

中温および高温消化による下水汚泥と稲わらの混合メタン発酵に関する研究

廃棄物・有害物管理工学研究室 05580582 井上 義康
指導教員 小松 俊哉 姫野 修司

1. 研究の背景および目的

近年、循環型社会の形成や地球温暖化防止のために、化石燃料の代替となるバイオマスエネルギーが注目されている。廃棄物系および未利用バイオマスからの有効なエネルギー変換技術のひとつに、下水汚泥との混合嫌気性消化法(メタン発酵法)がある。実際に、石川県珠洲市では下水処理場に厨芥を受け入れての混合消化が実機で行われている。また、今後は下水処理場ヘディスポージャー排水が導入される可能性も考えられ、増加した投入汚泥量や汚泥中の有機物を、高速かつ高分解率で処理できる手法が望まれる。これらを達成するものとして、微生物活性の高い高温消化法がある。そのため、近年の下水汚泥嫌気性消化においては、中温消化(36 付近)に加えて、高温消化(50~55)を採用する処理場も現れてきている。

そこで、本研究では新潟県において発生量の多い稲わらを用いて、中温(36)および高温域(55)における連続式混合嫌気性消化実験を行い、固形物分解やメタン生成などの消化特性と消化汚泥の処理特性を明らかにするとともに、システム全体でのエネルギーバランスを総合的に評価することを目的とした。

2. これまでの知見

稲わらの基本構造はセルロース約 37%、ヘミセルロース約 45%、リグニン約 5%およびケイ素灰約 13% からなっており、何らかの処理を施さない限り、有効利用が困難である。そこで、本研究では酵素処理に着目した。本研究で使用する酵素(メニコン社製)は本来、水田に鋤き込まれた稲わらを好氣的に分解するために開発された新規のセルロース分解酵素であり、ヘミセルロース(キシラン)を切断してからセルロースを切断するため、セルロース分解効果が大きい。

また、昨年度の工藤の研究より、消化の前段階で稲わらに水処理や酵素処理の可溶性前処理を施すことでメタン転換率は向上しており、中温では酵素処理の効果が有利であることが明らかとなっている。

3. 中温および高温連続式混合嫌気性消化実験

予め行った中温および高温回分式嫌気性消化実験によって、他の酵素の検討も行ったが、昨年度の工藤が導き出したメニコン社製酵素の酵素濃度 5g/L、浸漬日数 20 日の条件においてもっとも良好なメタン転換率が得られた。そのため、本酵素で酵素処理を施した稲わらと下水汚泥における中温および高温連続式混合嫌気性消化実験を行い、消化温度(36 および 55)の違いが消化特性(稲わらのメタン転換率や除去率、上澄み液の特徴など)に与える影響、また消化汚泥の処理特性を評価した。

3.1 実験材料

実験には、新潟県長岡市村松町で譲与していただいた稲わらと、株式会社メニコンから譲与していただいた酸性域で効果のある酵素を用いた。稲わらはミキサーで約 5mm に粉碎後、105 の乾燥機で絶乾状態にした後、実験に使用した。稲わらは全 COD 約 0.65g-COD/g-稲わらであり、酵素は全 COD 約 0.80g-COD/g-酵素であった。また、種汚泥として実験に用いた中温および高温消化汚泥は、濃縮汚泥で 14 日間にわたって馴致した消化汚泥をそれぞれ用いた。もとなつた中温消化汚泥および高温消化汚泥は、新潟県長岡市中央浄化センターおよび栃木県足利市水処理センターよりそれぞれ譲与していただいた。濃縮汚泥には、新潟県長岡市中央浄化センターより譲与していただいた濃縮汚泥(最初沈殿地汚泥を重力濃縮したものと、余剰汚泥を遠心濃縮したものが、およそ 1 : 1 で混合されている)を用いた。

馴致後の実験に用いた消化汚泥および濃縮汚泥の初期性状を表 1 に示す。

表-1 消化汚泥および濃縮汚泥の初期性状

	pH	TS	VS	全COD
	-	%	%	g-COD/L
中温消化汚泥	7.5	2.11	1.14	10.9
高温消化汚泥	7.7	2.28	1.30	13.1
濃縮汚泥	5.2	3.56	2.70	32.3

