



日本中央競馬会
特別振興資金助成事業

馬ふん燃焼利用マニュアル

堆肥利用の困難な馬ふんの燃焼利用調査

事業成果報告書



平成 30 年 3 月



一般財団法人 畜産環境整備機構

はじめに

馬ふん等の家畜排せつ物については、これまで堆肥化処理・利用が主として行われてきましたが、堆肥の利用については、原発事故の影響等から地域によって耕種農家での利用が進まない状況があることや、農地への施用量の限界等の問題があり、堆肥化だけではなく、家畜排せつ物法の基本方針であげられているエネルギー利用や副産物である燃焼灰の利用等についても検討する必要性が生じてきております。

しかしながら、馬ふんの燃焼については、燃焼した場合の副資材の種類等による燃焼ガス中のダイオキシンやガス成分及び発生エネルギー量の知見がなく、また燃焼灰の成分についても調査が行われておりません。

このため、日本中央競馬会畜産振興事業の助成をうけて、馬ふんの燃焼時における熱エネルギー量、燃焼排ガスの成分、燃焼灰の成分等を調査し取りまとめました。

本書が馬産地、馬関係者の皆様方の一助となり、馬生産の復興、畜産振興の推進に資することができれば幸甚です。

平成 30 年 3 月

一般財団法人 畜産環境整備機構

目 次

I 馬ふん燃焼利用マニュアル

1	馬ふんを燃料とした燃焼試験	1
1)	燃焼試験のねらい	1
2)	燃焼試験に共試した材料	1
3)	燃焼方式（ロータリーキルン方式）	1
4)	燃焼試験	2
(1)	燃焼条件と燃焼方法	2
(2)	燃焼排ガスの成分	3
(3)	燃焼灰の成分とその利用方法	4
5)	馬ふんを燃焼利用するための材料の検討	4
6)	実用化に向けて	5
(1)	馬ふんの燃料化のための前処理	5
(2)	燃焼法の改善	5
(3)	燃焼に適した馬ふん材料	5
2	燃焼熱エネルギーの利用	6
1)	燃焼時に発生する熱エネルギーの利用	6

II 堆肥利用の困難な馬ふんの燃焼利用調査事業成果報告書

1	馬ふんによる燃焼試験	7
1)	燃焼試験材料	7
(1)	馬ふん燃焼試験材料の性状調査	7
(2)	馬ふん燃焼試験材料の組成調査	7
(3)	電気炉による燃焼及び溶融試験	7
(4)	電気炉による燃焼灰の有害重金属の分析	8
(5)	馬ふん燃焼材料の改質及び電気炉による溶融試験	11
2)	燃焼方式	14
3)	燃焼試験結果	14
(1)	予備燃焼試験	14
(2)	燃焼試験－1	16
(3)	燃焼試験－2	19
(4)	燃焼試験－3	22
(5)	燃焼試験の燃焼ガス（排ガス）及び燃焼灰の分析	28
4)	燃焼時の課題	31
2	燃焼熱エネルギーの利用	32
1)	燃焼材料の前処理	32

(1) 通風乾燥試験	32
2) 燃焼試験材料の発熱量	33
3) 燃焼時の発生熱エネルギーと回収利用熱エネルギー	33
(1) ウッドシェーブ混合馬ふんの乾燥処理	33
4) 燃焼熱エネルギーの利用	35
(1) 低水分材料（水分 22.3%）での燃焼熱エネルギーの利用	35
(2) 高水分材料（水分 49.4%）での燃焼熱エネルギーの利用	36
(3) 中水分材料（水分 39.0%）での燃焼熱エネルギーの利用	37
(4) 稲わら混合馬ふん材料での燃焼熱エネルギーの利用	37
5) 燃焼灰の発生量	40
3 馬ふん堆肥の利用調査の事例	41
1) 馬肉生産農場（九州）	41
2) 乗馬クラブ（関東）	42
3) 馬肉生産法人（東北）	43
4) 競走馬育成牧場（東北）	44
5) 育成・調教牧場（東北）	45
6) 飼育農場（東北）	46
4 謝辞	47
5 事業推進委員及び執筆担当者	47

I 馬ふん燃焼利用マニュアル

～ロータリーキルン式燃焼炉による馬ふんの燃焼試験～

I 馬ふん燃焼利用マニュアル

～ロータリーキルン式燃焼炉による馬ふんの燃焼試験～

1 馬ふんを燃料とした燃焼試験

1) 燃焼試験のねらい

バイオマス資源を燃焼利用する場合、材料中に塩類や窒素分、硫黄分、塩素などが含まれているため、燃焼中に材料が溶けて燃焼炉が目詰まりする、排ガス中のNO_xやSO_x成分が高くなる、ダイオキシン類が発生するなどの問題点があります。そこで、実際に馬ふん材料の燃焼試験を行い、熔融現象を低減させるための燃料の改質技術や、環境汚染物質の発生を抑制するための燃焼条件を明らかにするため燃焼試験を実施しました。

2) 燃焼試験に供試した材料

日本中央競馬会的美浦トレーニングセンターの稲わら混合馬ふん堆肥(写真1)と栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふん(写真2)のそれぞれ敷料の種類異なる敷料混合馬ふんで燃焼試験を行いました。



写真1 稲わら混合馬ふん堆肥



写真2 ウッドシェーブ混合馬ふん

3) 燃焼方式 (ロータリーキルン方式)

馬の敷料の稲わら、ウッドシェーブとも乾くと軽いため風で飛びやすい、特にウッドシェーブは粒子が細かいので、火格子を用いる燃焼炉では格子の隙間から燃焼材料が落ちてしまうという問題が発生するため、粉状のものから塊状のものまでの燃焼が可能なロータリーキルン式燃焼炉(図3)で燃焼試験を行いました。円筒形の燃焼炉の外周部には6本の通気管が等間隔で配置されており、通気管の細孔から外壁に沿って暖めた空気を噴出し、旋回流を起こして燃焼させる方式です。供試したロータリーキルン式燃焼炉は木質チップの場合116kW(約10万kcal/時)の熱出力で、燃焼炉からの火炎の噴出温度は1,000℃以上です。

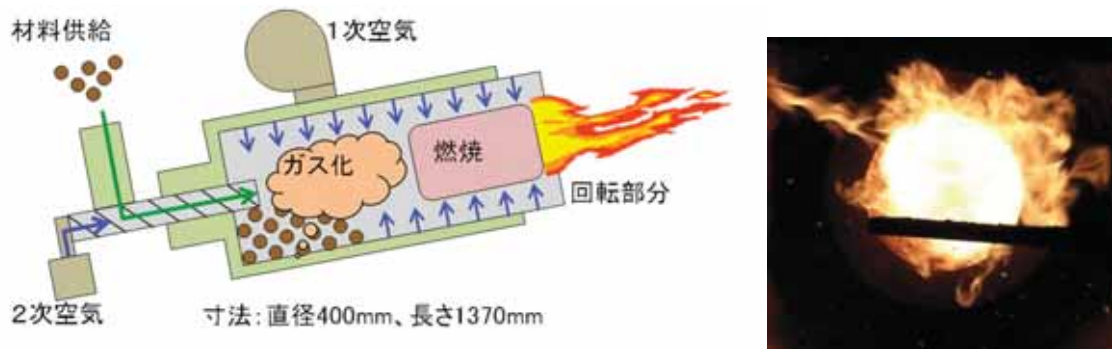


図3 ロータリーキルン式燃焼炉の構造（左）と燃焼状況（右）

4) 燃焼試験

(1) 燃焼条件と燃焼方法

稲わら混合馬ふん、ウッドシェーブ混合馬ふんともそのまま燃焼させると馬ふんと敷料が分離して燃焼し、馬ふんは炉内で熔融して溶岩状の塊（図4）となるため、円筒状に成型（図5）し燃焼させました。また、木質チップと馬ふんペレットを併給すると安定して燃焼させることができる。燃焼システムを図6に、燃焼中の温度変化を図7に示します。



図4 溶融した馬ふんの塊

図5 稲わら混合馬ふんペレット（左）と同燃焼灰（右）



図6 ロータリーキルン式燃焼炉の燃焼システム

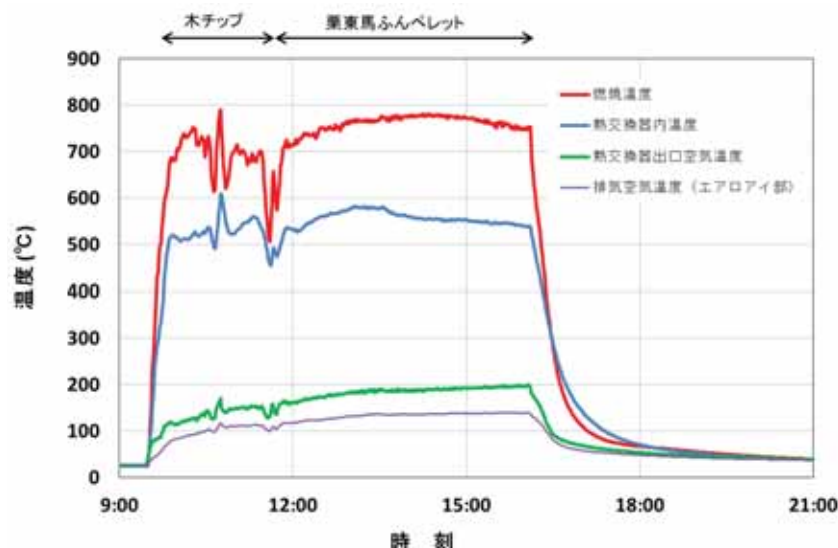


図7 ウッドシェーブ混合馬ふんペレットの燃焼結果

(2) 燃焼排ガスの成分 (ダイオキシン類の発生、窒素酸化物、CO, CO₂等)

木質チップを燃焼させ、ロータリーキルン式燃焼炉を予熱した後ウッドシェーブ混合馬ふんペレットの燃焼に切替えます。燃焼出口部の温度は700°C以上で安定的に燃焼しており、排ガス中のCO₂濃度は約12%、COが約100ppm、NO_xが約220ppmレベルであり、SO_xもわずかな検出でした(表1)。ダイオキシン類の発生量も基準値以内に収まります(表2)。

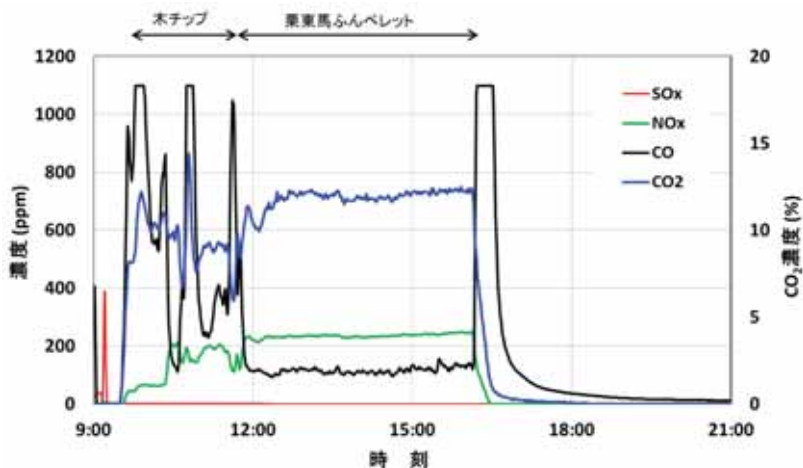


図8 ウッドシェーブ混合馬ふんペレット燃焼時の排ガス成分

表1 燃焼試験中の排ガス測定(平成29年8月4日、12:00~16:00)

計量項目	単位	栗東ウッドシェーブ混合馬ふんペレット	計量方法
窒素酸化物濃度	ppm	240	JIS K 0103(2011)
硫黄酸化物濃度	ppm	30	JIS K 0104(2011)
ばいじん濃度	g/m ³ N	0.049	JIS Z 8808(2013)
塩化水素濃度	mg/m ³ N	<50	JIS K 0107(2012)
測定者:(株)環境研究センター(つくば市羽成3-1)			
測定場所:農研機構 中央農業研究センター			

表2 燃焼中のダイオキシン類等分析(測定日：平成29年8月4日)

燃焼供試材料	ダイオキシン類濃度計量の結果			備 考
	実測濃度	濃度	毒性等量	
栗東ウッドシェーブ混合馬ふんペレット	230 ng/m ³	160 ng/m ³	3.4 ng-TEQ/m ³	燃焼炉出口温度700℃、燃焼状態よし、溶融物が多くみられた
(0℃、101.32kPa) JIS K 0311(2008)				
測定場所：農研機構 中央農業研究センター			測定者：(株)環境研究センター	
(参考)毒性等量：2t/h未満 5 ng-TEQ/m ³ 、2～4t/hまで1 ng-TEQ/m ³ 、4t/h以上 0.1ng-TEQ/m ³				

(3) 燃焼灰の成分とその利用方法 (有害重金属の含有量、肥料成分とその利用)

栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんペレットの燃焼試験 (測定日：平成29年8月4日)における燃焼灰の有害重金属の含有量は、土壤汚染対策法による土壤含有率 (カドミウム 150mg/kg、水銀 15mg/kg、ヒ素 150mg/kg、鉛 150mg/kg) と比べると極めて少なくなりました (表3)。また、燃焼灰の肥料成分やく溶率も高く、肥料分として利用が可能でした (表4)。

表3 燃焼灰中の有害重金属の分析

試料名	カドミウム	水銀	ヒ素	鉛	亜鉛
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
栗東トレセンウッドシェーブ混合馬ふんペレットの燃焼灰(燃焼試験日：2017.8.4)	0.6	<0.01	0.6	1.6	320

表4 馬ふん燃焼灰の全量およびく溶性濃度分析結果

試料名	性状	項目	単位	リン酸	加里	石灰	苦土
栗東トレセンウッドシェーブ混合馬ふんペレット燃焼灰	やや濃い灰色 細かい	全量	乾物%	8.1	10.7	10.2	3.7
		<溶性	乾物%	8.0	10.8	8.5	2.5
		<溶率	%	100	101	83	68

注2) <溶率(%)：成分全量に占めるく溶性成分の割合。

注3) 分析には1mm篩を通し、さらに微粉碎した灰を用いた。

5) 馬ふんを燃焼利用するための材料の検討

美浦トレーニングセンターの稲わら混合馬ふん堆肥と栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんをペレット化して燃焼試験に供試しましたが、燃焼時において、稲わら混合馬ふん堆肥は、ペレット化しても溶融し易いため石灰を加え、さらに燃焼し易くするために木質チップを助燃剤として混合するなど燃焼時に幾つかの作業が必要となりました。このようなことから、馬ふんを燃焼利用するには、稲わら混合した馬ふん (堆肥) は燃焼には適さないと考えられます。

6) 実用化にむけて (まとめと提案)

(1) 馬ふんの燃料化のための前処理

ウッドシェーブ混合馬ふんは、最初に乾燥・粉砕してから円筒状に成型処理します。残餌由来の長い牧草が混入するので、事前にカッター等で細断し成型に適した水分まで乾燥する必要があります。成型処理は、スクリーンで材料を圧縮しながら押出す方式の圧縮成型機により直径 10~20mm の円柱形に成型します。稲わら混合馬ふんはそのままでは 800℃以下の温度でも熔融するため、消石灰を乾燥物に 5%混合してから成型します。

(2) 燃焼法の改善

馬ふんを燃焼して熱利用する場合、熱交換効率の向上や、ダイオキシン類の発生低減のためには燃焼温度を高く維持する方が効率的です。一方で、燃焼温度を高くすると熔融しやすくなるという問題もあるので、ロータリーキルン式燃焼により蒸気発電などを大規模に行う場合には、ロータリーキルン部は酸素不足の一次燃焼として燃焼温度を 800℃以下の熔融が発生しない温度に維持し、中間部から二次燃焼空気を吹き込み 850℃以上の高温に 2 秒間以上維持し、熱交換器で短時間に 250℃以下に冷却する構造が望ましいと考えられます (図 9)。

(3) 燃焼に適した馬ふん材料

馬の飼育には大量の敷料が使われます。本試験では敷料として稲わらとウッドシェーブが使われた馬ふんを燃焼試験に使用しましたが、稲わらは比較的低い温度でも熔融し易く、火付きも悪いため、燃焼をスムーズに行わせるには敷料としてウッドシェーブを用いることが望まれます。

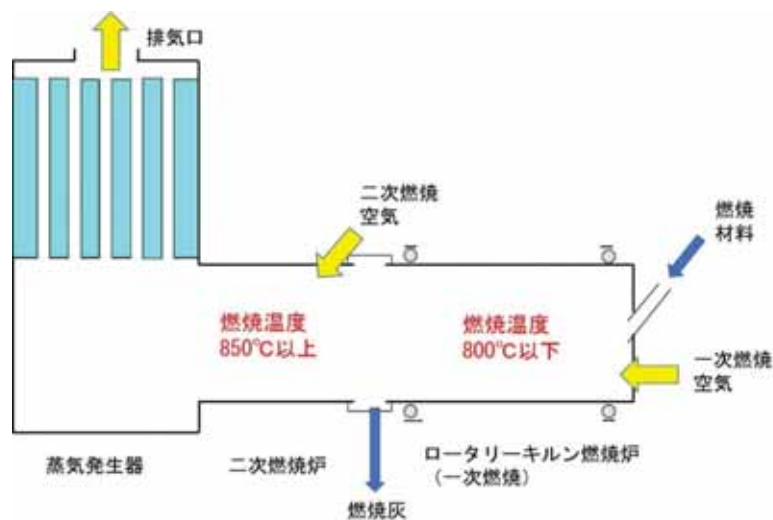


図 9 ロータリーキルン式燃焼システム

2 燃焼熱エネルギーの利用

1) 燃焼時に発生する熱エネルギーの利用

成型処理したウッドシェーブ混合馬ふんペレットをロータリーキルン式燃焼炉等で燃焼させ、熱交換により蒸気を発生させ発電を行う。蒸気タービンを回した後の蒸気の一部は、ウッドシェーブ混合馬ふんの乾燥や温水製造などに使用するが、残りの廃熱については、蒸気を温水に戻すため潜熱分をクーリングタワー等で大気中に放出するシステムとしました。処理規模は、ウッドシェーブ混合馬ふんの処理量が現物で80t/日、平均水分49.4%で、乾物量で40.48t/日でそろえてあります。高圧蒸気発電を前提に蒸気の発生効率が80%、発電効率21%で試算しました（図10、11）。

発電能力は各々1200kW程度で、発電時に発生する蒸気を復水する際に発生する蒸発潜熱で馬ふんを乾燥します。夏期のウッドシェーブ混合馬ふんは水分が低く乾燥が不要です。乾燥した残りの熱量を暖房や温水製造に利用可能です。

