

家畜排せつ物のエネルギー高度利用

— 南国興産を例に —

農研機構 中央農業総合研究センター
主席研究員

薬師堂 謙一

1. はじめに

家畜排せつ物のエネルギー利用は、乳牛ふん尿や豚尿を主原料としたメタン発酵によるガス化発電・熱利用と、ブロイラー鶏ふんを主原料とした燃焼発電の2方式がある。ブロイラー鶏ふんを燃料とした鶏ふん発電所は、宮崎県と鹿児島県で現在、それぞれ3基ずつの合計6基が稼働中であり、鶏ふんの処理規模は300t/日以上 of 大型のものが導入されている。

家畜排せつ物のエネルギー利用については、バイオマス事業化戦略(平成24年9月策定)

http://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_kihonho/pdf/senryaku.pdf

の中で、①高水分系のものについては生ゴミや食品残さなどと混合処理してメタン発酵させ、発生するメタンガスでガスエンジン発電を行い、発酵残さを液肥として飼料作や水稲や畑作物等へ利用する方式と、②家畜排せつ物が需要量を超えて過剰に発生している地域等では、直接燃焼・固体燃料化等の堆肥化以外の方法により家畜排せつ物の処理・利用を図ることが重要であるとされている。

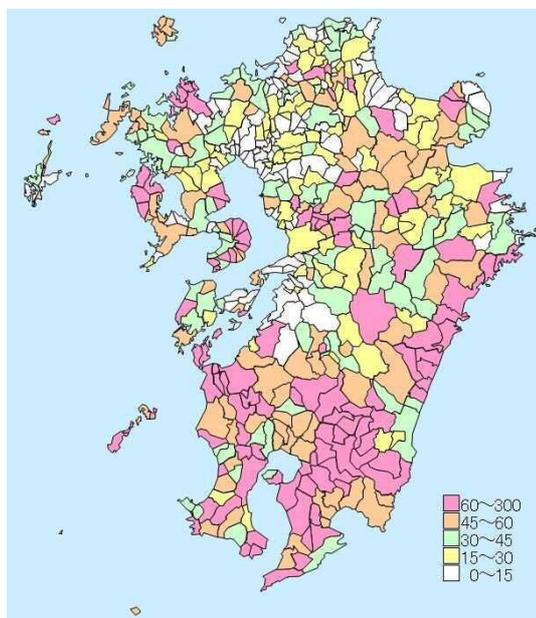


図1 家畜排せつ物の農耕地への負荷量 (t/ha/作)

九州地域における家畜排せつ物の農耕地への負荷量を図1に示す。鹿児島県と宮崎県は日本有数の畜産県であり、生ふん尿換算で家畜ふん尿の負荷量が60t/ha・作を超える市町村が带状に連なっている。一般的な家畜排せつ物の農耕地への負荷容量は、水稲で30 t/ha・作以内であり、畑作物で45 t/ha・作程度、飼料

作物であっても 60 t/ha・作以内である。このような畜産集中地域では、良質堆肥を生産したとしても地域内のみでは使用できず、他の堆肥が不足している地域に輸送し利用してもらわなければ畜産業自体が成り立たなくなる。畜種別の堆肥の利用では、まず土壌改良効果の高い牛ふん堆肥が使用され、次いで肥料成分濃度の高い豚ふん堆肥や鶏ふん堆肥が利用される。九州地域では、採卵鶏ふんの堆肥でも九州管内で使用されるのは 1/3 程度であり、日本国内のみならず中国へも輸出されているような現状にある。

このような状況のもと、平成 13 年に宮崎県都城市にある南国興産株式会社にプロイラー鶏ふんを燃料とした燃焼蒸気発電所が導入され、その後各地に増設され

現在に至っている。南国興産では平成 24 年度からプロイラー鶏ふんと牛ふんも燃せる 2 号機目の燃焼蒸気発電所も導入された。電力の固定価格買取制度 (FIT) 制定以来、木質バイオマス発電を中心にバイオマス発電が増加してきているが、発電のみではエネルギーの利用効率が悪く問題となっている。南国興産では発電だけではなく、蒸気を熱利用するコ・ジェネレーションシステム(熱と電力の併給システム)が行われており、燃焼蒸気発電所としてのエネルギーの利用効率が高い。今後の鶏ふんの燃焼発電を行われる際にはコ・ジェネレーションによりエネルギーを効率的に利用することが求められるので、南国興産の例を中心に鶏ふん発電の方法について解説する。