3.2 実験方法

中温および高温連続式混合嫌気性消化実験の実験系列を表-2に示す。実験には 2L のガラス容器を使用し(混合液量 1.8L), 種汚泥として消化汚泥を, 投入基質として稲わらと濃縮汚泥を用いた。基質の投入は半連続式

表-2 中温および高温連続式混合嫌気性消化実験系列

実験系列	混合比	投入基質			酵素添加量 g-酵素/g-稲	浸漬日数 日
		濃縮:稲	TS %	VS %		
	コントロール	1:0	3.56	2.70	32.3	-
Run 1	1:0.5	5.31	4.10	43.7	-	-
Run 2	1:0.5	5.31	4.10	43.7	0	20
Run 3	1:0.5	5.31	4.10	44.3	0.05	20

で行い, 汚泥の引抜きと基質の投入は 1 日に 1 回, 約 120mL を引抜き・投入し, 擬似的に消化日数を 15 日と設定した。また, 中温および高温の消化温度は, それぞれ 36 ± 1 および 55 ± 2 に設定した。なお, 投入基質として用いた稲わらは, 5mm 以下に粉碎し, 36 ± 1 で酵素溶液または水に 20 日間浸した(Run2, 3)。実験では, 比較対照として濃縮汚泥のみのコントロール, 粉碎のみの系(Run1)も用意した。実験期間中は中温および高温連続式混合嫌気性消化実験で, それぞれ 75 日間および 57 日間とし, 安定したところで定常状態であると仮定した。

測定は, 定期的に引き抜いた汚泥を用いて pH, TS, VS, 全 COD, 溶解性 COD(1.0 μ m のガラス繊維ろ紙によるろ液の COD), アンモニア性窒素(NH_4^+ -N)の分析を行った。測定日には同時にガス量, ガス組成(CH_4 , CO_2)の分析を行った。

連続運転の消化汚泥の処理特性として, 実験終了時に脱水性を, 上澄み液の特徴として脱離液の全窒素および全リンを測定した。脱水性の測定は, 落らの凝集・脱水実験¹⁾を参考に, 高分子凝集剤とガーゼ, 三角巾, 遠心分離機を用いて擬似的に脱水汚泥を作成し, 含水率を測定した。

3.3 実験結果および考察

3.3.1 消化特性

中温および高温連続式混合嫌気性消化実験において定常状態であると考えられた実験開始 17 日目からの平均消化成績(平均 \pm 標準偏差)を表-3に示す。なお, NH_4^+ -N は, 中温で 36 日目, 高温で 26 日目からの平均である。

pH は, 稲わらを混合することで, 中温および高温消化の各温度域において, コントロールと比較して 0.1 程度低くなったが, それぞれ $\text{pH}6.8\pm 0.1$ および $\text{pH}7.1\pm 0.1$ 程度で安定していた。

TS および VS は, 稲わらを混合することで高くなったが, 粉碎のみよりも水処理や酵素処理を施すことによって TS および VS は減少する傾向にあった。また, 中温消化よりも高温消化において, 高い TS 除去率および VS 除去率を示した。これらの傾向は, 濃縮汚泥の TS 除去率が全てのリアクターで同等であると仮定して算出した, 稲わらの TS 除去率についても同様であった。

上澄み液の特徴として, 溶解性 COD および NH_4^+ -N は順調に消費されたが, 中温消化よりも高温消化においてより多く蓄積する傾向を示した。また, NH_4^+ -N については稲わらの混合によって減少した。これは, C/N 比が 75 程度と高い稲わらを投入することで, 炭素源が多くなったことから菌体の増殖量が増加し, 窒素源の消費量が多くなったために起こったと考えられる。この傾向は, 木質を用いたメタン発酵実験²⁾においてもみられており, セルロース系バイオマスの混合により NH_4^+ -N は減少すると考えられる。

メタンガス発生量は, 粉碎のみよりも水処理で, 水処理よりも酵素処理を施すことによって増加した。なお, 粉碎のみの系と比較して, 水処理および酵素処理系では, それぞれ 5~13% および 13~18%, メタンガス発生量が増加した。また, 中温消化と比較して高温消化においては, コントロール系で 36%, 稲わら混合系で 6~14%, 増加した。

