

### 3. セメント原燃料堆肥を生産・利用するための要素技術の検討

#### 1) 固液分離機（スクリープレス）による水分除去、および塩素除去

##### (1) 固液分離機の脱水性能と塩素除去性能

###### 【調査方法】

家畜ふん尿中の塩素を除去するとともに、その後の家畜ふんの発酵を促進する前処理方法を確定するために、固液分離機による脱水処理工程を調査した。栃木県那須烏山市のS牧場から材料や場所の提供を得て、固液分離機のメーカー立ち合いのもとで調査は実施された（写真3、4）。固液分離機のスクリー回転数を操作することで処理速度を1~7rpmの範囲で5段階に変えて、表9の条件に従って固液分離機の処理速度や乾物回収率、塩素除去率、あるいは得られた固液分離固分の性状を評価した。



写真3 供試した可搬式の固液分離機



写真4 調査現場でのサンプリング風景

表9 固液分離機の脱水性能調査の条件

調査場所	S牧場(栃木県那須烏山市)、2009.11.17~20	
供試原料	凝集剤を所定量添加し、濃縮器でろ液を除去した豚ふん尿スラリー	
	塩素濃度、ppm	870~930
	含水率、%	91.8~93.9
供試装置	F社製 SHX-200型 1.5ML(スクリープレス・ツインタイプ)	
	スクリー (テフロン被覆)	SPNo36(汎用タイプ) SPNo45(圧縮比が大きいタイプ)
	運転条件	・スクリーの回転数を1~7rpmに変化 ・スクリー内部を還流する蒸気で原料を加熱する条件下でも脱水処理を実施
分析項目	表5と同様	

## 【結果と考察】

### ①スクリー回転数と処理性能 (図 7, 8)

スクリーの回転数が大きくなるほど直線的に処理速度が増加して、7rpm の処理速度は1rpm の場合の3.9倍であった。それとともに、負荷電流値も直線的に増加したが、7rpm の負荷電流値は2倍に留まった。

原料を加熱することで処理速度にやや改善が見られたが、スクリーに原料の付着が確認されたことから、長時間の処理にあたっては処理速度の低下が考えられる。原料の加熱やスクリーの圧縮比の違いによる付加電流値への影響はあまり見られなかった。

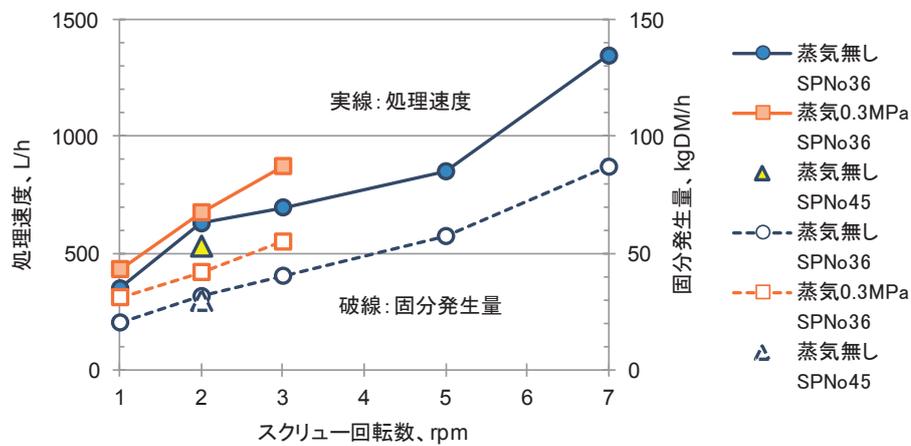


図 7 スクリュー回転数と処理速度の関係

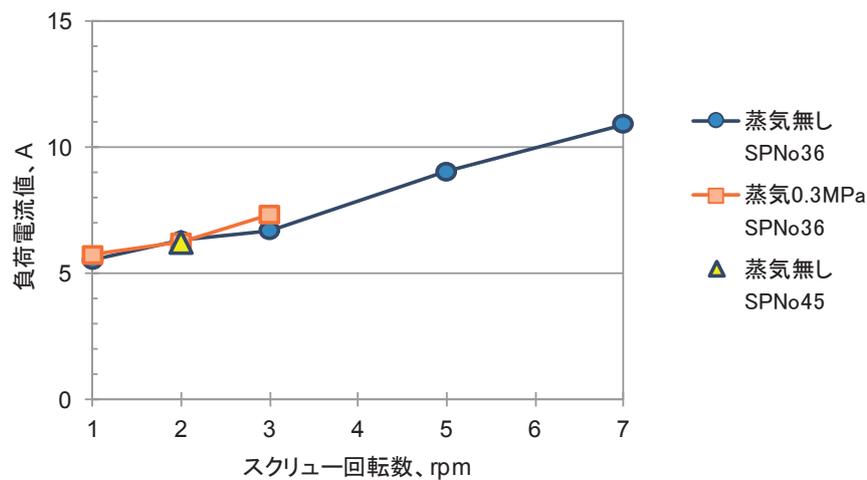


図 8 スクリュー回転数と付加電流値の関係

## ②スクリー回転数と乾物回収率および塩素除去率（図9）

調査開始時の原料に含まれていた塩素に対し、脱水処理によって分離液とともに取り除かれた塩素の割合を塩素除去率（%）とすると、スクリーの回転数が1rpm時では塩素除去率が90%近くに達し、良好な塩素の除去が確認された。しかし、スクリーの回転数を上げて処理速度を高めると、塩素除去率は5rpm時には84%にまで低下した。原料の加熱やスクリー圧縮比の増加はむしろ塩素除去率を低くする影響があった。

調査開始時の原料に含まれていた乾物に対し、分離後の固分として回収できた乾物の割合を乾物回収率（%）とすると、原料を加熱しない場合の乾物回収率は1rpm時で最も高く87%であり、処理速度が高まると7rpmの81%まで直線的に減少した。原料を加熱することで乾物回収率が改善されたが、スクリー回転数が3rpmでは違いがみられず、その効果はスクリー回転数が小さな場合に限定された。

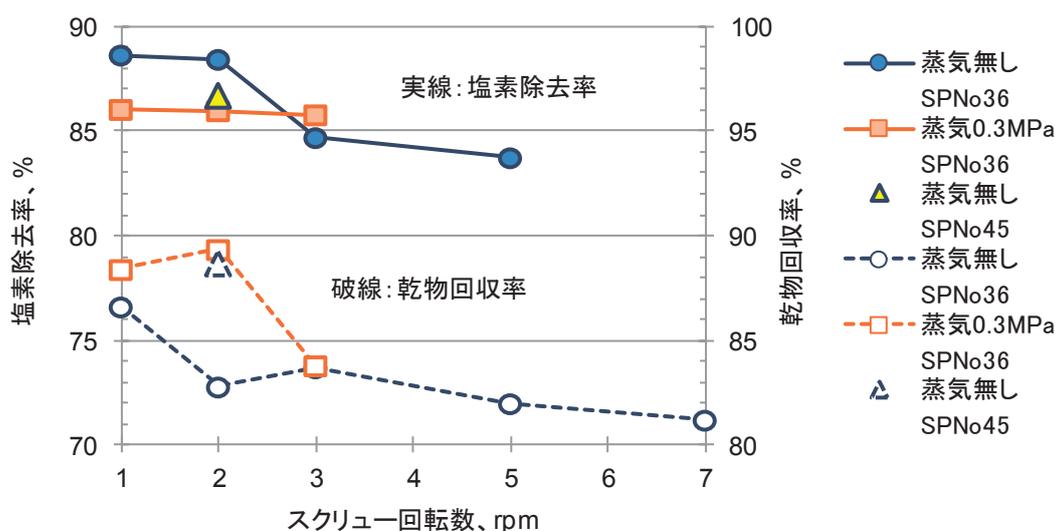


図9 スクリュー回転数と処理速度の関係

## ③スクリー回転数と固分の含水率、塩素濃度、総発熱量（図10）

供試原料の含水率は90%強であったが、脱水処理後の固分の含水率は、1rpmの場合で71%にまで減少した。処理速度が3rpmより大きくなると、固分の含水率は75%を超えて高くなる傾向にあった。原料の加熱やスクリーの圧縮比の増加の効果は明確には見られなかった。75%を超える固分では、通気性が悪く、後段の堆肥化処理に悪影響を与え

