

(20) 地域特性を考慮した嫌気性消化プロセスと消化ガスの利用に関する LCA

LCA for the Sludge Disposal and Beneficial Use of Biogas in Nagaoka City

安井 英斉* 小松 和也* 松橋 隆治** 大橋 晶良*** 原田 秀樹***

Hidenari YASUI, Kazuya KOMATSU, Ryuji MATSUHASHI, Akiyoshi OHASHI, Hideki HARADA

ABSTRACT; Process schemes of municipal sludge treatment to reduce greenhouse gas emission in Nagaoka city were evaluated by conducting pilot-scale experiments and review of annual operational reports. (1) High-concentrated anaerobic digestion process with partial ozonation on digested sludge to improve biological degradability, (2) high-concentrated anaerobic digestion process without ozonation, and (3) conventional anaerobic digestion process, were compared its energy consumption and the amount of dewatered sludge cake to incorporate CO₂ emission equivalent in the subsequent incineration processes. For beneficial use of biogas, an application of power generation and recovery as alternative natural gas for local sectors were assessed using Input-Output Model with dynamic LCA procedure. It appeared that the scheme of the partial ozonation process with power production gave minimal CO₂ emission equivalent because the produced energy was expected to cover all of the energy demand for the plant operation and the production of dewatered sludge cake from the process was only 40% of that from the conventional, which minimizes the hauling and the needs of fuel at the incineration process. The scheme of the partial ozonation process with alternative natural gas was ranked second to contribute the reduction of CO₂ emission equivalent.

KEYWORDS; Anaerobic digestion; Greenhouse gas; Incineration; Kyoto protocol; LCA

1 はじめに

地球温暖化の主原因のひとつと考えられている二酸化炭素の排出削減に向けて、日本をはじめとする各国は様々な取り組みを進めている。この国際的な枠組みに 2005 年に発効した京都議定書がある^{1, 2}。京都議定書は、温室効果ガス排出量について法的拘束力のある数値目標を各国毎に設定するもので、日本は 2012 年までに温室効果ガスの排出量を 1990 年比で 6%削減することが義務づけられている。このことで、以前にも増して省エネルギーの検討・新エネルギーの活用が積極的に検討されるようになり、日本政府による「バイオマス・ニッポン総合戦略」が大いに注目されている³。バイオマス・ニッポン総合戦略の意図は、二酸化炭素の排出量に計上されないバイオマスを化石燃料の代替エネルギーに用いることにある。これについて、総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会では、2010 年度までに発電・熱利用を含めて、原油換算で 101 万 kL のバイオマスエネルギーを導入する目標を報告した⁴。エネルギーに利用可能なバイオマスには、木質系廃棄物や有機汚泥等が挙げられる。この中でも下水汚泥は、汚泥の成分や発生量の変動が少ないこと、中規模以上の下水処理施設であれば一ヶ所で大量のバイオマスが回収可能なこと、等の理由から有望な資源と考えら

* 栗田工業株式会社 開発本部 (R&D Division, Kurita Water Industries)

** 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境学専攻 (Institute of Environmental Studies, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo)

*** 長岡技術科学大学 環境システム工学系 (Department of Civil and Environmental Engineering, Nagaoka University of Technology)

れる。実際、下水汚泥は、有効利用されるべきバイオマスの一つとして、バイオマス・ニッポン総合戦略に位置づけられている。

下水汚泥を資源として利用するには様々な方法がある。嫌気性消化プロセスは、この代表であり、汚泥有機物からメタンガスを回収できる。また、汚泥をオゾン処理することで消化が促進されることも最近報告されており、このような新技術を導入すれば、従来よりも多量のメタンガスを回収できる可能性がある^{5,6}。メタンガスのエネルギー利用では、都市ガス原料の他に、ガス発電によって電力を生産することも選択肢の一つとなる。様々な選択肢の中でシステムの最大効率を得るためには、その地域特性、下水処理施設の運営状況や汚泥の組成等を総合的に考慮した汚泥処理の LCA を実施する必要がある。なぜなら、各単位プロセスの合理的な組み合わせは、地域や施設の状況によって大きく異なることが予想されるからである。この背景から、筆者らは、汚泥バイオマスの有効利用とその効果を調べることを目的として、新潟県長岡中央浄化センターの下水汚泥処理を選び、嫌気性消化プロセスの実験的検討をおこなうとともに、当市の下水汚泥処分状況を系統的に分析した⁷。本論文は、これら一連の研究の中で、長岡市の地域特性と長岡中央浄化センターの特徴を考慮した嫌気性消化プロセスの LCA について述べるものである。

本論文では、(1)従来の嫌気性消化プロセス、(2)嫌気性消化槽の汚泥を高濃度で運転することで消化を促進するプロセス、(3)消化汚泥をオゾン処理して槽へ返送することで消化を促進するプロセス、の3種類を比較した⁸。(2)と(3)は、汚泥有機物の消化が多くなるため、汚泥の TVS/TS 比が(1)よりも低くなり、脱水ケーキの含水率は低下すると予想される。脱水ケーキの含水率は、焼却による二酸化炭素の排出量や場外処分費用に影響するため、このことは重要な点である。また、汚泥処理設備の運転を夜間に集中的におこなえば、昼夜の連続運転と較べて設備の規模がやや大きくなるものの、運転に関する等価二酸化炭素排出量の削減できる可能性がある。そこで、(1)～(3)のプロセス評価に加えて、運転の時間帯を考慮した動的な分析も実施することにした。

2 解析方法

2.1 長岡中央浄化センターの汚泥処分状況

長岡中央浄化センターの汚泥処理フローを模式的に Figure 1 に示した^{9,10}。最初沈澱汚泥は、重力濃縮槽、余剰汚泥は機械濃縮処理をそれぞれ経由して、嫌気性消化槽へ導入される。下水処理施設には分流式と合流式の二種類があり、近年は分流式に由来する汚泥の割合が増加する傾向にある。嫌気性消化槽ではガス攪拌によって汚泥が混合され、この消化汚泥は遠心脱水機によって脱水される。長岡中央浄化センターには鉄化合物を多く含む下水が流入するため、汚泥の TVS/TS 比は近隣の流域下水処理場と較べてやや低い。これに対応して脱水ケーキの含水率も約 76%程度の値が通年で得られており、一般的な消化汚泥よりも脱水されやすい特徴を示している。

