Technical Paper

Estimation of Improved Energy Balance of Anaerobic Digestion Plant
by Hyper Thermal Hydrolysis

Shojiro OSUMI, and Jun TSUBOTA

(Received February 17, 2009)

超高温可溶化技術導入によるメタン発酵施設のエネルギーバランス改善試算

大隅省二郎, 坪田 潤

Anaerobic digestion recovers renewable energy from garbage of municipal solid waste, which is not suitable for incineration because of its high water content. However, anaerobic digestion produces digestion residue and high BOD waste water. Adaptation of hyper thermal hydrolysis to dry type anaerobic digester does not require water treatment process, therefore increased the amount of electricity recovery. In this study, we calculated and compared the amount of surplus energy produced by standard methane fermentation and hyper thermal hydrolysis integrated process.

Key Words

Biogas, Hyper thermal hydrolysis, Methane fermentation, Energy balance

1. はじめに

メタン発酵は、生ごみ等、含水率が高いため焼却処理に向かず、またその性状からマテリアルリサイクルも難しいバイオマスから、バイオガスとして効率よくエネルギー回収することができる技術である¹⁾。しかし、投入バイオマス中の固形物の10~40%程度は発酵残渣として、また投入バイオマス中の水分(通常70~95%程度)はBOD10,000mg/L程度の排水として排出されるため²⁾、これらの処理がメタン発酵普及にとって最大のネックとなっている。そのため、発酵残渣発生量及び廃水処理量を削減することができれば、メタン発酵の普及を急速に促進できる可能性がある³⁾。

我々が開発した超高温可溶化技術は、高温メタン発酵汚泥中の微生物を超高温(80℃)で利用することにより、難分解性有機物の可溶化を促進し、バイオガス回収量の増大と発酵残渣の削減を実現するものである⁴⁾が、分解率が高いためにpHが比較的高く、かつ高温であるという本技術の特徴を利用し、超高温可溶化槽においてアンモニアストリッピングを施し、メタン発酵プロセスで発生するアンモニアを蒸発回収することが可能となる⁵⁾。

メタン発酵を行う際、固形物濃度が高すぎるために希釈を要するケースが多く、希釈水としてメタン発酵から出てくる排水を再利用できることが好ましいが、生ごみのように窒素含有濃度の高い廃棄物を原料とする場合、メタン発酵プロセ

スにおいて多量のアンモニアが発生し、処理水を再利用することでこれが濃縮され、メタン発酵槽内におけるアンモニア濃度が高くなり、アンモニア阻害によりメタン発酵が継続できなくなるという問題が生じる⁶⁾⁷⁾。よって、処理水を希釈水として使用する場合には、アンモニア除去等の排水処理を行った後でないと使用することができない。また、利用用途のない排水を河川や下水に放流する場合も、基準を満足するためにはかなり高度な排水処理を必要とする。

一方、超高温可溶化を導入し、さらに超高温可溶化槽におけるアンモニアストリッピングを行った場合⁸⁾は、アンモニアを適度に除去することが可能となり、アンモニアの蓄積が発生しないため、排水を処理することなく希釈水として利用することが可能となる⁹⁾。さらに、アンモニアストリッピングの際に相当量の水が蒸発し、アンモニア水として回収されることを考慮すると、河川や下水等に放流しなくてはならない排水が全く発生せず、結果として、全く水処理を必要としないプロセスが実現できる可能性がある。本プロセスには、発酵残渣の発生量も大幅に削減できるというメリットもあり、実現すれば、メタン発酵普及のネックとなっている発酵残渣の処分及び排水処理を大幅に軽減することができ、コストの面からはかなりのメリットがあると期待される。

しかし、本技術には、(1)超高温可溶化のために80℃まで加温する必要がある、(2)アンモニアストリッピングのためにブ

ロワ電力及び気化熱分の熱を加える必要があることから、エネルギー収支上は従来技術に劣るのではないかと懸念があった。一方で、(1)バイオガス回収量が増加する、(2)排水処理に必要なエネルギーが不要となるといった、エネルギー収支上もプラスになる要素も含まれるため、従来技術と本技術のどちらがエネルギー収支上優れているかを直観的に判断することは難しい。