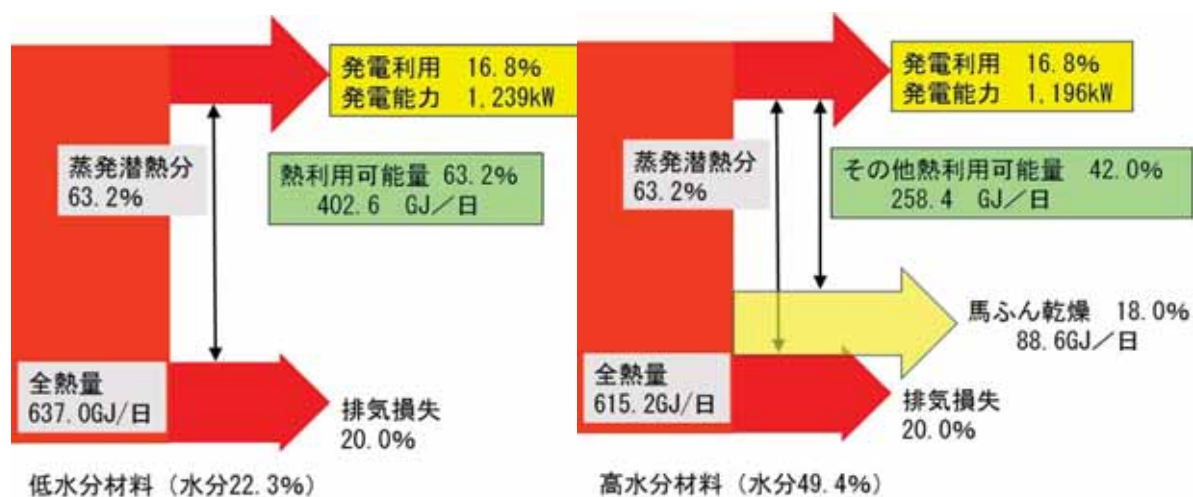


図10 ウッドシェーブ混合馬ふんペレットでの熱利用（左：低水分、右：高水分）

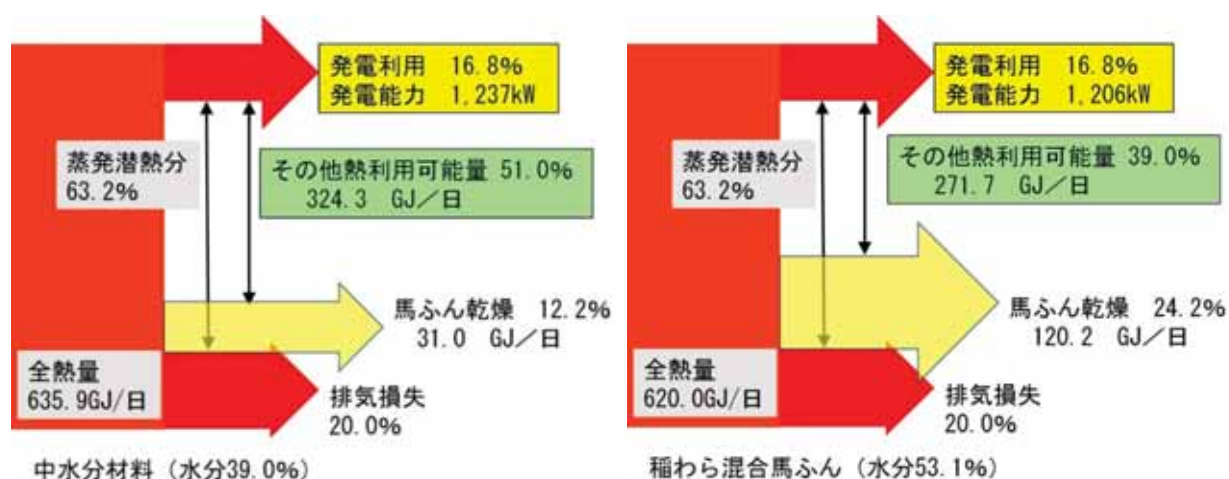


図11 ウッドシェーブ混合馬ふん（左）と稲わら混合馬ふん（右）ペレットでの熱利用

Ⅱ 堆肥利用の困難な馬ふんの 燃焼利用調査事業成果報告書

1 馬ふんによる燃焼試験

1) 燃焼試験材料

美浦トレーニングセンターの稲わら等混合馬ふん及び栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんについて燃焼材料としての特性調査を行った。

(1) 馬ふん燃焼試験材料の性状調査

美浦トレーニングセンターの稲わら等混合馬ふんの水分は平成 27 年 7 月初旬で 56.1%、同 10 月初旬で 53.1%であり、平成 29 年 4 月初旬で 57.1%、同 7 月初旬で 62.7%と高かった。栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんの水分は、平成 27 年 7 月初旬調査で 22.3%、同 10 月初旬で 45.2%、平成 30 年 1 月下旬に馬ふん運搬車 10 台について測定した結果の平均値で 49.4%であった。

(2) 馬ふん燃焼試験材料の組成調査

燃料組成を明らかにするため、各材料について電気炉で 550℃4 時間燃焼させ有機物含量を求めた(表 1-1)。栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合は、木質系の敷料を使用しているため、稲わら等を敷料としている美浦トレーニングセンターの稲わら等混合馬ふんよりも有機物含量が高い。なお、美浦トレーニングセンターの馬ふん堆肥は生材料の 71%程度の有機物含量となっていた。

燃焼させたところ、直径 1 mm 以上の砂粒が灰に 7~20%混合していた。燃焼灰を肥料利用する際には、風力選別など砂を除去する必要のあることがわかった。

表 1-1 各燃焼材料の有機物含有量他

平均値	有機物含量	灰分量	灰への石 混入割合
	%	%	%
美浦生粉碎(風乾)	86.33	13.67	7.38
美浦堆肥粉碎	61.45	38.55	24.30
栗東生粉碎(風乾)	93.11	6.89	19.49

(3) 電気炉による燃焼及び熔融試験

燃焼中に燃焼材料が熔融すると未燃焼部分が発生する、火格子炉では閉塞して燃焼不能になる、クリンカ(炉壁及び熱交換パイプなどに熔融した材料が付着する現象)が発生して熱交換不良になるなどの問題がある。そこで、栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんと美浦トレーニングセンターの稲わら混合馬ふんについて、550℃で灰化した材料を、700~1100℃の範囲で 50℃ごとに 20 分間加熱し熔融状況を確認した。

栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんは 1100℃でも熔融しなかったが、美浦トレーニングセンターの稲わら混合馬ふんは 800℃で熔融が始まった(表 1-2)。850℃での熔融状況を図 1-1 に示す。美浦トレーニングセンターの稲わら混合馬ふんは、稲わら等の敷料の影響で熔融温度が低くなっていると考えられるが、一般の工業炉では燃焼温度を 800℃以上に設定しているため、このままでは燃焼できないことが明らかとなった。なお、同センターの堆肥では熔融開始温度は 1,000℃上となっているが、原料の振れ幅の範囲と考えられる。

表 1-2 マッフル炉による馬ふんの燃焼条件別の有機物と灰分、灰への石の混入状況

燃焼温度	燃焼時間	美浦トレセン馬ふん(稲わら)			美浦トレセン馬ふん堆肥(稲わら)			栗東トレセン馬ふん(ウッドシェーブ)			前処理
		有機物	灰分	灰への石の混合割合	有機物	灰分	灰への石の混合割合	有機物	灰分	灰への石の混合割合	
°C	min	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
550	240	86.33	13.67	7.38	61.45	38.55	24.30	93.11	6.89	19.49	
700	20	87.05	12.95	8.06	67.09	32.91	35.35	95.48	4.52	13.37	550°C-4h
750	20	86.91	13.09	7.46	65.80	34.20	37.06	94.24	5.76	14.73	550°C-4h
800	20	86.14	13.86		64.24	35.76	13.58	95.12	4.88	12.59	550°C-4h
850	20	86.64	13.36		69.23	30.77	37.55	95.44	4.56	9.11	550°C-4h
900	20	85.85	14.15		65.47	34.53	17.31	94.58	5.42	17.28	550°C-4h
950	20				70.70	29.30	40.44	94.21	5.79	20.69	550°C-4h
1000	20				67.12	32.88	32.76	93.60	6.40	12.08	550°C-4h
1050	20				60.13	39.87		94.10	5.90	32.48	550°C-4h
1100	20							94.64	5.36	34.46	550°C-4h

注:分析試料は風乾後(美浦堆肥はそのまま)1軸カッターミル(下部穴径5mm)で破砕してから使用した。

分析試料は直径100mmの丸皿のるつぽに入れ、電気コンロ上で予備炭化した後マッフル炉で燃焼させた。

分析試料には石(砂粒)が混入していたため、灰を1mm篩いでふるい、砂粒を分離してから有機物含量と灰分を計算してある。

表中の着色部分は灰が溶融している部分を示す。



図 1-1 燃焼灰の性状(850°C)

(4) 電気炉による燃焼灰の有害重金属の分析

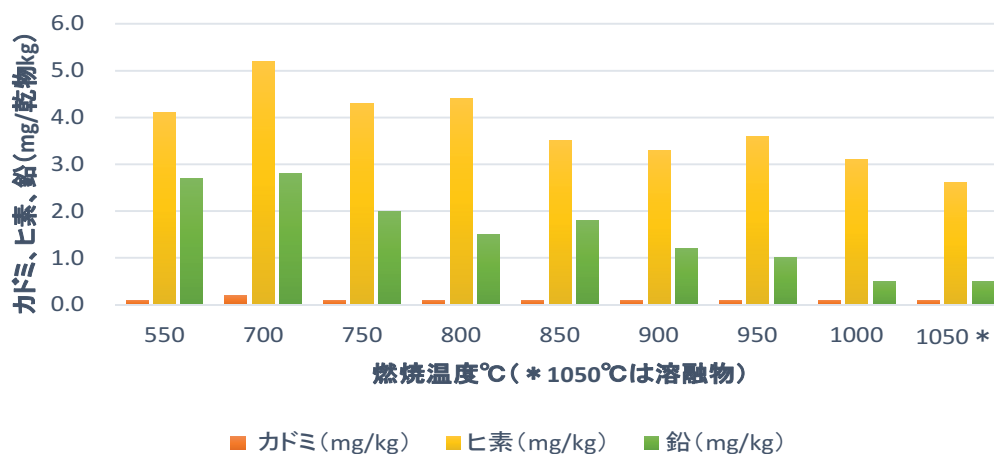
美浦トレーニングセンターの稲わら混合馬ふん堆肥と栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんを電気炉で温度別に燃焼し、その燃焼灰中の有害重金属類を分析した(表 1-3)。どの材料も肥料取締法の汚泥肥料中の有害重金属の許容値(カドミウム 5mg/kg、水銀 2mg/kg、ヒ素 50mg/kg、鉛 100mg/kg)以下であった(土壌含有量基準は水銀:15mg/kg、カドミウム、鉛、ヒ素:150mg/kg以下)。両燃焼灰とも燃焼温度が上昇するに従ってヒ素を除いて重金属の含有率は低下する傾向にあった(図 1-2、1-3)。特に亜鉛、鉛は含有率が大きく低下した。美浦トレセンの燃焼灰ではヒ素が栗東トレセンの燃焼灰より含有量が多く、鉛は逆の傾向にあった。

表 1-3 電気炉による燃焼灰の有害重金属の分析結果（分析機関：（株）環境研究センター）

燃焼温度 °C	燃焼時間 min	出所	材料	燃焼状態	乾物あたり 分析結果(mg/乾物kg)					
					カドミウム	水銀	ヒ素	鉛	亜鉛	
800	20	美浦	生ふん	熔融	黒褐色、塊状も含まれる	0.1	<0.01	5.2	1.2	94
800	20	美浦	堆肥	1mm以下	濃い灰色砂状	<0.1	<0.01	3.9	1.3	71
800	20	栗東	生ふん	1mm以下	灰色、細かい	0.8	<0.01	2.3	5.0	643
750	20	美浦	生ふん	1mm以下	濃い灰色砂状	0.2	<0.01	5.5	1.5	180
750	20	美浦	堆肥	1mm以下	濃い灰色砂状	0.1	<0.01	4.3	2.0	140
750	20	栗東	生ふん	1mm以下	灰色、細かい	0.9	<0.01	2.6	5.1	753
850	20	美浦	堆肥	1mm以下	薄茶色、細粒石状	0.1	<0.01	3.5	1.8	49
850	20	栗東	生ふん	1mm以下	灰色、細かい	0.7	<0.01	2.2	4.1	643
900	20	美浦	堆肥	1mm以下	薄茶色、細粒石状	<0.1	<0.01	3.3	1.2	33
900	20	栗東	生ふん	1mm以下	灰色、細かい	0.5	<0.01	2.0	3.1	502
1100	20	栗東	生ふん	1mm以下	灰色、細かい	0.2	<0.01	2.2	1.7	301
550	240	美浦	生ふん	1mm以下	濃い灰色、粉状	0.3	<0.01	5.8	2.1	295
550	240	美浦	堆肥	1mm以下	濃い灰色、粉状	0.1	<0.01	4.1	2.7	171
550	240	栗東	生ふん	1mm以下	薄い灰色、粉状	0.7	<0.01	2.2	4.6	635
700	20	美浦	生ふん	1mm以下	濃い灰色、粉状	0.3	<0.01	5.7	1.5	261
700	20	美浦	堆肥	1mm以下	濃い灰色、粉状	0.2	0.01	5.2	2.8	191
700	20	栗東	生ふん	1mm以下	薄い灰色、粉状	1.1	0.01	2.3	5.0	857
800	20	美浦	生ふん	熔融	濃い灰色、塊状	0.2	<0.01	4.4	1.7	64
800	20	美浦	堆肥	1mm以下	濃い灰色、砂状	<0.1	<0.01	4.4	1.5	42
800	20	栗東	生ふん	1mm以下	薄い灰色、粉状	0.3	<0.01	2.2	1.8	331
950	20	美浦	堆肥	1mm以下	濃い灰色、砂状	<0.1	<0.01	3.6	1.0	18
950	20	栗東	生ふん	1mm以下	薄い灰色、粉状	0.4	<0.01	1.9	3.0	391
1000	20	美浦	堆肥	1mm以下	濃い灰色、砂状	<0.1	<0.01	3.1	<0.5	15
1000	20	栗東	生ふん	1mm以下	薄い灰色、粉状	0.2	<0.01	2.0	0.7	231
1050	20	美浦	堆肥	熔融	濃い灰色、塊状	<0.1	<0.01	2.6	<0.5	15
1050	20	栗東	生ふん	1mm以下	薄い灰色、粉状	0.3	<0.01	2.5	1.5	280

備考 カドミウム、鉛、亜鉛：ICP発光分光分析法。ヒ素：水素化物発生ICP発光分光分析法。水銀：還元気化原子吸光度法。

カドミウム、ヒ素、鉛(美浦)



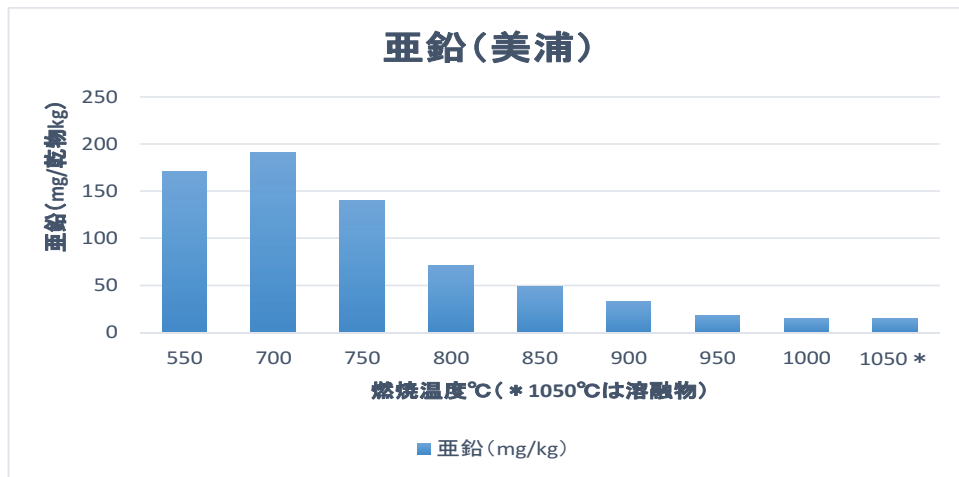


図 1-2 美浦トレセンの燃烧灰の燃烧温度別の有害重金属含有率の推移

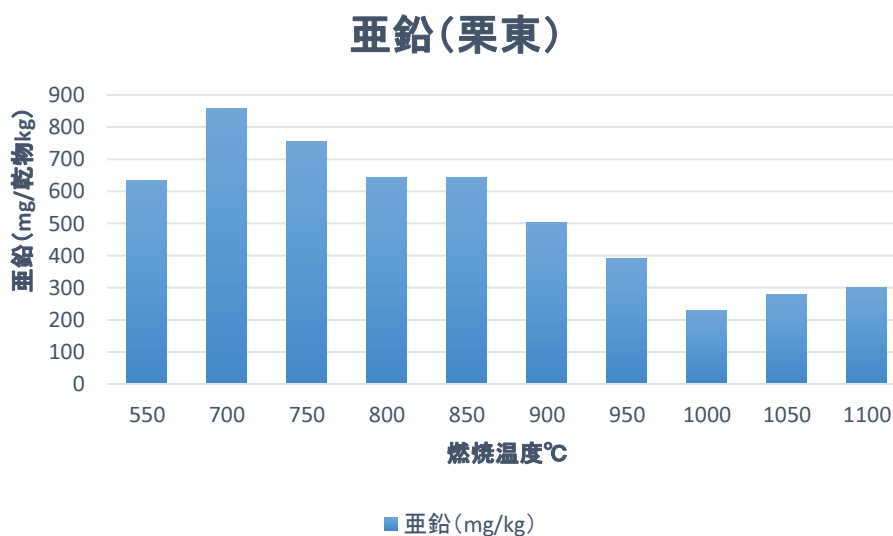
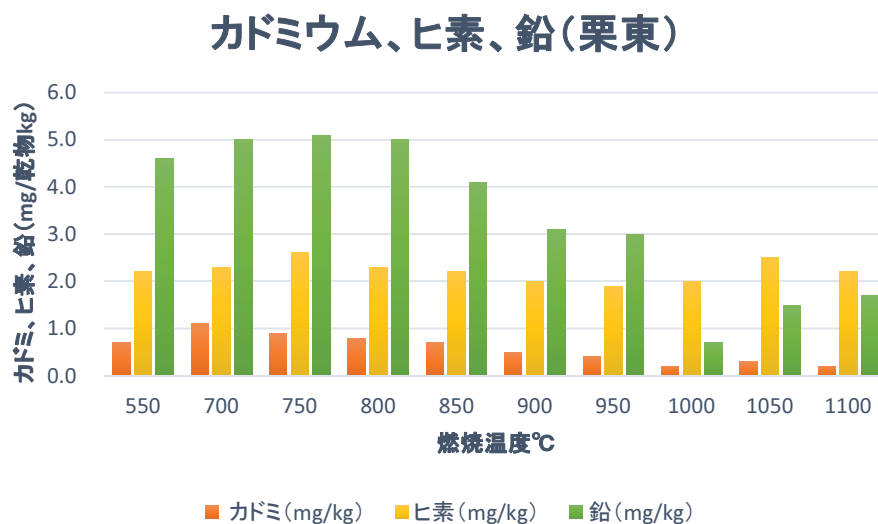


図 1-3 栗東トレセンの燃烧灰の燃烧温度別の有害重金属含有率の推移

(5) 馬ふん燃焼材料の改質及び電気炉による溶融試験

平成 27 年度の燃焼試験により、栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんは、ウッドシェーブと馬ふんに分離して燃焼し、馬ふんが溶融するという問題点があった。また、美浦トレーニングセンターの稲わら混合馬ふん堆肥は 800℃で溶融するため、安定燃焼をさせるには石灰添加が必要と判断された。このため、両トレーニングセンターの敷料混合馬ふん堆肥について、材料の乾物当たりの消石灰添加量を 0、5、10、15、20%に変え、ローラー・ディスクダイ式成型機で直径 8mm のペレット状に加工し、電気炉で 800～1200℃の範囲で加熱し溶融現象の発生状況を確認した。