表 1 家畜排せつ物の処理方式の比較

	堆肥化	炭化	焼却
適用規模	中小規模	中規模	大規模
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・機械が少ない ・運転が容易 ・維持管理費が安い 	<ul style="list-style-type: none"> ・減容化率が高い ・製品の用途が広い ・長期貯蔵が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・減容化率が高い ・熱利用が可能
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・製品量が多い ・日数がかかる ・スペースが必要 ・臭気対策が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料費がかさむ 	<ul style="list-style-type: none"> ・灰の処分が必要 ・燃料費がかさむ ・維持費がかさむ
減量化率	50~70%	80~90%	90~95%
減容化率	45~65%	55~80%	90~95%
2次公害対策	アンモニア対策必要	乾燥排ガス対策必要	乾燥排ガス対策必要
ダイオキシン対策	不要	騒音・振動に留意 一部必要	騒音・振動に留意 必要
建設費	小	中	大
維持管理費	小	中	大
運転者資格	不要	必要	必要

畜産環境整備機構「家畜排せつ物を中心とした燃焼・炭化施設に関する手引き」平成17年3月、p7

2. 処理方式の比較

家畜ふんの固形状としての主な処理法を表1に示す。堆肥化と炭化、焼却を比較した場合、最も利用価値が高く、処理コストが安いのは堆肥化である。処理原料当たりの処理コストは堆肥化を1とすると、炭化が1.7~2.0、活性炭が3.7、焼却が2.0である。また、製品当たりの処理コストは、堆肥化を1とすると、炭化が1.5~2.5、活性炭が4.3、焼却が8.0となる。

したがって、堆肥流通を基本とし、努力しても堆肥流通が困難な場合、あるいは、堆肥の販売・流通コストの方が炭化や焼却処理経費よりも高い場合にのみ、炭化や焼却処理を検討することとなる。ブロイラー鶏ふんの場合は、堆肥化しても流通が困難、炭化処理はコストが高い、焼却により発電ができ蒸気が利用できると同時に残さの量が少ないというメリットから焼却発電が採択されることになる。

3. ブロイラー鶏ふんの燃焼利用

(1) 発熱量

鶏ふんの発熱量を表2に示す。ブロイラー鶏ふんは、敷料としてプレーナークズなど木質の材料が混合されており、

表2 鶏ふんの水分別の発熱量と灰の発生

種類	発熱量	水分	灰分
	kcal/kg	%	%
木質ペレット	4,000	15	0.3
ブロイラーふん(乾燥)	3,900	0	14.0
同上(湿潤)	2,100	40	8.4
採卵鶏ふん(乾燥)	2,800	0	27.0
同上(湿潤)	1,280	45	15.2
A重油(参考)	8,770/L	0	0.0

採卵鶏ふんに比べ発熱量が高い。完全に乾燥させたブロイラー鶏ふんは木質ペレットなどとほぼ同等の発熱量を有している。

(2) 燃焼利用

鶏舎から排出された時点では、鶏舎暖房を行う関係から水分が40%以上含まれており、発熱量は乾燥時の約半分になる。燃焼する材料に水分が含まれていると、燃焼炉内で燃える前に水蒸気となって蒸発するための熱量が必要となるため、水分が含まれていると発熱量が低くなる。なお、ブロイラー鶏ふんは比較的乾いており、そこそこの発熱量が得られることから、燃焼利用は過去にも行われており、鶏舎暖房などに小型の燃焼炉が使用されていた。

しかしながら、廃棄物の燃焼処理に対してダイオキシン特別措置法が施行され、800℃以上の燃焼温度の安定維持と急冷処理が必要となったことから、従来型の燃焼炉ではダイオキシンの発生を完全に防止することは困難と判断され、これらのブロイラー鶏ふんボイラーの使用は停止されることとなった。