搬出される消化汚泥の脱水ケーキは、約 1/3 が隣接する公営のゴミ焼却施設（寿事業所）において一般廃棄物とともに混合焼却される。一般廃棄物の熱量が十分に高いため、この混合焼却では補助燃料は使われない。焼却処理は昼夜で運転されており、約 5 週間毎に清掃のために焼却炉が休止する。発生した焼却灰は、長岡市郊外の官営の管理型処分場に埋め立てられる。

残りの 2/3 の脱水ケーキは、民間委託で処分されており、新潟県にある 27 の排水処理施設から搬出される脱水ケーキとともに隣接の柏崎市にある中間処分場で焼却される。焼却の燃料には、重油の他に廃タイヤも用いられる。焼却炉の最大処理能力は 120 ton/day だが、現在の受け入れ汚泥量は、その 2/3 程度に留まるため、約 2 週間一回の頻度で清掃も兼ねて炉は休止する。焼却灰の一部は県外のセメント工場に送られ、エコセメント原料に再利用される。残りは、同敷地内の管理型最終処分場に埋め立てられる。嫌気性消化槽から発生する消化ガスは、脱硫設備・二酸化炭素吸収設備によって約 96%濃度のメタンガスに精製された後、北陸ガス（株）のガス工場へ圧送される。この販売されるメタンガスは、一年で約 500,000 Nm³ に及ぶ¹¹。

```

graph LR
    Sewage --> PST
    PST --> AT
    AT --> SST
    SST --> TreatedWater[Treated water]
    TreatedWater --> RecycleGas[Recycle as alternative natural gas]
    SST --> GravityThickener[Gravity thickener]
    GravityThickener --> CentrifugalThickener[Centrifugal thickener]
    CentrifugalThickener --> Biogas[Biogas]
    Biogas --> GasPurification[Gas purification]
    GasPurification --> IncinerationPublic[Incineration by public sector]
    IncinerationPublic --> IncineratedAshPublic[Incinerated ash]
    IncineratedAshPublic --> LandfillingPublic[Landfilling by public sector]
    GravityThickener --> PrimarySludge[Primary sludge]
    PrimarySludge --> AnaerobicTank1{{Anaerobic digestion tank #1}}
    AnaerobicTank1 --> AnaerobicTank2{{Anaerobic digestion tank #2}}
    AnaerobicTank2 --> StorageTank[Storage tank]
    StorageTank --> CentrifugalDewatering[Centrifugal dewatering]
    CentrifugalDewatering --> DewateredSludgeCake[Dewatered sludge cake]
    DewateredSludgeCake --> IncinerationPrivate[Incineration by private sector]
    SludgeFrom27WWTP[Sludge from 27 WWTP in Niigata prefecture] --> IncinerationPrivate
    IncinerationPrivate --> IncineratedAshPrivate[Incinerated ash]
    IncineratedAshPrivate --> LandfillingPrivate[Landfilling by private sector]
    IncineratedAshPrivate --> RecycleCement[Recycle for cement material]
  
```

The flowchart illustrates the wastewater treatment and sludge disposal process at Nagaoka WWTP. Sewage enters the Primary Sedimentation Tank (PST), then the Aerobic Tank (AT), and the Secondary Sedimentation Tank (SST). Treated water is recycled as alternative natural gas. Sludge is processed through Gravity thickener, Centrifugal thickener, and Anaerobic digestion tanks. Biogas is produced and sent to Gas purification, which then feeds into Incineration by public sector. Excess sludge goes to Anaerobic digestion tank #1, then to Storage tank, and finally to Centrifugal dewatering. Dewatered sludge cake is sent to Incineration by private sector. Sludge from 27 WWTP in Niigata prefecture is also sent to Incineration by private sector. The final products are Incinerated ash, which is Landfilling by public sector or Landfilling by private sector, and Recycle for cement material.

2.2 最適条件の探索アルゴリズム

```

graph TD
    Start([Anaerobic Digestion Process  
• Conventional AD  
• High-concentrated AD  
• High-concentrated AD with partial ozonation]) --> ProcessModel[Process model  
Estimation of state variables by  
changing ozone-input and sludge  
retention time in the AD tank]
    ProcessModel --> VSS{VSS degradation  
<Max.?}
    VSS -- No --> ProcessModel
    VSS -- Yes --> SS{Permissive  
SS conc.  
<Max.?}
    SS -- No --> ProcessModel
    SS -- Yes --> OptOps[Optimum operational  
condition for AD processes  
• Energy and material  
consumption for unit  
processes]
    OptOps --> AppScen[Application scenario  
• Power production (internal recycle)  
• Alternative natural gas (external recycle)]
    AppScen --> LCCO2{LCCO2  
<Min.?}
    AppScen --> OpCost{Operating cost  
<Min.?}
    LCCO2 -- No --> Start
    LCCO2 -- Yes --> SysLCCO2[System for  
minimal LCCO2]
    OpCost -- No --> Start
    OpCost -- Yes --> SysOpCost[System for  
minimal operating cost]
  
```

- 173 -

炭素排出量や運転費用が最小になる運転条件が選定される。等価二酸化炭素排出量と運転費用はそれぞれ独立した基準で判断されるため、等価二酸化炭素排出量が最小になるシステムと運転費用が最小になるシステムの最適運転条件の解は異なる場合があり得る。運転費用の算出には投資する装置の償却や労務費等の幅広いデータが必要になるため、本論文では、消費財の調査だけで一定の評価が可能となる等価二酸化炭素排出量に関するのみ解析をおこなった。

2.3 検討の嫌気性消化プロセス

試算に用いた三種類の嫌気性消化プロセスのフローを模式的に Figure 3 にそれぞれ示した。第一のプロセスは、ケモスタット運転による通常の嫌気性消化処理である（以下、従来プロセスと記す）。第二と第三のプロセスは、消化率の向上を図るために遠心濃縮による固液分離装置を槽の後に付加し、消化汚泥の返送によって槽内の汚泥濃度を高めるものである。これらのプロセスには、固液分離装置のみを設置する系（以下、高濃度消化プロセスと記す）と、固液分離に加えて消化汚泥の一部を引き抜いてオゾン処理をおこない再び処理汚泥を槽へ返送する系（以下、オゾン処理プロセスと記す）の二種類がある。これら二種類のプロセスでは、従来プロセスよりも槽内の汚泥濃度が高く、汚泥滞留時間が長くなるため、消化率が向上する^{13, 14}。オゾン処理プロセスでは、消化汚泥のオゾン処理によって汚泥有機成分の一部が生物分解されやすくなるため、高濃度消化プロセスよりも高い消化率が得られる。