表-3 実験開始17日目から75日目(中温), 57日目(高温)までの平均消化成績

		中温				高温			
		コントロール	Run 1	Run 2	Run 3	コントロール	Run 1	Run 2	Run 3
pH	-	6.9±0.1	6.8±0.1	6.8±0.1	6.8±0.1	7.2±0.1	7.1±0.1	7.1±0.1	7.1±0.1
TS	%	1.73±0.11	2.67±0.23	2.31±0.15	2.33±0.11	1.58±0.12	2.34±0.27	2.08±0.18	2.19±0.20
TS除去率	%	51.4	49.7	56.5	56.2	55.8	56.0	60.8	58.8
VS	%	0.98±0.06	1.74±0.14	1.50±0.11	1.50±0.07	0.89±0.08	1.49±0.19	1.34±0.11	1.42±0.09
VS除去率	%	63.7	57.6	63.3	63.4	66.9	63.5	67.2	65.3
稲わらのTS除去率	%	-	46.1	66.8	65.8	-	56.4	70.9	64.9
全COD	g/L	12.3±1.9	15.6±3.6	14.9±1.8	15.0±2.9	11.6±1.8	15.1±3.6	13.5±2.2	14.9±3.4
全COD除去率	%	62.1	64.3	66.0	65.6	64.2	65.5	69.1	66.3
溶解性COD	g/L	0.75±0.17	1.07±0.17	0.94±0.25	0.95±0.15	0.88±0.21	1.55±0.17	1.46±0.17	1.40±0.19
アンモニア性窒素	mg-N/L	399±30	273±44	240±18	261±42	493±34	387±51	333±29	364±12
バイオガス発生量	mL/day	925±84	1890±261	1900±230	2024±234	1282±104	1989±143	2169±285	2239±242
メタン含有率	%	56.0±2.6	51.9±2.3	53.9±2.5	54.8±1.5	57.7±1.5	52.7±1.3	54.9±1.4	55.8±1.6
メタンガス発生量	mL/day	593±66	1042±133	1093±145	1175±135	807±66	1107±82	1250±163	1310±139

3.3.2 COD 収支

中温および高温連続式混合嫌気性消化実験におけるCOD収支を図-1および図-2に示す。

COD収支は、両温度域において、90%程度の高い回収率を得ることが出来たが、中温消化のコントロールにおいては、回収率が78%と低かった。工藤の消化日数が20日の連続式混合嫌気性消化実験³⁾においても、コントロールの回収率が低くなる傾向はみられており、中温で消化日数を短くすることで、有機物濃度の低いコントロール系においては、回収率が低下する可能性も考えられた。

次に、稲わらのメタン転換率を、濃縮汚泥のメタン転換率が全てのリアクターで同等であり、酵素からのメタン転換率は100%であると仮定して算出した。ただし、中温消化においては、コントロールの回収率を88%と仮定して算出した。結果、中温消化では、コントロールの濃縮汚泥のメタン転換率が50.1%であるのに対して、Run1で57.5%、Run2で67.3%、Run3で77.8%であった。同様に、高温消化では、コントロールの濃縮汚泥のメタン転換率が54.5%であるのに対して、Run1で57.5%、Run2で84.8%、Run3で91.0%であった。両温度域において、稲わらを粉碎のみで投入するよりも、水処理を併用することで、また水処理よりも酵素処理を併用することでより高い転換率を得られることが確認された。TS除去率と同様に、稲わらのメタン転換率は高温消化で高かった。