美浦トレーニングセンターの稲わら混合馬ふん堆肥ペレットでの溶融状況を表 1-4 と図 1-4 に示す。稲わら混合馬ふん堆肥のみでは 800℃で溶融するが、消石灰の添加量が増加するにつれ溶融温度は上昇する。5%の消石灰添加であれば 900℃まで溶融現象の発生を軽減できると判断した。平成 27 年度採取の栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふん堆肥ペレットでの溶融試験結果を表 1-5 と図 1-5 に示す。消石灰を添加しないと 900℃で表面の一部が溶融し軟化したが、粉碎できる状況であったので、燃焼温度を低く保つ燃焼方式とすることにして消石灰を添加せず燃料化することとした。同様に、平成 28 年度に採取した栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんペレットで 50℃刻みに溶融試験を行った結果、950℃で軟化及び部分溶融が発生し、1000℃で溶融することがわかった（図 1-6）。

燃焼試験のために、美浦トレーニングセンターの稲わら混合堆肥はφ6mm の孔径のハンマーミル粉碎機で粉碎後、水分 20%に調製し消石灰を原料の乾物量に対し 5%混合調製した。また、栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんは通風式の 1.5m³ のフレキシブルコンテナで乾燥後、同様に粉碎した。ディスクダイはペレット径 8mm、有効加圧長 24mm のものを用い、3.7kW のローラー・ディスクダイ式成型機でペレット状燃料に加工した。成型能力は、美浦トレーニングセンターの稲わら混合堆肥が 128.9kg/h、栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんが 55.8kg/h と高い処理能力を示した。

表 1-4 美浦トレーニングセンターの稲わら混合馬ふん堆肥ペレットの溶融状況

供試材料	燃焼温度						
	800	900	1000	1050	1100	1150	1200
堆肥のみ	△	△	△	×	×	×	×
堆肥+5%消石灰	○	○	△	△	△	×	×
堆肥+10%消石灰	○	○	○	○	△	△	×
堆肥+15%消石灰	○	○	○	○	○	○	△
堆肥+20%消石灰	○	○	○	○	○	○	△

注：図中の ○は非溶融 △は軟化 ×は溶融を示す。
 軟化は表面が一部溶けて堅くなってもつぶれて灰が粉状になる状態。
 消石灰の混合割合は堆肥の乾物重量に対する比率
 ペレット直径は8mm、切断長20mmにセットしたものを使用した。

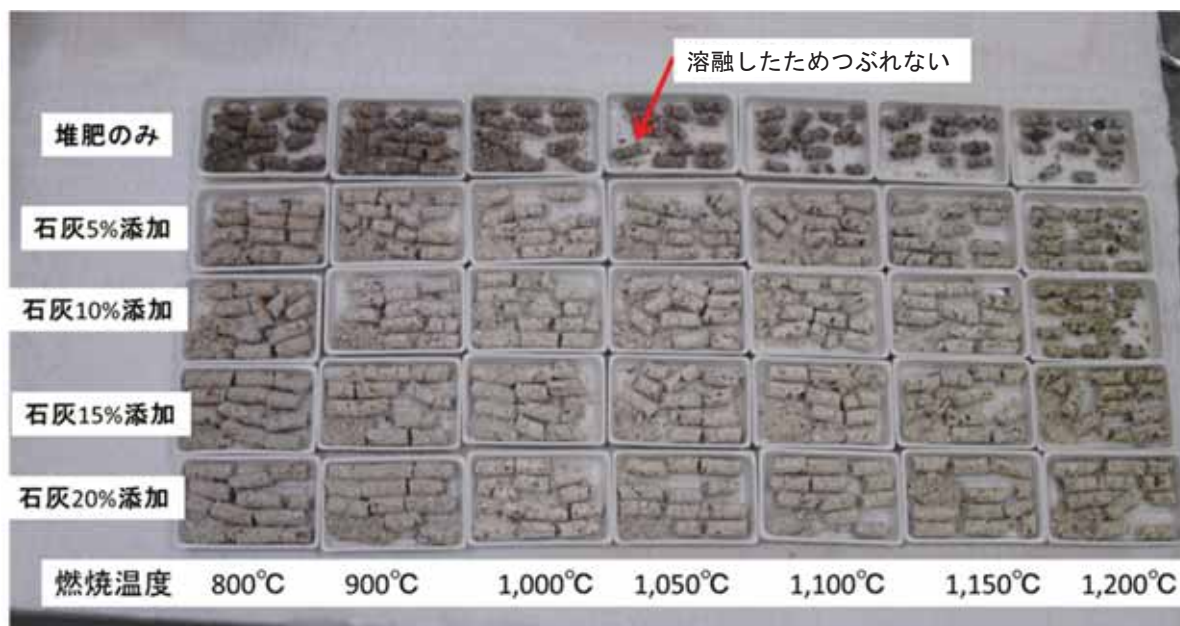


図 1-4 美浦トレーニングセンターの稲わら混合堆肥ペレットの溶融試験結果

表 1-5 栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふん堆肥ペレットの溶融状況

供試材料	燃焼温度				
	800	900	1000		
堆肥のみ	○	△	×		
堆肥+5%消石灰	○	○	△		
堆肥+10%消石灰	○	○	○		
堆肥+15%消石灰	○	○	○		
堆肥+20%消石灰	○	○	○		

注：図中の ○は否溶融 △は軟化 ×は溶融を示す。
 軟化は表面が一部溶けて堅くなってもつぶれて灰が粉状になる状態。
 消石灰の混合割合は堆肥の乾物重量に対する比率
 ペレット直径は8mm、切断長20mmにセットしたものを使用した。

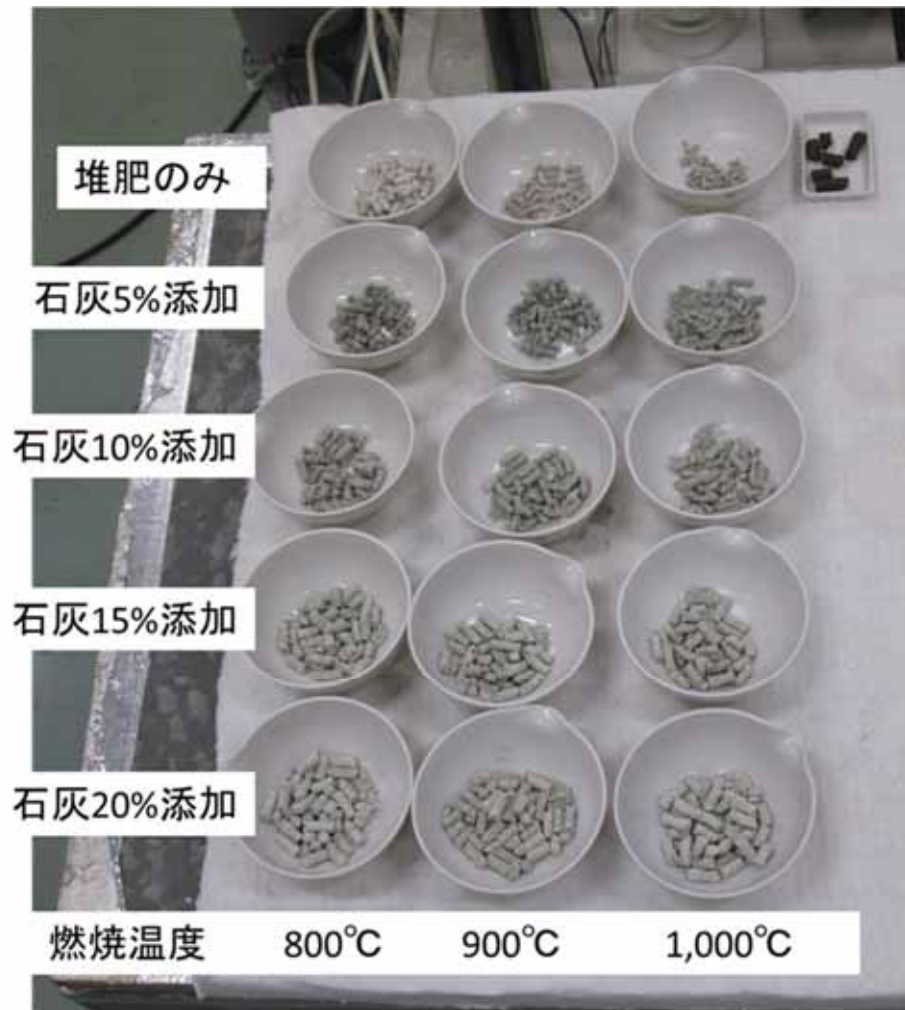


図 1-5 栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふん堆肥ペレットの溶融試験結果



図 1-6 栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんペレットの温度別の溶融状況

2) 燃焼方式

一般的な燃焼方式としては、火格子炉、流動床炉、ロータリーキルン炉が用いられる。このうち、流動床炉は熱風で加熱した砂を流動させた中に燃焼材料を投入して燃焼させる方式で、加熱した砂の蓄熱エネルギーが使えるため湿った材料の燃焼も容易であり、流動床部分の温度を 700℃程度と低く維持することも可能なため熔融しやすい材料も燃焼できるという特徴がある。一方で、砂を流動させるだけの風速があるため、ウッドシェーブやわら類などのかさ密度の低いものはそのまま吹き飛んでしまうという問題点があるため、稲わら混合馬ふんやウッドシェーブ混合馬ふんの燃焼には適さないと判断した。

また、火格子炉は粒子径の小さい材料が混合すると火格子から落ちてしまう、試験用の小型炉では燃焼温度の細かい制御が困難という問題があるため、今回の馬ふんの燃焼方式からは除外した。

以上のことから、小型のロータリーキルン式燃焼炉で燃焼試験を実施することとした。ロータリーキルン式燃焼炉の構造と燃焼状況を図 1-5 に示す。

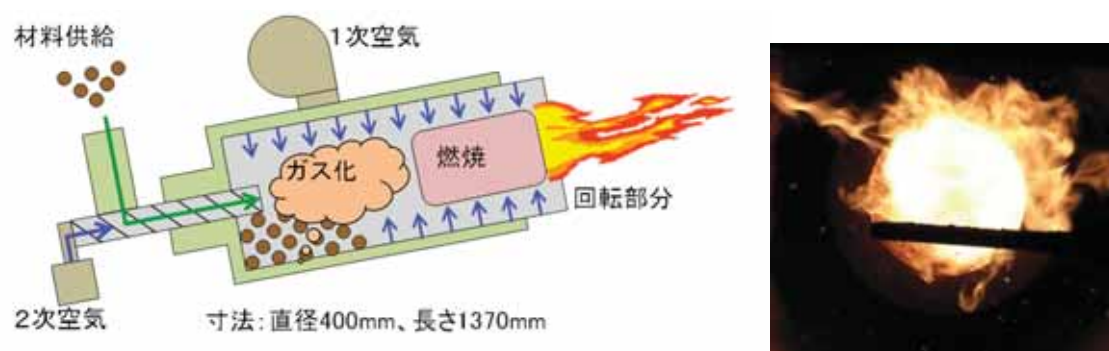


図 1-7 ロータリーキルン式燃焼炉の構造と燃焼状況

円筒形の燃焼炉の外周部には 6 本の通気管が等間隔で配置されており、通気管の細孔から外壁に沿って暖めた空気を噴出し、旋回流を起こして燃焼させる。常時 2 本の通気管が燃焼材料の中に入っており、高速で空気を吹き込みフイゴ効果により燃焼温度を高める。また、旋回流のみでは完全燃焼できないので、燃焼材料を供給する中央のパイプから 2 次燃焼空気を送り完全燃焼させる構造となっている。供試したロータリーキルン式燃焼炉の燃焼性能は、木質ペレットおよび木質チップの場合の熱出力は 116kW(約 10 万 kcal/h) で、燃焼筒からの火炎の噴出温度は 1,000℃以上である。

3) 燃焼試験結果

(1) 予備燃焼試験

ロータリーキルン式燃焼炉での燃焼状況を確認するため、ロータリーキルン式燃焼炉と灰出しボックスを接続し(図 1-8)、天日乾燥した美浦トレーニングセンターの稲わら混合馬ふん堆肥と、栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんについて、材料別に燃焼試験を実施した。当初、餌由来のわら類が混入していたため、直径 20cm のスクリーオーガー式定量供給機(図 1-9)を供試したが、スクリー部の傾斜角が

50° 以上あり、スクリー径も大きいため原料の供給ムラが大きく燃焼が安定しないため図 1-8 の木質チップ用の定量供給機を使用することにした。



図 1-8 ロータリーキルン式燃焼試験装置

注：ホoppaがついているのが定量供給装置、緑部分がロータリーキルン式燃焼炉
右側灰色の部分が灰出しボックス、この右側に熱交換器が接続できる。



図 1-9 大型のスクリーオーガー式定量供給機

木質チップで暖機運転を行い、火炎温度が 1,000℃以上で、ロータリーキルン式燃焼炉出口温度が 850℃以上になった時点で燃焼材料を変えて試験を行った。栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんを燃焼させると、ウッドシェーブが燃焼しながらロータリーキルンの前方に飛散し、馬ふんがキルン内部に滞留する燃焼状態となった。そのまま連続して燃焼を継続すると、キルン内部の送風孔の部分で熔融現象が発生し、スティック状になったものが押し出されて灰だめボックスに落下する燃焼状況になった。なお、熔融してスティック状になっているが、空洞が多く簡単につぶれて粉になるので燃焼上問題は少ないと考えられた。一方で、美浦トレーニングセンターの稲わら混合堆肥は、燃焼初期からキルン内で溶岩状に熔融し、塊がキルン内の 1/3 を覆うぐらいの大きさになり、また、部分的に熔融して送風孔をふさぎ正常な燃焼ができなくなった (図 1-10)。



図 1-10 美浦堆肥の燃焼状況
(溶融物が壁面に付着している)

(2) 燃焼試験－1

ロータリーキルン式燃焼炉に水冷式熱交換器を接続(図 1-11)し、栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんの燃焼試験を実施した。風乾物の供給量は 21.3kg/h で、送風量はキルン側面から $88\text{Nm}^3/\text{h}$ 、中央部から $47\text{Nm}^3/\text{h}$ である。燃焼温度変化を図 1-12 に、排ガス成分を図 1-13 に示す。木質チップで暖機運転を行ったが、燃焼温度の上昇に伴い CO 濃度が低下し 100ppm 以下になる時点で栗東の燃焼材料に切替えた。木質チップのキルン出口温度は 900°C を超えていたが、栗東の燃焼材料になると一旦 800°C 付近まで低下し、 870°C 程度で安定する。熱交換器下部も水タンクになっているため、 500°C 程度の温度でタンク内を上昇し、熱交換器出口では 200°C 以下まで冷却された。急冷できているが、塩化水素腐食対策を講じる温度域であるので実用化の際には注意を要すると判断された。

排ガス成分は、木質チップの場合温度上昇に伴い CO 発生量が低下し、燃料切り替え時には CO 濃度は 100ppm を下回っていたが、栗東の燃焼材料に変わると脈動し 1000ppm を超える場合もあった。木質燃料の場合、木質ペレットの方が木質チップより CO 濃度は早く低下することから、木質チップより厚みが薄く燃焼・ガス化しやすく、かつ飛散しやすいウッドシェーブが入っているため、 CO 発生量が増加したのではないかと考えられる。この場合、実規模の燃焼炉の場合には十分な燃焼容積を確保し、低い風速でも火炎との混合状況を保つ送風・燃焼方式が重要となる。 NO_x については、栗東の燃焼材料でも木質チップとほぼ同じ燃焼温度を維持しており、木質チップの 80ppm 程度に対し、約 135ppm と 1.7 倍の値となったが排ガス規制値の基準値以内であった。 SO_x についてはほとんど検出されなかった。なお、燃焼灰については、ウッドシェーブは飛散して灰だめに落下したが、馬ふん部分はキルン内での溶融付着がみとめられた(図 1-14)。



図 1-11 ダイオキシン測定時の燃焼試験全景
(灰出しボックスに水冷式熱交換器を接続した)

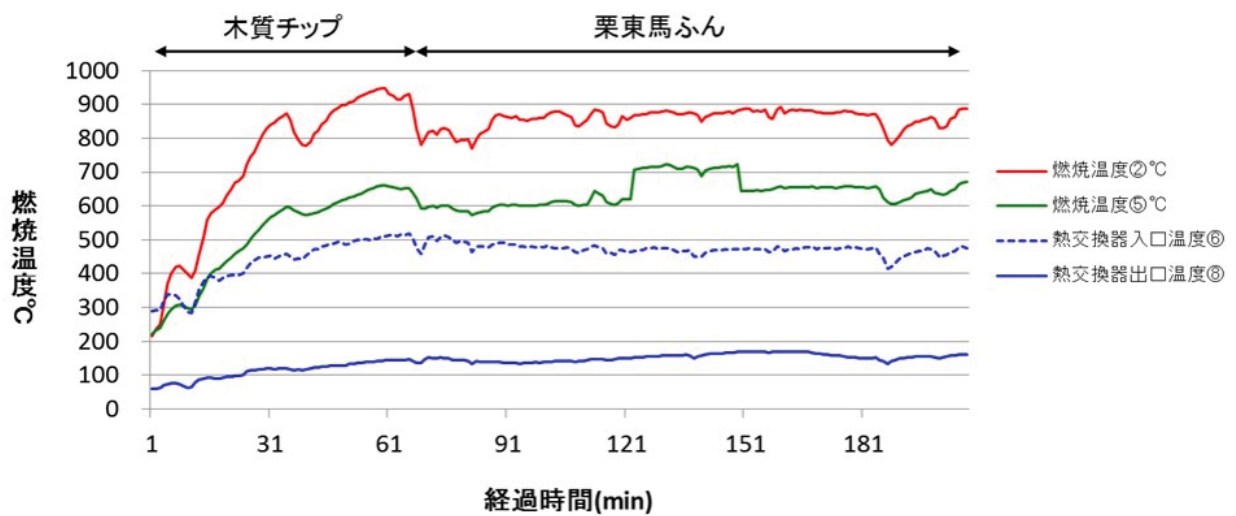


図 1-12 栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふん燃料での燃焼状況

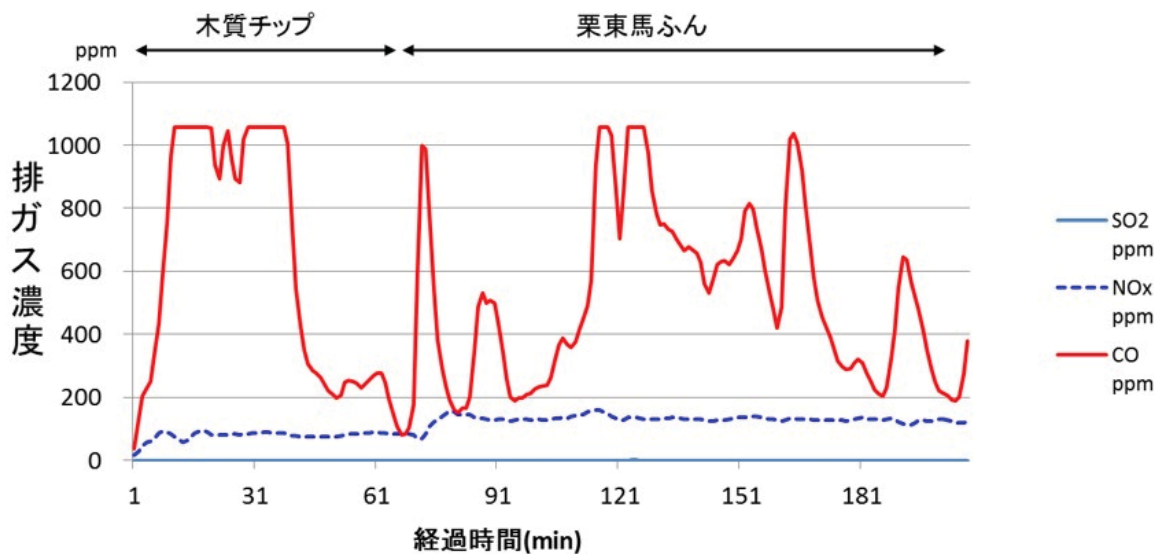


図 1-13 栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふん燃料での燃焼状況



図 1-14 栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふん燃料での燃焼灰の溶融状況
左：キルン壁への溶着状況、右：灰だめに落下した溶融灰（溶岩状で硬い）