4. 大型燃焼発電の必要性

(1) 発電の必要性

個別の養鶏農家の場合では、鶏ふんを燃焼させ畜舎暖房などに使用することも可能であるが、大規模経営や、地域の鶏ふんをまとめて処理する場合は燃焼熱を使い切れなため発電が行われる。ブロイラー鶏ふんでは、大型の燃焼発電の処理方式が選択され、最大のものは日処理量440tで最大発電能力11,000kW級のも

のである。

(2) 発電効率

木質燃料の発電では、燃焼発電は10,000kW 規模以上の大型発電が一般的であり、2,000kW 級以下の規模ではガス化発電が主に使用されている。図2に発電方式別の発電規模と発電効率の関係を示す。図中の一番右に曲線が燃焼蒸気発電

電の規模別の発電効率を示している。燃焼蒸気発電は、燃料を燃して水を高圧の蒸気に変え、蒸気の圧力でタービンを回し発電する。発電の終わった蒸気は水または空気冷却して温水に戻し、再度加熱して発電に利用するということを繰り返し行っている。

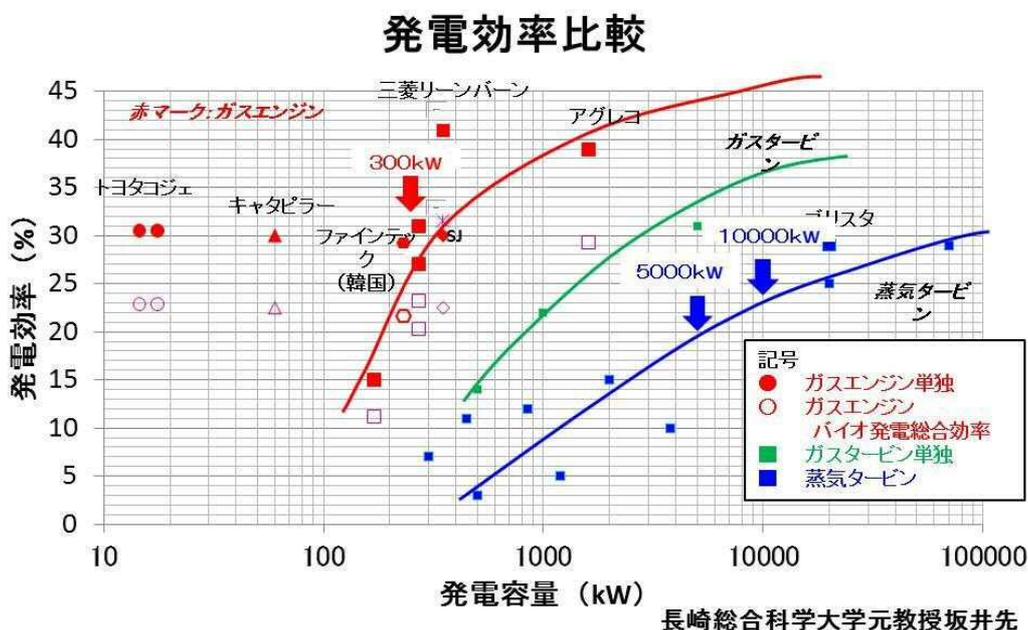


図2 発電方式・発電規模別の発電効率

蒸気の圧力差しか使っていないため、10,000kW 規模でも発電効率は25%程度である。残りの75%のエネルギーはどこに行っているかという点、煙突からの排熱が15%程度で、60%程度の熱は蒸気を温水に戻す際の冷却熱として排出されている。このことは、発電に使用できるのは、燃料の持っているエネルギーの約1/4しかなく、残りの3/4は無駄に地球を暖めているということになる。バイオマス事業化戦略チームの検討会でもこの発電

効率の低さが問題となった。

現在の火力発電所では蒸気温度593°C、25気圧(25MPa)という非常に高圧の蒸気が用いられるため発電効率が35%以上であるが、一般の蒸気発電では10,000kW 級でも蒸気圧力はもっと低く発電効率は良くて25%以下となる。このため、個別に発電効率の悪い発電所を作るより、発電効率の高い火力発電所へ燃料を持って行くべきだとされた。