そこで、本研究では、排水処理を含めたエネルギー収支を評価することにより、超高温可溶化を導入することでエネルギーバランス改善効果があるのかどうかを明らかにする。

2. 方法

2.1 想定フロー

本試算では、自治体が回収した分別生ごみを焼却場に併設するメタン発酵施設で処理することを想定した。回収生ごみの想定組成を Table 1 に示す。

標準の処理フローは、55℃の高温乾式メタン発酵¹⁰⁾ (生ごみをTS20%に希釈して投入) 後、発酵残渣を脱水し、脱水残渣は焼却炉へ、脱水ろ液は排水処理後、原料生ごみと同量を希釈水として利用し、残りを下水放流するものとした。

超高温可溶化導入ケースは、同じく55℃の高温乾式メタン発酵をした後、後段に80℃の超高温可溶化槽を設け、全ての生ごみが計算上1回は超高温可溶化槽を通過するようにするため、生ごみと同量のメタン発酵処理物が超高温可溶化槽を通過するシステムとした。超高温可溶化槽では、回収したバイオガスを用いてアンモニアストリッピングを行い、アンモニア濃度の低くなった超高温可溶化処理液をメタン発酵槽へ戻すことで、メタン発酵槽内のアンモニア濃度上昇を防ぐシステムとした。

Table 1 Assumption of collected garbage

Amount	30t/d
TS	40%
Calorie	7.6GJ/t
T-N	0.4%

*TS: Total Solid

Fig. 1 Assumed treatment flow chart

発酵残渣は標準ケースと同様に脱水し、脱水残渣は焼却炉へ、脱水ろ液はアンモニア濃度が低くなっており、また、アンモニアストリッピングにおいてアンモニア水として蒸発回収される水分によってバランスさせることで、全量希釈水として利用することとした (Fig. 1 参照)。380 ~ 460m³/h 以上のガス量でアンモニアストリッピングすることで、脱水ろ液を希釈水として利用してもアンモニアによる阻害無しにメタン発酵を続けることが可能である⁵⁾。

原料の生ごみ及び希釈水は15℃で入ってくるものとした。

2.2 プロセスの前提条件

分別生ごみの標準条件および超高温可溶化導入条件におけるバイオガス化率は既報¹⁰⁾を参考にそれぞれ Table 2 の通りとした。

回収バイオガスの組成はメタン 60%, 二酸化炭素 40%とし、高位発熱量は0.024GJ/m³とした。脱水機のTS回収率、脱水残渣のTSはそれぞれ Table 2 の通りとした。

2.3 物質収支

2.1 で示したフロー、2.2 で示した試算条件における物質収支を Fig. 2 に示す。

Fig. 2 に示す通り、標準条件では36.9t/日の水を処理することが必要であるが、超高温可溶化を導入した場合は、超高温可溶化におけるアンモニアストリッピングの際に水分を10.8t/日回収することで水処理は不要となる。80℃で蒸発させた水蒸気を36℃で回収すると想定すると、10.8t/日の水分を回収するために必要な超高温可溶化槽における通気量は、以下により16,300m³N/日となる。

80℃における飽和蒸気圧: 47.4kPa

80℃における比容積: 3.41m³/kg

36℃における飽和蒸気圧: 5.6kPa

36℃における比容積: 24.0m³/kg

80℃でガス中に存在する水蒸気量 (重量, 体積)

: WS₈₀kg/日, VS₈₀m³N/日

36℃でガス中に存在する水蒸気量 (重量, 体積)

: WS₃₆kg/日, VS₃₆m³N/日

ストリッピングガス量: V m³N/日

とすると、

$$VS_{80}m = V \times (273+80) / 273 \times 101.3 / (101.3 - 47.4) = 3.41WS_{80}$$

$$VS_{36}m = V \times (273+36) / 273 \times 101.3 / (101.3 - 5.6) = 24.0WS_{36}$$

$$WS_{80} - WS_{36} = 10.8$$

また、発酵残渣は、標準条件で14.0t/日発生するのに対し、

Table 2 Conditions precedent of treatment process

Gasification efficiency (standard) ¹⁰⁾	82%
Gasification efficiency (with hyper thermal hydrolysis) ¹⁰⁾	90%
Calorie of biogas	0.024GJ/m ³
Recovery ratio of TS by dewatering equipment	90%
TS of dewatered sludge	25%