消化プロセスモデルの計算では機械攪拌の消化槽を想定し、運転できる汚泥濃度の上限値は、現実的に攪拌可能な汚泥濃度を考慮して 60 gSS/L と仮定した。また、別途の実験的検討によって、最初沈澱汚泥と余剰汚泥中の窒素・リン以外の無機 SS 成分の可溶化割合は極めて僅かであることが明らかになったため、これら無機 SS 成分以外の可溶化は無視した¹⁵。

2.4 長岡中央浄化センター汚泥処理システムの運転シナリオ

長岡中央浄化センターの汚泥処理システム運転シナリオとして、Table 1 に示した 4 ケースを考えた。これは、消化ガスを都市ガス原料や発電に利用するとともに、多量の電力を消費するオゾン発生機と電力を生産するガス発電機に運転時間帯を設けたものである。ケース 1 は、現行のように発生した消化ガスを都市ガス原料として利用し、Figure 3 の各プロセスの運転をおこなうシナリオである。ケース 2 は、オゾン処理プロセスにおけるオゾン発生機の運転を夜間に集中的に実施することで、夜間電力の利用による電気由来の二酸化炭素排出量の削減を意図した。昼間の電気は、夜間よりも等価二酸化炭素排出量の原単位が高いため、このシナリオではケース 1 よりも排出量を削減することが期待できる。ケース 3 は、メタンガスのガス発電に

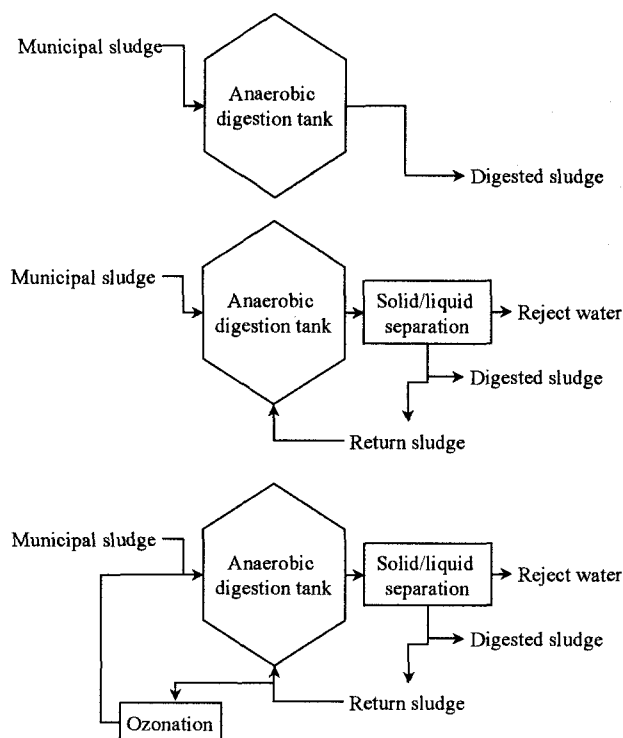


Figure 3 Process schemes for anaerobic digestion
(Top: conventional AD process, Middle: High-concentrated AD process, Bottom: High-concentrated AD process with partial ozonation)

よって、長岡中央浄化センターへの電力供給と加温エネルギーの両方を得ることを考えたシナリオである。ケース4は、更に、夜間電力を汚泥処理施設の運転に用いるとともに、発生したメタンガスをガスホルダーにいったん貯留し、日中に集中してガス発電をおこなうシナリオである。昼間に発生する電力は、下水処理施設の動力源になる。

Table 1 Scenarios for biogas utilization and operation hours of sludge treatment plant

	Biogas utilization		Operation hours of sludge treatment plant	
	Alternative natural gas & heat source for the tank	Power generation by gas engine& heat source for the tank	Ozone treatment	Power generation
Case 1	Yes	—	24 hr	—
Case 2	Yes	—	Night time (22:00-7:00)	—
Case 3	—	Yes	24 hr	24 hr
Case 4	—	Yes	Night time (22:00-7:00)	Day time (7:00-22:00)

2.5 等価二酸化炭素排出量の試算

長岡中央浄化センターから発生する汚泥の処理に関する LCA モデルを模式的に Figure 4 に示した。“Anaerobic digestion process”の種類には、(1)従来プロセス (Figure 2 の“Conventional AD process”)、(2)高濃度消化プロセス (同じく“High-concentrated AD process”)、(3) オゾン処理プロセス (同じく“High concentrated AD process with partial ozonation”) の三種類があり、これらプロセスへ投入される製品には下水汚泥、熱、運転に用いる電気や凝集剤等がある。消化ガスを都市ガス原料として利用する場合では、“Anaerobic digestion process”から生産されるメタンガスが“Gas recycle process”に投入され、製品として都市ガスが生産される。一方、ガス発電を用いる場合は、メタンは“Power generation process”に投入される製品に充当され、生産された電力や熱は、“Anaerobic digestion process”や下水処理等の動力に利用される。“Anaerobic digestion process”におけるもうひとつの生産物である消化汚泥脱水ケーキは、“Incineration Process (public sector)”と“Incineration Process (private sector)”の投入製品になる。脱水ケーキの分配では、いずれの嫌気性消化システムでも、現状の都市ゴミとの混合焼却量に相当する 2,447 ton/year が“Incineration Process (public sector)”に投入され、残りが“Incineration Process (private sector)”に与えられると仮定した。また、オゾン処理の装置では、オゾン発生の副産物として酸素ガスが発生する。これは、下水処理の酸素供給に利用可能な資源と位置づけられるが、本研究では長岡中央浄化センターの曝気動力の詳細は検討しなかった。また、設備の建設に関わる等価二酸化炭素排出量は、日常の運転に由来する値と較べてかなり少ないことが知られている¹⁶。このことから、建設に関わる等価二酸化炭素排出量は試算では無視し、日常の運転に関する等価二酸化炭素排出量のみをそれぞれのシステムで比較した。

