

〈特集〉

下水汚泥焼却熱によるバイナリー発電

高岡 昌輝

京都大学大学院地球環境学堂

(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 E-mail: takaoka.masaki.4w@kyoto-u.ac.jp)

概要

下水汚泥はバイオマス廃棄物の一つであり、資源として積極的に位置づけ、エネルギー利用を推進していくことが期待されている。日本においては下水汚泥の約7割が焼却処理されていることから、焼却システムをエネルギー回収型に転換することができれば、下水汚泥のエネルギー有効利用の割合は飛躍的に増加するものと期待される。その一つの方法として、低位の熱源から発電を可能にするバイナリー発電システムが注目されている。バイナリー発電システムは、どのような中間媒体を使うか、また温熱源、冷熱源に何を使うかにより、発電容量等が変化する。本稿では、下水汚泥焼却において、温水、低圧蒸気、排ガスを温熱源とした事例を紹介する。

キーワード：バイナリー発電、下水汚泥焼却、オーガニックランキンサイクル、カーナサイクル

原稿受付 2016.1.11

EICA: 20(4) 35-38

1. はじめに

2015年11月30日～12月11日までフランス、パリで第21回気候変動枠組条約締約国会議が開催され、翌12日に「パリ協定」が採択された。中国、アメリカも含めた地球温暖化防止に向けた新たな国際的な枠組みであり、長期的な温度上昇を1.5℃に変更するなど野心的な目標が合意された。このように気候変動問題への関心が高まる中、低炭素社会の実現に向けてカーボンニュートラルであるバイオマス資源の利活用が期待されている。2050年の世界を考えると、バイオマス資源及び廃棄物が世界の最も期待されるエネルギー源となる。また、国内においては、福島第一原子力発電所の事故の影響により全国的に電力需給が逼迫しており、バイオマス由来を含め再生可能エネルギーによる電力供給量の拡大が求められている。

下水汚泥は、バイオマス廃棄物のうち都市型バイオマスであり、有効利用に適した特徴をもっており、資源として積極的に位置づけ、エネルギー利用を推進していくことが期待されている。日本では、下水汚泥のリサイクル率は70%を超えるが、有機物基準の下水汚泥バイオマスのリサイクル率を見ると、有効利用されているのは全体の約1/4であり、そのうちエネルギー利用されているのは全体の13.1%に過ぎない¹⁾。下水汚泥の約7割が焼却処理されていることから、焼却システムをエネルギー回収型に転換することができれば、下水汚泥のエネルギー有効利用の割合は飛躍的に増加するものと期待される。しかしながら、現状は、燃焼ガスから熱回収して燃焼空気を予熱し、それでも

燃焼温度が確保できない場合は補助燃料を必要とするような焼却システムが一般的で、外部からのエネルギーが必要な熱収支となっている。この点を飛躍的に改善するため、最近では低位の熱源からの熱回収し、発電することが期待されている。その一つとして、バイナリー発電システムがある。この発電システムは特に、地熱、温泉の分野において注目されており、現在の再生可能エネルギー普及制度の一つである固定価格買取制度によっても後押しされている。最近では下水汚泥関連でもその低位の熱源からの回収が検討されている。日本では、下水道新技術機構においては下水分野でのバイナリー発電について技術導入マニュアルも作成されている²⁾。さらには、B-dashプロジェクトにおいて、下水汚泥焼却関連の2つのプロジェクトに、バイナリー発電が採用され、その実績が出始めている^{3,4)}。これからの技術開発もさらに期待される技術といえ、ここでは主に3つの事例を紹介する。

2. バイナリー発電

バイナリー発電とは、温熱源と冷熱源の間を中間媒体を加圧下で媒体蒸気としてタービンを駆動させて発電することを可能にしたものを指す⁵⁾。つまり、火力発電や原子力発電、ごみ発電では、ボイラーを温熱源として、中間媒体である水を高圧の水蒸気に変換し、タービンを駆動させて発電しており、これもバイナリー発電の一つといえる。しかし、本稿で扱うのはもっと低位の熱源からの発電を可能にしている事例を紹介する。中間媒体をイソペンタン、代替フロンなど