(3) 廃熱の利用

また、無駄に熱を捨てているのが問題であるので、コ・ジェネレーション（発電と熱との併用方式）により、廃熱で飼料や木質残さなどを乾かすなどの有効利用をすれば、エネルギーの有効活用の面からは問題ない。過去の廃棄物発電では、縦割り行政の悪弊等により合理的な熱利用が難しかった面もあるが、バイオマス発電に関しては、規制緩和も進んでいるので是非廃熱の有効利用を検討していただきたい。

5. 家畜ふんの燃焼技術

(1) 燃焼方式

家畜ふんを加熱すると、最初に水分が蒸発し、次いで可燃性の揮発性成分が燃焼し、さらに温度が上昇すると残った炭素が燃焼する。

家畜ふんの燃焼方式には、

- ①固定の火格子の上で燃焼させるストーカー炉、
- ②砂の層に高温の熱風を吹き込み、砂を流動状態させそこに燃焼材料を投入して燃焼させる流動床炉、
- ③円筒形の回転する炉で燃焼材料を攪拌しながら燃焼させるロータリーキルン炉等の方式がある(図3)。

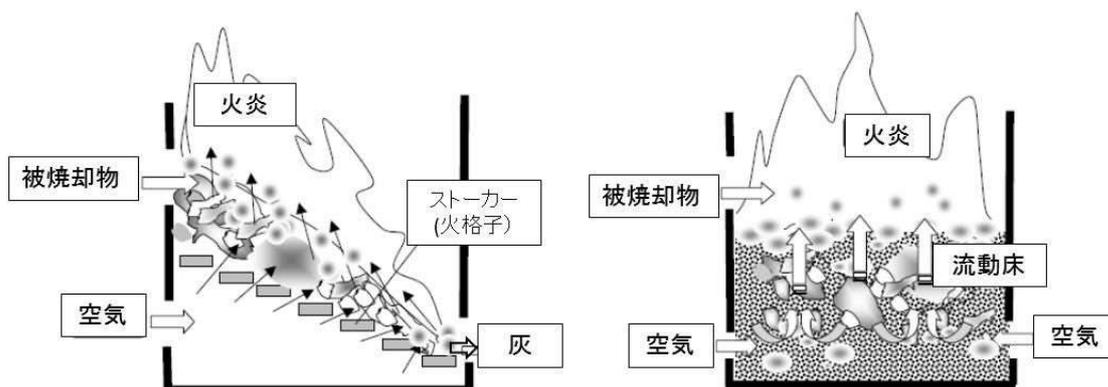


図3 鶏ふん燃焼方式の概要(左：ストーカー炉、右：流動床炉)

畜産環境整備機構「家畜ふん尿処理施設・機械選定ガイドブック」(平成18年11月)
p52,53

大型の燃焼発電所では①と②の方式がとられているが、①のストーカー炉は生ゴミの燃焼や木チップ原料に多く用いられる方式で、ブロイラー鶏ふんの燃焼発電所では宮崎県にも1基導入されている。②の流動床炉は、砂を流動させるためにブローアの電力消費量が多いが、燃焼時の温度を制御しやすいので3基の燃焼発

電所で採用されている。③は近年開発されてきたもので、火格子が無い場合粉状の材料の燃焼も可能で、熱利用など小規模の処理に採用されることが多い。

(2) 家畜ふん燃焼時の留意点

1) 熔融

家畜ふん尿にはカリウムやナトリウムなどが多く含まれているため、木材と異

なり、燃焼中に熔けやすいという特性がある。肉牛ふんは900~1,000°Cで熔け始め、ブロイラー鶏ふんは1,200~1,250°Cで、採卵鶏ふんは1,350°C以上で熔融する。燃焼中に材料が熔けると熔岩状に固まり(図4)、塊が大きくなるとストーカー炉では燃焼炉の火格子が閉塞して燃焼不能になる場合がある。