電気の等価二酸化炭素排出量の原単位は、新潟県の地域を所轄する東北電力株式会社からヒアリングすることで得た。この他の原単位は、Input-Output モデルを原理とする(独)国立環境研究所(2002)による産業連関表の数値を用いた¹⁷。国内に流通する材の収支が産業連関表によって把握されているため、これによって算出された二酸化炭素排出量は、積み上げ法で求めた値より精度が高いことが指摘されている¹⁸。ただし、産業連関表は様々な種類のポリマーを一括して表しているため、凝集剤の原単位には、製造原価から産業連関表の数値を補正した(独)造水促進センター(2004)の資料を用いた¹⁹。

東北電力株式会社の発電に由来する等価二酸化炭素排出量の内訳、ならびに凝集剤、燃料、メタンとエコセメント中のカルシウム等の原単位を Table 2 にそれぞれまとめた。発電の等価二酸化炭素排出量が時間帯で異なる理由は、電源全体に占める原子力発電の割合が時間帯で異なるためである。一般に、原子力発電は昼夜を通してほぼ一定で運転されており、電気会社は、電力需要が高まる昼間は火力発電の割合を高めて対応する。火力発電の等価二酸化炭素原単位は原子力発電よりも多いため、昼間の電力は夜間よりも等価二酸化炭素の原単位が上昇する。この割合は各電気会社の電源構成によって異なるため、同じ処理システムであってもライフサイクルアセスメントの結果が検討の地域によって違う可能性がある。

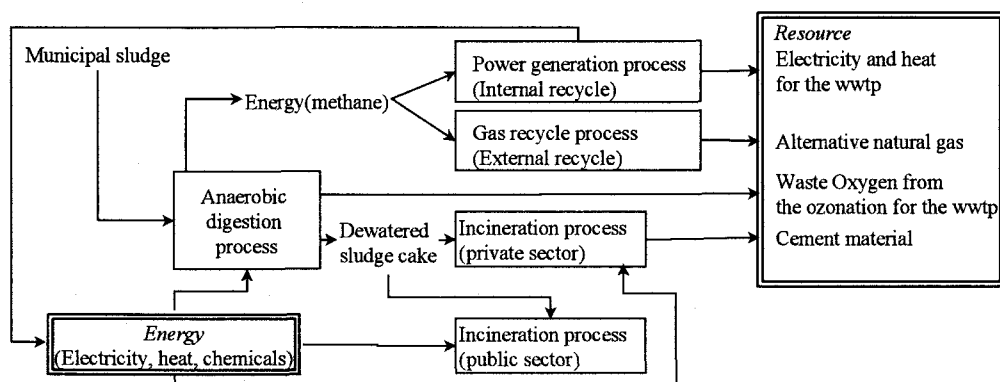


Figure 4 The energy & material-flow matrix of Nagaoka city for municipal sludge treatments and disposal processes

Table 2 List of LCCO₂ unit

Item	LCCO ₂ unit	
Electricity by Tohoku electric company	Annual average:	0.425 kgCO ₂ /kW
*Data in FY2002	Day time (8:00-22:00):	0.441 kgCO ₂ /kW
	Night time (22:00-8:00):	0.395 kgCO ₂ /kW
Chemicals for thickening and dewatering	2.32 kgCO ₂ /kg-polymer	
Diesel oil for lorry	2.64 kgCO ₂ /L-diesel oil	
Heavy oil (class A)	2.77 kgCO ₂ /L-heavy oil	
Rubber of waste tire for incineration	2.71 kgCO ₂ /L-rubber	
Methane gas as alternative natural gas	-2.20 kgCO ₂ /Nm ³ -methane	
CaO for cement material	-0.786 kgCO ₂ /kgCaO	

施設各装置の単位プロセスで消費・生産されるエネルギーや材に関わる原単位の調査結果を Table 3 にまとめた。長岡中央浄化センターの汚泥処理設備である(1)～(5)と(9)の原単位は、各設備の 2002 年度運転記録をもとにそれぞれ求めた¹⁰。脱水ケーキの場外処分に関する(6)～(8)の各プロセスでは、それぞれの施設の 2002 年度運転年報をもとに原単位を求めた。汚泥の焼却から発生する N₂O は測定されていないため、焼却炉の炉温を 850℃と仮定して、土木研究所(2000)による炉温と N₂O の発生度合いを関連づけた相関式から N₂O の発生量を求めた²⁰。(10)のガス発電では、発電効率率は平成 13 年度の下水道統計による 21 施設の運転平均値、熱回収率は平均的な熱交換器の設計条件をそれぞれ採用した²¹。(11)の高濃度消化プロセスに関する原単位は、長岡中央浄化センターの 1/10 規模で試験した H 浄化センターの 2003 年度運転記録から求めた⁶。(12)のオゾン反応槽とポンプ類の原単位は、同じく H 浄化センターの 2003 年度運転記録を用い、オゾン発生装置の原単位は Ozonia 社 (スイス)の機器を用いた²²。

Table 3 List of fundamental units of energy, material consumption for the sludge treatment and disposal

Facility	Fundamental unit of energy, material consumption
(1) Collection of primary sludge Thickening, storage, pumping	0.0060 kWh/kg-thickened sludge (dry weight basis)
(2) Collection of excess sludge Thickening, storage, pumping	0.24 kWh/kg-thickened sludge (dry weight basis) 0.32 g-polymer/kg-thickened sludge (dry weight basis)
(3) Anaerobic digestion tank Mixing and heating	0.0022 kWh/hr/m ³ -tank (mixing) 0.27 kWh/m ³ -input sludge (heating) (dry weight basis)
(4) Sludge dewatering facilities Withdrawing, dewatering by centrifuge, pumping	0.23 kWh/kg-digested sludge (dry weight basis) 14 g-polymer/kg-digested sludge (dry weight basis)
(5) Biogas purification facilities: Gas scrubbing Compressing and pumping to the gas company	0.097 kWh/Nm ³ -methane 0.29 kWh/Nm ³ -methane
(6) Hauling of dewatered sludge cake Hauling by 4-ton lorry	4 km/L-diesel oil (mileage)
(7) Sludge disposal by private sector Incineration and treatment for landfilling leachate	-469 mL-fuel/kg-VSS, 172 mL-fuel/kg-H ₂ O, 35 mL-fuel/kg-Ash 94.3 kWh/ton-cake, 0.0374 kgN-N ₂ O/kgN-VSS (assumed incineration temperature: 850°C)
(8) Sludge disposal by public sector Incineration and treatment for landfilling leachate	No supplement fuel used 94.3 kWh/ton-cake, 0.0374 kgN-N ₂ O/kgN-VSS (assumed incineration temperature: 850°C)
(9) Beneficial use of ash Recycle for cement material	75 gCaO/kg-ash
(10) Power production facilities Gas engine Heat exchanger	Electricity generation efficiency: 34%* Heat recovery efficiency: 42%* *On the basis of calorific value
(11) Facilities for the high-concentrated digestion process Solid/liquid separation by centrifuge	0.056 kWh/kg-digested sludge (dry weight basis) 6.0 g-polymer/kg-digested sludge (dry weight basis)
(12) Ozonation facilities Ozone production, ozone treatment	0.026-0.038 kWh/kg-digested sludge (dry weight basis)** **Depending on facility scale