ることが考えられる。

固分中の塩素濃度についても含水率と同様の傾向がみられた。つまり、スクリー回転数が 3rpm 以上では塩素濃度が 0.2%DM を超えて高くなり、原料の加熱やスクリーの圧縮比を大きくする効果は明らかではなかった。

一方で、固分の総発熱量は処理速度に影響を受けず、常に 20~22MJ/kgDM であった。

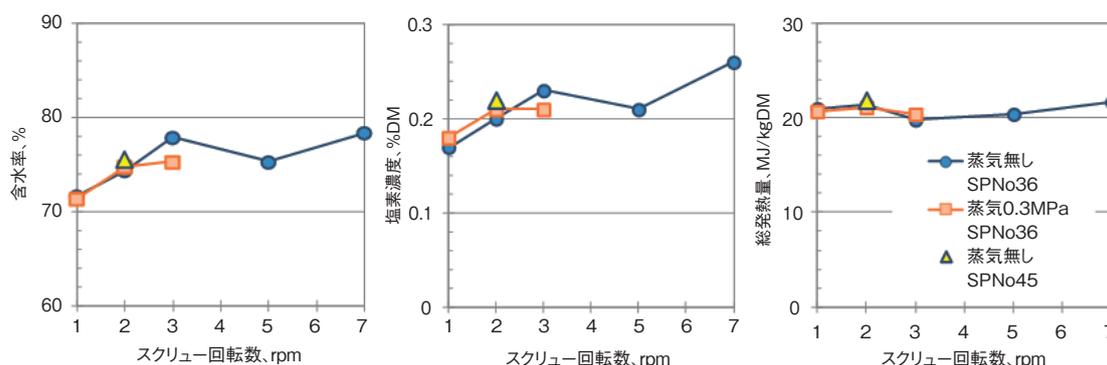


図 10 スクリュー回転数と固分中の成分との関係

## (2) 処理対象物の性状と処理性能

### 【調査方法】

前項と同じ目的で、固液分離機による脱水処理を検討した。具体的には、牧場のふん尿処理施設から出される固形物、すなわち、豚ふん尿スラリーや余剰汚泥に凝集剤を添加したものや、豚ふんを原料にして、脱水処理後に得られる固分の性状を評価した。なお、調査方法は表 9 とほぼ同様であるが、供試原料の調達の関係から、調査場所を HL 牧場（青森県三戸町）に変更した。また、調査にあたっては、予備試験の結果から固液分離機のスクリー回転数を 0.5rpm に落として一定とし、原料の加熱は行わなかった。供試原料は、調査結果とともに表 10 に示す。

### 【結果と考察】

豚ふん尿スラリーや豚ふんは、固液分離機での脱水処理が可能であり、含水率が 70% を下回る固分が回収できた。しかし、余剰汚泥は効果的な脱水ができず、固分の含水率は 85% と高かった。スクリープレス方式では、固分中に適量の繊維成分が必要とされ

る場合があり、余剰汚泥の場合は繊維成分が不足して固液分離機的能力を十分に引き出せなかったものと考えられる。

塩素濃度は、豚ふん尿スラリーを固液分離した固分が 0.08%DM と最も低くなった。余剰汚泥と豚ふんの脱水処理後の固分には、それぞれ 0.26%と 0.24%が含まれ、これらは、前項で調査した豚ふん尿スラリーの場合と同程度であった。

総発熱量は、いずれの供試原料の脱水処理後の固分も同様の値を示し、19～20MJ/kgDM であった。

表 10 HL 牧場のふん尿処理施設から出される原料の固液分離後の固分の性状

供試原料	供試原料		固液分離固分	
豚ふん尿 スラリー	MLSS	9,800 ppm	含水率	64.8 %
	塩素濃度	570 ppm	塩素濃度	0.08 %DM
	総発熱量	20.8 MJ/kgDM	総発熱量	20.0 MJ/kgDM
余剰汚泥	MLSS	9,700 ppm	含水率	84.6 %
	塩素濃度	580 ppm	塩素濃度	0.26 %DM
	総発熱量	18.1 MJ/kgDM	総発熱量	19.0 MJ/kgDM
豚ふん	含水率	80.9 %	含水率	69.2 %
	塩素濃度	0.52 %DM	塩素濃度	0.24 %DM
	総発熱量	18.5 MJ/kgDM	総発熱量	18.8 MJ/kgDM

## 2) 堆積方式（通気型堆肥舎）でのセメント原燃料堆肥の生産

### 【調査方法】

強制通気を行う堆積方式の堆肥舎を供して原燃料堆肥の試作を行うとともに、堆肥の生産、利用に向けた技術的な検討を行った。堆肥の試作は茨城県鹿行地域にある H 養豚場で実施した。H 養豚場では、豚ふん尿スラリーを堆肥化する前段で、スラリーに凝集剤を添加して脱水性を改善し、高さ数 10cm ほどに堆積したモミガラをフィルターにしてスラリーを脱水する点で独自の前処理方法が採られている（図 11、写真 5、6）。この前処理以外については、通気型堆肥舎で堆肥原料（脱水後のスラリーとモミガラが混合されたもの）の腐熟を促進し、約 1 週間に 1 度の割合でローダーで切り返しを行う一般的な堆肥化処理が採用されている。

今回の調査では原燃料堆肥を試作するために、堆肥原料に剪定枝（粉碎品）をさらに

混合して初発の原料の含水率を下げるとともに、剪定枝の希釈効果で塩素濃度を低減できるか調査を行った。なお、調査概要や供試した堆肥原料を表 11 に示す。

表 11 H 養豚場における調査概要

調査場所	H 養豚場 (茨城県鹿行地域)、2010.9.6~11.1			
供試原料	凝集剤を所定量添加し、モミガラで脱水・水分調整した豚ふん尿スラリーと、堆肥化副資材として豚ふん尿+モミガラと同容量の剪定枝			
	含水率 (%)	塩素濃度 (%DM)	総発熱量 (MJ/kgDM)	灰分 (%DM)
豚ふんスラリー	86.1	0.40	21.9	21.4
モミガラ	12.1	0.06	14.3	25.5
剪定枝(粉碎品)	38.9	0.02	15.7	1.9
混合物	75.1	0.23	18.3	21.2
堆肥化方法	間口約 3m×奥行き約 4m×6 槽の強制通気型の堆肥舎を用いてホイルローダーで約 1 週間ごとに切り返し、およびサンプリング			
分析項目	表 5 と同様			

