

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560228

研究課題名(和文)循環型過熱水蒸気利用による廃棄物の高効率再資源化に関する研究

研究課題名(英文) Study of a Refuel System with High Efficiency to Process Waste Material using Circulation-Type Superheated Steam

研究代表者

丸山 直樹 (MARUYAMA, Naoki)

三重大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20209703

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：過熱水蒸気利用による廃棄物の高効率再資源化を目的に、機械加工工場から排出される油付き切削屑を対象に、過熱水蒸気脱脂システム導入の有効性を検証した。水蒸気生成時に要する蒸発潜熱を損失しないため、過熱水蒸気循環型脱脂システムを構築した。その性能を消費エネルギーならびに脱脂量の観点からワンスルー型システムの結果と比較検討した。その結果、循環型システムは、ワンスルー型システムに比べて消費エネルギーならびに脱脂量の双方の観点で優位性のあることを示した。

研究成果の概要(英文)：The advantages of introducing a superheated steam waste recycle system to process oily metal waste is evaluated from the viewpoint of high-quality waste material recycling. A practical circulation-type superheated steam degreasing system is introduced in order to avoid heat loss by the latent heat of evaporation. The evaluation parameters of the degreasing system chosen here are the energy consumption of the system and the amount of degreasing oil. As a result, the circulation-type superheated steam degreasing system conserves more energy and can remove more oil from waste material than the once-through type system.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：過熱水蒸気 金属脱脂 循環型 廃棄物 誘導加熱 エネルギー消費 省エネルギー リサイクル

1. 研究開始当初の背景

過熱水蒸気は、含水性廃棄物や、有機物を含む廃棄物の乾燥や分離処理に対して有効な処理方法の一つである。しかしながら、常温の水から過熱水蒸気を連続生成するためには、水の蒸発にシステム全体の多くのエネルギーを消費している。このため、蒸発した廃棄物質と過熱水蒸気を廃棄物処理後に分離し、過熱水蒸気が凝縮する前に再加熱することで循環利用することが望ましい。そこで、資源循環を視野に入れたより省エネルギー性の高い循環型過熱水蒸気廃棄物処理システムの構築と、その妥当性を理論かつ実証実験により学術的視点で示す。

2. 研究の目的

本研究は、以下の3点を目的に進めた。

(1) 廃棄物の物性に適した循環型過熱水蒸気制御理論の構築

処理対象とする廃棄物の物性に適した供給蒸気の制御を行うため、廃棄物の処理量、蒸発物質物性と処理量をパラメータとした過熱水蒸気流量と水蒸気温度を見積もる必要がある。循環型過熱水蒸気処理およびワンスルー型(非循環型)処理システムを対象に、蒸気制御理論を構築する。

(2) 循環型と非循環型過熱水蒸気処理システムのライフサイクルアセスメントによる有効性比較

循環型処理システムの有効性を、ライフサイクル評価手法の導入により、消費エネルギー、処理効率および環境性の観点からワンスルー型処理と比較して定量的に評価する。

(3) 小型実証機の製作と有効性評価

循環型過熱水蒸気小型廃棄物処理システムを構築し、その性能を消費エネルギーと処理効率の観点でワンスルー型システムと比較することにより、導入の有効性を定量的に評価する。

3. 研究の方法

過熱水蒸気を利用する廃棄物処理について、各研究目的に対して以下の手法で取り組んだ。

(1) 廃棄物の物性に適した循環型過熱水蒸気制御理論の構築

処理対象廃棄物として、金属加工工場から排出される油付き切削屑とし、切削屑から油分を脱脂分離する処理を対象とした。金属としては、実験の作業性を考慮してアルミ系切削屑とし、油分としては、汎用の水溶性切削油とした。切削屑の現物と以下(3)の廃棄物処理実証機の仕様を元に、脱脂処理に要する蒸気流量、処理温度、切削屑流量などを理論的に関連付け、蒸気制御理論を構築する。処理法としては、過熱水蒸気循環型とワンスルー型各システムについて行った。

(2) 循環型と非循環型過熱水蒸気処理システムのライフサイクルアセスメントによる有効性比較

理論的には、循環型およびワンスルー型各システムに関して、過熱水蒸気流量、廃棄物流量に対するエネルギーバランス式を構築し、システム稼働時の消費エネルギーの観点から算出して循環型システムの導入有効性を分析評価した。