3 試算結果と考察

3.1 脱水ケーキとメタンガスの発生量の試算

長岡中央浄化センターに高濃度消化プロセスとオゾン処理プロセスをそれぞれ適用した場合の汚泥 VSS 成分のメタン転換率、脱水ケーキ含水率と脱水ケーキ発生量の試算結果を Figure 5a, b, c にそれぞれ示した。オゾン処理プロセスで kg-O₃/day で示した図中の数値は、汚泥と反応させる一日あたりのオゾンの投入量を示す。VSS 成分の分解はオゾン処理量が多いほど高くなり、対応してメタンガスの発生量が増加する結果が得られた⁷。これに伴い、消化汚泥中の無機物の割合が高まって脱水されやすくなることで、脱水ケーキの含水率は約 70%以下に下がると予想された。脱水ケーキの排出量は、従来プロセスの発生量に対して高濃度消化プロセスでは 84%、オゾン処理プロセスでは 40%程度になるものと予想される。

3.2 エネルギー収支

ガス発電を想定したケース 3 と 4 において、長岡中央浄化センターにおける汚泥処理施設の生産電力と消費電力を試算した結果を Figure 6 に示した。

従来プロセスの消費電力が最も低かったことから、生産電力から消費電力を差し引いた余剰の電力は、このプロセスが最も多くなるものと考えられた。一方、高濃度消化プロセスとオゾン処理プロセスは、従来プロセスよりも関連機器の消費動力が増えるため、余剰の電力はかなり少なくなった。オゾン処理プロセスで

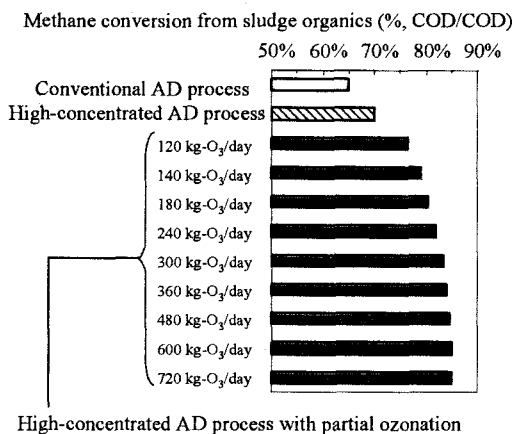


Figure 5a Expected methane conversion from sludge organics

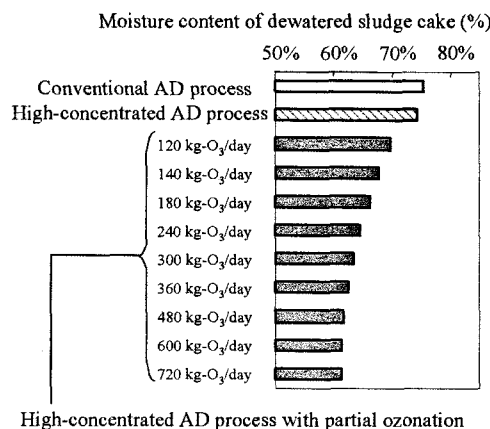


Figure 5b Expected moisture content of dewatered sludge cake

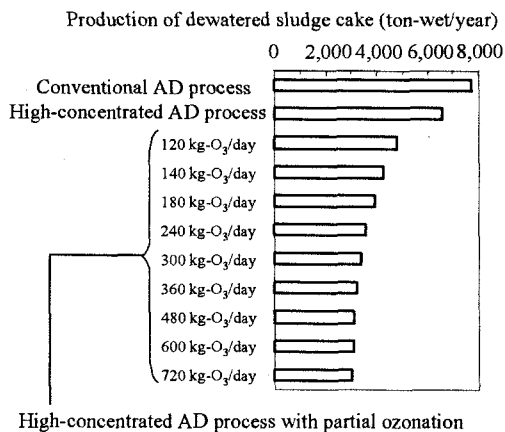


Figure 5c Expected dewatered sludge cake production

は、オゾン投入量が多いほど余剰電力が少なくなる傾向にあり、約 300 kg/day 以上では消費電力の方が発生電力より多くなると予想された。また、夜間に運転を集中するとオゾン発生機の規模が大きくなるため、装置自体の単位動力効率(kg-O₃/kW)は若干向上した。このことで夜間運転のケース 4 の方が 24 hr 連続運転のケース 3 に較べて、電力を最大で約 20 kW/hr ほど多く発生できる範囲があった。

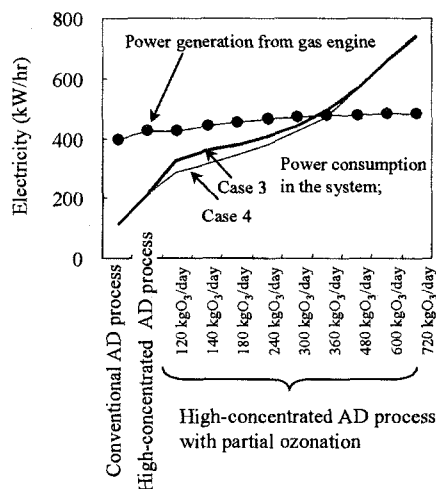


Figure 6 Expected excess electricity (Circle: power generation by gas engine; Thick line: power consumption in case 3, continuous operation for ozone plant; Thin line: power consumption in case 4, daytime operation for power plant and nighttime operation of ozone plant)