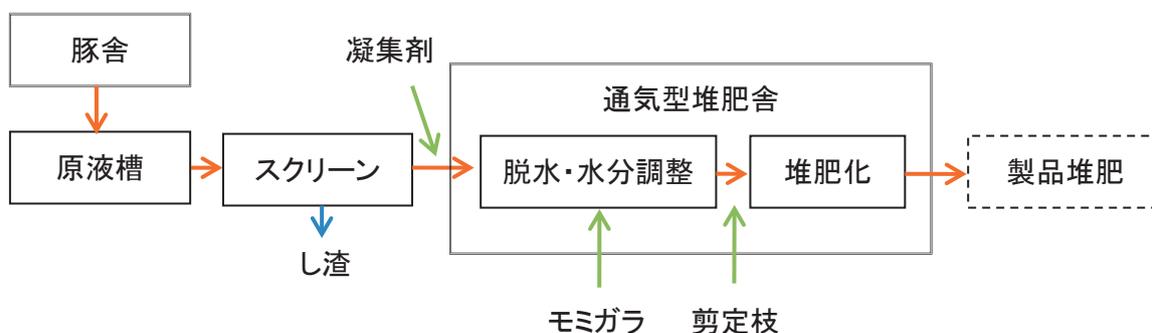


図 11 H 養豚場での原燃料堆肥生産フロー図



写真 5 モミガラによる脱水処理と水分調整



写真 6 供試した剪定枝(粉碎品)

### 【結果と考察】

図 12 に堆肥化過程における堆肥原料の含水率と塩素濃度、総発熱量の変化を示す。含水率は当初 75%であったものが 5 週目には 20%を下回り、この間ほぼ直線的に低下した。一方で、塩素濃度はサンプリングの誤差が原因と思われる変動があったものの、総発熱量とともに、堆肥化開始時に比べて大きな変化は見られなかった。

5 週間という時間が必要であったものの、一般的な堆肥化処理を行うことで目標値の含水率まで乾燥できた。原料の総発熱量が堆肥化過程で減少しなかったことから、含水率の低下は有機物分解に伴う発酵熱の他に、強制通気の影響も大きかったと考えられる。

塩素濃度は原料の豚ふん尿スラリーが 0.4%DM であったのに対し、塩素濃度の低いモミガラや剪定枝を混合することで、相対的に塩素濃度を 0.23%DM まで低減することができた。堆肥化に伴って塩素に大きな変化は見られなかったことから、前処理の段階で塩素濃度を調整する必要性が再確認された。

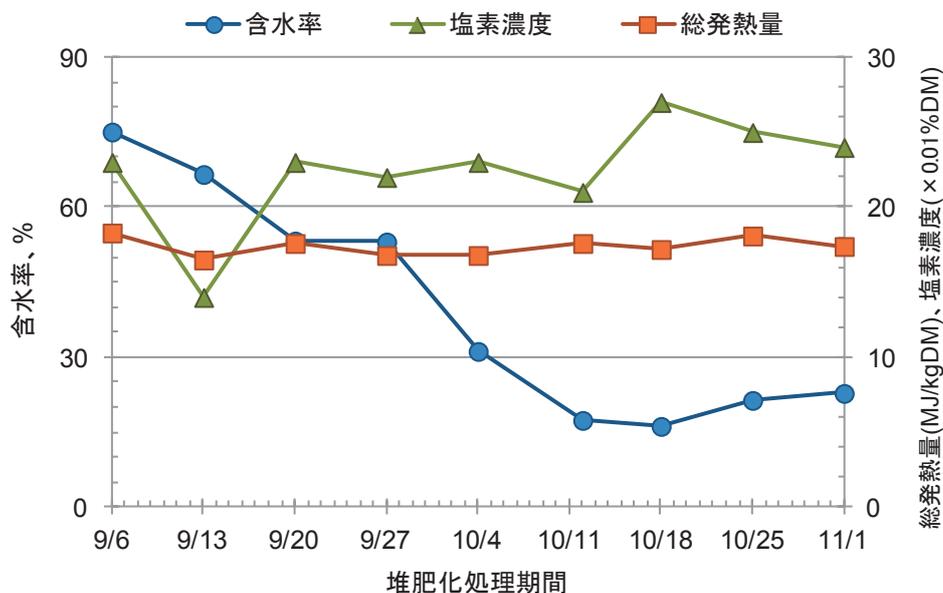


図 12 堆積方式による堆肥の変化

### 3) 開放型攪拌方式でのセメント原燃料堆肥の生産

#### 【調査方法】

開放型攪拌方式の堆肥化施設において、原燃料堆肥を連続して試作するとともに、堆肥の生産、利用に向けた技術的な検討を行った。堆肥の試作は栃木県那須烏山市にある S 牧場で実施した。S 牧場では豚舎からふん尿混合状態で見られるため、ふん尿はいったんベルトプレス式の脱水機にかけられて、分離された固分だけが堆肥化処理される。固分には前項の剪定枝破砕品と同じものが容積比で固分 1 に対し剪定枝 4 の割合で混合され、その後、ホイールローダーで堆肥化施設に投入される (図 13)。堆肥化施設は、ロータリー式の攪拌装置と送風機による強制通気の設備が備わっており、堆肥は連続的に生産される (写真 7、8)。

表 12 に S 牧場で供した堆肥原料の成分を示す。これらの原料を 53m<sup>3</sup>/日の割合で 15 日間連続的に投入して、製品堆肥の成分を調査した。

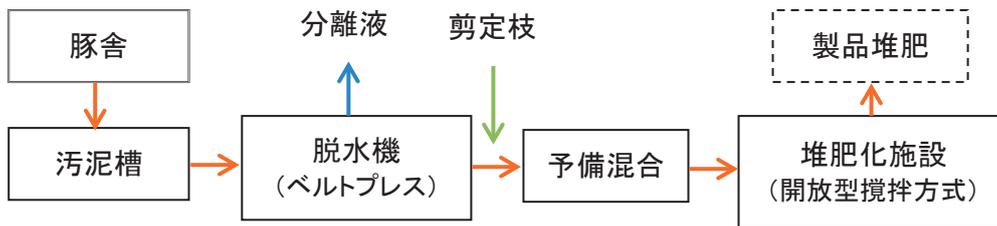


図 13 S 牧場での原燃料堆肥生産のフロー図



写真 7 S 牧場の堆肥化施設(開放型攪拌方式)



写真 8 堆肥化施設の内部

表 12 S 牧場での供試原料、および仕上がり堆肥

供試原料	含水率 %	塩素濃度 %DM	総発熱量 MJ/kgDM
豚ふん	79	0.14	21.3
剪定枝(粉碎品)	42	0.07	13.8
試作した堆肥	33	0.22	15.9

## 【結果と考察】

従来はS牧場の堆肥の含水率は55%程度であったが、副資材に剪定枝を多く用いることで含水率を低減することができた。ただし、表12にある堆肥試作品の含水率33%まで低減するためには、堆肥化施設での水分蒸発の他に、堆肥舎で約30日の通風乾燥が必要になり、後述の仕上げ乾燥の調査が必要となった。豚ふん尿を堆肥化処理の前段でベルトプレス方式で脱水処理しているものの、スクリーンプレスほどの脱水能力が得られず、堆肥化前の豚ふんの含水率が高かったことが原因の一つと考えられる。

なお、試験に先立って、すでに堆肥化施設に投入されていた一般管理の堆肥原料と5m程度の距離を確保して今回の調査を開始したが、原燃料堆肥を取り出すときには両者が接触しており、境界が判別できない状態であった。このため、豚ふんの塩素濃度が堆肥化前で0.14%DMであったのに対し、一般管理の堆肥が製品堆肥に混ざった分だけ、試作した堆肥の塩素濃度が0.22%DMと高くなったものと考えられる。

製品堆肥の総発熱量は、堆積方式とほぼ同程度の16MJ/kgDMであった。

## 4) 密閉縦型攪拌方式でのセメント原燃料堆肥の生産

### 【調査方法】

密閉縦型攪拌方式の堆肥化施設において、原燃料堆肥を連続して試作するとともに、原燃料堆肥の生産、利用に向けた技術的な検討を行った。堆肥の試作は青森県三戸町にあるHL牧場で行った。HL牧場での堆肥化処理フローを図14に示す。HL牧場では豚舎からふん尿混合のまま出されるため、ふん尿はスクリーンで粗ゴミが除かれた後に、スクリーンプレスで固液分離され(写真9)、固分は密閉縦型堆肥化装置に投入される(写真10)。他に、スクリーンからの粗ゴミや分離液を処理する曝気槽からの余剰汚泥もこの密閉縦型堆肥化装置で固分といっしょに堆肥化処理される。

