

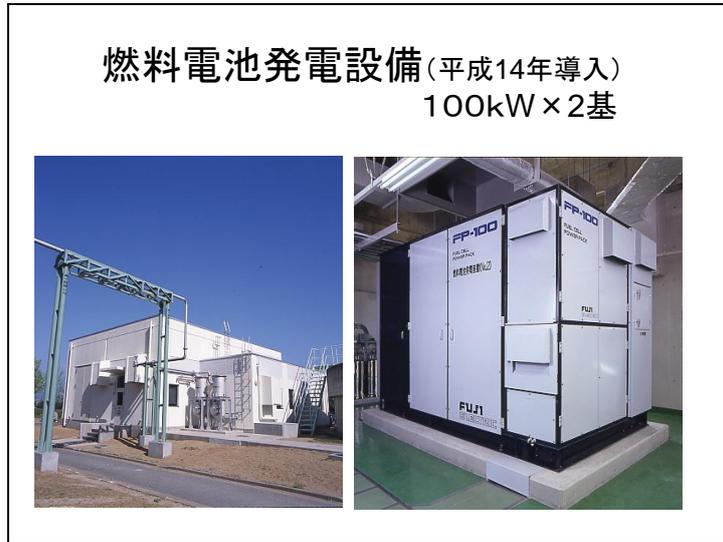
このまとめ、とくに第4項の「下水道システムに流入してくるC源(有機物)はエネルギー回収して二酸化炭素へ、N源は回収利用あるいは窒素ガスに」という視点が重要と思ひます。



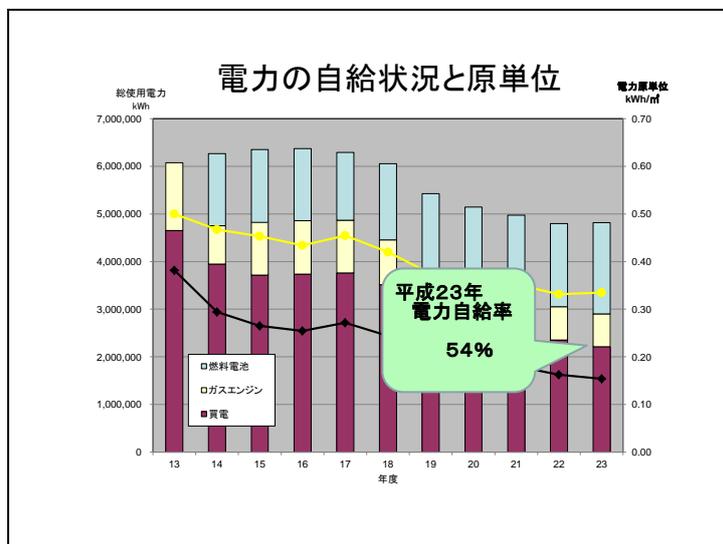
ここで昨年度に実施しました「21世紀の消化技術を考える」の研究集会から山形市の取り組みを紹介したいと思います。消化槽の物質収支を示した図です。半分以上57%の有機物がガス化されていることがわかります。



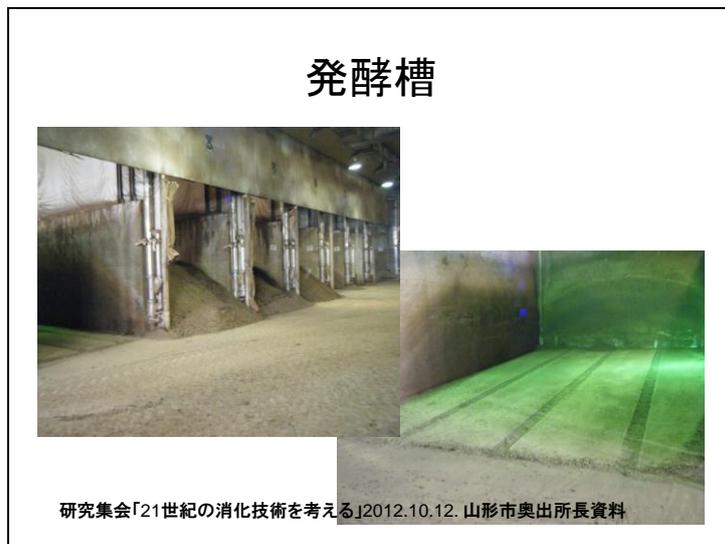
ガスエンジンの発電機です。昭和63年に導入されています。



新しく導入された燃料電池です。ガスエンジンで問題となっていたNOxの問題、騒音の問題のない21世紀のメタン発電技術であると思います。



消化ガスにより発電された電力量と処理場で消費される電力量を対比して示したものです。最近では省エネルギーの努力が実って総使用電力量は過去の8割ぐらいに下がってきています。それも関係してでしょうか、現在の電力自給率は54%となっています。随分高い数値です。