以上の試験結果に基づき、ロータリーキルン式燃焼炉を、より低い温度で燃焼を維持できるように改造することにした。改造項目は以下のとおりである。

- ①キルン内への吹き込み風速を遅くするため通気管を6本から10本に増設した。
- ②従来機では燃焼温度を高くするよう炉内で熱交換した熱風を吹き込むようになっていたが、燃焼温度を低くするため外気をそのままキルン内にふきこめるように変更した。
- ③燃焼温度を下げる分熱効率が低くなるので、水冷熱交換器に直接バーナーの燃焼火炎を吹き込めるようにした。

なお、燃焼材料については、馬ふんとウッドシェーブや稲わらが分離燃焼しないよう円筒形のペレットに成型した燃焼材料を使用することにした。

(3) 燃焼試験－2

ロータリーキルン式燃焼炉に水冷式熱交換器を接続(図 1-15)し燃焼試験を実施した。本年度用いたロータリーキルン式燃焼炉は、燃焼温度を極力低く保てるよう、外周からの空気吹き込み孔径を大きくし吹き込み風速を低く抑え、なおかつ、外気をそのまま外周部から吹き込める構造とした。また、原料の投入速度を遅くし、通風量を多くすると、相対的に燃焼温度を低くなるので、熔融現象の発生を軽減するよう投入量と通風量を制御した。

栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんペレットでの燃焼試験結果を図 1-16, 17 に示す。木質ペレットで 800℃近くまで燃焼温度を上昇させた後に馬ふんペレットに切り替えた。燃焼時間は 3 時間で、馬ふんペレットの平均供給速度は 21.1kg/h である。バーナーの出口温度は 750–800℃を維持できた。バーナー出口から水冷煙管式熱交換器に入るまでに輻射等で約 500–600℃まで温度低下し、熱交換後により 120℃程度の温度に冷却された。なお、輻射熱も熱交換器の予熱に利用しているため、約 85%の熱が回収できると推定される。燃焼中の排ガス成分は、CO₂が 10–12%であり、CO は 200ppm 程度で安定しているが 3 時間の間に 2 回 400ppm まで上昇した。NO_x はほぼ 200ppm で一定の値となった。バーナー出口温度は 800℃以下であったが、ロータリーキルン外周の空気吹き込み口の部分には、一部に熔融した塊が付着し、燃焼後の炉内状況は壁面に熔融物が付着した。空気吹き込み口の部分は、ふいご効果により燃焼温度が高くなるため熔融が成長したと考えられる。相対的に通気量を増加させて燃焼温度を低下させるため、燃焼材料の供給量を減少させるなど、燃焼温度をより低く抑えるなどの対応が必要と考えられる。

美浦トレーニングセンターの稲わら混合馬ふん堆肥ペレットでの燃焼状況を図 1-18, 19 に示す。木質ペレットで燃焼温度が約 700℃になった時点で馬ふん堆肥ペレットに切り替えたが、急激に燃焼温度が低下し燃焼を維持できなくなったため、手で木質チップを併給して燃焼を維持させた。稲わら混合馬ふん堆肥ペレットと木質チップの混合重量比は 2.45 : 1 であった。燃焼温度は 500–700℃の間を推移し、バーナー吹き出し部と熱交換器入口温度の差は少なかった。熱交換後の排気温度は 100–120℃であった。排ガス成分は、CO₂濃度が 7–12%の間を推移し、NO_x は 200ppm で安定していたが、CO 濃度は 1000ppm を超えることが度々あり燃焼が安定しておらず、ペレットと木質チップとも自動で定量供給させる必要のあることが分かった。美浦トレーニングセンターの稲わら混合馬ふん堆肥ペレットは、燃焼後のロータリーキルンへの熔融付着は認められなかった。灰は複数のペレットが付着した形状のものも一部あったが、燃焼温度が低かったこともあり大部分はペレットが収縮した状態の灰となった。

3 時間の燃焼時間において、稲わら混合馬ふん堆肥ペレットの燃焼量は 55.2kg、木質チップが 22.5kg の合計 77.7kg であり、燃焼材料の供給速度は合わせて 19.4kg/h であった。熱交換後の温水の熱回収量は 1,178MJ であり、平均して 15.2MJ/kg の値となった。



図 1-15 ロータリーキルン式燃焼炉の燃焼システム

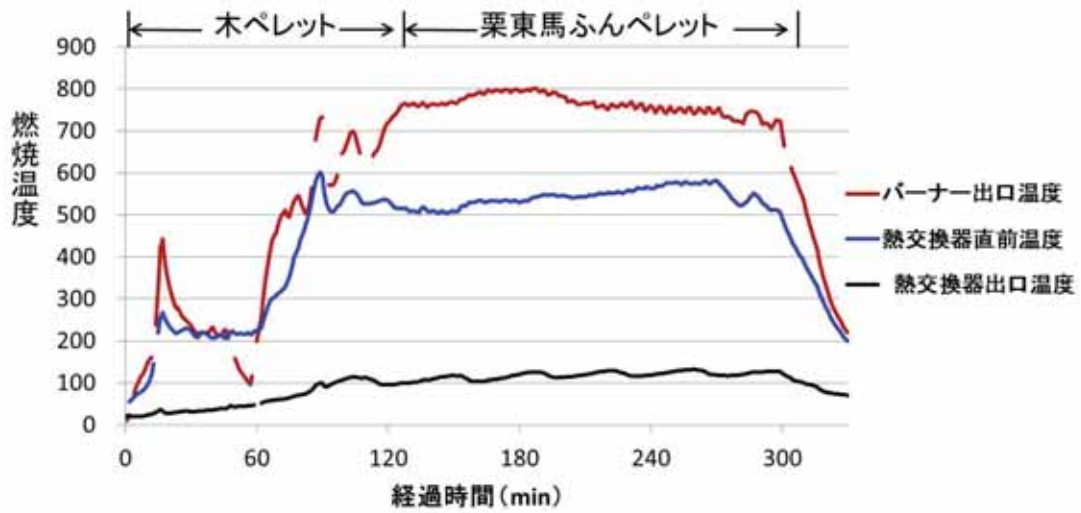


図 1-16 栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんペレットの燃焼結果

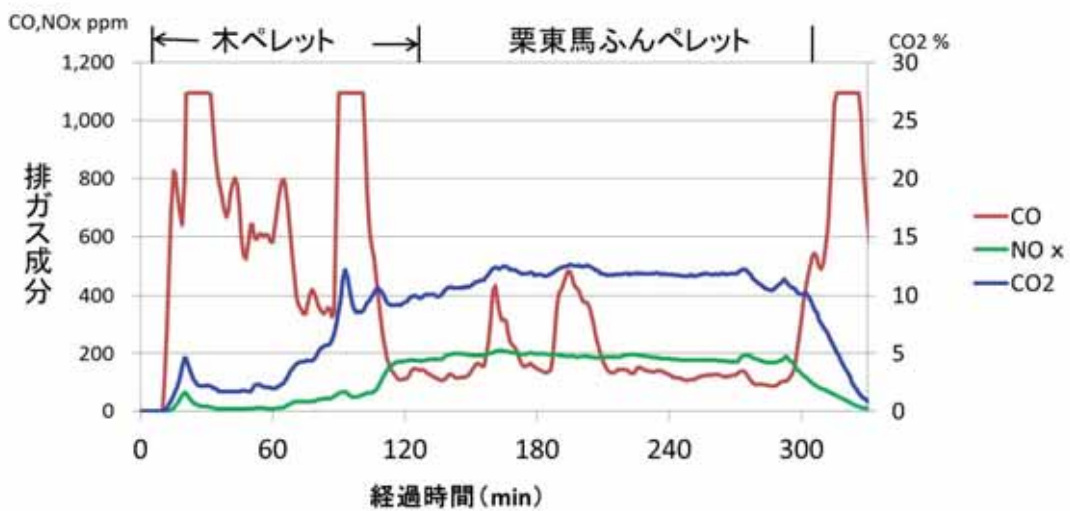


図 1-17 ウッドシェーブ混合馬ふんペレット燃焼時の排ガス成分



図 1-18 ウッドシェーブ混合馬ふんペレット 燃焼後の熔融状況

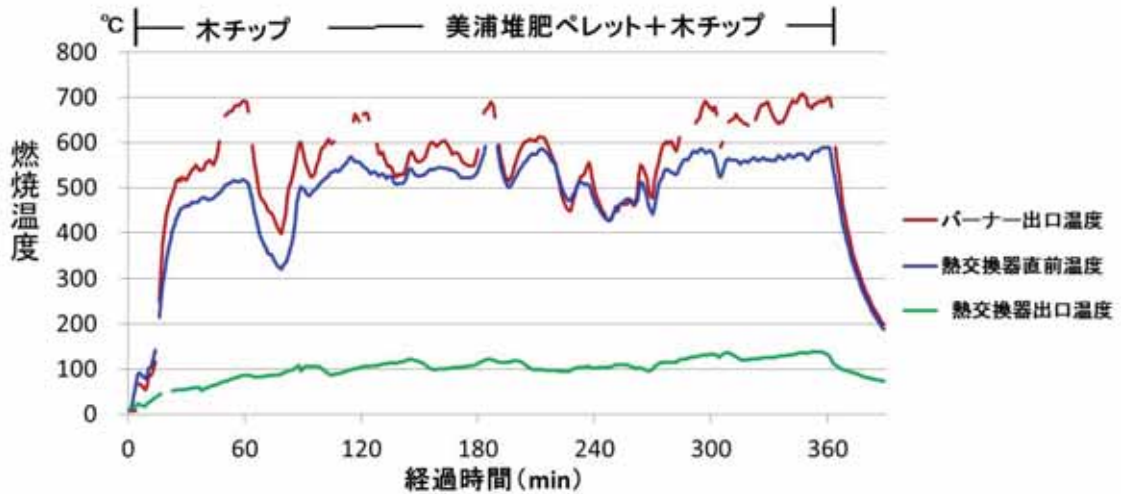


図 1-19 美浦トレーニングセンターの稲わら混合堆肥ペレットの燃焼状況

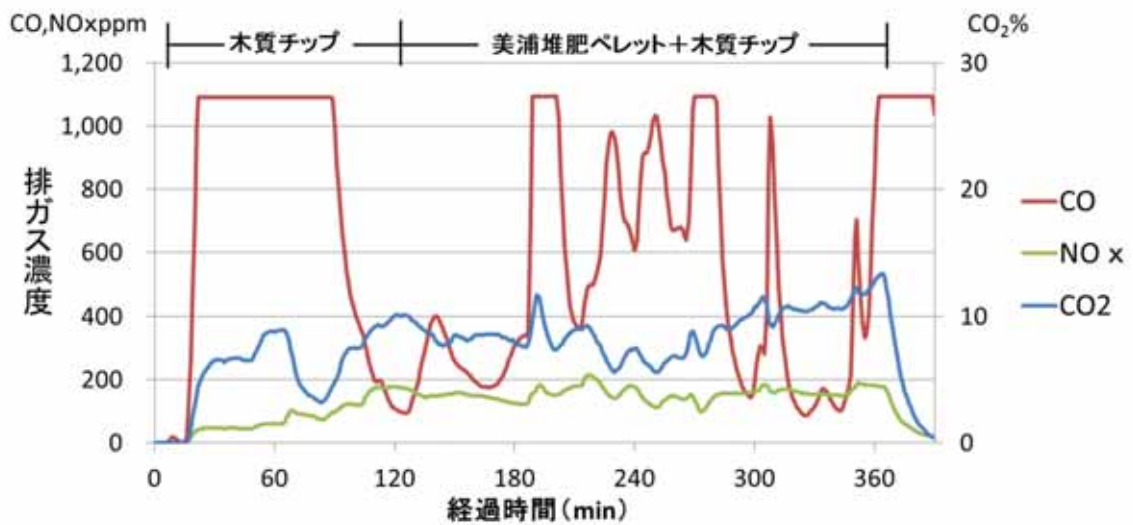


図 1-20 美浦トレーニングセンターの稲わら混合堆肥ペレット燃焼時の排ガス成分

(4) 燃焼試験－3、燃焼排ガス成分とダイオキシン類の発生状況のまとめ

燃焼試験－2で、美浦トレーニングセンターの稲わら混合馬ふん堆肥ペレットの燃焼において、稲わら混合馬ふん堆肥ペレットと木質チップを併給する必要があるがあった。手動供給では安定性にかけるため、稲わら混合馬ふんペレットと木質チップとに、それぞれ定量供給機を別途設置し、ロータリーキルン式燃焼炉に水冷式熱交換器を接続(図1-21)し燃焼試験を実施した。燃焼炉及び熱交換器が暖まるまでは木チップで燃焼させ、所定温度に達した後に稲わら混合馬ふんペレットと木質チップの併給燃焼に切り替えた。また、美浦トレーニングセンターの稲わら混合馬ふん堆肥ペレットと、栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんペレット共に、燃焼温度とダイオキシン類の発生抑制効果を明らかにするため、ロータリーキルン式燃焼炉の出口温度を600℃程度と700℃程度の2段階に調整して燃焼試験を実施した。なお、ダイオキシン類濃度は、馬ふんペレットに切り替えて安定燃焼になった後4時間連続で測定した。

燃焼試験結果を図1-22～29に示す。図1-22、23は平成27年度に採取した栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんペレットを用い、燃焼炉出口温度を700℃以上に維持した際の燃焼状況である。排ガス中のCO₂濃度は約12%、COが約100ppm、NO_xが約200ppmレベルであるがSO_xは検出されなかった。図1-24、25は平成28年度に採取した栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんペレットを用い、燃焼炉出口温度を600℃程度に低く抑えた場合の燃焼状況を示す。平成28年度の同馬ふんペレットは表面が非常に平滑であり、燃焼中に着火不良を起こしたため木質ペレットを併用して燃焼を継続させた。燃焼が安定しなかったためCO濃度は非常に高かったが、NO_xは200ppm未満で、SO_xもほぼ発生しなかった。ダイオキシン類の毒性等量は、高温燃焼時は3.4ng-TEQ/m³であったが、低温燃焼時は10ng-TEQ/m³となった(表1-6)。

表1-6 燃焼中のダイオキシン類等の分析

測定日	燃焼供試材料	ダイオキシン類濃度計量の結果			備考
		実測濃度	濃度	毒性等量	
平成29年8月2日	美浦稲わら混合馬ふん堆肥+石灰5%混合ペレット+助燃剤	330 ng/m ³	220 ng/m ³	4.8 ng-TEQ/m ³	燃焼炉出口温度700℃、燃焼状態概ねよし
平成29年8月4日	栗東ウッドシェーブ混合馬ふんペレット	230 ng/m ³	160 ng/m ³	3.4 ng-TEQ/m ³	燃焼炉出口温度700℃、燃焼状態よし、溶融物が多くみられた
平成29年9月14日	栗東ウッドシェーブ混合馬ふんペレット(ペレット作り直し)+助燃剤	510 ng/m ³	490 ng/m ³	10 ng-TEQ/m ³	ペレット作り直し、燃焼炉出口温度600℃、8/4より燃焼温度下げた
(0℃、101.32kPa) JIS K 0311(2008)					
注)美浦稲わら混合馬ふん堆肥+石灰5%混合ペレット+助燃剤の混合割合は、ペレット(2.45):ウッドチップ助燃剤(1)。					
測定場所:農研機構中央農業研究センター 測定者:(株)環境研究センター					
(参考)毒性等量:2t/h未満 5 ng-TEQ/m ³ 、2~4t/hまで1 ng-TEQ/m ³ 、4t/h以上 0.1ng-TEQ/m ³					

図1-26～27は美浦トレーニングセンターの稲わら混合馬ふん堆肥ペレットを、溶融が起こらないよう燃焼炉出口温度を600℃程度に抑えて燃焼させたものであるが、燃焼温度が低いためCO濃度が安定せずに200ppm以上の高い値を示した。また、NO_xは200～300ppm程度を推移しているが、SO_xはほぼ発生していない。この燃焼時のダイオキシン類の毒性等量は10 ng-TEQ/m³と高い値を示した。図1-28～29は同材料について

て溶融現象を発生させながら、あえて燃焼炉出口温度を700℃程度に維持したもので、CO₂濃度は12～13%で、CO濃度が150～600ppm、NO_xが約230ppmでSO_x濃度も20ppm以下と低い値を示した。この燃焼時のダイオキシン類の毒性等量は4.8 ng-TEQ/m³と燃焼温度を上げることによりダイオキシン類の発生量を低減できることがわかった。

ダイオキシン類対策特別措置法では、廃棄物焼却炉の焼却能力が4t/h以上でダイオキシン類の毒性等量が0.1ng-TEQ/m³以下、焼却能力2～4t/hで1ng-TEQ/m³以下、焼却能力2t/h未満で5ng-TEQ/m³以下とされている。馬ふんを燃焼させエネルギー利用する場合のダイオキシン類の規制値が、トレーニングセンター規模で1ng-TEQ/m³以下、小規模の場合に5ng-TEQ/m³以下になると想定される。いずれにしても、燃焼炉出口温度を700℃以上で炉内の燃焼温度を800℃以上で維持させる必要がある。なお、稲わら混合馬ふんを燃焼させエネルギー利用する場合は、5%以上の石灰添加が必要となり石灰添加した分だけ灰の発生量が増えると共にコスト増となること、ウッドシェーブ混合馬ふんに比べ排出時の水分が多く乾燥処理負担が増加することなどを考慮すると、燃焼によるエネルギー利用を行う場合には、敷料を稲わら等からウッドシェーブに変更する必要があると判断される。



