C122 ピンチ解析による VCC プロセスの造粒乾燥システムへの複合効果の評価

An integration of a granulating-drying system and Vapor Compression-Condensation process by pinch-method

○学 正木 亮 (早大) 学 中村 宗平 (早大)
正 日野 俊之 (東大) 正 天野 嘉春 (早大)

Ryo MASAKI, Waseda University, Shuhei NAKAMURA, Waseda University
Toshiyuki HINO, Tokyo University, Yoshiharu AMANO, Waseda University

Drying process consumes great amount of energy, but, by attaching the evaporation-dehydration system called VCC (Vapor Compression and Condensation), energy consumption can be reduced significantly. VCC is an open-type heat pump cycle uses water. In this study, authors take up a granulating-drying system for sewage disposal process. It is called as case-A as a reference. The adaptability of the VCC to the system is evaluated by comparing two sets of process, case-B and C. Case-B is the cascading combination of the VCC and the granulating-drying system. VCC preprocess the dehydrating process in order of relaxing the drying-load of existing centrifugal hydro-extractor. Then, to enhance the energy recovery in the process, the integrated process was derived by pinch method; that is case-C. These three cases are compared with primary energy consumption. As a result, compared with Case-A, primary energy consumption of Case-B is reduced 42.8%, and Case-C is reduced 50.5%.

1. 諸言

近年、地球温暖化などの環境問題の深刻化により、化石燃料に代わる新たな資源として再生可能資源が注目を集めている。再生可能資源の一つであるバイオマスは燃焼させても正味 CO_2 増加しないカーボンニュートラルという性質を持っており、中でも下水汚泥は、その集積性や安定性などの優位性により、特に注目を集めている。下水汚泥を固形燃料に加工し、石炭代替物として利用することができれば、地球温暖化防止に貢献するとともに、下水汚泥の長期安定的なリサイクルを実現することが可能となる。しかし、下水汚泥は含水率が高いため、乾燥に多くのエネルギーを消費してしまう。

本研究が対象としている蒸発脱水システム(以下: VCC(Vapor Compression and Condensation))は水を媒体とする開放型ヒートポンプサイクルであり、これまで主にプロセス系での液体濃縮過程に適用され、通常の化石燃料を用いた熱風蒸発乾燥に比べて大幅な省エネルギー性が見込めることを明らかにしてきた。

本報では下水汚泥をペレット状燃料に加工する造粒乾燥システムに VCC 蒸発脱水システムを適用した際の省エネルギー性、さらにはピンチ解析によりプロセスの改善案を提示し、一次エネルギー消費量を比較することで提案プロセスの優位性を報告する。

2. 研究方法

本研究では既存の造粒乾燥プロセス⁽¹⁾を参照基準として Case-A、この前処理に VCC を追加したプロセスを Case-B と定義する。さらに Case-B に対してピンチ解析を行い、VCC を複合したプロセス(Case-C)を導出する。これら3つのプロセスを一次エネルギー消費量の観点から比較し、提案プロセスの省エネルギー性を評価する。

3. 解析対象

3.1 VCC 蒸発脱水システム

図1に VCC 蒸発脱水システム⁽²⁾のモデル図を示す。蒸発・凝縮器へ流入したバイオマスは、高温の蒸気と熱交換

を行うことにより水分が蒸発する。ここで発生した蒸気は圧縮機で圧縮され、昇温、昇圧される。このとき圧縮機前にボイラで生成した蒸気を流入させることでバイオマスの顕熱部を補っている。圧縮された蒸気は蒸発・凝縮器でバイオマスと熱交換を行った後、凝縮水となって排水される。

圧縮機のモータ投入電力 E_{MT} は、圧縮機断熱効率、V-ベルト伝達効率($=0.97$)、モータ効率($=0.90$)を用いて表し、ボイラ効率は $0.85^{(3)}$ とする。また、蒸発・凝縮器からの放熱は今回対象とする系全体の交換熱量に対して微小な値であるため、無視するものとする。

VCC 蒸発脱水システムの成績係数 COP は蒸発・凝縮器でバイオマスの水分の蒸発潜熱を Q_{ev} とした時、式(1)で定義する。

$$COP = \frac{Q_{ev}}{E_{MT}} \quad (1)$$

VCC の過去の実績値⁽⁴⁾より COP は 10 と設定している。また、蒸発・凝縮器における高温の湿り蒸気と低温の被乾燥物の温度差は $5 \sim 10[\text{C}]$ 程度必要であることがわかっている。