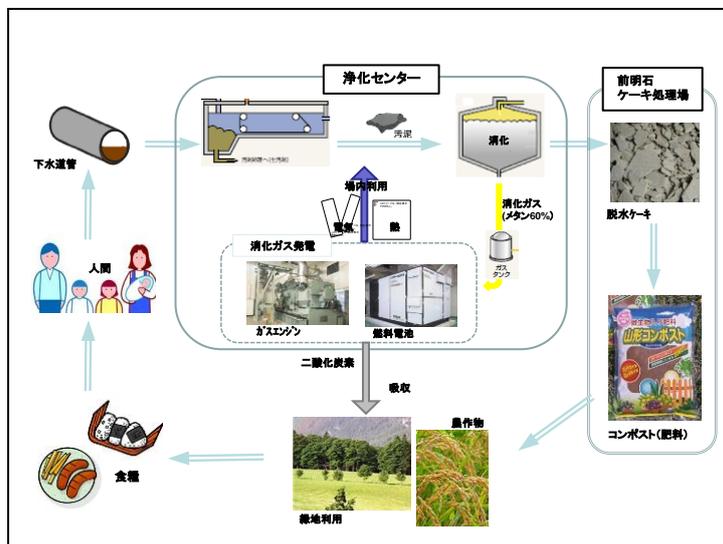
山形市のもう一つのリサイクル事業、汚泥コンポストです。この写真はコンポストヤードで、この床から曝気空気が供給されます。



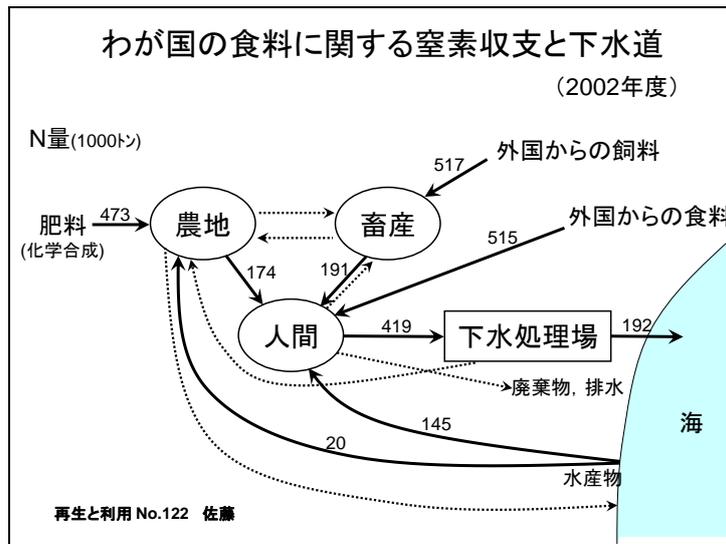
コンポスト製品です。



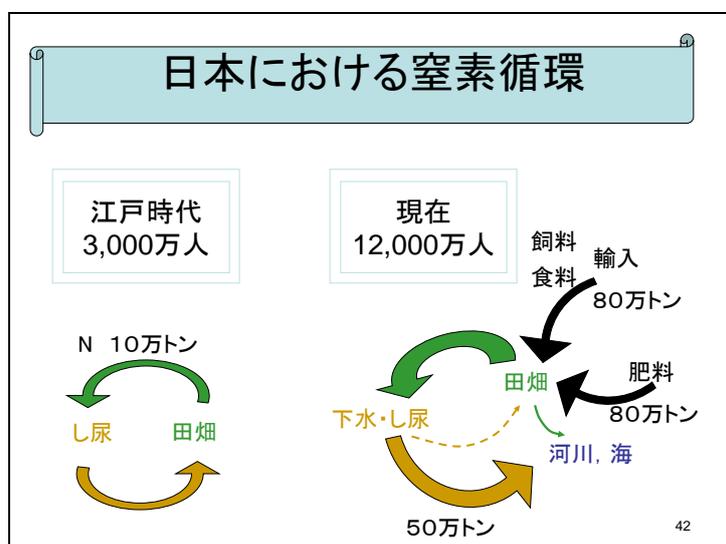
山形では秋に恒例の芋煮会という行事が大々的に行われますが、その主役となる里芋が汚泥コンポストを使って生産されています。



山形市の下水道を介したリサイクル、資源循環と温室効果ガスの二酸化炭素の排出削減の様子を表しています。山形市は人口20万人程度の中規模の都市ですが、下水道の中でエネルギー資源の再生を図り低炭素社会の創造に貢献するとともに、近郊農地とうまくタイアップして下水道の肥効成分をリサイクルしています。日本の中規模の都市の先駆的な事例となっています。