次に、消化槽の加温に必要な熱エネルギーと発生熱エネルギーを Figure 7 に比較した。加温用蒸気の投入量の運転実績から、嫌気性消化槽を加温するために必要なエネルギーは約 378 kWh/hr と見積もられた⁹⁾。ガス発電機の排熱を利用したコジェネレーションによってシステムから回収可能な熱エネルギーはおおよそ 400 kWh/hr 以上と試算された。このため、槽の加温は、ガス発電機の熱エネルギーを利用することでほぼ充分と推定される。

3.3 等価二酸化炭素排出量

施設内の汚泥処理と焼却の場外処分を含めたシステム全体の等価二酸化炭素排出量を Figure 8 にまとめた。これによれば、長岡中央浄化センターの現在の汚泥処理 (ケース 1 の従来プロセス: current

scheme) における一年間の排出は、約 4,000 ton と推定された。一方、高濃度消化プロセスの二酸化炭素排出量は、いずれのケースに関わらず、従来プロセスよりもやや低くなり、およそ 400 ton の等価二酸化炭素が削減される結果が得られた。オゾン処理プロセスの等価二酸化炭素排出量は、規模に応じて機器構成が段階的に変わるためオゾン投入量について滑らかに対応しないものの、グラフの左右が高くなる典型的な bathtub 曲線を示した。この理由は、(1)小規模のオゾン処理プロセスでは、脱水ケーキの減量度合いが低いため、焼却の二酸化炭素排出量があり削減されないこと、(2)大規模のオゾン処理プロセスでは、オゾン処理に関わる電力の等価二酸化炭素排出量が焼却よりも多くなること、であった。等価二酸化炭素排出量は、いずれのケースでもオゾン投入量が約 240 kg/day の条件で最小になった。オゾン投入量が 240 kg/hr の最適条件における等価二酸化炭素排出量は、ケース 1 で 2,352 ton/year、ケース 2 で 2,229 ton/year、ケース 3 で 1,806 ton/year、ケース 4 で 1,619 ton/year であった。

このグラフで特筆する点は、(1)等価二酸化炭素排出量を現状の運転 (○印で示したケース 1 の従来プロセス) よりも低くできる条件が存在すること、(2)ガス発電をおこなうと消化ガスを都市ガスに利用するよりも等価二酸化炭素排出量がやや低下すること、(3)オゾン処理を夜間を実施すると、24 時間の連続運転よりも電気由来の等価二酸化炭素排出量を更に削減できること、である。

(1)が得られる理由は、消化污泥の排出量が削減されることによって、焼却に関わる二酸化炭素の排出量が減少するためである。また、(2)は、余剰電力の生産・利用によって東北電力株式会社からの購入電力が少なくなり、電力会社の発電に起因する二酸化炭素排出量が低下するためである。

(3)の夜間電力利用では、消化ガスを都市ガスに利用する場合、オゾン処理を連続的に稼働するケース 1 よりも、夜間電力を利用した集中処理であるケース 2 の方が更に 100 ton/year の等価二酸化炭素を減らすことが可能と考えられた。またガス発電を実施すると、オゾン処理を連続的に稼働するケース 3 に対して、夜間電力の利用と昼間のガス発電の両方を想定したケース 4 の効果は著しくなり、およそ 200 ton/year の削減が可能と見積もられた。等価二酸化炭素の排出が最も少ないケース 4 の年間排出量は、現行の污泥処理システムよりも約 2,400 ton 少なく

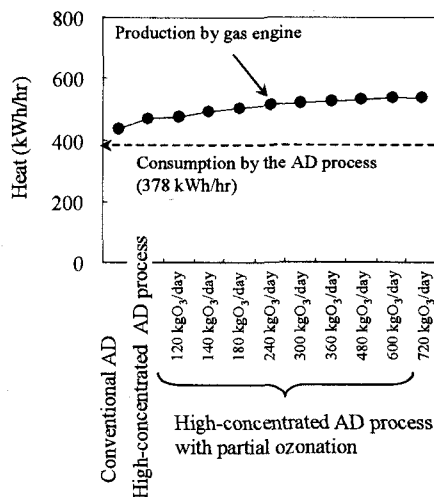


Figure 7 Expected reusable heat from gas engine

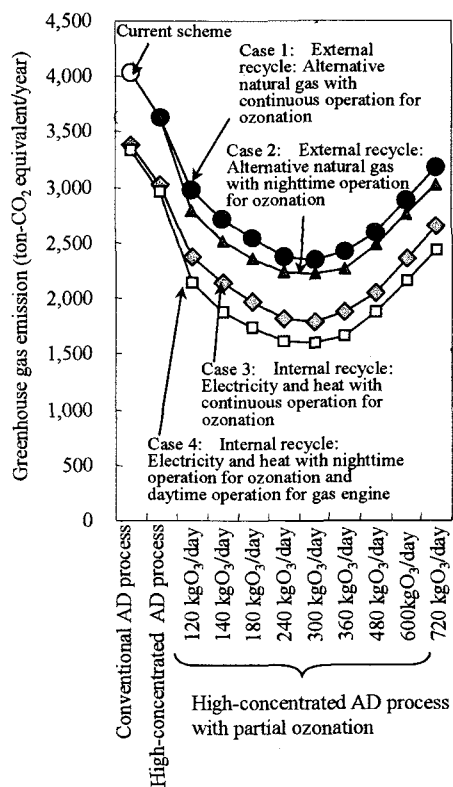


Figure 8 The estimation of GHG emission of sludge treatment, disposal and biogas utilization in Nagaoka area

なった。この量は約 900 kL の原油に相当し、処理人口あたりでは、総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会が示したバイオマスエネルギー導入目標のおよそ 60%に対応する⁴。

3.4 汚泥処理システムの等価二酸化炭素原単位

システムから排出される等価二酸化炭素の削減度合いは、システムに投入される製品の一つである電気の原単位によって変化する。電力消費が他よりも大きいオゾン処理プロセスでは、このことは特に顕著になるはずである。また、国内にある 10 電力会社の環境レポートによれば、電気の前単位は各社によってかなり異なり、需要端の日平均でおよそ 0.260 から 0.880 kgCO₂/kW に渡る²³。これらのことから、電力消費の大きいプロセスの LCA をおこなう際には、検討対象とする地域を所轄する電力会社のデータに基づいて注意深く検討する必要があると考えられる。