Fig.1 Model of VCC

3.2 造粒乾燥システム

図2に造粒乾燥システムの前処理として遠心式脱水機を追加したプロセスのフロー図を示す。含水率95%で流入する汚泥は遠心式脱水機で83%まで脱水された後、二軸ミキサー内でリサイクルペレットと混練し、造粒されるものとする。造粒された汚泥（含水率40%）は乾燥ドラムで乾燥空気（温度400[℃]）と熱交換して乾燥汚泥（含水率10%）となり、バグフィルタへ送られる。乾燥ドラム出口における湿り空気の温度は120[℃]とする。バグフィルタで乾燥汚泥と蒸気を含んだ空気は分離される。乾燥汚泥は分級器に送られ、大きなペレットは製品サイロに送られ、小さいものは二軸ミキサーへ循環・再利用される。バグフィルタで分離された湿り空気は一部抽気されコンデンサに流入し、系外へ排出される。残りは抽気により失った空気を外気（温度25[℃]、絶対湿度0.02[kg/kg]）から補充した後、熱交換器で加熱され、再び乾燥ドラムへ循環される。乾燥空気は粉塵、臭気の漏れを防ぐため閉回路で負圧循環される。

乾燥ドラムと熱交換器における熱損失は無視し、乾燥ドラム出口での絶対湿度は0.05[kg/kg]と仮定する。

遠心式脱水機による機械脱水に必要な電力 E_{hy} [kW]は電力消費原単位 f [kWh/ton]を用いて求める⁽⁵⁾。

熱交換器で乾燥空気を加熱するための熱源として都市ガス13Aの燃焼ガスを用いるものとする。

Fig.2 Flow of the granulating-drying system: Case-A

4. ピンチ解析

4.1 VCCの造粒乾燥システムへの複合

既存の造粒乾燥システム（Case-A）にVCCを前処理に適用した例（Case-B）のフロー図を図3に示す。遠心式脱水を完全にVCCで代替する場合、蒸発処理水量が過大となるため結果的に、エネルギー消費量は増加することがわかってるので⁽⁶⁾、遠心式脱水機によって含水率を95%から83%まで減少させた後、VCCへ投入されるものとする。VCCで含水率は83%から65%まで減少するものとする。また、蒸発・凝縮器の凝縮側では圧縮蒸気は飽和液となるまで熱交換されるものとする。

Case-Bでのストリームデータを表1に示す。VCCからの排水とコンデンサに抽気された湿り空気を与熱流体とし、VCCの蒸発・凝縮器へ投入される下水汚泥の顕熱部とCase-BのHEX-1で加熱される前の乾燥空気を受熱流体として設定した。このストリームデータよりピンチ点温度差を10[℃]として作成した熱複合線図を図4に示す。図中の破線はVCCにおける自己熱回収であり、圧縮機の模式図の幅は投入電力にCOPをかけた熱量相当値である。図4の太線で囲まれた部分を見ると、与熱流体であるVCCの排水と抽気した湿り空気が複合された部分と受熱流体の下

Fig.3 Flow of granulating-drying system with VCC: Case-B

Fig.4 Composite curve: Case-B

Fig.5 Flow of the integrated network of VCC and granulating-drying system: Case-C

Fig.6 Composite curve: Case-C

水汚泥の顕熱部が重なっている。これより、抽気した湿り空気の下汚泥を加熱できると考えられる。

熱複合線図をもとに、造粒乾燥システムに VCC を複合したシステム (Case-C) のフロー図を図 5 に示す。抽気した湿り空気と VCC の蒸発・凝縮器から排水される蒸気ドレンは下水汚泥の予熱に再利用する。ここで、Case-C の HEX-2 において空気と汚泥の熱交換を行っており、この熱交換器における最小温度差は 50[°C] 必要と設定した。Case-C の HEX-3 における凝縮水と汚泥では温度差 10[°C] で熱交換可能であるとした。次に、Case-C の熱複合線図を図 6 に示す。Case-B に比べ、圧縮機の投入電力が減少しており、より省エネルギー運転が可能であることが分かる。

Table 1 Stream data of Case-B

Stream	Hot stream		Cold stream	
	Hot-1	Hot-2	Cold-1	Cold-2
Source stream number	20	15	2	13
Source Temperature [°C]	112.8	120	25	58.98
Target stream number	Exhaust	16	-	9
Target Temperature [°C]	35	35	96.69	400
ΔQ [kW]	206.4	1056	268.3	1123

4.2 システムの比較

遠心式脱水による造粒乾燥システム (Case-A)、VCC を前処理に適用した場合 (Case-B)、ピンチ解析により造粒乾燥システム内部に VCC プロセスを複合した場合 (Case-C) の 3 つのシステムを比較する。

4.2.1 エネルギーフロー

各プロセスのエネルギーフロー図をそれぞれ図 7、図 8、図 9 に示す。系内に投入される熱量は、遠心式脱水が行われた後の下水汚泥の熱量 Q_{bio} 、HEX-1 に供給する都市ガスの燃焼ガス熱量 Q_g 、外気から乾燥空気として流入させる空気の熱量 Q_{air} 、ボイラの燃料の熱量 Q_{fuel} 、ボイラの給水の熱量 Q_{sw} とし、その合計を Q_{IT} とする。熱損失の合計 Q_{loss} は圧縮機とボイラの熱損失の合計である。回収熱量 Q_{re} は VCC の蒸発・凝縮器と各熱交換器における下水汚泥の受熱量の合計である。