さて、山形市のようなリサイクルが我が国全部でできるわけにはいかないということも指摘しておきたいと思います。これは食糧需給表という統計数値を用いて我が国の食料に関する窒素量と下水道に集約されてくる窒素量を見たものです。外国からの飼料、食糧に起因する窒素量が随分と大きいということがわかるかと思えます。日本の国土にはこのように過剰に窒素が負荷されているのだと思えます。しかし、そのうち人間界に来ている窒素量の約4割が下水道に集約されていることもわかります。この関係は2002年度65%の普及率でみたものですが、現在、将来はもっと集約率が上がることとなります。これがこれからの下水道の役割を考えるときのヒントになるのではと私は思っております。



昔200年前の江戸時代の日本では、人のし尿が全面的にリサイクルされていた状況です。人口は当時3000万人でした。そして右側は現在の状況を対比したものです。人口は4倍の1億2000万人そして使用されている化学肥料の他に食料、飼料として同様の量の窒素が我が国に入ってきます。ですからもちろん窒素・リンのリサイクルはこれが可能な地域では下水道事業として推進することが重要ですが、日本全体で見た場合にはリサイクルと同様、適切な処理をしていくと言うことが同時に重要となってくると思います。日本では大都市といわれる部類の都市で、この窒素の処理が課題になると思います。

スライド 43

### 有効物質のリサイクル or 処理

- 循環型社会を実現するためにはできるだけリサイクルが望ましいが
- 少なくとも日本の国土では汚泥(有機廃棄物)の全量リサイクルは無理
- 窒素については水処理で脱窒素処理あるいは汚泥焼却で処理することが必要

43

これまでの話を少し整理しますと、このようなものになると思います。

## 我々が扱うバイオマス

「メタン発酵」 p.22

表-2.3 様々な有機固形物の化学分析値

| 有機固形物  | 含水率  | COD <sub>Cr</sub> | 全窒素     | VS/TS比 |
|--------|------|-------------------|---------|--------|
| 調理くず   | 73.4 | 480,000           | 12,200  | 95.4   |
| 生ごみ    | 82.3 | 215,000           | 4,260   | 93.5   |
| 水産加工残渣 | 74.7 | 380,000           | 165,000 | 91.7   |
| 牛排泄物   | 66.2 | 300,000           | 8,630   | 84.9   |
| 豚排泄物   | 74.7 | 310,000           | 9,470   | 78.8   |

単位:含水率(%), COD<sub>Cr</sub>(mg/kg-湿重), 全窒素(mg/kg-湿重), VS/TS比(%)

「メタン発酵」表-2-1 p.20 より

|      |                                                   |           |
|------|---------------------------------------------------|-----------|
| 調理くず | C <sub>17</sub> H <sub>29</sub> O <sub>10</sub> N | C/N比 14.6 |
| 下水汚泥 | C <sub>10</sub> H <sub>19</sub> O <sub>3</sub> N  | 8.6       |
| し尿汚泥 | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub> N   | 6.0       |

“Metcalf & Eddy : Wastewater Engineering 3<sup>rd</sup> Ed. 1991” より

|    |             |                           |             |            |          |
|----|-------------|---------------------------|-------------|------------|----------|
| 下水 | BOD 220mg/L | COD <sub>Cr</sub> 500mg/L | TOC 160mg/L | T-N 40mg/L | C/N比 4.0 |
|----|-------------|---------------------------|-------------|------------|----------|

窒素除去あるいは窒素の取り扱いが21世紀の大きな課題になるだろうということを述べました。下水にはし尿に起因する部分がかかなり多いと思いますが、窒素が随分多く含まれていまして、他のバイオマスの炭素・窒素比が10とかそれ以上である場合が一般的なのですが、下水はC/N比4と随分窒素成分の勝った構成となっています。

そして、下水の高度処理を実施する場合、生物学的脱リン、生物学的脱窒で必要となるC源、カーボン源が一般的には足りないという関係があります。どこからカーボン源をもってくるのがよいのでしょうか。



そこで期待されるのが、台所ごみ、生ごみを破碎、ジュース化するディスポーザです。生ごみのC/N比は通常の下水より随分と高くなっています。この写真は私のところのシンクにつけたディスポーザです。省エネルギーで温室効果ガスの発生を低い下水処理を目標とすると、下水成分としてはどのような構成が望まれるのか、ということも考えてみる必要があります。下水道の機能をより高めるディスポーザの使い方という問題も含めて、私ども水倶楽部は積極的にこの課題に取り組んでいます、ということをお最後に付け加えておきたいと思えます。

**下水処理に関する今日的課題と展望  
(まとめ)**

- 人口問題に起因する窒素サイクル増加の課題は地球上の大きな問題
- 世界の都市人口(32億人)の半分に普及した下水道には多量の有機物と共に窒素が集約されている
- 1970年代に確立された生物学的窒素除去法は温室効果ガス問題も含めその解決法を提示する可能性大
- 地域の水環境保全、地球環境保全を目標に高度処理、資源回収の機能を有する下水道システムを世界に普及・推進しよう

46

本日の私の発表をまとめてみますとここに書いてあるようなことになるかと思えます。ご清聴ありがとうございました。