表1 バイナリー発電に使用される主な中間媒体^{5,6)}

物質名	化学式	分子量	沸点	Tc	Pc	可燃性	爆発限界	ODP	GWP 100年
		g/mol	℃	℃	kPaA		Vol % (空气中)		
アンモニア	NH ₃	17.03	-33.3	133	11.417	可燃	15.0-28.0	0	<1
R134a	CF ₃ CH ₂ F	102.3	-29.8	112	4.113	不燃	—	0	1430
R1234yf	CF ₃ CF=CH ₂	114.04	-29.5	94.7	3.382	可燃	6.2-12.3	0	4
R1234ze	CF ₃ CH=CFH	114.04	-19	109.4	3.636	可燃	5.6-14.4	0	6
R227ea	CF ₃ CHFCF ₃	170.03	-15.6	102.8	2.999	不燃	—	0	32220
イソブタン	iso-C ₄ H ₁₀	58.13	-11.7	135	3.645	可燃	1.8-8.5	0	4
ブタン	n-C ₄ H ₁₀	58.13	-0.5	152	3.794	可燃	1.8-8.4	0	15
R245fa	CF ₃ CH ₂ CHF ₂	134.08	15.3	154.1	3.64	不燃	—	0	1030
イソペンタン	iso-C ₅ H ₁₂	72.15	27.8	187.2	3.396	可燃	1.3-8.3	0	20
ペンタン	n-C ₅ H ₁₂	72.15	36.1	196.6	3.37	可燃	1.5-7.8	0	20
HFE-7000	C ₃ F ₇ OCH ₃	200.055	34	164.55	2.481	不燃	—	0	530
水	H ₂ O	18.02	100	373.9	22.064	不燃	—	0	<1

の有機物質を中間媒体として使う場合、オーガニックランキンサイクルと呼び、中間媒体をアンモニア+水系、有機物の非共沸混合物系から選定したシステムはカーナサイクルという。中間媒体に何を使うかは温熱源と冷熱源の温度差による。ここで代表的な中間媒体の性質を表1に示す^{5,6)}。水と比べて沸点が低いのは当然として、これらの物質には可燃性の物質が多く、安全面での配慮が必要となる。それゆえ、現在市販されている、バイナリー発電システムで使われている有機物質は R245fa が多い。また、オゾン層破壊物質 (ODP: オゾン層破壊係数) ではないが、地球温暖化係数 (GWP) の高いものも多く、気を付ける必要がある。

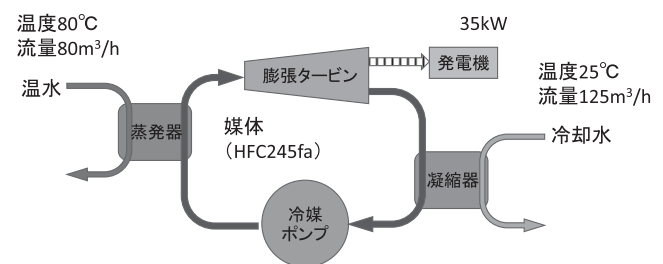
3. 導入事例

ここでは3つの日本の事例を紹介する。興味深いのは3つの事例において、それぞれ温熱源が異なることであり、下水汚泥焼却においてシステムに応じて、様々な箇所を熱源として利用できることを示している。

3.1 加古川市の事例

本事例では、神戸製鋼所のマイクロバイナリーを利用した事例である^{2,7)}。排ガス中の酸性ガスを取り除くために設置されている排煙処理塔の循環水 (温水) を温熱源 (80℃) とし、排煙処理塔の後段 (上部) での凝縮プロセスに供給する水 (冷水) を冷熱源 (25℃) としたプロセスである。図1に本システムで紹介されているフローを示す⁷⁾。温度差は55℃程度のものであり、それぞれの熱源の流量にもよるが、35 kW の発電を達成している。これまで温水としての利用や潜熱蓄熱材としての利用以外は利用されることがなかった廃熱から発電するものであり、非常に魅力的であり、潜在的に多くの利用先があると考えられる。本システムでの注意点としては、排煙処理塔の温水で

はスケールなどの懸念材料があり、熱交換器における工夫が必要であると報告されている。本技術は導入マニュアルとしてまとめられており、経済性の評価、温室効果ガス削減の効果なども試算されている。

図1 温水を熱源としたバイナリー発電フロー⁷⁾

3.2 和歌山市における事例

本事例は、B-dash プロジェクトの一環である。システムとしては、高効率の脱水機により下水汚泥を70%程度まで脱水し、自然できるようにし、ストーカ炉による高効率な熱回収を実現している^{3,8)}。ボイラーにより蒸気を発生させ、高圧な蒸気 (0.91 MPa, 175℃) によりまずスクリー型発電機を用いて発電し、その後、カスケード式にその発電機から排出された低圧の蒸気 (0.2 MPa, 120℃) を温熱源としてバイナリー発電システムに導入し、発電するものである。冷熱源は再利用水 (処理水: 15~30℃) である。図2にシステムフローを示す³⁾。本システムでは汚泥の処理量・コストからスクリー型発電機が用いられているが、一般のごみ焼却施設などで用いられている復水蒸気タービン式発電機後の低圧蒸気でも同様のシステムが組むことが可能である。