(3) 小型実証機の製作と有効性評価

循環型およびワンスルー型過熱水蒸気脱脂処理システムを構築し、実験を行った。廃棄物としては、油付きのアルミ切削屑を用い、脱脂処理実験を行った。システム消費エネルギーと脱脂量の観点で循環型システムの導入有効性を分析評価した。

4. 研究成果

(1) 廃棄物の物性に適した循環型過熱水蒸気制御理論の構築

金属加工工場から排出される金属切削屑のリサイクルを対象に、過熱水蒸気循環型とワンスルー型の各脱脂システムの処理に要する消費エネルギーを見積り、循環型システムの導入効果を分析比較すると共に、(3)で述べる実験条件の設定を行った。図1に、各システムのエネルギーバランスの構成を示す。

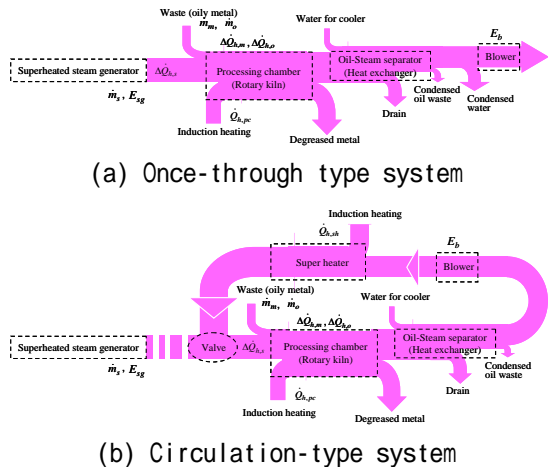


Fig. 1 Heat and energy balance of degreasing system using superheated steam

図1(a)に示すように、ワンスルー型システムでは、油付き切削屑は、ロータリーキルン式の処理室に連続投入され、過熱水蒸気により加熱されることで、油分が蒸発する。脱脂された切削屑は、処理室から搬出される。一方、過熱水蒸気はIH式過熱水蒸気発生装置から供給され、処理室で油付き金属切削屑を加熱、脱脂する。ここで、過熱水蒸気の温度低下を防ぐと共に蒸気温度を上昇させるため、処理室を誘導加熱する。蒸発した油分を含む過熱水蒸気は油水分離器で凝縮され、比重分離法で水と油に分離される。蒸気の流れを誘導するため、ブロワが導入されている。

循環型システムでは、図1(b)に示されるように、油付き金属切削屑はワンスルー型と

同様に処理室を通過、脱脂される。しかしながら蒸発した油分を含む過熱水蒸気は、温度調整された油水分離器で油のみが凝縮され、蒸気は循環する。温度低下した蒸気は、再過熱器で加熱されて処理室に流入する。定常処理状態では、過熱水蒸気発生装置は稼働すること無く、蒸気の発生に要するエネルギーを供給する必要が無い。

油分付き切削屑が処理室で加熱されるために要する熱量は、金属と油分に対してそれぞれ式(1)、(2)で表される。

$$\Delta\dot{Q}_{h,m} = \dot{m}_m c_m (T_{m,2} - T_{m,1}) \quad (\text{for metal}) \quad (1)$$

$$\Delta\dot{Q}_{h,o} = \dot{m}_o \{c_o (T_{o,2} - T_{o,1}) + L_o\} \quad (\text{for oil}) \quad (2)$$

ここで、 \dot{m} と c は、質量流量と比熱、添字 m と o は、金属と油をそれぞれ示す。 $T_{m,1}$ 、 $T_{o,1}$ と $T_{m,2}$ 、 $T_{o,2}$ はそれぞれ、処理室入口と出口の金属と油の温度である。 L は、蒸発潜熱である。また、過熱水蒸気発生装置からの蒸気熱量のうち、油分を含む金属の加熱のために消費される熱量は、

$$\Delta\dot{Q}_{h,s} = \dot{m}_s (h_{s,2} - h_{s,1}) \quad (3)$$

で表される。ここで、添字 s 、1、2はそれぞれ蒸気、処理室入口および出口を示す。しかしながら、 $(\Delta\dot{Q}_{h,m} + \Delta\dot{Q}_{h,o}) > \Delta\dot{Q}_{h,s}$ となるため、誘導加熱により $\dot{Q}_{h,pc}$ の供給を要する。