図 1-21 ロータリーキルン式燃焼炉の燃焼システム

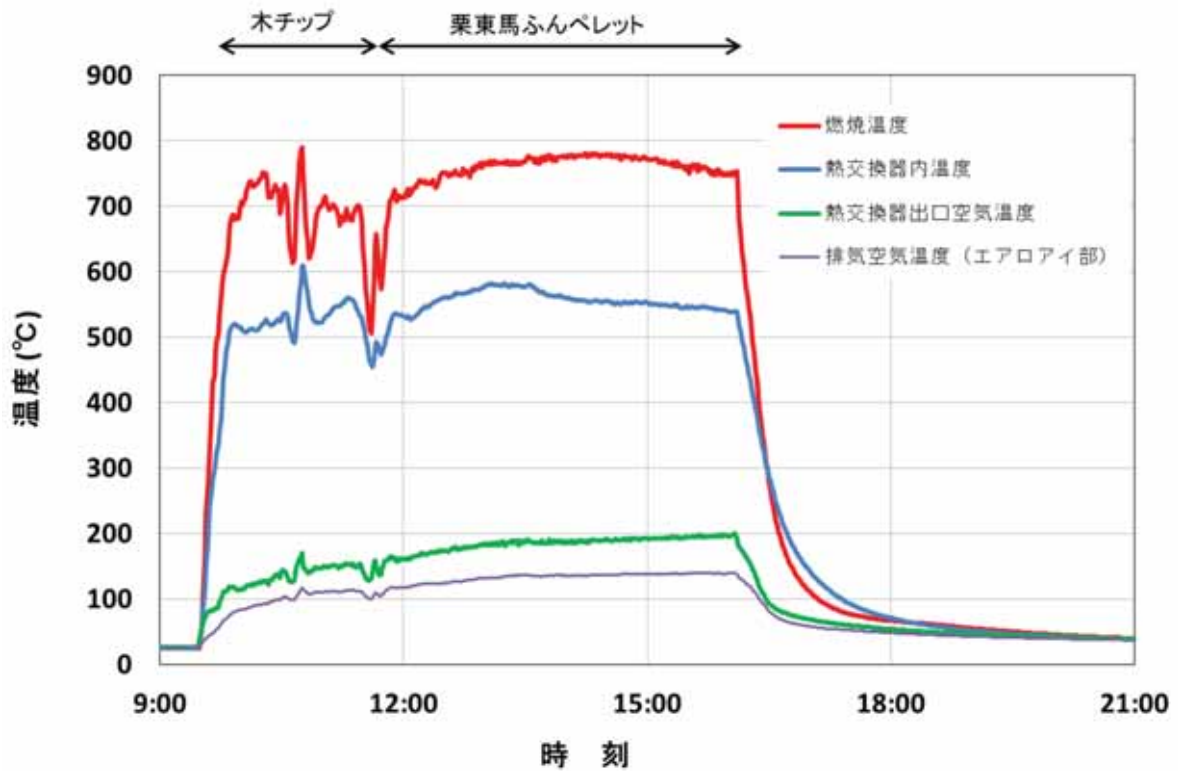


図 1-22 栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんペレットの燃焼結果

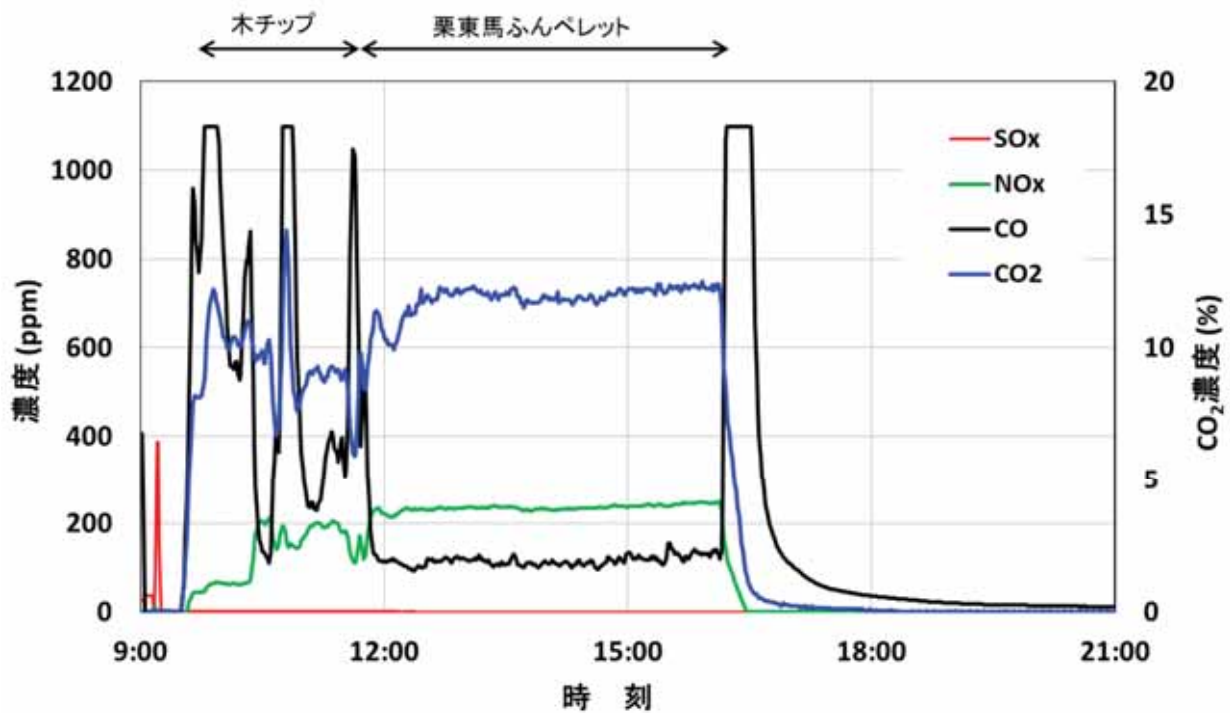


図 1-23 ウッドシェーブ混合馬ふんペレット燃焼時の排ガス成分

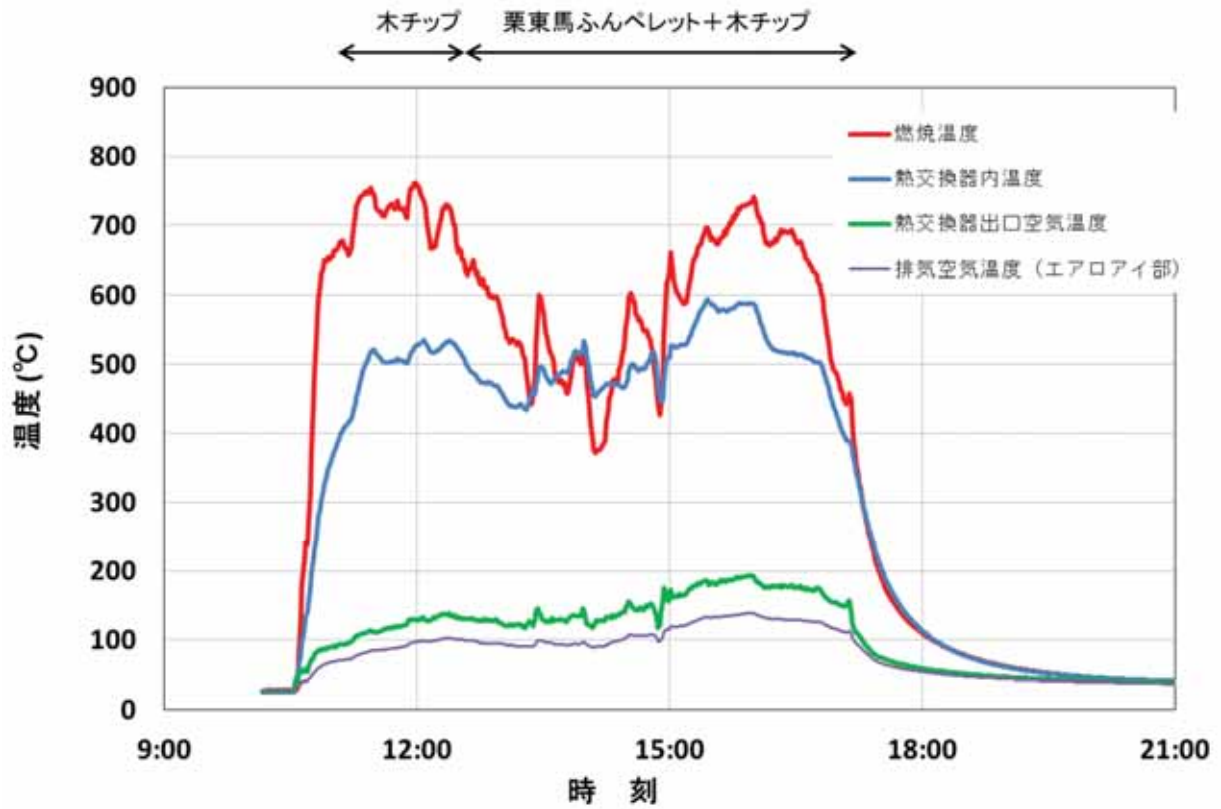


図 1-24 栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんペレットの燃焼結果

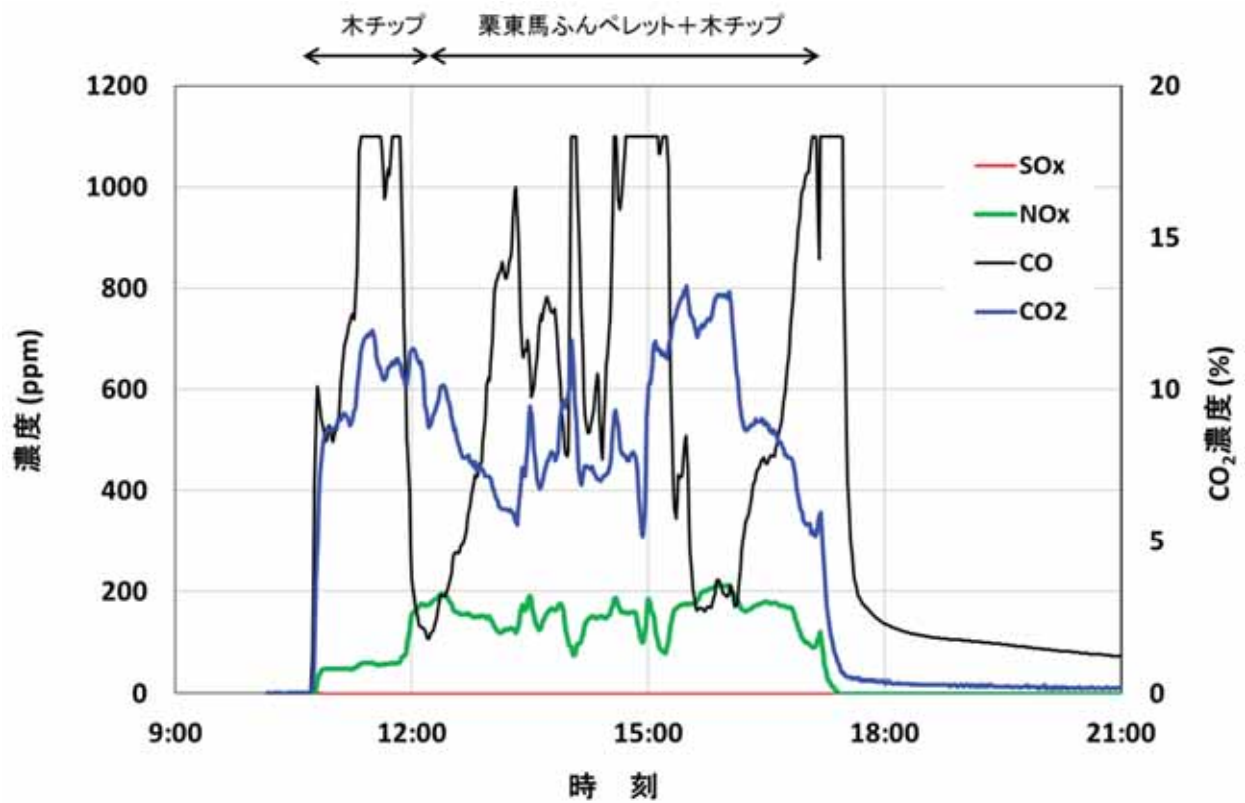


図 1-25 ウッドシェーブ混合馬ふんペレット燃焼時の排ガス成分

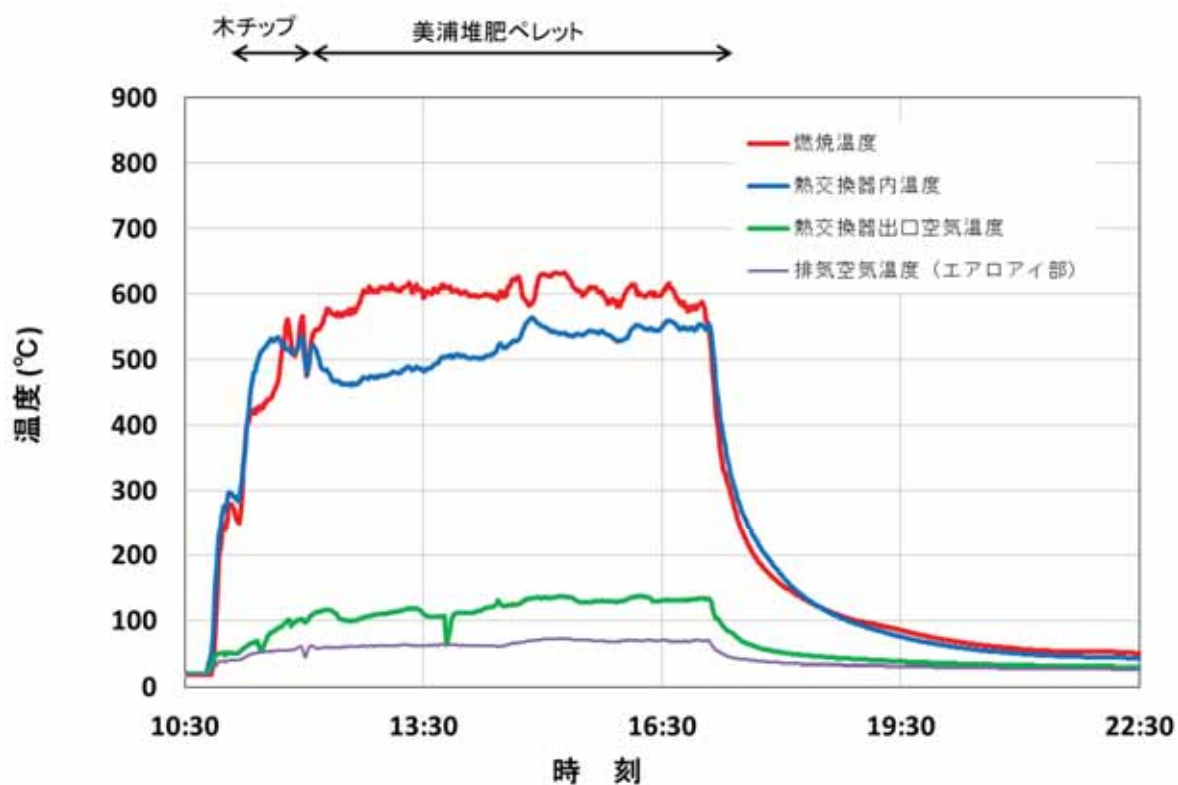


図 1-26 美浦トレーニングセンターの稲わら混合堆肥ペレットの燃焼状況

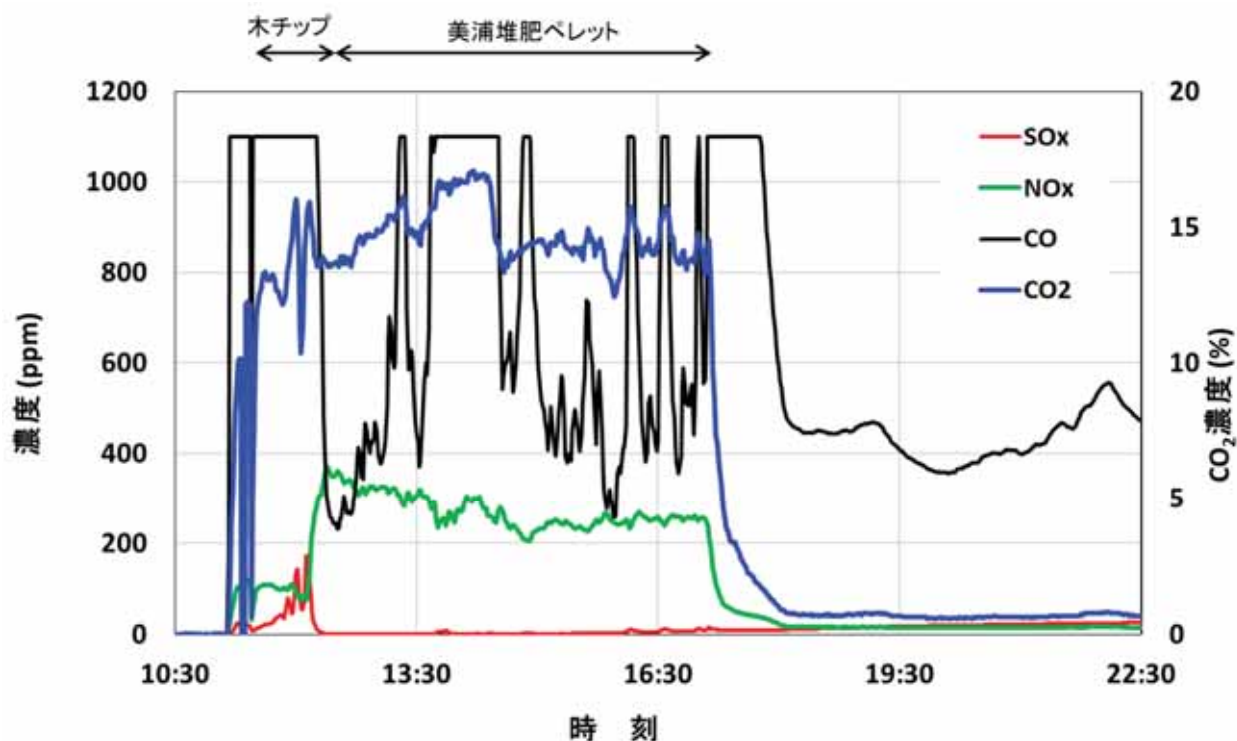


図 1-27 美浦トレーニングセンターの稲わら混合堆肥ペレット燃焼時の排ガス成分

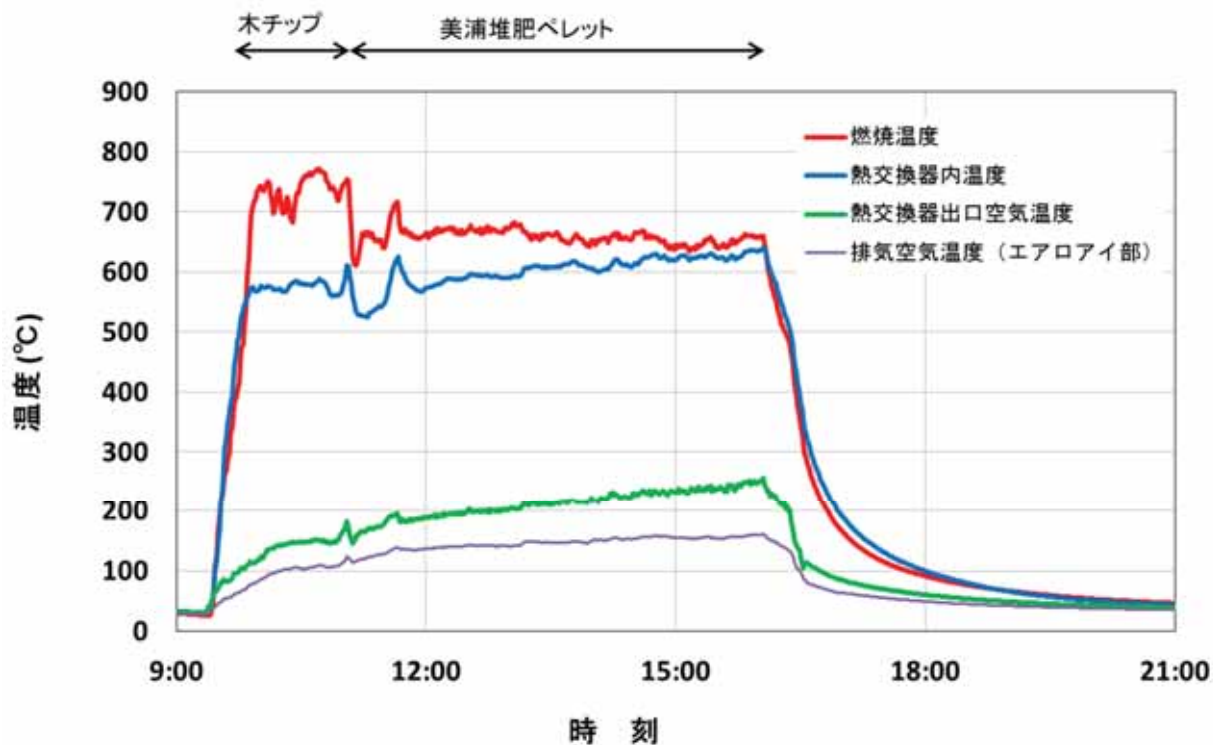


図 1-28 美浦トレーニングセンターの稲わら混合堆肥ペレットの燃焼状況

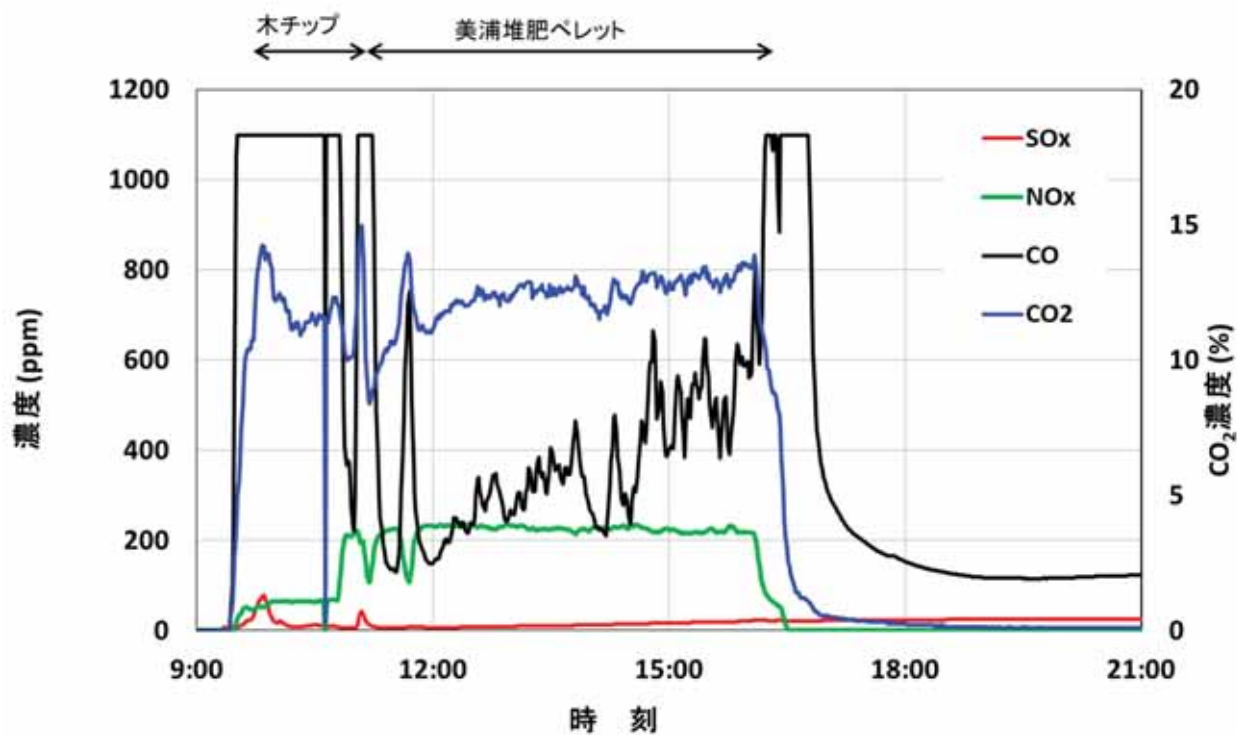


図 1-29 美浦トレーニングセンターの稲わら混合堆肥ペレット燃焼時の排ガス成分

(5) 燃焼試験時の燃焼ガス（排ガス）及び燃焼灰の分析

これまでの燃焼試験の燃焼状態を表 1-7 に示した。稲わら混合馬ふん堆肥及びウッドシェーブ混合馬ふんのみではロータリーキルン式燃焼炉では材料が軽量なため飛散して燃焼させることができなかつたため、すべて材料をペレット化して燃焼試験に供試した。ペレットでも燃焼しにくい美浦トレセンの材料は、美浦トレセンの稲わら混合馬ふん堆肥に石灰を 5%混合しペレットとした材料を原料とし、助燃剤としてウッドチップを混合しながら燃焼試験を行った。混合重量比率は、馬ふん堆肥ペレット（約 2.5）：助燃剤（1）であった。

これまでの燃焼試験において、燃焼温度が一定状態に安定した時の燃焼中の排ガスに含まれる窒素酸化物濃度、硫黄酸化物濃度、ばいじん濃度、塩化水素濃度は低かつた（表 1-8）。燃焼温度が 700℃になると美浦トレセン稲わら混合馬ふん堆肥 + 5%石灰混合ペレット + 助燃剤の燃焼材料も栗東トレセンウッドシェーブ混合馬ふんペレットの燃焼材料も熔融し易くなりため、燃焼は燃焼炉出口温度 600℃で燃焼させることが必要であった。しかし、600℃では排ガス中のダイオキシン類の発生量が多くなる傾向があつた（表 1-9）。

燃焼灰中の肥料成分（リン酸、加里、石灰、苦土）及びく溶性濃度を調べた結果、栗東ウッドシェーブ混合馬ふんペレットの燃焼灰の肥料成分濃度が高かつた（表 1-10）。

燃焼灰中の有害重金属は、土壤汚染対策法による土壤含有率（カドミウム 150mg/kg、水銀 15mg/kg、ヒ素 150mg/kg、鉛 150mg/kg）以下であり、極めて少なかつた（表 1-11）。

表 1-7 これまでの燃焼試験の経過と結果

燃焼試験日	燃焼材料	燃焼状況
2017年1月13日	栗東トレセンウッドシェーブ混合馬ふんペレット	燃焼状況良好
2017年1月23日	美浦トレセン稲わら混合馬ふん堆肥ペレット + 助燃剤	ペレットだけではうまく燃焼できない。助燃剤として木質ペレットが必要。
2017年3月22日	美浦トレセン稲わら混合馬ふん堆肥ペレット(石灰5%混合) + 助燃剤	石灰5%を混合してペレット化して供試した結果、概ね良好に燃焼できた。助燃剤として木質ペレットが必要。
2017年5月17日	美浦トレセン稲わら混合馬ふん堆肥ペレット(石灰5%混合) + 助燃剤	石灰5%を混合してペレット化して供試した結果、良好に燃焼でき燃焼条件を把握した。助燃剤として木質ペレットが必要。
2017年8月2日	美浦トレセン稲わら混合馬ふん堆肥ペレット(石灰5%混合) + 助燃剤	石灰5%を混合してペレット化して供試した結果、良好に燃焼でき燃焼条件を把握した。助燃剤として木質ペレットが必要。
2017年8月4日	栗東トレセンウッドシェーブ混合馬ふんペレット	燃焼状況良好だが熔融物が多かつた。
2017年9月14日	栗東トレセンウッドシェーブ混合馬ふんペレット(ペレット作り直し、水分低くして硬くした)	着火しにくく燃焼状況はあまり良くなかつた。助燃剤が少量必要。

注) 美浦稲わら混合馬ふん堆肥+石灰5%混合ペレット + 助燃剤の混合割合は、ペレット(2.5)：ウッドチップ助燃剤(1)。

表 1-8 燃焼試験中の排ガスの測定

計量項目	単位	1月13日	1月23日	3月22日	5月17日	計量方法
		栗東ウッドシェーブ混合馬ふんペレット	美浦稲わら混合馬ふん堆肥ペレット+助燃剤	美浦稲わら混合馬ふん堆肥+石灰5%混合ペレット+助燃剤	美浦稲わら混合馬ふん堆肥+石灰5%混合ペレット+助燃剤	
		採取時間 14:00～17:00	採取時間 12:45～17:00	採取時間 12:15～16:15	採取時間 13:00～17:00	
窒素酸化物濃度	ppm	218	187	197	184	JIS K 0103(2011)
硫黄酸化物濃度	ppm	65	61	42	22	JIS K 0104(2011)
ばいじん濃度	g/m ³ N	0.002	0.003	0.019	0.035	JIS Z 8808(2013)
塩化水素濃度	mg/m ³ N	<50	<50	<50	<50	JIS K 0107(2012)
計量項目	単位	8月2日	8月4日	9月14日	計量方法	
		美浦稲わら混合馬ふん堆肥+石灰5%混合ペレット+助燃剤	栗東ウッドシェーブ混合馬ふんペレット	栗東ウッドシェーブ混合馬ふんペレット(ペレット作り直し)+助燃剤		
		採取時間 12:00～16:00	採取時間 12:00～16:00	採取時間 12:10～16:10		
窒素酸化物濃度	ppm	248	240	162	JIS K 0103(2011)	
硫黄酸化物濃度	ppm	18	30	19	JIS K 0104(2011)	
ばいじん濃度	g/m ³ N	0.052	0.049	0.063	JIS Z 8808(2013)	
塩化水素濃度	mg/m ³ N	<50	<50	<50	JIS K 0107(2012)	

注) 美浦稲わら混合馬ふん堆肥+石灰5%混合ペレット+助燃剤の混合割合は、ペレット(2.45):ウッドチップ助燃剤(1)。
 測定者:(株)環境研究センター(つくば市羽成3-1)
 測定場所:農研機構中央農業センター

表 1-9 燃焼中のダイオキシン類等の分析 (全期間)

測定日	燃焼供試材料	ダイオキシン類濃度計量の結果			備考
		実測濃度	濃度	毒性等量	
平成29年1月13日	栗東ウッドシェーブ混合馬ふんペレット	260 ng/m ³	190 ng/m ³	3.8 ng-TEQ/m ³	燃焼状態よし、700°C
平成29年1月23日	美浦稲わら混合馬ふん堆肥ペレット+助燃剤	1000 ng/m ³	820 ng/m ³	19 ng-TEQ/m ³	燃焼状態悪い