3.3.3 消化汚泥の処理特性

実験終了時における消化汚泥の処理特性を表-4に示す。

消化汚泥の脱水性は、稲わらを混合することによって向上することが確認された。この傾向は特に高温

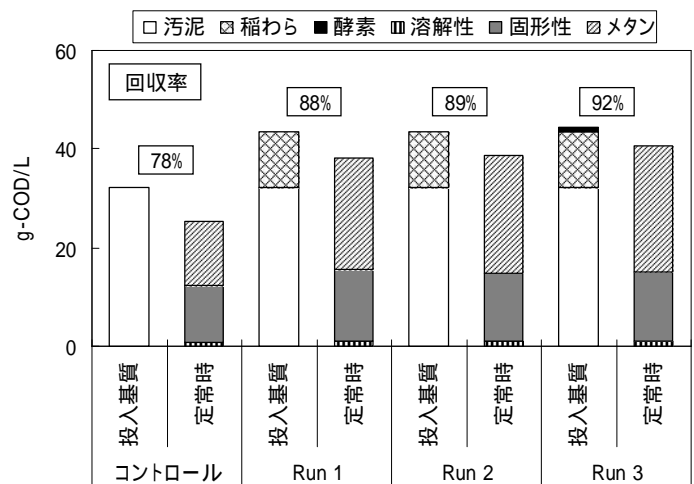


図-1 中温連続式混合嫌気性消化実験におけるCOD収支

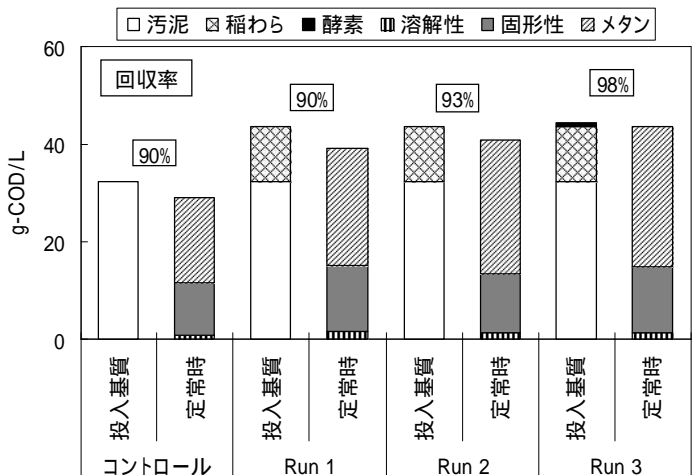


図-2 高温連続式混合嫌気性消化実験におけるCOD収支

消化において顕著であった。消化汚泥脱離液中の全窒素は稲わらの混合に伴い、アンモニア性窒素と同様に減少するが、全リンは稲わらの混合に伴って増加した。しかしながら、その全リンの濃度増加が水処理系に与える影響はごく僅かであると考えられ、さらに、全リンは脱水工程に鉄塩を介在させることで問題なく除去できると考えられた。

表-4 実験終了時における消化汚泥の処理特性

		中温				高温			
		コントロール	Run 1	Run 2	Run 3	コントロール	Run 1	Run 2	Run 3
脱水後の含水率	%	79.6	79.0	78.5	78.8	78.9	75.9	75.3	74.7
全窒素(TN)	mg/L	576	411	387	387	582	474	468	483
全リン(TP)	mg/L	5.1	8.8	7.1	9.3	8.6	15.5	15.1	18.2

4. 稲わらの中温および高温混合嫌気性消化のエネルギー評価

新規システムの導入検討においては、エネルギー面およびコスト面などの LCA 評価が重要である。そのため、本研究では、中温および高温連続式混合嫌気性消化実験結果を用いて、稲わらと下水汚泥の混合嫌気性消化を実施に適用した場合の 1 日あたりのエネルギー収支を、新潟県長岡中央浄化センターをモデルに算出し、本研究が提案するシステム全体でのエネルギー評価を行った。

4.1 評価範囲およびシナリオの設定

本研究で提案する稲わらと下水汚泥の混合嫌気性消化システムの概略フローと評価範囲を図-3 に示す。

本研究では、提案する混合嫌気性消化システムを、稲わらの収集および運搬、稲わらの前処理、消化槽の加温および攪拌、バイオガス利用、消化汚泥処理(コンポスト化)の 5 つの評価項目に大きく分類し、ランニングエネルギーを算出した。増設が必要である稲わら貯蔵庫および可溶化槽については、各評価系列において、最適なサイズを決定し、それに伴う建設エネルギーを算出した。なお、バイオガス利用については、余剰バイオガスを脱硫・精製後にガス会社に売却するシナリオ A とバイオガス全量を消化ガス発電により利用するシナリオ B について検討した。