約5ヵ月間にわたって調査を実施し、約1週間ごとに供試原料を堆肥化装置に投入した(図15)。原料の投入時、あるいは製品の取り出し作業時にはサンプルを採取して、表5に準じて含水率、塩素濃度、総発熱量の分析を行うとともに、堆肥化装置内部の温度を測定して堆肥化過程も調査した。

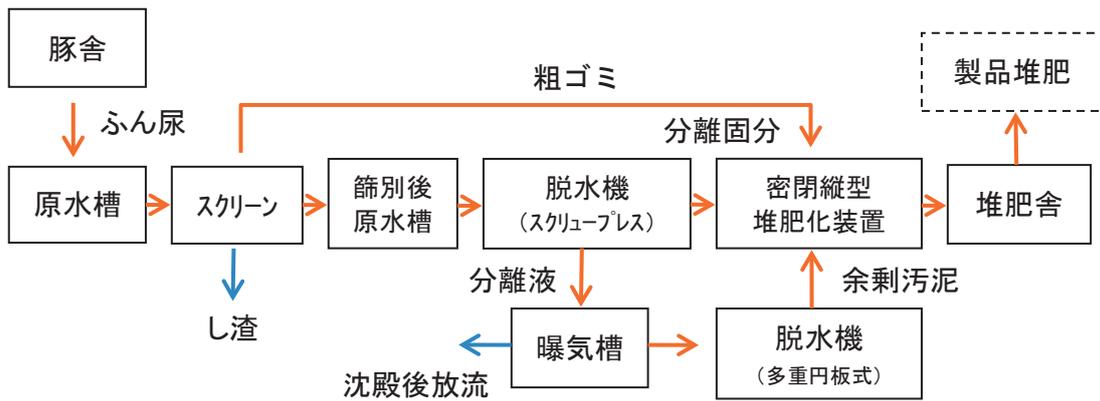


図 14 HL 牧場での原燃料堆肥生産のフロー図



写真 9 HL 牧場の固液分離機



写真 10 HL 牧場の密閉縦型堆肥化装置

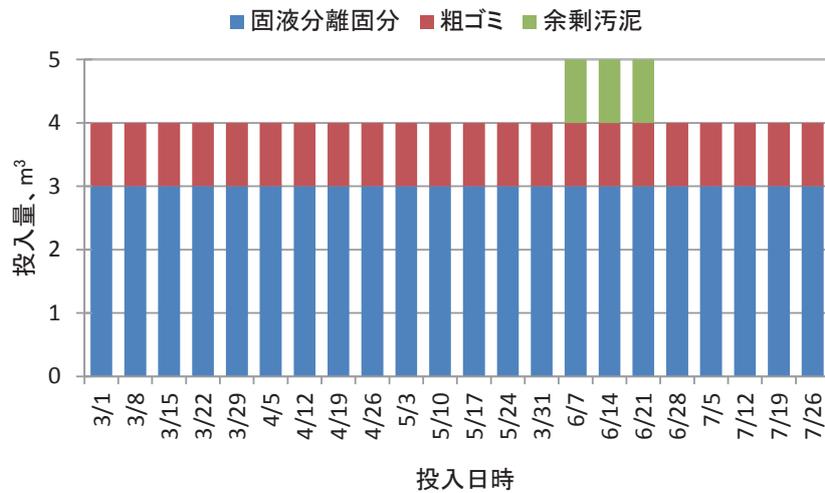


図 15 HL 牧場での堆肥原料の投入履歴

## 【結果と考察】

調査期間中の堆肥原料の温度変化を図 16 に示す。一般的に、密閉縦型堆肥化装置では、厩白土など熱量が高く分解しやすい副資材をふん尿に混ぜることで、発酵温度を 60～70℃に維持するケースが多い。HL 牧場では副資材を使っていないため、あるいは調査の開始時期が寒い時期であったことから、原料の温度はやや低く 40～60℃で推移した。原料は堆肥化装置上部のホッパーから投入されて、仕上がった堆肥は堆肥化装置底部から取り出されるが、投入されて間もない堆肥化装置上部の原料の温度が高くなる傾向があり、取り出し前の底部では温度が低くなる傾向がみられた。

堆肥原料のほか、仕上がった堆肥の性状変化を図 17 に示す。固液分離固分など原料の含水率は 69～88%と高い状態で投入されたが、約 1 週間の堆肥化過程を経た製品堆肥の含水率は 30%弱にまで低下した。

余剰汚泥を除く原料の塩素濃度は 0.13～0.17%DM であったが、製品堆肥の場合は若干高くなる傾向があり、0.19～0.21%DM で推移した。これは前章でも考察したように、堆肥化過程で乾物が分解されるために、乾物あたりの塩素が相対的に高まった結果と考えられる。余剰汚泥の塩素濃度は 0.43%DM と高いものであったが、投入量がわずかであったことから、仕上がり堆肥の塩素濃度に与える影響は限定的であった。