平成29年3月22日	美浦稲わら混合馬ふん堆肥+石灰5%混合ペレット+助燃剤	730 ng/m ³	490 ng/m ³	9.7 ng-TEQ/m ³	溶融を避けるため石灰混合
平成29年5月17日	美浦稲わら混合馬ふん堆肥+石灰5%混合ペレット+助燃剤	630 ng/m ³	630 ng/m ³	10 ng-TEQ/m ³	燃焼炉出口温度600°C、比較的良好に燃焼、ダイオキシン多い
平成29年8月2日	美浦稲わら混合馬ふん堆肥+石灰5%混合ペレット+助燃剤	330 ng/m ³	220 ng/m ³	4.8 ng-TEQ/m ³	燃焼炉出口温度700°C、燃焼状態概ねよし
平成29年8月4日	栗東ウッドシェーブ混合馬ふんペレット	230 ng/m ³	160 ng/m ³	3.4 ng-TEQ/m ³	燃焼炉出口温度700°C、燃焼状態よし、溶融物が多くみられた
平成29年9月14日	栗東ウッドシェーブ混合馬ふんペレット(ペレット作り直し)+助燃剤	510 ng/m ³	490 ng/m ³	10 ng-TEQ/m ³	ペレット作り直し、燃焼炉出口温度600°C、8/4より燃焼温度下げた
(0°C, 101.32kPa) JIS K 0311(2008)					
注) 美浦稲わら混合馬ふん堆肥+石灰5%混合ペレット+助燃剤の混合割合は、ペレット(2.45):ウッドチップ助燃剤(1)。					
測定場所:農研機構中央農業研究センター		測定者:(株)環境研究センター			
(参考)毒性等量:2t/h未満 5 ng-TEQ/m ³ 、2~4t/hまで1 ng-TEQ/m ³ 、4t/h以上 0.1ng-TEQ/m ³					

表 1-10 馬ふん燃焼灰の全量およびく溶性濃度分析結果 (2017 年燃焼試験)

試料名	性状	項目	単位	リン酸	加里	石灰	苦土
栗東ウッドシェーブ混合馬ふんペレット燃焼灰 (燃焼試験日: 2017/1/13)	やや濃い灰色 細かい	全量	乾物%	8.1	10.7	10.2	3.7
		<溶性	乾物%	8.0	10.8	8.5	2.5
		<溶率	%	100	101	83	68
美浦稲わら混合馬ふん堆肥+5%石灰混合ペレット+助燃剤、[ペレット(2.45): ウッドチップ助燃剤(1)混合材料]の燃焼灰 (燃焼試験日: 2017.3.22)	やや白い灰色 塊状含む	全量	乾物%	1.8	5.5	13.0	2.3
		<溶性	乾物%	1.7	2.5	8.5	0.9
		<溶率	%	93	46	66	41

注2) <溶率(%): 成分全量に占めるく溶性成分の割合。

注3) 分析には1mm篩を通し、さらに微粉碎した灰を用いた。

表 1-11 燃焼灰中の有害重金属

試料名	カドミウム	水銀	ヒ素	鉛	亜鉛
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
栗東ウッドシェーブ混合馬ふんペレット燃焼灰 (燃焼試験日: 2017/1/13)	<0.1	<0.01	1.0	8.9	90
美浦稲わら混合馬ふん堆肥+5%石灰混合ペレット+助燃剤、[ペレット(2.45): ウッドチップ助燃剤(1)混合材料]の燃焼灰 (燃焼試験日: 2017.3.22)	<0.1	<0.01	4.1	1.3	110
美浦稲わら混合馬ふん堆肥+5%石灰混合ペレット+助燃剤、[ペレット(2.45): ウッドチップ助燃剤(1)混合材料]の燃焼灰 (燃焼試験日: 2017.5.17)	<0.1	<0.01	1.6	1	140
美浦稲わら混合馬ふん堆肥+5%石灰混合ペレット+助燃剤、[ペレット(2.45): ウッドチップ助燃剤(1)混合材料]の燃焼灰 (燃焼試験日: 2017.8.2)	<0.1	<0.01	1.2	<0.5	110
栗東ウッドシェーブ混合馬ふんペレットの燃焼灰 (燃焼試験日: 2017.8.4)	0.6	<0.01	0.6	1.6	320
栗東ウッドシェーブ混合馬ふんペレット (ペレットの作り直し) + 助燃剤の燃焼灰 (燃焼試験日: 2017.9.14)	0.4	<0.01	0.5	2.1	570

4) 燃焼時の課題(温度による溶融化、ダイオキシン類の発生)

稲わら混合馬ふんペレットとウッドシェーブ混合馬ふんペレットについて燃焼試験を実施してきたが、稲わら混合馬ふんペレットは 5%以上の石灰添加が必要となり石灰添加した分だけ灰の発生量が増えると共にコスト増となること、ウッドシェーブ混合馬ふんペレットに比べ排出時の水分が多く乾燥処理負担が増加することなどを考慮すると、燃焼によるエネルギー利用を行う場合には、敷料を稲わら等からウッドシェーブに変更する必要があると判断される。

また、ウッドシェーブ混合馬ふんについても、ウッドシェーブと馬ふんとは分離しないように成型処理を施す必要がある。また、溶融を低減しながら燃焼させる必要があるため燃焼温度の管理が重要となる。燃焼材料に対し、燃焼空気量を増加させ空気の冷却効果により燃焼温度を低く維持することも可能であるが、熱交換効率の向上や、ダイオキシン類の発生低減のためには燃焼温度を高く維持する方が効率的である。

そこで、ロータリーキルン式燃焼により蒸気発電など大規模に行う場合には、ダイオキシン類の発生を低減し、同時に材料の溶融を防止するため、ロータリーキルン部は酸素不足の一次燃焼として燃焼温度を 800℃以下の溶融が発生しない温度に維持し、中間部から二次燃焼空気を吹き込み 850℃以上の高温に 2 秒間以上維持し、熱交換器で短時間に 250℃以下に冷却する構造が望ましいと考えられる (図 1-30)。なお、この場合、燃焼灰は一次燃焼後にキルン出口から落下させ回収する。一部飛灰も発生するが、主に熱交換器下部に溜まると考えられるので、定期的に清掃できる構造が望ましい。また、一次燃焼炉の容積は、成型した燃料が完全燃焼するまでの時間を確保することが重要である。特に、成型燃料を十分に乾燥できない場合(乾燥方式については後述する)には、燃焼炉内で成型燃料が乾燥するまでの時間も含めて十分な滞留時間が必要となる。

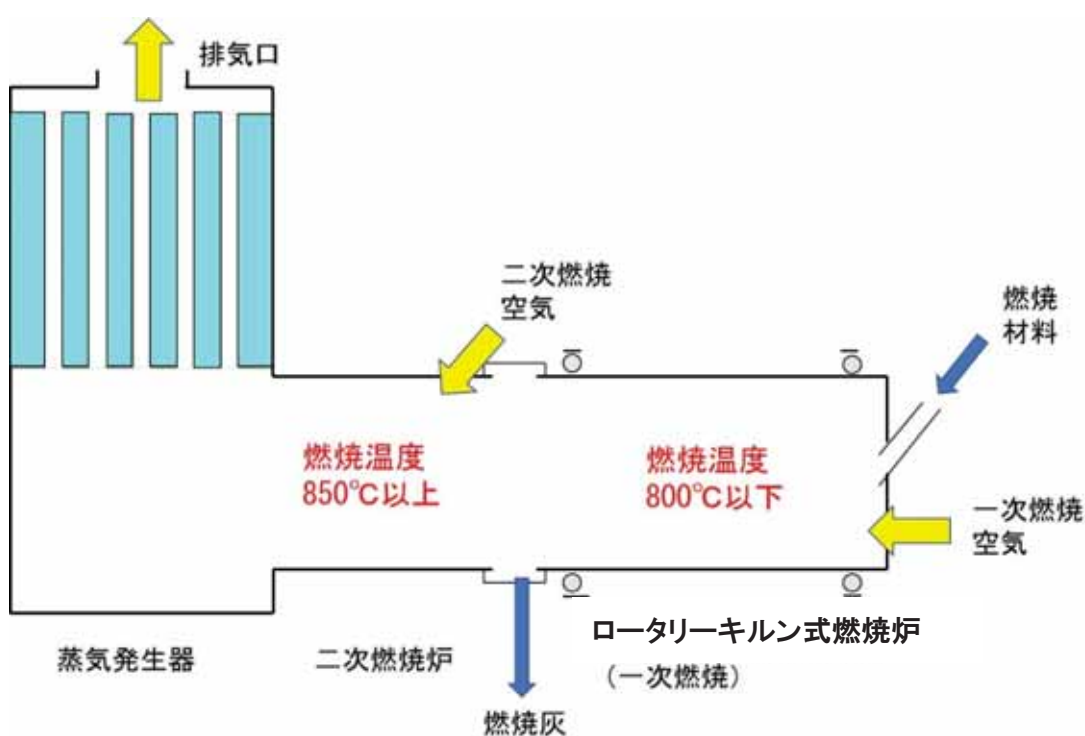


図 1-30 ウッドシェーブ混合馬ふんペレット燃焼システムの構造模式図

2 燃焼熱エネルギーの利用

1) 燃焼材料の前処理

ウッドシェーブ混合馬ふんを燃焼する場合には、ウッドシェーブと馬ふんが分離しないよう成形処理する必要がある。ウッドシェーブ混合馬ふんには残餌由来の長い牧草が混入するため、事前にカッターで細断処理し成形処理に適した水分域まで乾燥する必要がある。湿った材料を燃焼させると、材料中の水を蒸発させる分だけ燃焼エネルギーが減少する。燃焼材料は乾燥してからでなければ燃焼しないため、乾燥するまでの滞留時間分燃焼炉の容積を大きくする必要があり、また、着火不良を起こす場合もあるので着火用のバーナー運転が常時必要になる場合もある。

一方で、ウッドシェーブ混合馬ふんを乾燥した排気については、ふん臭やアンモニア臭が含まれているため、燃焼処理により脱臭する必要がある。通風乾燥を行う場合、乾燥に使用できる空気量は燃焼炉で処理するため、燃焼空気量以上の量を通気することはできない。また、乾燥空気温度は、使用できる廃熱の温度や種類（加熱空気か水蒸気の潜熱か等）により制限されるが、極力化石系エネルギーを使用しないシステムを構築する必要がある。