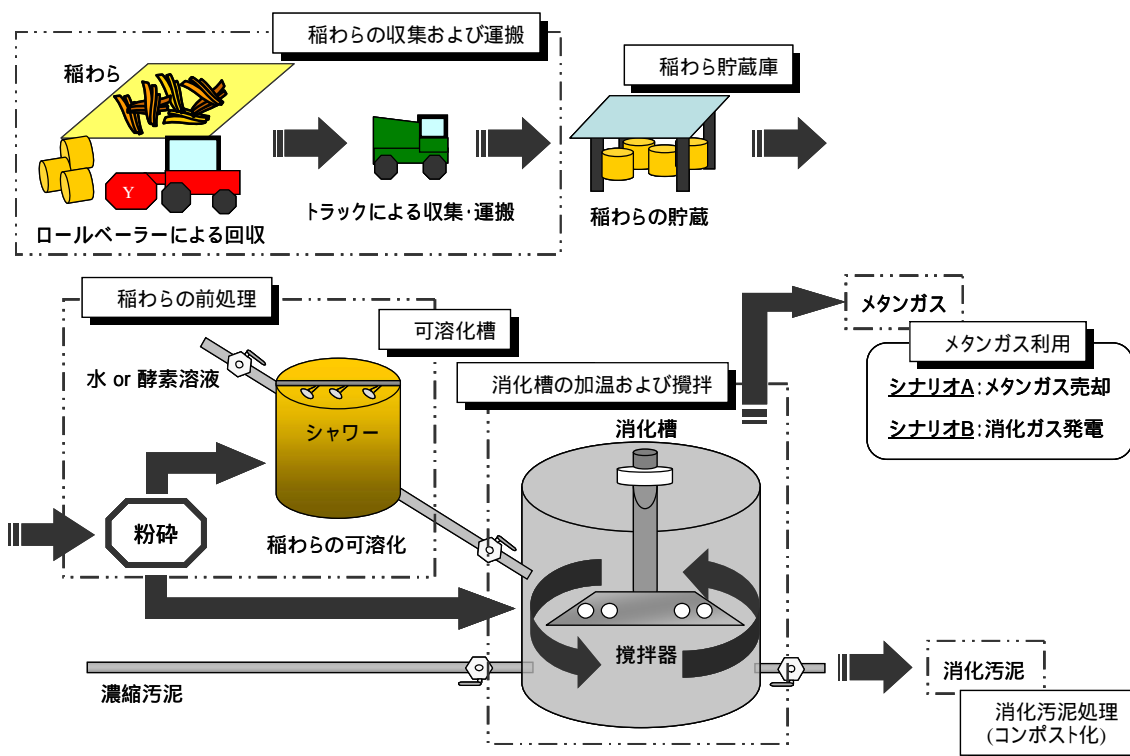


図-3 稲わらと下水汚泥の混合嫌気性消化システムの概略フローと評価範囲

4.2 エネルギー試算に用いる設定値

エネルギー試算は、長岡中央浄化センターをモデルに、表-2の実験系列について、各実験結果を用いて行った。そのため、投入汚泥量は、長岡中央浄化センターにおける年間投入汚泥量 $86,237\text{m}^3/\text{年}$ ⁴⁾とした。また、バイオガス生産量については、連続実験結果(混合液量 1.8L での発生量)を長岡中央浄化センターにおける消化槽容量 3540m^3 (消化日数を 15 日とした場合の容量)において発生するガス量に換算したものをを用いた。なお、投入汚泥濃度は、長岡中央浄化センターでは 4.4%であるが、本研究のエネルギー試算においては、連続実験結果の 3.5%を用いた。

4.3 試算方法

(1) 稲わらの収集および運搬

稲わらの収集および運搬には、田圃に撒かれた稲わらをロールベラーによって回収・圧密するプロセスと回収した稲わらを処理場もしくは処理場付近に運搬するプロセスが必要である。稲わらの回収・圧密エネルギーは、現在の稲わらの有効利用法である鋤き込みと同等であると考えられたために、処理場までの運搬エネルギーのみを試算した。