この間、総発熱量は 17～19MJ/kgDM とほぼ一定であった。

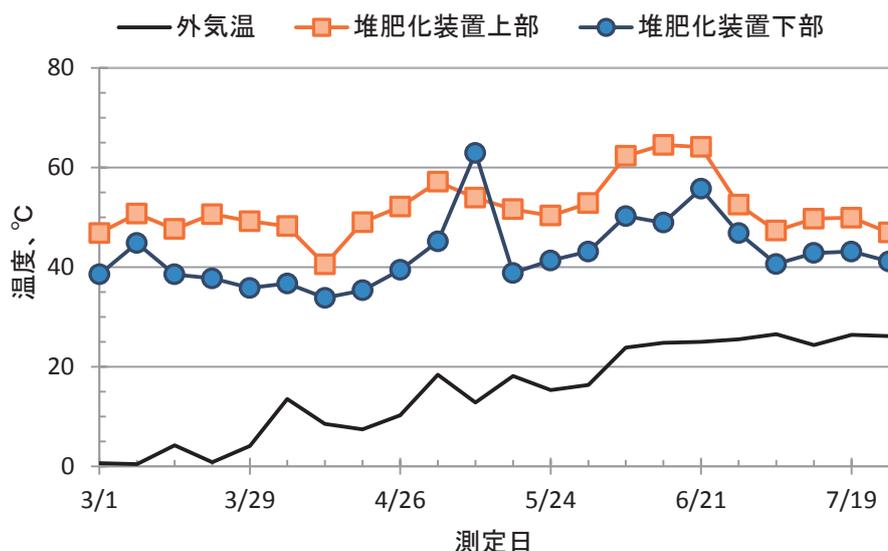


図 16 密閉縦型堆肥化装置で堆肥化した際の原料の温度変化

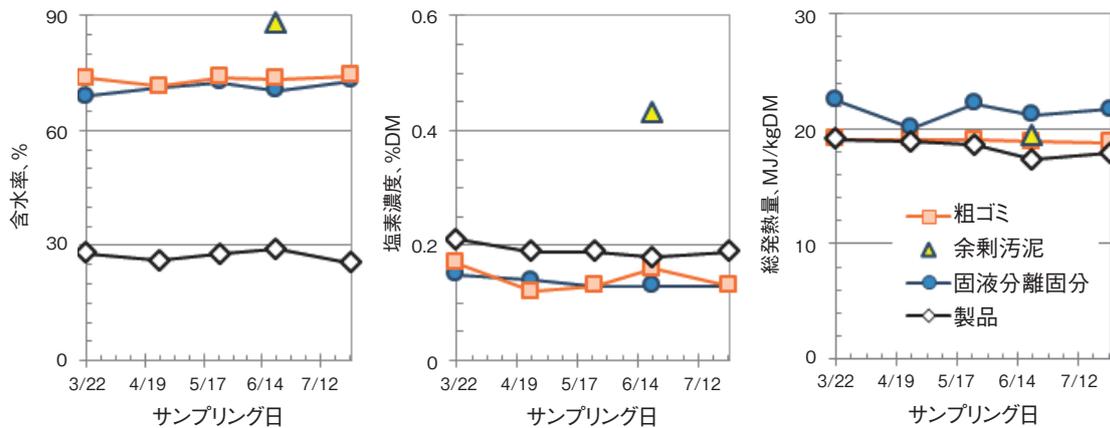


図 17 密閉縦型堆肥化装置による堆肥の性状

## 5) 通風による仕上げ乾燥

### 【調査方法】

堆肥化施設での処理を終えた原燃料堆肥について、堆肥化過程で十分に含水率が低下しないケースがみられたことから、堆肥化後の原燃料堆肥の含水率を低くする方法を検討した。具体的には、牧場で所有する通気型堆肥舎を利用して、通風による仕上げ乾燥を調査した。

仕上げ乾燥の調査内容は表 13 の通りであり、密閉縦型堆肥化装置で原燃料堆肥を試作した青森県三戸市にある HL 牧場の堆肥舎を利用した。送風機は堆肥化処理の通気用途で一般に使われる送風機よりも大容量の機種を選定し、夏季と冬季に分けて堆肥の乾燥程度に加え、乾燥に要する時間と費用を調査した。

### 【結果と考察】

調査期間中の外気温度は、夏季と冬季とでそれぞれ 25~30℃、14~16℃であったが、前者の含水率は約 4 日間で 29%から 23%に、後者は約 7 日間で 33%から 25%にまで低下した。この仕上げ乾燥に要する送風機の消費電力量は堆肥 1t 当たり夏季で 18kWh/t、冬季で 30kWh/t となった。原燃料堆肥の生産にあたっては、一般的な堆肥化処理コストに加えて、必要に応じて仕上げ乾燥のコスト、つまり夏季で 300 円/t、冬季で 500 円/t 程度の追加費用を考慮する必要がある。

表 13 通風による堆肥の仕上げ乾燥のための調査内容と結果

供試送風機	H社製 VB-060E (最大出力 4kW)	
実施場所	HL 牧場 (青森県三戸町)	
供試堆肥	密閉縦型堆肥化装置からの豚ふん堆肥 15t	
試験日時	夏季試験 2009. 8. 7~	冬季試験 2010. 10. 28~
乾燥前堆肥含水率、%	29	33
乾燥後堆肥含水率、%	23	25
乾燥時間	約 4 日	約 7 日
消費電力量、kWh/t	18	30
乾燥費用、円/ t	288	480

※電力料は 16 円/kWh で計算

## 6) 3章のまとめ

### (1) 含水率の低減化方法について

実機を使用した本章の調査では、前章の基礎試験以上に含水率の低下がみられ、堆積型、あるいは密閉縦型堆肥化装置において含水率が 30%以下の堆肥が試作できた。送風機を使った仕上げ乾燥によって、冬季でもさらに含水率を下げる事が可能であった。

ただし、原燃料堆肥を供出する畜産側としては、できるだけ堆肥化の基本に沿った方法で安価に発酵乾燥を進め、冬季の乾燥が不利な時期などに限って仕上げ乾燥を行うことが得策である。また、堆積型のケースでは、従来法の副資材(本章2項ではモミガラ)の他に、堆肥原料と同容量の剪定枝の混合を要するため、堆肥化処理に従来の2倍近くのスペースが必要になる点にも留意が必要である。

### (2) 塩素濃度の低減化方法について

堆肥化過程では、塩素は水分と同時に除去されることはないため、堆肥化前に原料中の塩素濃度を低くすることが重要であった。その点で、畜産で広く利用されるスクリープレスは効果的な塩素除去が可能であり、塩素が90%以上除去された条件も見られた。

ただし、固液分離機を利用できるケースは、浄化施設を併設する経営や、固液分離された液分のは場散布が可能な経営など、今のところ養豚業や酪農業の一部に限られる。液分の管理ができない場合は、剪定枝などの比較的低コストな副資材をふん尿に混合することで、堆肥化開始の時点で塩素濃度がすでに低減されている必要がある。

#### 4. 豚ふん堆肥を利用したセメント原燃料化モデルとその検証

##### 1) 原燃料堆肥を空気搬送する場合（八戸セメントモデル）

###### (1) 八戸セメントモデル

すでに1章の図1で示したように、セメント製造時には2つの系統で原燃料が投入される。つまり、空気搬送された原燃料が焼成炉内に突出したノズルから吹き込まれる場合と、仮焼炉を介して焼成炉の入り口から他の原料や原燃料とともに投入される場合である。本項では、まず前者の投入方法を検討した。その原燃料供給経路を図18に示す。なお、本モデルを検証するに当たっては、3章-4)のHL牧場で試作した豚ふん堆肥(表14)を原燃料堆肥として八戸セメントに供給し、工場内の実機を使ってセメントを製造した。

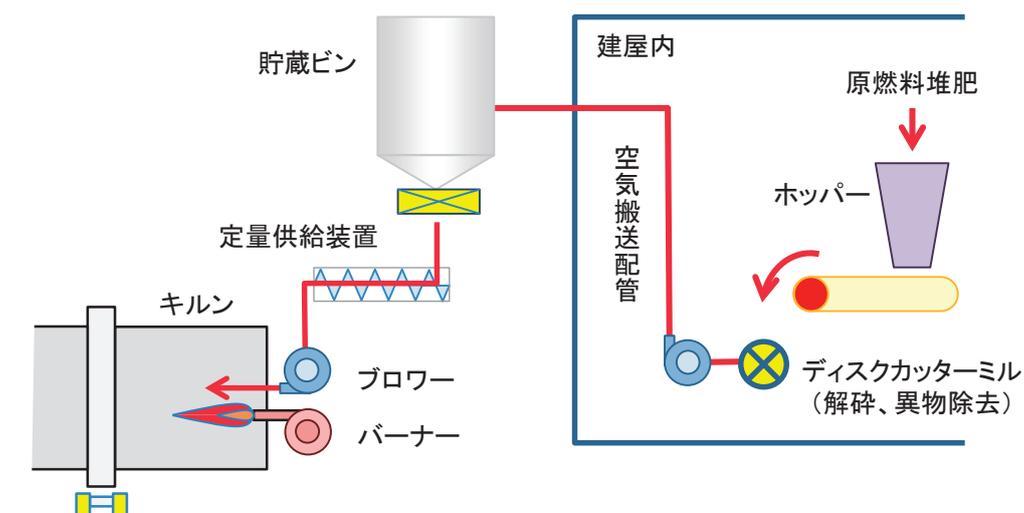


図18 八戸セメントモデルでの原燃料堆肥の供給方法

表 14 HL 牧場で試作した原燃料堆肥

ロット No	含水率 %	塩素濃度 %DM	総発熱量 MJ/kgDM
①	21	0.25	15.4
②	23	0.27	15.4
③	23	0.25	16.0
④	27	0.18	16.5
⑤	29	0.24	15.8
⑥	28	0.26	16.0
⑦	26	0.27	15.1
⑧	27	0.24	15.1
⑨	20	0.27	16.4
⑩	20	0.22	16.1
⑪	23	0.22	16.4
平均	24	0.24	15.8