(1) 通風乾燥試験

燃焼装置の煙突廃熱や、発電の際の凝縮器からの廃熱利用を想定し、栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんの乾燥試験を実施した。乾燥方法としては、直交流方式のロータリーキルン式乾燥装置を想定し、乾燥温度 50℃と 80℃、1 回当たりの乾燥試験重量 10kg（ロータリーキルン乾燥機のホールドアップ率：30%）、風量を 20.1、31.8、46.2 m^3/min とし、5 分ごとにサンプリングして水分低下状況を測定した。試験装置の外形を図 2-1 に、50℃での試験結果を図 2-2 に示す。

初期水分値が 28.1%と低かったこともあり、成型処理に適した水分 20%までの乾燥時間は、乾燥温度 50℃でも 5 分以内で、燃焼に適する水分 15%以下にする乾燥時間は 10 分以内であった。

美浦トレーニングセンターの稲わら等混合馬ふんで同様の乾燥試験を実施した。初期水分値が 61.1%であり、ローラー・ディスクダイ式成型処理に適した水分 25%までの乾燥時間は、風量を 20.1 m^3/min で約 55 分、31.8 m^3/min で約 37 分、46.2 m^3/min で約 34 分であった（図 2-3）。美浦トレーニングセンターの稲わら等混合馬ふんは初期水分が高いため、乾燥温度を高くし乾燥時間を短縮する必要があることがわかった。



図 2-1 ロータリーキルン式乾燥装置
注：熱風は斜め下から上方向に吹抜ける

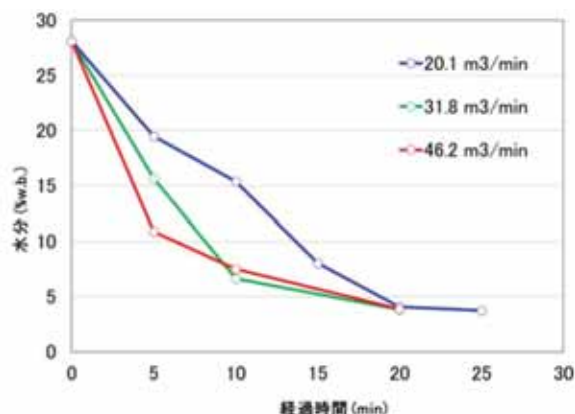


図 2-2 通風温度 50℃における栗東トレセン馬ふんの水分低下状況

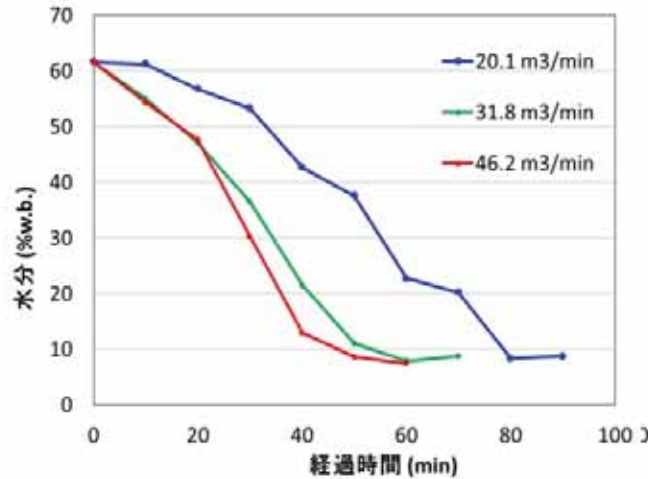


図 2-3 通風温度 50°Cにおける美浦トレセン馬ふんの水分低下状況

2) 燃焼試験材料の発熱量

燃焼試験材料ごとの高位発熱量の分析を行った。栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんの高位発熱量は採取時期により異なるが、乾燥物 1kg あたりで 18.5MJ/kg (4430kcal/kg) と 18.0MJ/kg (4310kcal/kg) であり、美浦トレーニングセンターの稲わら混合堆肥は 11.7MJ/kg (2790kcal/kg) で、5%カルシウムを添加したものは 10.6MJ/kg (2530kcal/kg) となった。ウッドシェーブ自体の高位発熱量は 18.8MJ/kg であり、馬ふんと混合することでやや低い値となっている。美浦トレーニングセンターの稲わら混合堆肥は稲わら自体の灰分が多く発熱量が低いことと、堆肥化処理により有機物の一部が分解されているため低い値を示したと考えられる。市販の杉の心材ペレットが 20.1MJ/kg で、バークペレット(樹皮ペレット)が 18.6MJ/kg であるので、栗東トレーニングセンターのウッドシェーブ混合馬ふんは乾燥させればバークペレット並の燃料といえる。

3) 燃焼時の発生熱エネルギーと回収利用熱エネルギー

(1) ウッドシェーブ混合馬ふんの乾燥処理

ウッドシェーブ混合馬ふんを燃焼させ蒸気発電を行うシステムを想定した場合、廃熱は①熱交換後の排気、②発電後の蒸気を復水させるときの潜熱が発生する。①熱交換後の排気は粉塵を除去するためのバグフィルターから 250°C以下の温度で排気される。乾燥した材料を燃焼させる場合は乾燥用空気の加熱などに利用できる。

一方で、ウッドシェーブ混合馬ふんを乾燥させる際の水分は、燃焼脱臭のために全量燃焼炉に投入される。また、残った水分も燃焼炉内で蒸発するため、ウッドシェーブ混合馬ふんに含まれていた水はすべて熱交換後の排気に含まれていることになる。このため、燃焼後の排気を熱利用して排気温度を低下させると結露が発生する危険性が高く、そのまま大気中に放出させることになるため熱利用は困難である。

ウッドシェーブ混合馬ふんの水分調査を行った結果、採取時期により異なるがそれぞれ、7月が 22.4%、10月が 45.2%、1月が 49.4%となった。22.4%の水分の場合には乾燥処理は不要であるが、成型処理のためには 30~40%程度まで乾燥させることが必要であり、低水分なほど材料の発熱量が増加する。燃焼脱臭のため、通気できる空気量は燃

焼の所要通気量に限定される。

水分 49.4%のウッドシェーブ混合馬ふんを水分 35%まで乾燥させることとして、日処理量 80t で試算する。燃焼空気の所要量は、燃焼後の排気中の炭酸ガス濃度が 14%、酸素濃度を 6.9%とすると、有機物 1kg あたり 6.75 Nm^3 となる。ウッドシェーブ混合馬ふんの処理量は現物で 80t/日、乾物量で 40.48t/日、有機物含量が 93.85%であるので有機物量が 38.0t/日で、総通風量は $256,500 \text{ Nm}^3$ /日となる。初期水分 49.4%のウッドシェーブ混合馬ふんを、成形処理のため水分 35%まで乾燥させるとすると、除去水分量は 17.7t/日となる。排気で持ち出せる水蒸気量は絶対湿度(図 2-4)で決まっており、この場合の乾燥後の排気温度は 43°C 以上の必要がある。また、水分 30%まで乾燥させるとすると、除去水分量は 22.2t/日となり、絶対湿度から乾燥後の排気温度は 47°C 以上となる。

このウッドシェーブ混合馬ふんの蒸発エネルギーを全て加熱空気から供給しようとする、熱風温度は 230°C 程度となるが、蒸気の潜熱で空気を加熱しても 100°C 程度の温度までしか加熱できないため、化石系燃料を併用しないと廃熱による通風乾燥方式は困難である。したがって、燃焼蒸気発電後の蒸気潜熱でウッドシェーブ混合馬ふんを乾燥する場合は、蒸気の潜熱を利用できる攪拌機付きの蒸気チャンバー型の接触式の乾燥方式として、蒸発した水を空気で燃焼炉に送り込む構造が必要となる。

なお、ウッドシェーブ混合馬ふんは残餌に由来する長い牧草類が混入しているため、カッター等で細断すると共に、水分がある材料の成型に適したエクストルーダー型の成型機(図 2-5)により直径 20mm 程度の円柱状ペレット燃料に加工して燃焼材料とする。

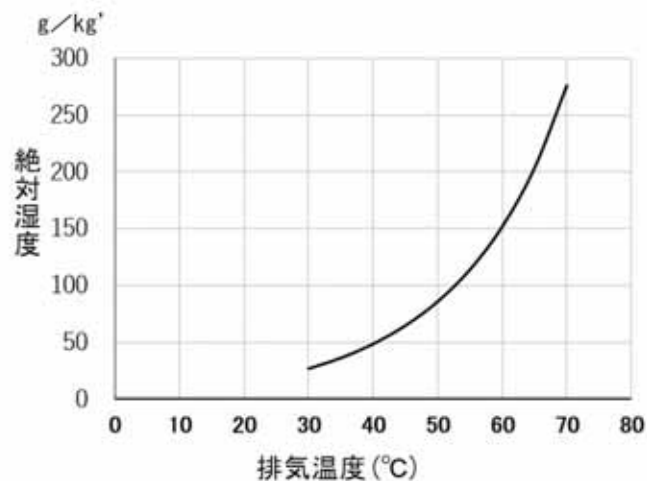


図 2-4 排気温度と絶対湿度の関係

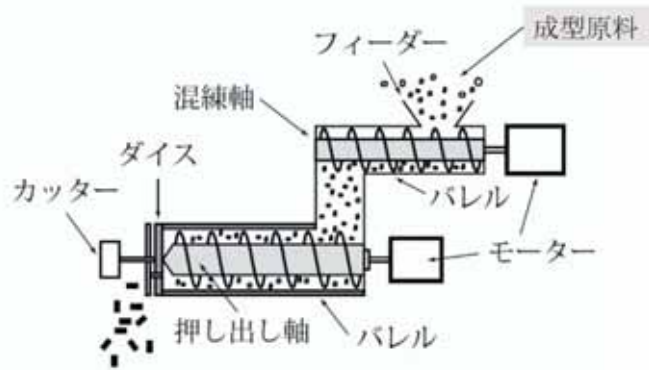


図 2-5 エクストルーダー型成型機の構造模式図(三重県 原)

4) 燃焼熱エネルギーの利用

成型処理したウッドシェーブ混合馬ふんペレットをロータリーキルン式燃焼炉等で燃焼させ、熱交換により蒸気を発生させ発電を行う。蒸気タービンを回した後の蒸気の一部は、ウッドシェーブ混合馬ふんの乾燥や温水製造などに使用するが、残りの廃熱については、蒸気を温水に戻すため潜熱分をクーリングタワー等で大気中に放出するシステムとして試算する。なお、試算するウッドシェーブ混合馬ふんの水分は、水分測定値を元に低水分材料として水分 22.3%のものを、高水分材料として水分 49.4%のものを、中水分として測定値平均の 39.0%のものについて試算を行う。

処理規模は、ウッドシェーブ混合馬ふんの処理量が現物で 80t/日、平均水分 49.4%で、乾物量で 40.48t/日とする。

(1) 低水分材料（水分 22.3%）での燃焼熱エネルギーの利用

ア) 低位発熱量の計算

ウッドシェーブ混合馬ふんの灰分は 6.15%、有機物量が 93.85%で、有機物中各元素の重量組成は C が 49.5%、H が 6.9%、O が 43.6%である。

水分 22.3%のウッドシェーブ混合馬ふんの場合、乾燥ペレットの高位発熱量は 18.0MJ/kg であるので、水分 22.3%の時の現物 1kg 当たりの高位発熱量は 13.99MJ/kg、h が 0.0536kg、w が 0.223kg なので

$$\text{低位発熱量は} = 13990 - 2500 \times (9 \times 0.0536 + 0.223) = 12,226 \text{kJ/kg}$$

燃料ペレットの総重量は 52.10t/日であるので、

$$\text{総発熱量は、} 52.10 \text{t/日} \times 12.226 \text{GJ/t} = 637.0 \text{GJ/日} \quad (\text{灯油換算 } 17.37 \text{kL/日、灯油 } 36.7 \text{MJ/L}) \text{ である。}$$

イ) 燃焼エネルギーの利用

ウッドシェーブ混合馬ふんの 2 次燃焼温度が 850℃程度の場合、蒸気発生熱効率が 80%、小規模の高圧蒸気発電での蒸気から電力への変換効率を 21%とすると、煙突からの排気熱量は発生熱量の 20%に当たる 127.4 GJ/日 (灯油換算 3.47kL/日)。煙突排気については、排気の露点温度 (結露し始める温度) が 56℃と高く、水蒸気を多量に含むため結露防止のために廃熱利用は行わない。

$$\text{発電量は } 637.0 \times 0.8 \times 0.21 = 107.02 \text{GJ/日} \quad \text{1kWh は } 3.6 \text{MJ} \text{ なので発電量は}$$

29,726kWh/日（発電能力1,239kW）となる（図2-6）。

発電に伴い発生する蒸気の冷却潜熱及び配管等からの放熱量は402.6GJ/日（灯油換算10.97kL/日）となる。

低材料水分では、原料を成型前に乾燥する必要が無いことから廃熱を乾燥に利用できない。したがって、温水需要や暖房需要があれば、残りの復水用の蒸発潜熱を利用できるが、余剰なエネルギーについてはクーリングタワーで放熱させる必要がある。

（2）高水分材料（水分49.4%）での燃焼熱エネルギーの利用

ア）低位発熱量の計算

ウッドシェーブ混合馬ふんの灰分は6.15%、有機物量が93.85%で、有機物中各元素の重量組成はCが49.5%、Hが6.9%、Oが43.6%である。

$$\text{低発熱量} = \text{高発熱量} - 2500(9h + w) \text{ [kJ/kg]}$$

ここで

h：燃料1kg中の水素分[kg]

w：燃料1kg中の水分[kg]

水分49.4%のウッドシェーブ混合馬ふんの場合、成型処理のため水分35%まで予備乾燥すると、乾燥ペレットの高位発熱量は18.0MJ/kgであるので、水分35.0%の時の現物1kg当たりの高位発熱量は11.70MJ/kg、hが0.0421kg、wが0.35kgなので

$$\text{低位発熱量} = 11700 - 2500 \times (9 \times 0.0421 + 0.350) = 9,878 \text{ kJ/kg}$$

燃料ペレットの総重量は62.28t/日であるので、

総発熱量は、62.28t/日 \times 9.878GJ/t = 615.2GJ/日（灯油換算16.76kL/日、灯油36.7MJ/L）である。

イ）燃焼エネルギーの利用

ウッドシェーブ混合馬ふんの2次燃焼温度が850℃程度の場合、蒸気発生熱効率が80%、小規模の高圧蒸気発電での蒸気から電力への変換効率を21%とすると、煙突からの排気熱量は発生熱量の20%に当たる123.0GJ/日（灯油換算3.35kL/日）。煙突排気については、排気の露点温度（結露し始める温度）が60℃と高く、水蒸気を多量に含むため結露防止のために廃熱利用は行わない。

発電量は615.2 \times 0.8 \times 0.21 = 103.3GJ/日 1kWhは3.6MJなので発電量は28,707kWh/日（発電能力1,196kW）となる（図2-7）。

発電に伴い発生する蒸気の冷却潜熱及び配管等からの放熱量は388.8GJ/日（灯油換算10.56kL/日）となる。

高水分原料の予備乾燥で蒸発させる水の総量は17.72t/日であり、乾燥に必要な熱量の理論値が44.3GJ/日であるので、熱効率を50%とみても必要熱量は88.6GJ/日であり、発電廃熱の22.8%、蒸気発生エネルギーの18.0%にあたる（灯油換算2.41kL/日）。温水需要や暖房需要があれば、残りの復水用の蒸発潜熱を利用できるが、余剰なエネルギーについてはクーリングタワーで放熱させる必要がある。

(3) 中水分材料（水分 39.0%）での燃焼熱エネルギーの利用

ア) 低位発熱量の計算

ウッドシェーブ混合馬ふんの灰分は 6.15%、有機物量が 93.85%で、有機物中各元素の重量組成は C が 49.5%、H が 6.9%、O が 43.6%である。

水分 39.0%のウッドシェーブ混合馬ふんの場合、高水分材料に比べて初期水分量が少ないので、より発電量を多くするため、水分 25%まで予備乾燥する。乾燥ペレットの高位発熱量は 18.0MJ/kg であるので、水分 25.0%の時の現物 1kg 当たりの高位発熱量は 13.50MJ/kg、h が 0.0421kg、w が 0.25kg なので

低位発熱量は $=13500 - 2500 \times (9 \times 0.0486 + 0.250) = 11,780 \text{kJ/kg}$

燃料ペレットの総重量は 53.97t/日であるので、

総発熱量は、 $53.97 \text{t/日} \times 11.782 \text{GJ/t} = 635.9 \text{GJ/日}$ (灯油換算 17.33kL/日、灯油 36.7MJ/L) である。

イ) 燃焼エネルギーの利用

ウッドシェーブ混合馬ふんの 2 次燃焼温度が 850°C 程度の場合、蒸気発生熱効率が 80%、小規模の高圧蒸気発電での蒸気から電力への変換効率を 21%とすると、煙突からの排気熱量は発生熱量の 20%に当たる 127.2 GJ/日 (灯油換算 3.47kL/日) 煙突排気については、排気の露点温度 (結露し始める温度) が 56°C と高く、水蒸気を多量に含むため結露防止のために廃熱利用は行わない。

発電量は $635.9 \times 0.8 \times 0.21 = 106.8 \text{ GJ/日}$ 1kWh は 3.6MJ なので発電量は 29,676kWh/日 (発電能力 1,237kW) となる (図 2-8)。

発電に伴い発生する蒸気の冷却潜熱及び配管等からの放熱量は 401.9GJ/日 (灯油換算 10.95kL/日) となる。

高水分原料の予備乾燥で蒸発させる水の総量は 12.39t/日であり、乾燥に必要な熱量の理論値が 30.98GJ/日であるので、熱効率を 50%とみても必要熱量は 61.95GJ/日であり、発電廃熱の 15.4%、蒸気発生エネルギーの 12.2%にあたる (灯油換算 1.69kL/日)。温水需要や暖房需要があれば、残りの復水用の蒸発潜熱を利用できるが、余剰なエネルギーについてはクーリングタワーで放熱させる必要がある。

(4) 稲わら混合馬ふん材料での燃焼熱エネルギーの利用

ウッドシェーブ混合馬ふんと同様に、稲わら混合馬ふんペレット燃焼での熱利用について試算する。処理規模は、ウッドシェーブ混合馬ふんと同様に乾物量が 40.48t/日、7月に調査した水分 53.1%とすると日処理量は 86.31t/日で、成型のため水分 35%まで予備乾燥し、乾物比 5%相当の消石灰を添加し成型したものを燃料として利用する。

ア) 低位発熱量の計算

稲わら混合馬ふんの灰分は 13.86%、有機物量が 86.14%で、有機物中各元素の重量組成は C が 49.5%、H が 6.9%、O が 43.6%である。

低位発熱量 = 高発熱量 - 2500 (9h + w) [kJ/kg]

ここで

h : 燃料 1kg 中の水素分[kg]

w : 燃料 1kg 中の水分[kg]

水分 53.1%の稲わら混合馬ふんの場合、成型処理のため水分 35%まで予備乾燥すると、乾燥稲わら混合ペレットの高位発熱量は 11.7MJ/kg であるので、水分 35.0%の時の現物 1kg 当たりの高位発熱量は 7.65MJ/kg、h が 0.0386kg、w が 0.35kg なので低位発熱量は $=11700 - 2500 \times (9 \times 0.0386 + 0.350) = 9,956 \text{kJ/kg}$ 石灰を含まない燃料ペレットの総重量は 62.28t/日であるので、総発熱量は、 $62.28 \text{t/日} \times 9.956 \text{GJ/t} = 620.0 \text{GJ/日}$ (灯油換算 16.89kL/日、灯油 36.7MJ/L) である。