この点について、電気由来の等価二酸化炭素排出量がシステムの性能評価に及ぼす影響を知るために、電気の前単位が異なる地域で、上の汚泥処理システムを長岡市と全く同じ条件で運転することを仮想し、それぞれの汚泥処理システムの前単位を比較した。汚泥処理システムの前単位は、システムから発生する等価二酸化炭素の排出量を処理・処分される下水汚泥の乾燥重量で除した値(kgCO₂eq/kgDS)として定義した。この比較では、消化ガスを都市ガス原料に利用するケース 1 とガス発電によって電力を回収・利用するケース 4 を基に、電気の前単位が最も低い関西電力株式会社(LCCO₂: 日平均 0.260 kgCO₂/kW)と最も高い沖縄電力株式会社(LCCO₂: 日平均 0.880 kgCO₂/kW)が所轄する地域を考えた。これらの試算結果をを Figure 9 に示した。

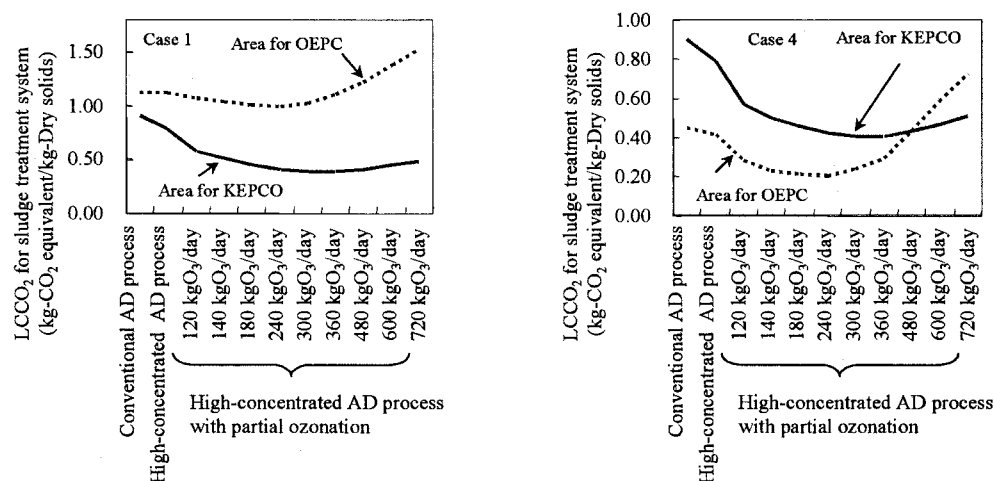


Figure 9 Impact of power source on GHG emission of sludge treatment, disposal and biogas utilization
Case 1: External recycle: alternative natural gas with continuous operation for ozonation, Case 4: Internal recycle: electricity and heat with nighttime operation for ozonation and daytime operation for gas engine,
KEPCO: Kansai electric power company, OPEC: Okinawa electric power company

消化ガスを都市ガス原料としたケース 1 では、電気の前単位が高い「沖縄電力」の地域における高濃度消化プロセスと LCCO₂ が最低値を示す最適条件のオゾン処理プロセス(オゾン投入量: 180 kgO₃/day)のシステム前単位は、それぞれ 1.12 kgCO₂eq/kgDS, 1.00 kgCO₂eq/kgDS に留まり、従来プロセスを適用した汚泥処理システムの 1.12 kgCO₂eq/kgDS と殆ど同じ水準を示した。いずれのシステムでも前単位が同程度になることから、このような地域では、各種嫌気性消化プロセスの選定には LCA よりも、電気料金や汚泥の減量による最終処分費用の削減といった経済的な視点が主要な判断基準になるものと考えられる。これに対し、電気の前単位が低い「関西電力」の地域における汚泥処理システムの前単位は、最適条件のオゾン処理プロセス(オ

ゾン投入量: 300 kgO₃/day)を適用すると、従来プロセスを用いた場合の43%である0.39 kgCO₂eq/kgDSまで下げることが可能であった。この地域は電気の前単位が低いため、ゾン投入量を多くしても汚泥処理システムの前単位があまり上昇しないことが特徴であった。

一方、ガス発電を用いて電力を回収するケース4では、電気の前単位が高い「沖縄電力」の地域の方が「関西電力」よりも汚泥処理システムの前単位が低くなる範囲があった。これは、ガス発電で生産される余剰電力を利用することでシステムの前単位が著しく引き下げられるためである。従来プロセスを適用した場合を例にとると、余剰電力の利用によって汚泥処理システムの炭酸ガス排出量は「沖縄電力」の地域で2,551 ton/yearが削減される。同じ発電量でも「関西電力」の地域では、炭酸ガスの排出削減は664 ton/yearに留まり、電気の前単位次第で排出削減の度合いが4倍ほど異なる結果が得られた。「沖縄電力」の地域では、汚泥処理システムの前単位は、従来プロセス、高濃度プロセス、最適化のゾン処理プロセス(ゾン投入量: 180kgO₃/day)の順に低くなり、それぞれ0.45 kgCO₂eq/kgDS, 0.42 kgCO₂eq/kgDS, 0.21 kgCO₂eq/kgDSであった。

「関西電力」の地域でも汚泥処理システムの前単位は同じ順に下がり、それぞれ0.90 kgCO₂eq/kgDS, 0.79 kgCO₂eq/kgDS, 0.41 kgCO₂eq/kgDS(ゾン投入量: 300 kgO₃/day)であった。汚泥処理システムの前単位は、いずれの地域でも従来プロセスを用いた場合よりもゾン処理プロセスを適用した方が半減した。

4 結論

長岡中央浄化センターの汚泥処理フローを例として、最終処分段階を含む汚泥処理システム全体の等価二酸化炭素排出量の試算検討をおこなった。この検討では、生物処理として(1)従来の嫌気性消化プロセス、(2)嫌気性消化槽の汚泥を高濃度で運転することで消化を促進するプロセス、(3)消化汚泥をゾン処理して槽へ返送することで嫌気性消化を促進するプロセス、の3種類を下水処理施設内の汚泥処理プロセスに想定し、それぞれから排出された脱水ケーキの場外焼却に関わる等価二酸化炭素排出量を含めてシステム全体を評価した。また、消化ガスの有効利用として、都市ガス原料による化石燃料の節減ならびにガス発電による受電量の削減を想定し、これらによる等価二酸化炭素排出量の削減効果を比較した。この検討で得られた結果は以下の通りである。