## (2) 八戸セメントモデルでの石炭代替効果

表 15 にセメント製造時の燃焼状況を示す。合計で 11 回、189t を焼成炉に投入した結果、粉じんや異物の混入、あるいは悪臭の発生など、堆肥のハンドリングについて大きな問題は生じなかった。一部に目標値を超過する含水率の堆肥も見られたが、空気搬送工程では経路の詰まりは確認されず、スムーズな供給が可能であった。

原燃料堆肥の投入量は 11 回の平均で 2.6t/h であったのに対し、石炭の削減量は 0.9t/h であったことから、堆肥水分に伴う潜熱損失や燃焼効率などを考慮した正味の堆肥の原燃料価値は石炭のおよそ 1/3 程度と考えられる。また、原燃料堆肥の投入時には塩素濃度が最大で 18ppm 高くなることもあったが、JIS の上限値である 350ppm に比較すれば、原燃料堆肥の投入に伴う上昇は十分に小さかった。

ちなみに、八戸セメントでは年間 150 万 t のセメントを生産する能力を有し、その製造工程で消費する石炭は 15 万 t である。今回のモデル検証から、投入された堆肥の総量を 189t、石炭代替率を 0.36 とすると、 $189 \times 0.36 / 15 \text{ 万 t} = 0.05\%$  の石炭代替量となる。仮に今回の調査においてロット間で最大の投入量となった 56.5t が毎日利用されたとすると、年間で 2.1 万 t となり、現在使用する石炭の約 5% を代替できる規模となる。

表 15 セメント工場における堆肥の燃焼状況(八戸セメントモデル)

ロット No	堆肥の投入状況				石炭の削減効果		クリンカー
	利用日	投入 時間 h	総堆肥 投入量 t	堆肥 投入量 t/h	石炭 削減量 t/h	石炭 代替率	塩素濃度 の変化 ppm
①	2008/ 9/ 8	3.5	9.1	2.6	1.0	0.38	+ 4
②	2008/10/29	4.0	13.7	3.4	1.1	0.32	
③	2008/11/ 6	3.4	10.3	3.0	0.8	0.27	
④	2008/11/28	4.1	10.7	2.6	1.2	0.46	± 0
⑤	2009/ 1/30	4.8	10.8	2.2	0.8	0.36	
⑥	2009/ 2/ 9	5.3	10.5	2.0	0.6	0.30	
⑦	2009/ 4/27	4.5	11.1	2.5	0.8	0.32	
⑧	2009/ 5/22	8.0	19.6	2.5	0.8	0.33	+18
⑨	2009/ 6/30	4.7	10.6	2.3	1.0	0.44	
⑩	2009/ 8/ 5	10.0	26.3	2.6	1.0	0.38	
⑪	2009/12/15	23.5	56.5	2.4	0.9	0.37	+10
			合計 189	平均 2.6	平均 0.9	平均 0.36	平均 + 8

### (3) 八戸セメントモデルの経済性の評価

本モデルの原燃料堆肥の生産は、すでに HL 牧場で稼働する施設や設備を使用しており、原燃料堆肥の生産作業も通常業務の範囲で可能であったことから、原燃料堆肥を生産するための経費に多くの上積みはないと考えられる。ただし、冬季のある時期には堆肥の含水率が高くなることもあり、その場合は堆肥舎での仕上げ乾燥が必要であった。これらモデルの検証結果を踏まえて、表 16 に原燃料堆肥の生産コストを示す。

一般的に、セメント工場では、主原燃料の石炭のほか、木屑や再生油、廃プラスチックや廃白土など多様な代替原燃料をすでに使用している。これら代替原燃料との比較も考慮すると、原燃料堆肥の価値は 2,000 円/t 程度と位置付けられる。セメント工場側が代替原燃料との比較にて通年の受入れを可能と判断すれば、本モデルは牧場側に多くの負担を強いることなく経済的に成立すると考えられる。

ただし、今回は運搬費用を実費計上したが、HL 牧場と八戸セメントの距離は 60km であり、これを超える距離の運搬が必要な場合には、運搬費用がさらに必要となることに留意が必要である。

表 16 原燃料用途のための堆肥生産コストの上乗せ分（八戸セメントモデル）

	内容	仕上げ乾燥無 円/t	仕上げ乾燥要 円/t	備考
必要経費	原燃料用途のための上乗せ分	なし	500	送風用のための電力料金（30kWh/t）
	運搬費	2,000	2,000	トラック 1 台の実績（20,000 円/10t）
経費合計		2,000	2,500	堆肥の原燃料価値は 2,000 円/t

## 2) 原燃料堆肥を仮焼炉経由でキルンに投入する場合（栃木工場モデル）

### (1) 栃木工場モデル

本モデルは、仮焼炉を介して焼成炉に原燃料堆肥を投入する方式であり、ホッパーに供給された原燃料堆肥はベルトコンベヤなどでいったん仮焼炉に搬送されてからキルンに投入される（図 19）。なお、本モデルを検証するに当たっては、3 章-3) の S 牧場で試作した原燃料堆肥を栃木工場に供給し、工場内の実機を使ってセメントを製造した。

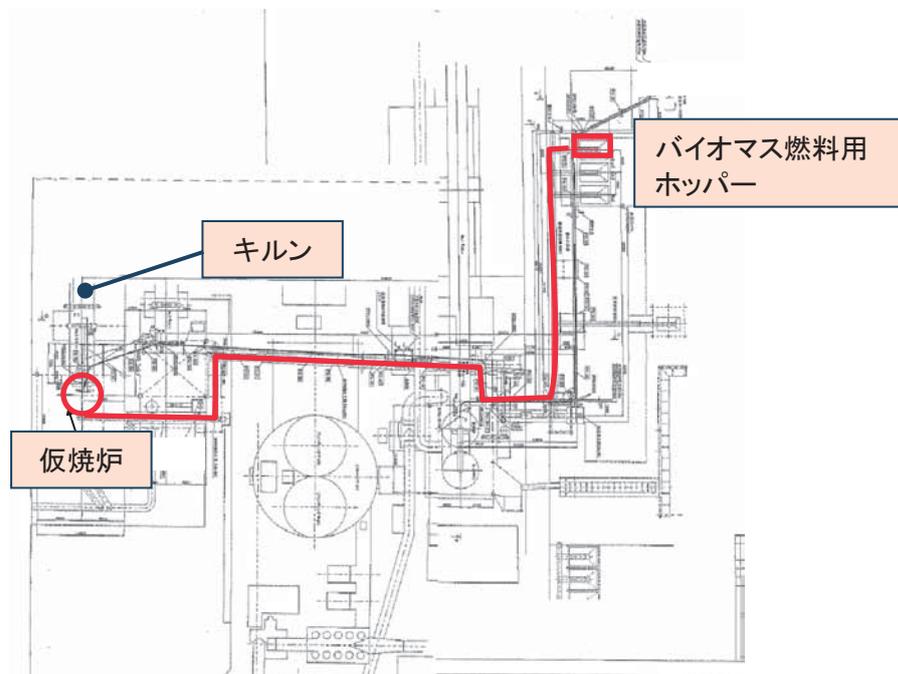


図 19 栃木工場モデルでの原燃料堆肥の供給ライン

## (2) 栃木工場モデルでの石炭代替効果

表 17 に供試した原燃料堆肥の成分とセメント製造時の燃焼状況を示す。3章で調査したように、S 牧場では通常、ベルトプレス式の脱水機で堆肥原料の含水率を低減してから、開放型攪拌方式の堆肥化施設で堆肥が生産される。原燃料堆肥については、脱水処理された豚ふんの容量1に対し副資材として剪定枝を4混合して含水率と塩素濃度の低減を図った。剪定枝は安価なものを選定した結果、外寸が 40mm と粗い形状であったが、堆肥化過程では問題なく発酵が進み、堆肥はほぼ目標値の含水率まで低下した。