イ) 燃焼エネルギーの利用

稲わら混合馬ふんの 2 次燃焼温度が 850℃程度の場合、蒸気発生熱効率が 80%、小規模の高圧蒸気発電での蒸気から電力への変換効率を 21%とすると、

煙突からの排気熱量は発生熱量の 20%に当たる 124.0 GJ/日 (灯油換算 3.38kL/日) 煙突排気については、排気の露点温度 (結露し始める温度) が 50℃と高く、水蒸気を多量に含むため結露防止のために廃熱利用は行わない。

発電量は $620.0 \times 0.8 \times 0.21 = 104.2 \text{ GJ/日}$ 1kWh は 3.6MJ なので発電量は 28,935kWh/日 (発電能力 1,206kW) となる (図 2-8)。

発電に伴い発生する蒸気の冷却潜熱及び配管等からの放熱量は 391.9GJ/日 (灯油換算 10.67kL/日) となる。

高水分原料の予備乾燥で蒸発させる水の総量は 24.03t/日であり、乾燥に必要な熱量の理論値が 60.1GJ/日であるので、熱効率を 50%とみても必要熱量は 120.2GJ/日であり、発電廃熱の 30.7%、蒸気発生エネルギーの 24.2%にあたる (灯油換算 3.28kL/日)。温水需要や暖房需要があれば、残りの復水用の蒸発潜熱を利用できるが、余剰なエネルギーについてはクーリングタワーで放熱させる必要がある。

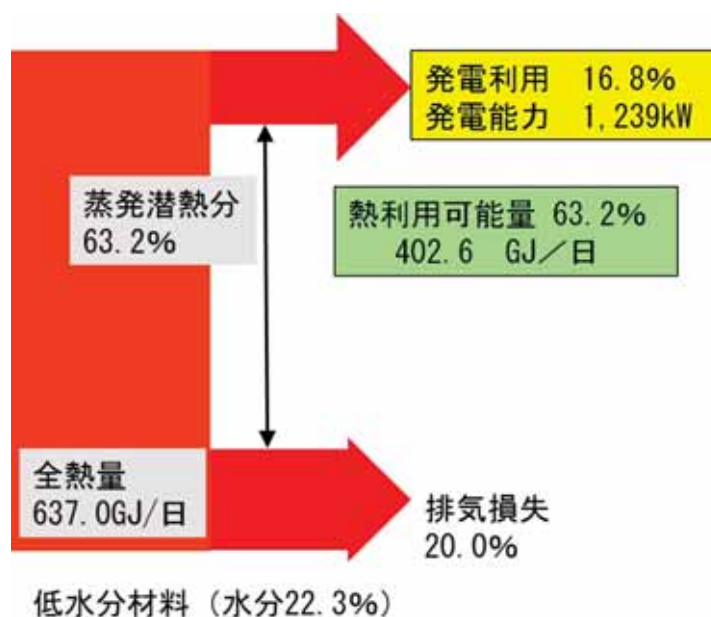


図 2-6 低水分ウッドシェーブ混合馬ふんペレットでの熱利用フロー図

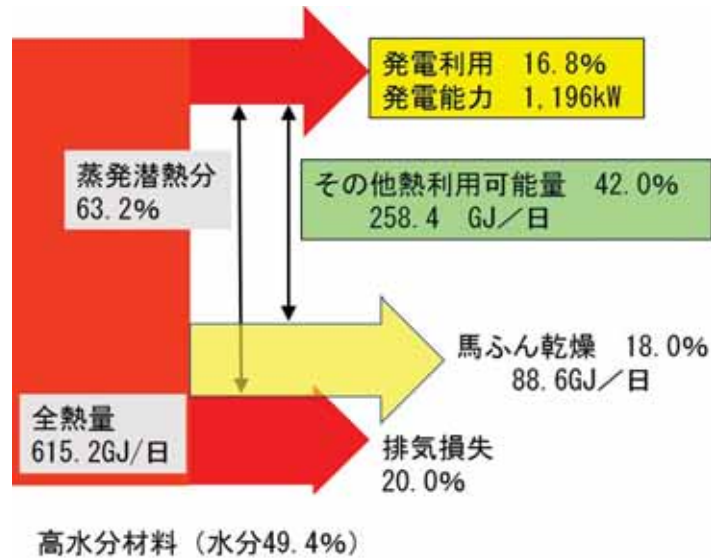


図 2-7 高水分ウッドシェーブ混合馬ふんペレットでの熱利用フロー図

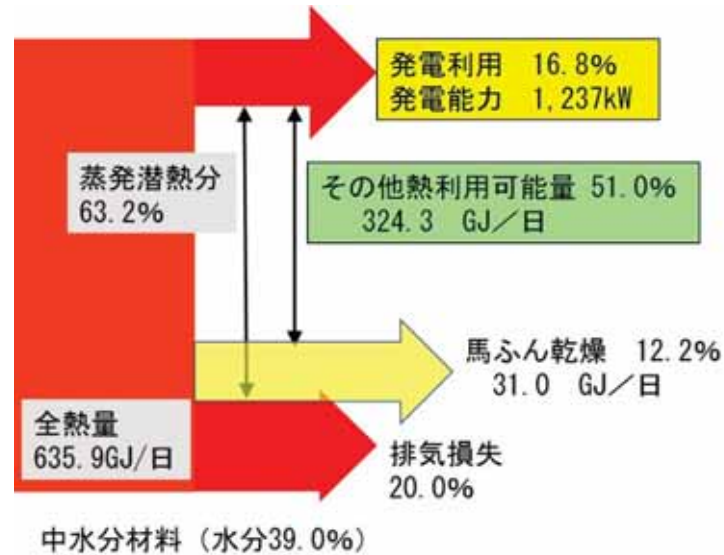


図 2-8 中水分ウッドシェーブ混合馬ふんペレットでの熱利用フロー図

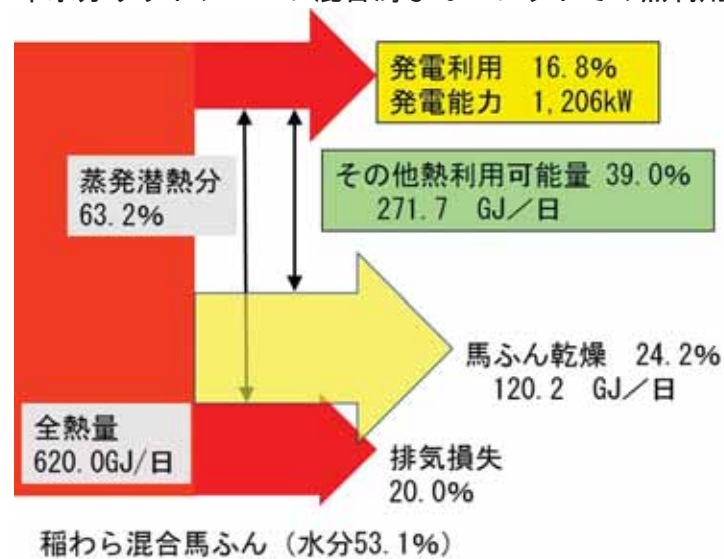


図 2-9 稲わら混合馬ふんペレットでの熱利用フロー図

(5) 燃焼灰の発生量

ウッドシェーブ混合馬ふんの日処理量80t/日の場合、乾物量が40.48t/日で灰分率が6.15%であるので、灰の発生量は2.49t/日以上となる。また、稲わら混合馬ふんでは乾物量が40.48t/日、石灰添加量が乾物の5%、乾物中の灰分率が13.86%であるので、灰の総量は7.63t/日となる。

3 馬ふん堆肥の利用調査の事例

馬肉生産農場（九州）調査

期日：平成28年3月23日（水）

- 1) この農場は、農場全体で約900頭の馬を飼養し馬肉生産を行っている会社である。馬の生産、飼養から屠場、肉生産まで一貫した経営を行っており、本農場にと場があり、肉生産を行っている。農場はいくつか分散しており、本農場では約400頭を飼養している。
- 2) 馬房は敷料としてモミガラを9割、バーク、おが粉を1割程度使っており、モミガラは年間約2万m³をJAのカントリーエレベータや近郊農家から無償で取りに行く方法で確保している。敷料の交換時期はおよそ20日間で汚れがひどいときはそれより前に交換する。1日の交換量は約40m³（約10t）が排出され、堆肥場へ運搬される。
- 3) 堆肥化の流れ：馬房からローダで搬出してダンプカーに積み込み、一次処理である堆積場へ運び、戻し堆肥を一部混合しながら約1ヵ月間堆積発酵している。その時には湯気も上がり一次処理の堆肥化が進みつつある。その後ロータリキルンに投入し3~4日間通して次の二次発酵舎で堆肥化している。ロータリキルンから排出された一次処理物の水分は、約65~70%程度であった。二次処理の堆肥舎で約1ヵ月ごとに切り返しを行って約3~6ヵ月間堆肥化し、製品化している。仕上がり堆肥は放線菌の発現も見られ、良質の堆肥となっていた。
- 4) 堆肥の利用：堆肥は約30戸の農家で利用され、野菜栽培での利用が主であり、取りに来る農家へは無償で、配達バラの場合、1000円/m³、距離によっては2000円/m³で販売している。袋詰めも行っており、350円/30L袋で年間約2万袋を出荷している。堆肥は県内の市町村（水田）にも出荷されている。
- 5) 臭気の課題：一次処理の堆肥舎周辺では、堆肥臭がやや強く感じられた。



写真1 パドックで飼育



写真2 ロータリキルンで混合



写真3 混合された堆肥は発酵槽へ



写真4 出来上がった製品堆肥

乗馬クラブ（関東）調査

期日：平成 29 年 9 月 15 日

- 1) この乗馬クラブは、乗馬用馬を 97 頭飼養している。馬房に敷く敷料はオガコが主で、納入方法は業者に連絡して 4 t トラックで搬入、庭先価格で約 4 万円である。使用方法は、馬房に 20~30 cm の厚さに敷き、汚れた部分（ふん尿が溜る後足部分）を毎日、スコップで取りだしている。その量は 30~50L（容積を大きくした 1 輪車）で約 1 杯分にあたる。運び出した使用済み敷料は、パッカー車に投入する。1 日の量は、3~4 m³ になりパッカー車 1 台分に当たる。パッカー車は毎日、近隣の契約農家の圃場（野菜畑）に降ろしに行く。そこで 6 カ月~1 年くらい堆積発酵処理している。ボロ出し時の性状は、水分が 60% 以下で取り扱い性がよい状態であり、堆積しておくとも発酵するような状態であった。
- 2) 毎日 3~5 m³ 程度の馬ふんが出てくるため、その置き場には苦勞しているようである。
- 3) このクラブでは臭気による苦情は出ていないが、傘下の乗馬クラブでは臭気の問題から敷料はすぐに 200L 程度の蓋付き容器に入れ、臭いを出さないようにしているところもある（東京都内）。
- 4) 牛ふんや豚ふんと違い、敷料を多く使用し、馬房から出てくるボロはそのままでも発酵が始まるような性状であるため不快臭はなく、山積みに堆積することができる。したがって取り扱いやすく、家畜ふんのような不快臭はないので扱いやすい材料となっている。
- 5) 馬ふん堆肥は、60a のショウガ栽培（ショウガ生産組合）に施用している（4~5 月、2~3 t/10a）。近隣の農家（白菜など）にもマニュアルスプレッダで散布しているようだ。堆積した堆肥から 9~10 月に小バエが発生することがあり、そのときは表面に石灰を散布して小バエの発生を抑制している。



写真 1 パッカー車に投入（1 日 1 台約 6 m³ が搬出）



写真 2 ほ場に堆積される



写真 3 馬ふん堆肥を施用したショウガ栽培



写真 4 収穫されたショウガ

馬肉生産法人（東北）調査

調査日：平成 28 年 9 月 29 日

- 1) この法人は、馬肉生産用の馬を飼育している。全体では約 300 頭飼育しているが、調査した農場では、120 頭の馬を飼育している。馬の繁殖は行っていない。生体を受け入れて肥育して出荷している。この法人の年間の馬の生産は約 2000 頭。競走馬系統（軽種馬）の馬がほとんどである。馬は 1 頭毎に各馬房に飼育されており、同じ馬房に複数頭は飼育しないそうである。飼育中の事故が一番心配であり、1 頭毎の管理を行っている。種付けから出荷まで 3 年間以上かかるために子馬は飼わない。できるだけ 3 ヶ月程度の肥育で出荷することが農場にとってはベストとのことである。
- 2) と場は同じ自治体内にあり、すべてそこで処理している。国産馬を使い、赤みの柔らかい肉にしあげて付加価値をつけている。
- 3) 馬房の敷料はオガコである。この地方はオガコが入手しやすいようで、近隣の製材所から入手しているようであるが、不足すると業者から購入するそうだ。価格は 20t 車（約 40~60m³）1 台 4 万円で購入している。敷料の交換時期は定期的では無く、汚れがひどくなると交換するようである。交換して堆積されている使用済み敷料は山状になっており、一部から湯気があがり堆肥化が進んでいるような水分となっており、排汁が流れ出るような水分にはなっていない。したがって車での運搬は容易なようである。材料（使用済み敷料）は近隣の農家約 40 戸が堆肥として利用している。2 t ダンプで農家庭先渡しで 1 車 5000 円で販売している。1 ヶ月の材料出荷量は、1 ヶ月約 40m³ 程度。
- 4) 馬房の臭気は、臭気強度 3 位か、楽に感じる臭気ある。ハエがやや多い。臭気の苦情は数年に 1 回程度、近くの住宅からあるようだ。畜舎は古いがそれほど汚れておらず、床面は比較的乾いているような状況である。



写真1 飼育中の馬房



写真2 飼育中の馬房



写真3 敷料は豊富



写真4 ボロは堆積しても崩れることはない

競走馬育成牧場（東北）調査

調査日：平成 28 年 9 月 30 日

- 1) この牧場は、競走馬約 270 頭を育成している。馬ふんは、1 日 4 t 車で 10 台分が発生する。馬房の敷料はすべてカナダ産の麦稈である。
- 2) 馬ふんの利用は、1 つは堆肥化である。堆肥化は天日で山積み Windrow を作り、1 ヶ月に 1 回、バックホーで切り返しを行い、約 5 ヶ月で製品として近隣農家へ販売、あるいは無償供与している。自治体内の長ネギ協議会（10a 当たり 2 t 車で 10～15 台分）、水田稲作部会（10a 当たり 2 t 車で 10～15 台分）運搬賃を含んで 1000 円 / 2 t 車 1 台で販売、軽 4 で直接取りに来るときは無償で出している。もう 1 つの利用は、マッシュルーム培地としての利用で、12 t 車（約 50m³、大型トレーラー使用）で週 3～4 台取りに来ている。マッシュルーム生産農家への出荷は、安定的で大口使用である。
- 3) 長ネギ協議会は自治体がバックアップしており、普通のネギより糖度が高く（普通ネギは約 8、馬ふん堆肥ネギは約 12）、価格は 2 倍くらい高く販売されている（JA 販売はなし、すべて協議会で販売）。ネギの生産は夏ネギ。ネギを収穫した 9～10 月に堆肥をほ場に堆積し、すぐにショベルローダで全面散布する（この牧場が行う）。



写真 1 マッシュルームへ運ばれる馬ふん



写真 2 ネギ栽培ほ場に散布された堆肥



写真 3 ほ場にすき込まれた堆肥



写真 4 栽培中のネギ

育成・調教牧場（東北）調査

期日：平成 29 年 6 月 13 日（火）

- 1) この牧場は、馬の育成、調教施設であり、現在、乗用馬と競走馬が約 120 頭飼育されている。競走馬は民間に施設管理を依頼している。種馬を所有して繁殖を行っている。競走馬の敷料（ワラ+馬ふん）は 1 日 4 t 搬出されるが乗用馬の方はワラ半分、オガコ半分で 1 日軽トラで 2 台程度、出てきた敷料は駒木堆肥生産組合の堆肥場で牛（和牛と乳牛）ふんと混合して堆肥化されている。
- 2) 堆肥の利用は、水田（食用米、飼料用米）に 3t/10a、葉たばこ生産農家（5ha）へは春、秋それぞれ 1 t /10a の利用である。オガコ入り堆肥は耕種側に敬遠されているがブルーベリー栽培に利用されている。
- 3) この牧場で搬出された各牧区に 2～3 ヶ月堆積された後、堆肥センターで堆肥化される。
- 4) ある堆肥センターでは、堆積型の堆肥舎でローダによる切り返しを行い、主に 11 月に出荷している。基本的には 4～5 月と 11 月に堆肥センター発酵槽を空にする。組合員は 4 戸、マニュアルスプレッダを所有しており、散布も行っている。
- 5) これまでに臭いの問題で苦情が出たことは一度もないとのことである。



写真1 馬房から搬出された馬ふん



写真2 堆肥舎で堆肥化される馬ふん



写真3 堆肥舎

飼育農場（東北）調査

期日：平成 29 年 11 月 19 日

- 1) この農場では、2018 年 2 月現在 16 頭の馬を飼育、管理している。協業する一般社団法人馬と人との共存・共栄推進協会と共に、引退馬を引き取り、「堆肥うま」としての新たな活用方法検討している。
- 2) 馬房に敷料としてオガコを敷き、ボロは水分が高いと天日乾燥してすこし水分を下げてから通気型堆肥舎で堆肥化している。良質堆肥を目指しており、通気型堆肥舎で1ヶ月堆肥化しさらに堆肥舎で1ヶ月、フレコンバックに詰めて4ヶ月堆積し腐熟させている。
- 3) 堆肥は袋詰め(18L)レインターネットで1300円/袋で販売している。また、近くの道の駅では580円/袋で販売し、好評を得ている。



写真1 パドックの様子



写真2 ボロを天日乾燥



写真3 通期型堆肥舎で堆肥化



写真4 道の駅での堆肥販売

4 謝 辞

「堆肥利用の困難な馬ふんの燃焼利用調査事業」の推進にあたり、馬ふん堆肥の燃焼試験を国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業研究センターに委託し、関係各位に多大のご協力をいただきました。ここに深く謝意を表します。

5 事業推進委員及び執筆担当者

【事業推進委員名簿】 (現職)

楠瀬 良	公益社団法人 日本装蹄協会	特別参与
凌 祥之	国立大学法人 九州大学大学院 農学研究院 環境農学部門	教授
天羽 弘一	国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農業技術革新工学研究センター 総合機械化研究領域	領域長
薬師堂 謙一	国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター 畜産草地研究領域 畜産環境・乳牛グループ	

【執筆担当者】

道宗 直昭	(一財) 畜産環境整備機構 畜産環境技術研究所	研究統括監
小堤 悠平	(一財) 畜産環境整備機構 畜産環境技術研究所	研究員
畠中 哲哉	(一財) 畜産環境整備機構 畜産環境技術研究所	嘱託
薬師堂謙一	国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター 畜産草地研究領域 畜産環境・乳牛グループ	

畜産環境技術研究所 所在地



馬ふん燃焼利用マニュアル

堆肥利用の困難な馬ふんの燃焼利用調査事業成果報告書

平成 30 年 3 月 30 日 発行

発行：一般財団法人 畜産環境整備機構

〒105-0001 東京都港区虎ノ門5丁目 12 番1号(ワイコービル2階)

TEL 03-3459-6300/FAX 03-3459-6315

編集及び連絡先：一般財団法人 畜産環境整備機構 畜産環境技術研究所

〒961-8061 福島県西白河郡西郷村大字小田倉字小田倉原1

TEL 0248-25-7777/FAX 0248-25-7540

メールアドレス：ilet@chikusan-kankyo.jp

ホームページ：<http://www.chikusan-kankyo.jp>