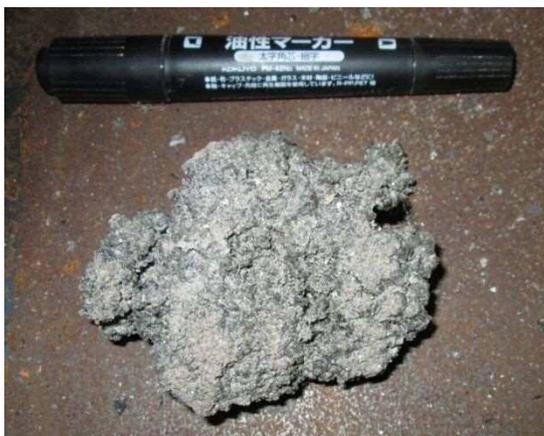


図4 燃焼中に発生した熔融物の例

鶏ふんでは熔けやすい部分と熔け難い部分が混在しており、特に、火炎先端部の温度の高い部分で熔融しやすい。このため、流動床炉では原料の熔融を防ぐため、流動床自体の温度を700°C程度に維持し、発生した可燃性ガスを再燃焼させて850°C程度の燃焼温度を確保している。ストーカー炉では、炉内への吹き込み空気温度を高くしすぎないように注意する。

なお、燃えて飛散した灰は、高温燃焼部を通過する際に800°C以上の温度になるため、一部が炎の中で熔融し、温度の低い炉壁や熱交換用の蒸気パイプの表面に付着した際に冷えてクリンカ(熔融灰の塊)となりやすい。熱交換パイプ上にクリンカが成長すると熱効率が低下するた

め、定期的に燃焼炉を停止させ熱交換パイプを叩いてクリンカの除去作業を実施する。このため、熱交換部は掃除しやすい構造にしておく(熱交換パイプを叩きやすい隙間のある構造等)必要がある。南国興産の蒸気配管(熱交換器)は、叩きやすいよう千鳥配列にせず直線上に配列するなどの配慮がなされている。

2) ダイオキシン

家畜排せつ物は産業廃棄物であるので、焼却処理する場合はダイオキシン特措法の規制対象となる。ダイオキシンの発生を抑制するため、排ガスは2次燃焼部で800°C、2秒間以上で燃焼させ、その後熱交換部で急冷させる。また、灰の粒子が排気に混入するため、サイクロンやバグフィルター等で灰の微粒子を回収する必要がある。

3) 窒素酸化物、硫黄酸化物、塩化水素

家畜排せつ物には餌由来の窒素や硫黄成分や塩素成分が含まれるため、必然的に排ガスには窒素酸化物(NO_x)や硫黄酸化物(SO_x)、塩化水素等も含まれる。通常は環境基準値以内に収まるが、処理規模が大きくなり基準値が厳しい場合は、水洗処理設備や消石灰処理設備を併設する必要がある。特に、 NO_x 成分は燃焼温度が高いと空気中の窒素も酸化して濃度が上がってしまうため、熱効率を勘案して燃焼温度を高くしすぎないようにすることも重要である。

なお、硫黄成分については、排せつ物中の石灰分と化学反応するため、排せつ物中の濃度に応じてそのまま排出されるものでもない。採卵鶏ふん堆肥と牛ふん

おがくず堆肥を燃焼させた場合、採卵鶏ふんの方が硫黄含量は高いが、実際の排ガスに含まれるSO_x濃度は牛ふん堆肥の方が高くなるという現象も確認しているので、実際の燃焼試験を行い、所定の環境対策を行う必要がある。

肪を溶かし食用や飼料用の油脂にする)工場を操業するほか、南九州地域の農産・畜産に由来する植物質や動物質の加工残渣から有機質肥料を製造している。

レンダリング工場は多量の熱を使用するため、南国興産では昭和60年より鶏ふんを燃料とする特殊ボイラーを設置し、地域の環境保全に取り組んでおり、平成14年に環境保全をさらに推し進めるため国内で初めての鶏ふん発電ボイラーを設置し、平成24年には家畜全般の畜ふんを処理できる2号機目の畜ふん発電ボイラーの稼働を始めた。南国興産におけるエネルギーと物流システムを図5に示す。