原燃料堆肥のセメント工場への搬送は 10t ダンプで行ったが、荷受けホッパーへ堆肥を投入する際にやや粉塵が生じたものの、悪臭の発生はほとんどなく、ベルトコンベヤによる仮焼炉への搬送は問題なく行うことができた。

原燃料堆肥の総投入量は 8.9t であり、これを 3.2 時間かけて行った。この結果、時間当たりの堆肥の投入量は 2.8t/h であったのに対し、石炭の削減量は 1.2t/h であったことから、堆肥水分に伴う潜熱損失や燃焼効率などを考慮した正味の堆肥の原燃料価値は石炭のおよそ 4 割程度と考えられる。

堆肥の投入量 (t/h) は八戸セメントモデルとほぼ同様であったが、石炭の削減量は八戸セメントモデルで 0.9t/h であったのに対し、栃木工場モデルでは 1.2t/h と高くなった。しかし、投入時間が短く、変動も大きかったことから、引き続き長時間の連続投入による検証が必要である。

表 17 セメント工場における堆肥の燃焼状況 (栃木工場モデル)

原燃料堆肥	生産場所	S 牧場 (栃木県那須烏山市)
	原料	豚ふんおよび剪定枝
	含水率、%	31.0
	塩素濃度、%DM	0.22
	総発熱量、MJ/kgDM	17.2
堆肥の投入条件	場所	住友大阪セメント栃木工場
	日時	2008/8/28
	投入時間、h	3.2
	堆肥総投入量、t	8.9
	堆肥投入量、t/h	2.8
石炭の削減効果	石炭削減量、t/h	1.2
	石炭代替率	0.41

### (3) 栃木工場モデルの経済性の評価

本モデルの原燃料堆肥の試作は、すでにS牧場で稼働する施設や設備を使用しており、堆肥の生産作業も通常業務の範囲内で可能であった。したがって、原燃料堆肥を生産するための経費の上積みは副資材の増量以外はないものと考えられる。これらのモデル検証の結果を踏まえて表18に原燃料堆肥の生産コストを示す。

八戸セメントモデルと同様に、ここでも主原燃料の石炭のほか、木屑や再生油、廃プラスチックや廃白土など多様な代替原燃料をすでに使用しており、代替原燃料の比較を加味した原燃料堆肥は3,000円/t程度の価値と位置付けられる。八戸セメントモデルの場合よりも価値が高いのは、工場の立地条件によって代替原燃料の種類や調達価格が異なるためである。塩素濃度やコスト面など課題は残されているものの、含水率や総発熱量では原燃料堆肥が他の代替原燃料とともに利用できる可能性があると考えられる。

表18 原燃料用途のための堆肥生産コストの上乗せ分（栃木工場モデル）

	内容	上乗せ費用 円/t	備考
必要経費	副資材費	2,000	豚ふんに剪定枝を追加混合
	運搬費	2,000	40m <sup>3</sup> 車(12t)
経費合計		4,000	堆肥の原燃料価値は3,000円/t

## 5. 今後の課題

### 1) 原燃料堆肥の供給体制の整備

本事業の成果として、原燃料堆肥に求められる含水率や塩素濃度、総発熱量をもとに、堆肥化処理方法やその前処理方法が整理された。また、原燃料堆肥の試作を行ってセメント工場のモデル検証を行った。その結果、家畜ふん堆肥がセメント製造時の原燃料利用に可能なことが明らかとなった。今後は、求められる仕様を満たす大ロットの原燃料堆肥を供給可能とするシステムの構築段階に入るものと思われる。

例えば、八戸セメントモデルでは9～57t規模で堆肥を燃焼したが、これは1日あたり最低10tの原燃料堆肥の供給が必要であったためである。つまり、10tに満たない原燃料堆肥では、工場設備が過剰となる一方で、その原燃料としての効果が微小となって、堆肥を利用するメリットが見い出せない。これだけの量を毎日安定的に供給するためには、堆肥センターなど、原燃料堆肥の流通上のバッファー機能が必要であり、個別の農家がそれぞれの判断でセメント工場に持ち込むということはある程度得ない。この量の堆肥を管理するためには、県や市町村、あるいは農協などを司令塔にした地域システム化が不可欠である。また、工場と畜産農家、あるいは堆肥センターの立地条件に応じたシステムの最適化も残された課題である。

### 2) 塩素の低減化対策

本事業の中で取り組まれた家畜ふん尿に含まれる塩素濃度の低減化方法、つまり、固液分離機による塩素除去、あるいは副資材を混合することによる塩素の希釈が有効であった。しかし、この方法が採用できるケースは浄化施設を併設する養豚業や酪農業の一部か、あるいは剪定枝などが安価で通年安定的に供給される立地条件で、しかも、副資材を混合した堆肥原料を切り返し、あるいは攪拌処理できる施設がすでに整備されている場合に限定される。

塩素の存在は、セメント製造設備のみならず、製紙業界や鉄鋼業界、あるいはバイオマスボイラー分野などバイオマス燃料の需要がある工場設備にとっても大きな問題であり、できるだけ少ないほうが望ましい。バイオマス資源としての家畜ふんに対する昨今の期待の高まりからも、塩素濃度の低減対策はより重要な課題になるものと思われる。そういった視点に立てば、ふん尿が発生した段階ですでに塩素濃度が十分に低いことが理想的であり、家畜の栄養管理の段階から塩素フローに注意を払うことも重要である。

表 19 畜種別に見た塩素の要求量

畜種	区分	備考
乳牛 *	0.15%DM(育成期)、0.28%DM(泌乳期)	日本飼養標準・乳牛(2006年版) <sup>4)</sup>
豚 **	0.11~0.25%(子豚)、0.08%(肥育豚) 0.12~0.16%(繁殖)	日本飼養標準・豚(2005年版) <sup>5)</sup>
採卵鶏 **	0.15%(育成期)、0.12%(採卵期、種鶏)	日本飼養標準・家禽(2004年版) <sup>6)</sup>
肉鶏 **	0.20%(前期)、0.15%(後期)	日本飼養標準・家禽(2004年版) <sup>6)</sup>

\* 乾物あたりの食塩(NaCl)要求量から換算

\*\* 風乾飼料現物(含水率 13%)の単位重量当たりの量

表 19 に日本飼養標準の中で示されている塩素の要求量を示す。今回の調査では、生の牛ふん（副資材混合原料含む）に含まれた塩素濃度が 0.60%DM（0.24~1.43%DM）であり、要求量に対してその数倍が含まれていたことになる。また、表 20 に示すように、餌に含まれる塩素濃度は、変動が大きいものの高濃度のものも散見され、塩素の多くが餌として畜産系内に持ち込まれている可能性が示唆される。しかも、給餌メニューや給餌量の設計は畜産農家それぞれで行う場合が多く、生ふんや堆肥の塩素濃度が農家によって大きく変動したことと関係はないか、今後の調査が必要である。いずれにせよ、家畜飼養の早い段階から塩素フローを制御できれば、家畜ふん堆肥の原燃料利用に向けた抜本的な問題解決が図られるが、さらなる腰を据えた検討が必要である。