Fig. 2 Material balance

超高温可溶化導入条件では 8.6t/ 日と 39% 減少する。

が電力、20%が蒸気、20%が温水に変換されるものとした¹²⁾。

2.4 エネルギー収支計算の前提条件

エネルギー収支の計算に用いる、各単位プロセスに要する必要電力量は Table 3 の通りとした。

メタン発酵槽及び超高温可溶化槽への導入のための加温は温水で行うこととし、メタン発酵槽における放熱は、両条件で差がないため考慮しないこととするが、超高温可溶化槽に導入するための加温の際には 10%の放熱があると想定した。

アンモニアストリッピングの際に水蒸気が奪う潜熱は蒸気によって補うこととした。

回収したバイオガスはバイオガスエンジンに供給し、40%

3. 結果と考察

両フローのエネルギーバランスを Table 4 に示す。電力に関しては、“エネルギーの使用の合理化に関する法律(通称、省エネ法)”の 1 次エネルギー換算係数(昼間 9.97MJ/kWh, 夜間 9.28MJ/kWh)の昼間と夜間の時間を考慮した加重平均値 9.68MJ/kWh を使用して 1 次エネルギーに換算した。超高温可溶化を採用したフローでは、メタン回収量が 10% 増大すること、および排水処理が不要となるため標準フローに比べ電力消費量を 39% 削減できることから余剰電力は 17% 増大した。超高温可溶化槽での水の気化熱を供給するための蒸気が必要となるため、回収エネルギーの総量での比較では、超高温可溶化を採用したほうが 5% 増大した。

超高温可溶化の採用による回収される余剰エネルギーの増加量は 5% であるが、標準フローで回収されるエネルギーの 72% が蒸気及び温水という熱であるのに対し、超高温可溶化導入を採用したフローでは 83% を電力として回収することが

Table 3 Electric energy required for each unit process

Dry type anaerobic digester	70kWh/t-garbage ¹⁰⁾
Water treatment	47kWh/t-garbage ¹⁰⁾
AS	0.002kWh/m ³ -stripping gas ¹¹⁾

*AS: Ammonia stripping

Table 4 Comparison of energy balance

		Standard		With HTH	
Input	Garbage	30t	228GJ	30t	228GJ
Output	Biogas	7293t	175GJ	8005t	192GJ
Recovered energy	Electricity	BCG	19,448kWh	BCG	21,346kWh
			188GJ		207GJ
	Steam	BCG	35GJ	BCG	38GJ
	Hot water	BCG	35GJ	BCG	38GJ
	Total	BCG	258GJ	BCG	283GJ
Consumed Energy	Electricity	Anaerobic digester	- 2,100kWh	Anaerobic digester	- 2,100kWh
		HTH	0kWh	HTH	- 30kWh
		Water treatment	- 1,410kWh	Water treatment	0kWh
		Total (Electricity)	- 3,510kWh	Total (Electricity)	- 2,130kWh
			- 34GJ		- 21GJ
	Steam	AS	0GJ	AS	- 25GJ
	Hot water	Anaerobic digester	- 10GJ	Anaerobic digester	- 10GJ
		HTH	0GJ	HTH	- 3GJ
		Total (Hot water)	- 10GJ	Total (Hot water)	- 13GJ
	Total		- 44GJ		- 59GJ
Surplus energy	Electricity		15,938kWh		19,216kWh
			154GJ		186GJ
	Steam		35GJ		14GJ
	Hot water		25GJ		25GJ
	Total		214GJ		225GJ

Each figures show the energy amount a day

*HTH: Hyper thermal hydrolysis

*BCG: Biogas co-generation

できる。熱、特に温水は利用用途の狭い低級なエネルギーであるのに対し、電力は用途の広い高級なエネルギーであり、余剰エネルギーに占める電力の割合が高いことから、超高温可溶化導入のメリットは大きいと言える。