6. 南国興産でのプロイラー鶏ふん 燃焼・発電システム

(1) システムの概要

南国興産株式会社は、レンダリング(牛・豚・鶏等の家畜を食肉処理する際に発生する脂肪や骨・内臓等の不可食部位を、高温で熱処理することにより、脂

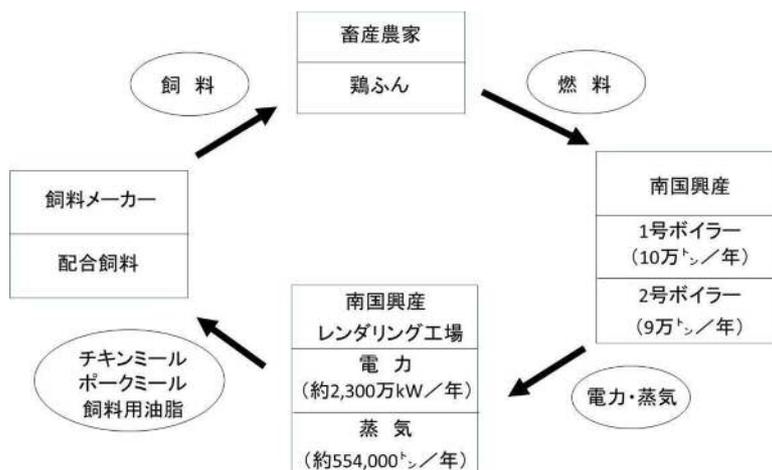


図5 南国興産におけるエネルギーと物流システム

表3 南国興産の鶏ふん発電所の仕様(左:1号機、右:2号機)

事業名	畜産振興総合対策事業 (H12~13) 資源循環型畜産確立対策事業	事業名	地域バイオマス活用交付金 (H21~22)
事業費	2,248,875千円	事業費	3,629,596千円
補助率	国1/2以内、県1/6以内	補助率	国1/2以内
鶏ふん焼却量	平成26年度実績 98,311t/年	畜ふん焼却量	平成26年度実績 90,213t/年
発電機出力	1,960kw (1,500kw1基、460kw1基)	発電機出力	1,780kw (1,500kw1基、280kw1基)
ボイラー仕様	種類:流動床燃焼方式 蒸気量:41t/時 圧力:1.67MPa	ボイラー仕様	種類:流動床燃焼方式 蒸気量:35t/時 圧力:2.06MPa
焼却灰発生量	平成26年度実績 8,834t/年	焼却灰発生量	平成26年度実績 9,708t/年
焼却灰の用途	PK肥料又は肥料原料として販売	焼却灰の用途	PK肥料又は肥料原料として販売

(2) 発電の必要性

レンダリング工場では大量の蒸気を使用するため、南国興産の鶏ふん発電(表3)は、蒸気利用を主とし、発電は工場の消費電力に見合った能力とする設計となっている。ブロイラー鶏ふんの発熱量をベースに計算すると、1号機の発電所でも6,000kW程度の発電を行うような設計が可能であったと推察できるが、工場の蒸気の利用実態に合わせ、工場全体での化石燃料の使用量を低減する設計となっている。2号機の設計の際には、ブロイラー鶏ふん以外に牛ふん堆肥も燃料として利用する設計となっており、高水分の牛ふん堆肥に適応できるようロータリーキルン式の乾燥機を備えている。しかしなが

ら、宮崎県で口蹄疫が発生し、肉牛と飼養頭数が激減したことから、2号機もほぼブロイラー鶏ふんのみで発電を行っている現状にある。このため、牛ふん用の乾燥機は、芋焼酎工場等から発生するサツマイモ残さなどを乾かして豚の餌にするために使用されており、当初の計画より付加価値の高い利用がなされている。

(3) 鶏ふん発電システム

鶏ふん発電システムを図6に示す。個々の畜産農家からブロイラー鶏ふんはダンプカーで発電所まで運搬されてくる。ピット内の鶏ふんは、一度に5t運べる畜ふんクレーンにより攪拌・均質化され、順次燃焼炉に投入される。