表 20 主な飼料中の塩素濃度 <sup>7)</sup>

飼料分類	平均値、%DM (最少～最大)	備考
生草	0.94 (0.03～1.85)	0.18～1.28 牧草類 0.90～1.85 青刈飼料作物 0.03～1.80 根菜類、果菜類 1.60～1.80 作物副産茎葉類
サイレージ	0.91 (0.22～1.78)	0.26～1.30 牧草類 0.22～1.78 青刈飼料作物 1.44 作物副産茎葉類
乾草	0.62 (0.15～1.24)	0.38～1.24 牧草類 0.15～0.52 青刈飼料作物 0.29～0.81 作物副産茎葉類 0.79 輸入乾草
穀類、マメ類、イモ類等	0.25 (0.03～0.92)	0.25 大麦 0.03 大豆 0.92 パン屑
ヌカ類および製造粕類	0.21* (0.01～0.75)*	0.05 ビール粕(生) 0.05 ビートパルプ(生) 4.53 醤油粕
植物性油粕類および植物性タンパク質類	0.17 (0.02～0.91)	0.03 大豆粕 0.05 アマニ粕 0.91 ヤシ粕
動物性飼料	1.60 (0.02～5.78)	0.57～0.71 魚粉 5.78 エビ殻ミール 1.21 脱脂粉乳

\* 醤油粕は含まない

### 3) オフセットクレジット制度などの利用

2011年6月に環境省から公示されたオフセットクレジット（J-Ver）制度の方法論 NoE025 は、セメント製造工程でのバイオマス利用を推進し、二酸化炭素の発生抑制を目的とした方法論である<sup>8)</sup>。これによれば、石炭使用に由来する二酸化炭素の削減量に応じて、プロジェクト実施者にクレジットが発行される。畜産が集中する地域など堆肥の過剰地域にあって堆肥を肥料利用できない、あるいは採算が合わず流通できない畜産農家の追い風になるとともに、セメント工場としても国内で安定的にバイオマスエネルギーが確保できる大きな可能性が秘められている。

ちなみに、表 21 は、3年間に供した原燃料堆肥をもとに、石炭とそれに由来する二

酸化炭素の削減量を方法論 NoE025 に従って試算したものである。まだ調査段階であり、原燃料堆肥の使用量はわずかであるが、石炭や二酸化炭素の削減に対する指標や支援の枠組みができたことは大きな前進である。先にも述べたように、今後はセメント工場を中心にした地域システム化にステップアップする段階にあるが、J-Ver や他の排出権取引制度などの利用がシステム参加者のインセンティブになることが期待される。

表 21 堆肥の原燃料利用による石炭使用と CO<sub>2</sub> の削減効果

	2008 年	2009 年	2010 年
堆肥の使用量、t	43.8	145.4	339.8
石炭の削減量、t	15	49	113
CO <sub>2</sub> 削減量、tCO <sub>2</sub>	44	145	338
<CO <sub>2</sub> 削減量の計算式>「石炭から未利用のバイオマスへのセメントキルン燃料代替」(025) <sup>8)</sup> $BE_{材,化,y} = BFC_{肥,y} * (1 - WCF_{肥,y}) * GCV_{肥,y} * CEF_{化,y}$			
BE <sub>材,化,y</sub> …ベースライン排出量 = CO <sub>2</sub> 削減量 (t-CO <sub>2</sub> ) BFC <sub>肥,y</sub> …堆肥化物使用量 (t) WCF <sub>肥,y</sub> …堆肥化物含水率 = 0.25% GCV <sub>肥,y</sub> …堆肥化物全乾時単位発熱量 = 14.65(GJ/dry-ton) CEF <sub>化,y</sub> …代替された石炭の CO <sub>2</sub> 排出係数 = 0.0906 (t-CO <sub>2</sub> /GJ)			

## 要約

1章では、家畜ふん堆肥の原燃料化と原燃料利用について、畜産側とセメント業界側の背景を整理し、原燃料用の家畜ふん堆肥に求められる含水率、塩素濃度、総発熱量に関する目標値を設定した。

2章では、豚ふん堆肥は含水率や総発熱量が目標値に合致するが、塩素濃度が高いために塩素を除去する必要があるとあり、固液分離処理の有効性が示された。また、鶏ふんも同様に、塩素濃度が高く固液分離後の液分処理が難しいこと、牛ふんは塩素濃度とともに含水率が高いことが明らかになった。また、堆肥化基礎試験からは、堆肥化過程では塩素濃度が1.1～1.3倍に濃縮され、しかも、戻し堆肥を使用する場合は堆肥化当初から塩素濃度が高くなることが示された。

3章では、畜産で多く採用される堆積方式、開放型攪拌方式、密閉縦型攪拌方式による堆肥化施設を供して、これらで生産できる原燃料堆肥の特徴が明らかとなった。また、スクリーンプレス方式による固液分離処理が塩素除去に有効であることや、堆肥化処理で十分に乾燥が進まない場合は、強制通気型の堆肥舎を利用した通風乾燥が有効であることなど、原燃料堆肥を生産するための要素技術が整理された。

4章では、セメント工場の原燃料投入方式、あるいは、立地条件を参考に二つの原燃料堆肥生産・利用のモデルケースを設定して、その技術的、経済的な評価を行った。その結果、いくつか改善点は残されたものの、豚ふん堆肥を原燃料利用することは技術的に可能であることが示された。

5章では、原燃料堆肥の供給体制の整備や、家畜の栄養管理から始まる塩素の低減化対策の視点、あるいは地球温暖化など環境対策補助制度の利用の必要性を取り上げ、本成果の事業化に向けた方向性を述べた。

## 【引用文献】

- 1) 農林水産省(2006):バイオマスの利用状況、<http://www.maff.go.jp/j/biomass/>
- 2) 農林水産省(2011):畜産環境をめぐる情勢、  
<http://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/>
- 3) (社)セメント協会:<http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jc5.html>
- 4) (独)農研機構(2007):日本飼養標準・乳牛(2006年版)、(社)中央畜産会、41
- 5) (独)農研機構(2005):日本飼養標準・豚(2005年版)、(社)中央畜産会、18-19
- 6) (独)農研機構(2004):日本飼養標準・家禽(2004年版)、12-13
- 7) (独)農研機構(2010):日本標準飼料成分表(2009年版)、(社)中央畜産会、136-161
- 8) 気候変動対策認証センター:[http://www.4cj.org/jver/system\\_doc/methodology.html](http://www.4cj.org/jver/system_doc/methodology.html)

## 謝辞

この技術リポートは、(社)畜産技術協会の「民間活力による畜産生産技術研究開発推進事業」(課題名:家畜糞のセメント製造用燃料化技術の開発、2008~2011年)の助成を受けて実施した研究開発の成果であり、本事業の関係者各位に謝意を表します。

また、本事業を推進するに当たっては、八戸セメント株式会社(担当者:大坂弘二氏)の全面的な支援を受けました。ほかに、調査にご協力いただいた牧場関係者の皆様、茨城県の畜産バイオマス燃料化検討会の皆様、本事業の事務や会計を担当した畜産草地研究所業務推進室の皆様はじめ、関係者各位に対し、心からお礼申し上げます。

最後に、住友大阪セメント株式会社の林幹夫氏は、事業開始から一貫して本開発業務に従事され、年次計画の立案からその実施、現地との調整や報告会での資料作成など、大きな貢献を賜った。不幸にも最終年次に体調を崩されて、現在も病氣療養中である。早期の回復を心よりお祈り申し上げます。



本技術レポートから転載・複製を行う場合は、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所の許可を得て下さい。

技術レポート 11 号

## セメント製造向けの原燃料用家畜ふん堆肥の生産技術の開発

発行日 2012 年 3 月 31 日

発行 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構

畜産草地研究所

〒305-0901 茨城県つくば市池の台 2

Tel 029-838-8600 (代表)

著者 阿部佳之 (畜産草地研究所・家畜飼養技術研究領域)

澤村 篤 (近畿中国四国農業研究センター)

君田美智雄 (住友大阪セメント株式会社)