(2) 稲わらの前処理

稲わら混合系において、収集した稲わらを粉砕するエネルギーと水処理・酵素処理を行うための可溶化槽の加温エネルギーを試算した。

(3) 消化槽の加温および攪拌

消化温度の違いや稲わらの混合が攪拌に与える影響として、消化槽加温エネルギーと攪拌エネルギーを試算した。

(4) バイオガス利用

メタン生産量にメタンの発熱量($0.213\text{Mcal}/\text{mol}$)を乗じて試算した。本研究の評価で、唯一の回収エネルギーである。また、シナリオAでは、脱硫および精製エネルギーを、シナリオBでは、脱硫とガスエンジン(総合熱効率は 74.6%とした)によって発電を行った際の損失エネルギーを試算した。なお、脱硫および精製エネルギーは長岡中央浄化センターにおける実処理に要する電気量⁴⁾から算出した。

(5) 消化汚泥処理(コンポスト化)

消化汚泥の脱水に要するエネルギーとコンポスト設備の加温と攪拌に要するエネルギーを試算した。なお、脱水エネルギーは長岡中央浄化センターにおける実処理に要する電気量⁴⁾から算出した。

(6) 稲わら貯蔵庫および可溶化槽建設

収集した稲わらを利用まで一時保存する貯蔵庫と稲わらの可溶化槽の建設に要するエネルギーを試算した。なお、建設エネルギーは 20 年間の均等償却とした。

4.4 試算結果および考察

シナリオAおよびシナリオBにおけるエネルギー収支の試算結果(投入エネルギーには損失エネルギーを含む)を図-4および図-5に、各シナリオにおける余剰エネルギーを図-6にそれぞれ示す。

高温消化は中温消化と比較して、脱水性の向上から汚泥処理に要するエネルギーは減少するが、消化槽の加温に多大なエネルギーを要する傾向を示した。そのため、余剰エネルギーは高温

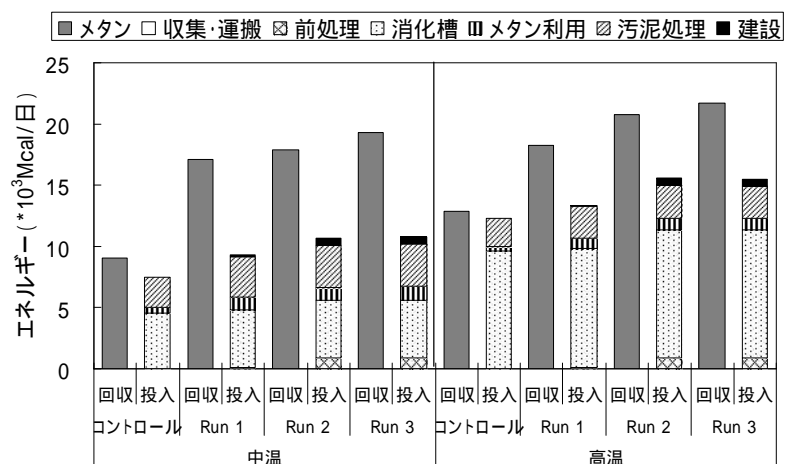


図-4 シナリオAにおけるエネルギー収支

よりも中温で大きかった。これは、今回の実験条件において投入汚泥濃度が3.5%と低く、単位汚泥容量あたりのガス発生量に比べ、加温に多くのエネルギーを要したためと考えられる。なお、投入汚泥濃度が5%程度であれば中温消化に比べ消化率は向上するという実処理場による報告もあることから、低濃度汚泥では、投入エネルギーに対して回収エネルギーが小さくなることが確認された。

次に、系列間の違いを比較すると、投入エネルギーの増加に伴って回収エネルギーも増加していた。しかし、酵素処理を施した Run3 においては、中温および高温の両温度域で、投入エネルギーは Run2 と同程度かそれ以下であるにもかかわらず、回収エネルギーは増加しており、結果として、余剰エネルギーを増加させる傾向を示した。このことから、稲わらに酵素処理を施すことはエネルギー的にも有効であると考えられる。また、稲わらを受け入れることにより新たに必要となる投入エネルギーは全投入エネルギーに対して僅かであり、稲わらの混合によるメタン発生量の増加分によって十分に賄えることが示唆された。最後にシナリオ間で比較を行うと、