発電量は温熱源量、冷熱源量により左右される。本システムでの入口蒸気流量と発電量の関係を図3に示す³⁾。なお、バイナリー発電機への入口蒸気流量はスクリー型への主蒸気流量から蒸気式空気予熱器及び

排ガス再加熱器に使用する蒸気量を引いて算出されている。冷却水量は年間を通じてほぼ一定であったが、冷熱源の温度は季節により変動し、冷却性能が変化することから発電性能が変動するため、夏季は秋季及び冬季と比較すると、性能目安値に示すように若干発電量が低い結果となっている。このシステムによる発電量は、スクリー型への主蒸気流量が1.5 t/hとした場合、スクリー型での発電量が35 kWに比べ、バイナリー式が78~94 kW程度でありバイナリー発電の方が大きい寄与を示していた。本下水汚泥焼却システムでは温水よりはエネルギーの高い水蒸気が熱源として利用されていることから、より大きなエネルギーが取り出せて、本焼却設備での消費電力を上回る発電が可能であった。つまり、本焼却発電システムでは余剰電力を生み出すことができている。スケールアップした場合は水処理の一部の電力をも賄えるシステムとなると試算されている。

3.3 池田市における事例

本事例も B-dash プロジェクトの一環で、脱水・燃焼・発電を全体最適化することにより、コスト、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量を削減する下水汚泥焼却システムである。バイナリー発電システムにおいては、アンモニア+水系のカーリーナサイクルを形成している。図4にそのフローを示す⁴⁾。温熱源は異なる温度域の熱源（排煙処理水と排ガス）を用いている^{4,9)}。アンモニア水はまず、排煙処理水からの熱を受け取って水よりも低い温度で蒸発を開始する（蒸発器）。アンモニア水は沸点が低く、混合物であることから沸騰しながら温度上昇をつづけるため、等温蒸発する熱媒体を用いるサイクルと比較して、より低温の熱源からより多くの熱量を回収できる（より有効に熱交換できる）。排煙処理水の熱によって蒸発したアンモニア水は、次に排ガスを熱源として過熱されてタービンに供され、発電する。タービンを通じた熱媒体は凝縮器で冷却される。オーガニックランキンサイクルよりは分離機などが必要なためやや複雑ではあることやアンモニア腐食性、漏えいに対する対応が必要ではあるが、カーリーナサイクルでは、単純なランキンサイクルより20~50%程度発電出力が大きいという特徴がある。図4は発電量が30.8 kWの最大値となった場合のサイクルを示しているが、冷却水温度が15~17.3°Cで汚泥投入量が定格量（25.2 t/d）であった場合には概ね安定して25 kW以上の発電が継続されたと報告されている^{4,9)}。