さらに、既に述べたように、超高温可溶化を導入した場合は排水処理が不要となり、残渣の発生量も約4割減少することから、これらの処理・処分に必要なコストが大幅に削減され、経済的にも大幅に有利となると考えられる。

超高温可溶化導入の場合の懸念材料は、脱水ろ液を希釈水として利用することによりメタン発酵槽内でメタン発酵阻害物質（アンモニア、塩類等）が濃縮されることであるが、十分な量のガスでアンモニアストリッピングをすることで、アンモニアによる阻害が発生することは防ぐことができる。メタン発酵が強く阻害されるアンモニア性窒素濃度は、中温発酵で5,000mg/L程度、高温発酵で2,500-3,000mg/L程度とされている³⁶⁾⁷⁾、筆者らはモデルケースの生ごみを超高温可溶化導入フローで処理することにより約1,500mg/Lと問題のないアンモニア濃度で維持できることを実験的に確認した。

無機物についても、物質収支で示したように、発酵残渣として一部が系から除去されることで非常に低い濃度で平衡に達すると考えられ、問題とはならない可能性が高い。

4. まとめ

本試算の結果、超高温可溶化の導入により排水処理不要のメタン発酵システムが構築できる可能性が示唆された。アンモニアストリッピングで回収されたアンモニア水は焼却排熱で濃縮し、焼却炉の脱硝用アンモニアとして利用することができる。またメタン発酵の脱水残渣も焼却炉で焼却できることから、残渣・排水処理不要のメタン発酵施設を提案することができる（Fig. 3参照）。さらに、本プロセスはエネルギー収支上は従来プロセスとほとんど変わらないが、付加価値の高い電力として回収できるエネルギーの割合が高くなること

Fig. 3 Flow chart of waste incineration plant attached by methane fermentation plant

から、エネルギー回収の観点からも従来プロセスと比較して有利となることが示唆された。

文 献：References

- 1) 益田光信, 環境技術, **29**(9), 669-670(2000) : Masuda, M., *Kankyo Gijutsu*, **29**(9), 669-670(2000)
 - 2) Speece, R. E.(松井三郎, 高島正信監訳), 産業廃水処理のための嫌気性バイオテクノロジー, (技報堂出版), (1999)
 - 3) 高島正信, 水処理技術, **45**(5), 207-213(2004) : Takashima, M., *Mizushorigijutsu*, **45**(5), 207-213(2004)
 - 4) 坪田潤, 局俊明, 菅原正孝, 濱崎竜英, 津野洋, 廃棄物学会論文誌, **18**(4), 240-249(2007) : Tsubota, J. et al., *Waste Management Research*, **18**(4), 240-249(2007)
 - 5) 坪田潤, 黒木浩二, 洪鋒, 千智勲, 津野洋, 廃棄物学会論文誌, **19**(4), 265-274(2008) : Tsubota, J. et al., *Waste Management Research*, **9**(4), 265-274(2008)
 - 6) Angelidaki, I., Ahring, B. K., *Water Res.*, **28**, 727-731(1994)
 - 7) 船石圭介, 山下耕司, 佐々木宏, 李玉友, 第34回日本水環境学界年会講演集, pp. 416(2002) : Funaki, K., et al., The 34th Japan Society on Water Environment Annual Meeting, pp. 416(2002)
 - 8) Saracco, G., Genon G. J., *Mater.*, **37**, 191-206(1994)
 - 9) 坪田潤, 角新支朗, 津野洋, 廃棄物学会論文誌, **19**(1), 51-60(2008) : Tsubota, J. et al., *Waste Management Research*, **19**(1), 51-60(2008)
 - 10) 平成18年度環境省受託業務報告書, バイオ資源・廃棄物等からの水素製造技術開発
 - 11) (社)日本下水道協会, 下水道施設計画・設計指針と解説後編, pp. 104-105(2001)
 - 12) Yenbacher社ホームページ(ガスエンジン仕様), http://www.ge-energy.com/prod_serv/products/ recip_engines/en/downloads/type3_en_new.pdf(2006.12)
-