消化ガス発電よりもガス売却で余剰エネルギーは大きかった。

5. 結論

- ・ 消化日数 15 日の場合においても、中温および高温消化ともに良好な消化成績を示した。
- ・ メタン生成量や消化汚泥残渣量、脱水性については、高温消化で良好な結果を示したが、上澄み液の水質および消化汚泥の粘度は中温消化で良好であった。
- ・ 両温度域において、稲わらの混合はエネルギー面で評価した場合、システムとして有効であった。
- ・ 余剰エネルギーは、今回の設定条件においては、高温消化よりも中温消化で多く回収できた。
- ・ 稲わらに酵素処理を施すことは、メタン発生量や TS 除去率などの消化効率だけでなく、エネルギー面でも有効であった。

参考文献:

- 1) 落修一, 南山瑞彦, 長沢英和, 鈴木穰: 「蒸煮・爆砕木質と下水汚泥とを混合・嫌気性消化した消化汚泥の処理性」, 下水道協会誌, Vol.42 No.508, pp111-123 (2005)
- 2) 越後崇, 落修一, 南山瑞彦, 斉藤忍: 「蒸気加圧爆砕した草本系廃材と下水汚泥の混合メタン発酵」, 第 39 回下水道研究発表会講演集, pp836-838 (2002)
- 3) 工藤恭平: 「稲わらの高効率メタン発酵を目的とした可溶性前処理方法の検討」, 長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文, p94 (2006)
- 4) 長岡中央浄化センター: 平成 16 年度処理年報

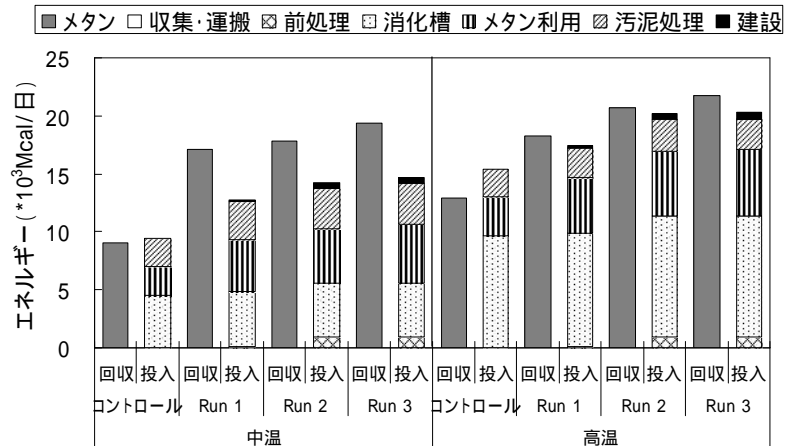


図-5 シナリオBにおけるエネルギー収支

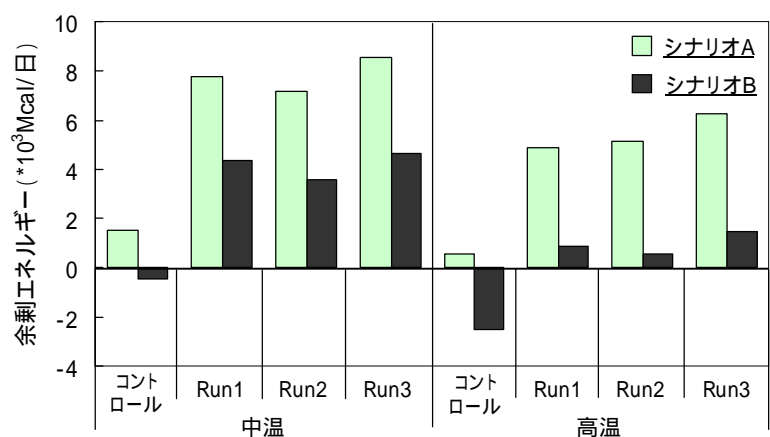


図-6 シナリオAおよびBにおける余剰エネルギー