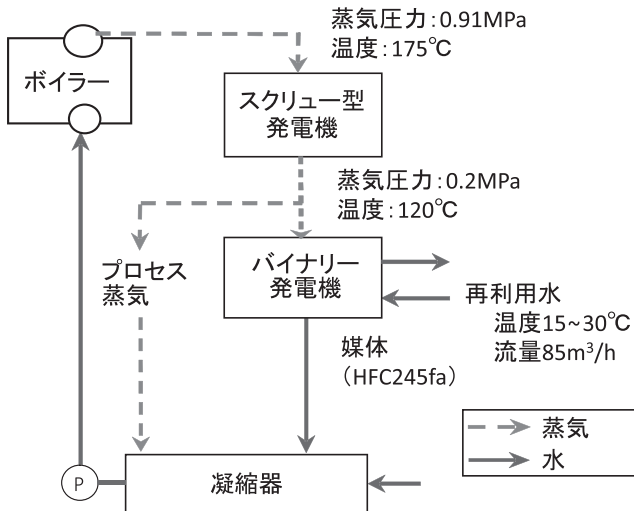


図2 蒸気を温熱源としたバイナリー発電システムフロー³⁾

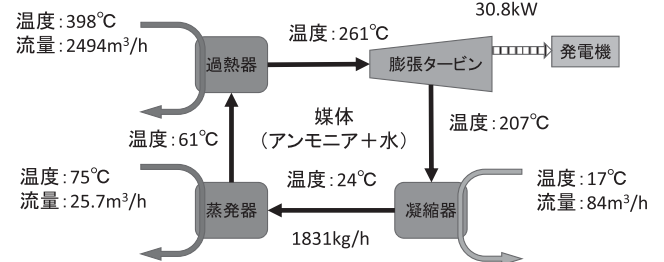


図4 温水と排ガス熱を利用したバイナリー発電フロー⁴⁾

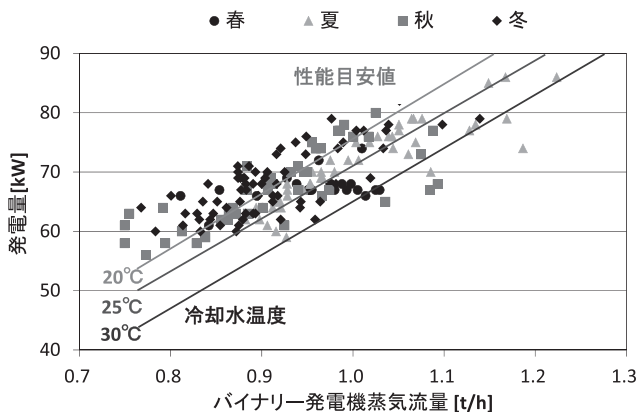


図3 本システムでのバイナリー発電機蒸気流量と発電量の関係³⁾

4. おわりに

現時点で日本で実証されている事例はそれほど大きな規模ではないが、海外ではもっと大規模でのオーガニックランキンサイクルが用いられている事例がある。ニューヨークのアルバニーの下水処理施設では多段炉の廃熱にオーガニックランキンサイクルが採用されており、1000 kW の発電能力がある¹⁰⁾。現時点ではインシヤルコストが高いため、導入は限定的であるが、東京都南多摩でのエネルギー自立型焼却炉プロジェクト

ではさらに大きなバイナリー発電施設が入る可能性があり¹¹⁾、今後の普及が期待される。その他、この技術は廃熱があればどこでも適用できることから、バイオガスプラントの廃熱なども利用可能である。技術開発の進展により低コストでできるようになれば、下水汚泥焼却やバイオガスプラントだけでなく、熱源としてのポテンシャルは他の工場排熱、都市ごみ焼却施設などにも適用可能であることから大きいといえる。

主に、低位の熱を回収し、発電に寄与することは電力供給（自立）、温室効果ガスの削減の文脈から評価されているが、都市部においてはヒートアイランドの解消、つまり都市における熱負荷の削減にも寄与し、このような効果についても積極的に評価が必要であろう。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ：下水道、資源・エネルギー循環の形成
URL：http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd_sewage_tk_000124.html
- 2) 日本下水道新技術機構：下水処理場における小型バイナリー発電の導入マニュアル，2014
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所：B-DASH プロジェクト No.10 下水道バイオマスからの電力創造システム導入ガイドライン（案），2015
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所：B-DASH プロジェクト No.9 脱水・燃焼・発電を全体最適化した革新的下水汚泥エネルギー転換システム導入ガイドライン（案），2015
- 5) 清水邦彦：第3編熱利用技術，第4章余排熱における利用事例，第1節余排熱利用による発電，1.3バイナリー発電システムによる低位廃熱利用，サーマルマネジメント，エヌティーエス出版，2013
- 6) 田中勝之：HFE-7100の飽和蒸気圧力および飽和液体密度の測定，日本冷凍空調学会論文集，32(3)，285-291，2015
- 7) 岩下 栄：下水処理場における小型バイナリー発電の導入マニュアル，日本下水道新技術機構資源環境研究部，平成26年度技術マニュアル活用講習会，2014
- 8) 水野孝昭，島村 太，宮川 透，株丹直樹，宍田健一：下水道バイオマスからの電力創造システムに関する技術実証研究その2，タクマ技報，23，58-66，2015
- 9) 野入菜摘，守屋由介，井上益男，柳瀬哲也：脱水・燃焼・発電を全体最適化した革新的下水汚泥エネルギー転換システムの実証研究，クリーンエネルギー 24(4)，48-52，2015
- 10) Project Profile Waste Heat to Power: In Waste Water Treatment Plant Albany County Sewer District-North Plant
URL：<http://www.heatispower.org/wp-content/uploads/2014/03/HiP-Albany-WWTP-WHP-Project-Profile.pdf>，2012
- 11) 望月伸行：2-4-3 南多摩水再生センター・未利用エネルギーの導入，東京都下水道局技術調査年報—2014—，38，2016