系外への物質移動に沿って排出される熱量 Q_{waste} は遠心式脱水のみの場合は乾燥空気から抽気された蒸気を持つ熱量となる。また、Case-B は乾燥空気から抽気された湿り空気と VCC からの蒸気ドレン、Case-C は予熱に利用された後の蒸気と蒸気ドレンの持つ熱量の合計となる。また、造粒乾燥された固形燃料の持ち出す熱量を Q_{SF} とする。

Case-B を見ると、Case-A と比べて熱回収によって、燃料による加熱量が大きく減少し、消費熱量は 66.3% 削減された。また、系外へ排出される熱量も大きく減少している。その減少量は、ボイラに用いる灯油や給水、圧縮機への投入電力の増加を大きくしのぎ、系に投入する正味エネルギーは 54.5% 削減された。

Case-C では Case-B と比べて燃料による加熱量に変化は

Fig.7 Energy flow (Case-A: dehydrator only)

Fig.8 Energy flow (Case-B: VCC applied)

Fig.9 Energy flow (Case-C: process integrated)

無いが、ボイラの給水の持ち込む熱量の他に、灯油と投入電力の消費量が低下したことにより、結果として系に投入するエネルギー量は 11.3%削減された。さらに、系外へ排出される熱量も減少し、より効率の良い熱交換ができていたことが分かる。また、Case-A と比べると、系に投入する正味エネルギー量は 59.6%削減されることが見込まれることがわかった。

4.2.2 一次エネルギー消費量

一次エネルギー消費量 E_p [MJ]は電力一次エネルギー換算係数を $\kappa(=9.76)$ [MJ/kWh]、消費電力を E_t [kWh]、消費燃料(低位)発熱量を Q_{fuel} [MJ]とした時、式(2)で表せる。

$$E_p = \kappa E_t + Q_{fuel} \quad (2)$$

1時間当たりの一次エネルギー消費量の算定結果を図10に示す。遠心式脱水のみの Case-A と比べて VCC を前処理に適用した Case-B は 46.8%, VCC を系内に複合した Case-C の場合は 54.0%減少する結果となった。

Fig.10 Primary energy consumption

4. 結言

ピンチ解析を用いて造粒乾燥システムに VCC プロセスを複合した場合の構成例を示し、その省エネルギー性の評価を行った。その結果、造粒乾燥システムに VCC プロセスを複合することでエネルギー消費量を大幅に削減できることが分かった。VCC 内部で発生する蒸気による自己熱再生の部分は、図4, 5のように他のストリームのピンチ条件とは別に区分することで、熱複合線図を描くことにより、適切なプロセス構成例を導出した。

Case-A とした遠心式脱水のみの場合、それに VCC を前処理として接続した Case-B,そしてピンチ解析により VCC プロセスを複合することによって改善した Case-C の3つの系を比較し、以下の結論を得た。

- Case-A と比べ、系に投入する正味エネルギー量は Case-B では 54.5%, Case-C では 59.6%削減された。特に、VCC を適用することで Case-A に比べ、Case-B では燃料(ガス)消費量が 66.3%削減される結果となった。同様に、Case-C では VCC の消費エネルギーを系内に有効利用することを可能とし、Case-B と比べて投入エネルギーは 11.3%削減される結果となった。
- 一次エネルギー消費量は Case-A と比べて Case-B では 46.8%, Case-C では 54.0%減少した。

参考文献

- 當間久夫, 臼井肇, 田中寿史, 村田雄一, ジェイコンビシステム(造粒乾燥方式)による下水汚泥の石炭代替燃料化について, 新日鉄エンジニアリング技報, Vol. 3, (2012), 19-24.
- 菱木翼, 中村宗平, 日野俊之, 天野嘉春, 水蒸気圧縮機における気液二相圧縮過程の解析と実績, 第18回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, (2013), 267-270
- M.A. Rosen, D.S. Scott, Comparative efficiency assessments for a range of hydrogen production processes, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 23, Issue 8, (1998), 653-659
- 日野俊之, 水蒸気ヒートポンプによる省エネルギー蒸発脱水技術, 第17回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, (2001), 691-696.
- 惣田訓, ほか4名, 処理規模を考慮したエネルギー解析モデルによるさまざまな下水汚泥処理システムのエネルギー消費量の比較評価, 用水と排水, 50-3, (2009), 226-236.
- 中島理, 日野俊之, 天野嘉春, 下水汚泥の VCC 蒸発脱水プロセスによるエネルギー資源化の可能性, 第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2010/1/27), 27-3, 123-126.