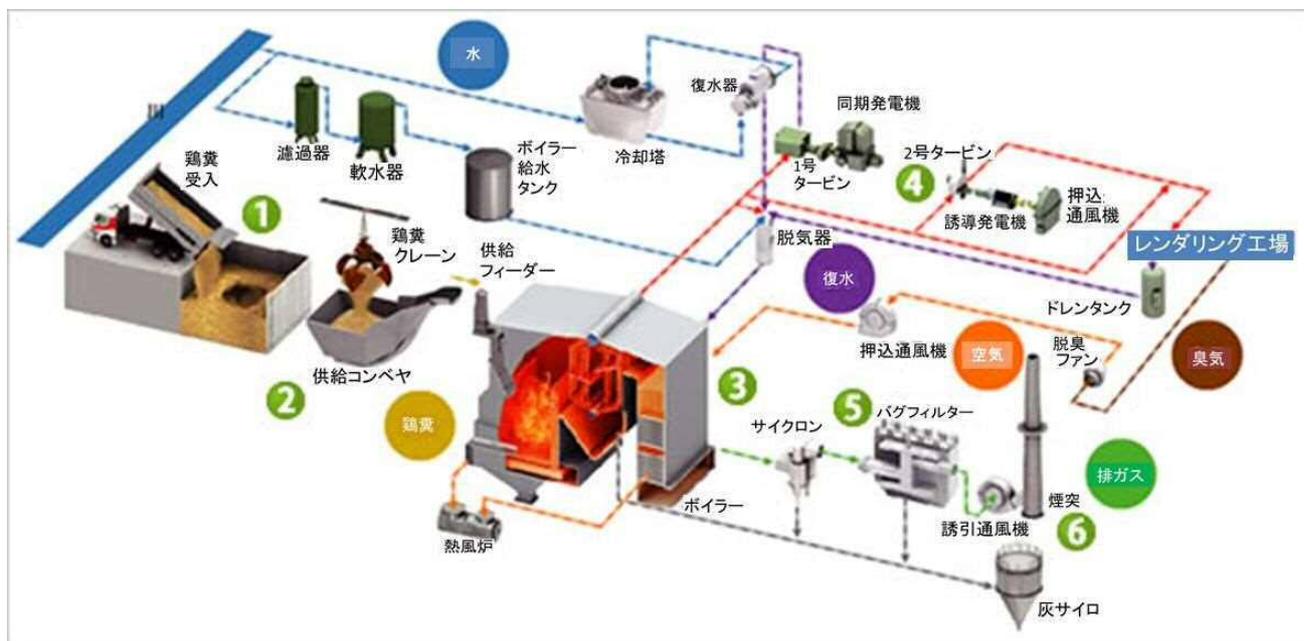


図6 南国興産での鶏ふん発電システム

流動床炉の運転管理は自動化されており、作業員は畜ふんクレーンのオペレータ1名のみで運転が行われている。燃焼

は連続運転であり、現在、1週間ごとに運転を停止し、熱交換器のクリンカ除去を行った後に、次の週の運転に入るとい

運行管理がなされている。一番トラブルの起こりやすい燃焼原料の投入操作を人間が行い、燃焼自体は制御の容易な流動床炉を用いることにより、流動床炉の運転自体に電力を使用するが、作業人員を少なくできる方式である。

また、発電用のタービンは高圧と中圧の2段階で効率よく発電するようになっている。発電に使った蒸気は、水で冷却され循環利用されているが、全体として蒸気利用の割合が高いため、システム全体としての熱の利用効率は50%を超えており、発電のみの場合に比べて2倍以上の熱効率となっている。

7. 発電廃熱の有効利用

(1) 廃熱利用の可能性

バイオマスの燃焼発電での発電効率が25%程度であり、ガス化発電でも30数%程度と低いことから、発電を行う事業者サイドからの発電廃熱の有効利用法について相談が寄せられている。よくあるのが、「温室の熱源に使用できないか」という提案であるが、寒冷期といえども温室は日中の暖房は不要であり、年間を通じて考えると、廃熱を利用できる期間は1/3程度に限られるため安定的な熱の利用先とはいえない。南国興産では、レンダリング工場へ蒸気を送る、また、ロータリーキルン式乾燥機で食品残さを乾燥させて飼料化するなど、エネルギー効率を高める対策がなされているが、通常は空冷もしくは水冷式の冷却塔から廃熱が放出されている。

(2) 木質チップの乾燥

一方で、木質バイオマス発電が普及す

ることにより、原料となる乾燥した木質チップの確保が困難になりつつあり、農業サイドでは、この影響により畜産用の敷料が不足する、また、ハウス暖房用の木質燃料の入手が困難、価格が高騰するという問題も発生している。生の木材は50~55%の水分を含んでおり、丸太のまま燃料に適した水分30%以下まで乾燥させるには、天日乾燥では1年以上の年月がかかり、積み替えなどにも労力を要する。チップ工場の能力に余裕はあるが、乾燥する良い方法が無いため原料不足の問題が改善できないでいるが、バイオマス発電所では膨大な量の熱が利用されること無く無駄に捨てられている。ロータリーキルン式乾燥機は小型のものでも数千円するためなかなか導入しづらい。