- (1) ゾン処理プロセスは、従来プロセスや高濃度消化プロセスよりも等価二酸化炭素の排出量が低くなる運転条件が存在した。
- (2) ゾン処理プロセスは、ゾン投入が多くなると、脱水ケーキの焼却に関わる等価二酸化炭素の発生が減少し、一方でゾン処理の電力に関わる電力会社から排出される等価二酸化炭素の発生が増加する特徴があった。
- (3) 消化ガスを都市ガスの原料に用いるよりも、ガス発電によって電力を回収する方が汚泥処理システムの等価二酸化炭素排出量が低くなる傾向が見られた。この度合いは、電力会社のLCCO₂前単位によって大きく影響を受けた。

謝辞

本研究は長岡技術科学大学技術開発センタープロジェクトの一環としておこなわれた。長年に渡って試験場を提供いただいた長岡市の厚意と研究の実施に協力いただいた長岡中央浄化センターの皆様へ記して謝意を表す。

参考文献

- ¹ 日本環境協会 全国地球温暖化防止活動推進センター (2003). 気候変動に関する国際連合枠組条約京都議定書 (公定訳), <http://www.jccca.org/hou/kpjpn.html>
- ² 日本環境協会 全国地球温暖化防止活動推進センター (2002). 京都議定書発効への道程, <http://www.jccca.org/hou/kpjpn.html>
- ³ 農林水産省 (2002). バイオマスニッポン総合戦略骨子, http://www.maff.go.jp/www/press/cont/20020730press_3.html
- ⁴ 総合資源エネルギー調査会 新エネルギー部会 (2001). 新エネルギー部会報告書—今後の新エネルギー対策のあり方について—, <http://meti.go.jp/report/data/g10705aj.html>
- ⁵ Goel R, Tokutomi T, Yasui H and Noike T. (2003). Optimal Process Configuration for Anaerobic Digestion with Ozonation. *Wat.Sci.Tech.*, Vol.48, No.4, pp.85-96
- ⁶ Yasui H, Komatsu K, Goel R, Li Y.Y., and Noike T. (2004). Full-scale Application of Anaerobic Digestion Process with Partial Ozonation of Digested Sludge. *Proc. of IWA International Conference on Anaerobic Digestion 2004*, Vol.2, pp.636-641, Montreal, Canada, in press for WST
- ⁷ 小松和也, 安井英斉, 大橋晶良, 原田秀樹 (2004). オゾン処理を用いた高効率嫌気性消化プロセス. *下水道協会誌論文集*, Vol.41, No.505, pp.111-118
- ⁸ Goel R, Yasui H and Shibayama C. (2003). High-performance Closed Loop Anaerobic Digestion using Pre/Post Sludge Ozonation. *Wat.Sci.Tech.*, Vol.47, No.12, pp.261-268
- ⁹ 長岡市 (2001). 平成 13 年度 長岡中央浄化センター処理年報
- ¹⁰ 長岡市 (2002). 平成 14 年度 長岡中央浄化センター処理年報
- ¹¹ 長部恵介 (2000). 長岡市における消化ガスの精製による都市ガス原料化について. *下水道協会誌* Vol.37, No.447, pp.13-20
- ¹² 安井英斉, 小松和也, ラジブゴエル, 大橋晶良, 原田秀樹 (2004). オゾン処理を用いた高効率嫌気性消化のプロセスモデル. *環境工学研究論文集* 第 41 巻, pp.19-29
- ¹³ Goel R, Tokutomi T., and Yasui H. (2004). Anaerobic Digestion of Excess Activated Sludge with Ozone Pretreatment. *Wat.Sci.Tech.*, Vol.47, No.12, pp.207-214
- ¹⁴ Goel R, Komatsu K, Yasui H. and Harada H. (2004). Process Performance and Change in Sludge Characteristics during Anaerobic Digestion of Sewage Sludge with Ozonation. *Wat.Sci.Tech.*, Vol.49, No.10, pp.105-114
- ¹⁵ Yasui H, Komatsu K, Goel R, Sato A., Matsushashi R, Ohashi A. and Harada H. (2004). Minimization of Greenhouse Gas Emission by Application of Anaerobic Digestion Process with Biogas Utilization. *Proc. of IWA International Conference on Anaerobic Digestion 2004*, Vol.4, pp.2518-2525, Montreal, Canada, in press for WST
- ¹⁶ 霧巻峰夫 (1998) 環境調和性を考慮した排水処理システムの評価手法に関する研究, 東北大学学位論文
- ¹⁷ Yoshida Y., Ishitani H., Matsushashi R., Kudoh Y., Okuma H., Morita K., Koike A. and Kobayashi O., (2002). Reliability of LCA considering the Uncertainties of Energy Consumptions in Input-Output Analyses, *Applied Energy* Vol.73, pp.71-82
- ¹⁸ 南齋規介, 森口祐一, 東野達 (2002). 産業連関表による環境負荷原単位データブック, 国立環境研究所
- ¹⁹ 小池壮一郎 (2004) 水処理プラントのライフサイクル CO₂ 排出. *用水と廃水* Vol.46, No.11 pp.66-72
- ²⁰ 土木研究所資料 第 3721 号 (2000). 下水汚泥焼却施設の温室効果ガス削減コストに関する調査報告. *土木研究所* ISSN 0386-5878
- ²¹ 平成 13 年度下水道統計 (2002). 44 消化ガス発電利用, 日本下水道協会
- ²² Ozonia 社技術資料 (2003). <http://www.ozonia.com>
- ²³ 北海道電力株式会社: <http://www.hepco.co.jp/kankyorepo2003-14a.html>;
東北電力株式会社: <http://www.tohoku-epco.co.jp/enviro/tea2003/>;
中部電力株式会社: http://www.chuden.co.jp/torikumi/kankyo/nenpo/new/12_13.pdf;
北陸電力株式会社: <http://www.rikuden.co.jp/kankyo/report/pdf/03-01.pdf>;
東京電力株式会社: <http://www.tepco.co.jp/eco/report04/env/08-j.html>;
関西電力株式会社: <http://www.kepco.co.jp/kankyorepo/action/efficiency/index.html>;
中国電力株式会社: <http://www.energia.co.jp/energy/general/eco/eco4.html>;
四国電力株式会社: <http://www.yonden.co.jp/energy/report/index.htm>;
九州電力株式会社: <http://www.kyuden.co.jp/company/kigyo/action/index.html>;
沖縄電力株式会社: <http://www.okiden.co.jp/environment/pdf/p18.pdf>