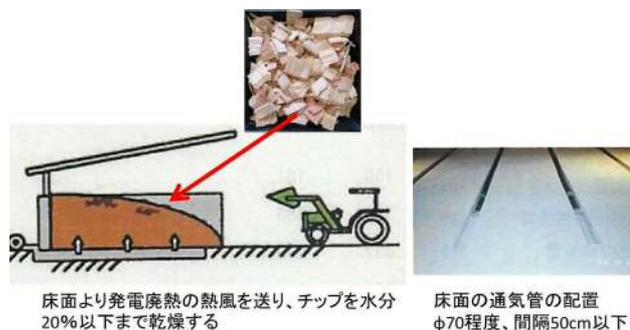


図7 通気式堆肥舎での木質チップ乾燥のイメージ

そこで、筆者らは、畜産で用いられている強制通気式堆肥舎をベースに、生の木質チップを2~3mの高さに堆積し、蒸気が温水に変わる際の潜熱を利用して温風により乾燥する方式を検討している(図7)。この方式であれば、建設コストも安く上がり、機械装備も少なくすむ。木質チップは下から順番に乾いていくが、

2~3日の上まで乾くので、温室の燃料などとして販売することが可能である。製紙原料用の木質チップの工場持ち込み時の価格は、乾燥物1kg換算で11~12円であるが、乾燥したものは20~25円で販売できるため、売電収入以外にも乾燥処理した分が収益となるので経済的にも有利である。

8. 燃焼灰の肥料利用

発電プラントで燃焼したブロイラー鶏ふんの灰の肥料成分を表4に示す。

表4 燃焼灰の肥料成分

成分	割合 (%)
リン酸全量	22.4
ク溶性リン酸	21.4
加里全量	20.2
ク溶性加里	20.2
水溶性加里	16.7
石灰全量	26.1
苦土全量	7.1
ケイ酸全量	4.0
水溶性ホウ酸	340mg/kg
マンガン全量	0.3
鉄全量	0.4

分析：南国興産株式会社（平成18年7月）

燃焼灰には、リン酸やカリウムが多く含まれており、有機質普通肥料の混合原料として利用される他、燃焼灰そのものも肥料として利用される。また、南国興産では造粒して散布しやすくしたものも販売されている。リン酸の約95%がク溶性（植物の根から出る有機酸で溶け出すもの）であるので、降雨などにより流出せず、リン酸吸収係数の高い黒ボク土のような火山灰土でも土壤に吸着されずに

植物が直接利用することができる。なお、窒素成分は含有されておらず、カリウムがリン酸とほぼ同量含まれているので、堆肥などと併用する場合は、カリウムの過剰施用にならないよう注意を要する。燃焼灰は、石灰散布機などでそのまま施用でき、非常に有効なリン酸資源であるので、南九州地域の大規模農家などではフレキシブルコンテナ入りの燃焼灰の活用による肥料費の低減を考慮すべきであろう。

9. おわりに

南九州地域では、大型のブロイラー鶏ふん発電設備が6基稼働している。養鶏は特に大型化してきているので、採卵鶏も含め堆肥として流通させるよりも燃焼発電に仕向けていきたいという要望も聞かれる。本来、鶏ふんは堆肥等の有機質肥料として利用することが望ましいが、大規模化による堆肥流通の負担も相当重くなってきていることから、燃焼発電のニーズも増えてきていると考えられる。

大型発電所の場合、その地域で鳥インフルエンザが発生すると操業ができなくなるなどの問題もあり、また、すでに南九州で6基もの大型発電設備が稼働していることから、燃焼灰も多量に発生し普通肥料への混合材としての需要を超えている。したがって、今後鶏ふん発電を導入する場合には、地域で燃焼灰の流通ができるか、また、前述したように発電以外にも廃熱が有効利用できるかなどを考慮して発電事業を進めていただきたい。