循環型システムの場合、蒸気は再過熱器により加熱される。その熱量は、

$$\dot{Q}_{h,sh} = \dot{m}_s (h_{s,4} - h_{s,3}) \quad (4)$$

で求められる。添字3、4はそれぞれ再過熱器入口および出口を示す。

これら理論計算により、ワンスルー型システムと循環型システムのエネルギーバランスに基づく消費エネルギーを求めることができる。また、金属屑流量、含油率、構成機器各箇所の温度を任意に設定することにより、脱脂処理に要するエネルギー、すなわち消費電力を算出することができる。

(2) 循環型と非循環型過熱水蒸気処理システムのライフサイクルアセスメントによる有効性比較

本研究の実証機を用いて、油分付き切削屑の搬送試験を行い、切削屑の質量流量を求めた。また、装置各位置の温度を仮定した。その条件を表1に示す。油分の質量流量を金属の2.5 wt%と仮定した。

Table 1 Theoretical conditions of energy balance analysis based on preliminary experimental results

Temperature		
Metal and oil at the processing chamber inlet	$T_{m,1}, T_{o,1}$	15 °C
Superheated steam at the processing chamber inlet	$T_{s,1}$	400 °C
Metal, oil and superheated steam at the processing chamber exit	$T_{m,2}, T_{o,2}, T_{s,2}$	250 °C
Superheated steam at the super heater inlet	$T_{s,3}$	150 °C
Superheated steam at the super heater exit	$T_{s,4}$	400 °C
Enthalpy of superheated steam		
at the processing chamber inlet at 0.1 MPa, $T_{s,1}$	$h_{s,1}$	3.28 MJ/kg
at the processing chamber exit at 0.1 MPa, $T_{s,2}$	$h_{s,2}$	2.97 MJ/kg
at the super heater inlet at 0.1 MPa, $T_{s,3}$	$h_{s,3}$	2.78 MJ/kg
at the super heater exit at 0.1 MPa, $T_{s,4}$	$h_{s,4}$	3.28 MJ/kg
Mass flow rate		
Superheated steam	\dot{m}_s	1.25×10^{-3} kg/s
Metal	\dot{m}_m	7.0×10^{-3} kg/s
Oil	\dot{m}_o	1.7×10^{-4} kg/s
Specific heat		
Metal (Aluminum)	c_m	0.9 kJ/(kg·K)
Oil (cutting oil)	c_o	2.1 kJ/(kg·K)
Evaporative latent heat of oil	L_o	320 kJ/(kg·K)

まず、ワンスルー型システムに関するエネルギー消費を算出する。油分付き切削屑の金属と油の加熱に対して要する熱量は、

$$\begin{aligned} \Delta\dot{Q}_{h,m} &= \dot{m}_m c_m (T_{m,2} - T_{m,1}) \\ &= 7.0 \times 10^{-3} \times 0.90 \times 10^3 \times (250 - 15) \\ &= 1,480 \text{ W} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta\dot{Q}_{h,o} &= \dot{m}_o \{c_o (T_{o,2} - T_{o,1}) + L_o\} \\ &= 1.7 \times 10^{-4} \times \{2.1 \times 10^3 \times (250 - 15) + 320 \times 10^3\} = 140 \text{ W} \end{aligned} \quad (6)$$

と算出される。したがって、

$$\Delta\dot{Q}_{h,w} = 1,480 + 140 = 1,620 \text{ W} \quad (7)$$

の電力を要する。

一方、過熱水蒸気発生装置の消費エネルギーは、 $E_{sg} = 5.0 \text{ kW}$ である。このとき、

$$\begin{aligned} \Delta\dot{Q}_{h,s} &= -\dot{m}_s (h_{s,2} - h_{s,1}) \\ &= -1.25 \times 10^{-3} \times \{2.97 \times 10^6 - 3.28 \times 10^6\} = 390 \text{ W} \end{aligned} \quad (8)$$

となる．すなわち，5.0 kW の消費電力に対して，わずか 390 W しか利用されていない．したがって，誘導過熱によって

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{h,pc} &= \Delta\dot{Q}_{h,w} - \Delta\dot{Q}_{h,s} \\ &= 1,620 - 390 = 1,230 \text{ W}\end{aligned}\quad (9)$$

を処理室に供給する必要がある．誘導加熱のインバータ変換効率と熱交換効率をそれぞれ 0.95, 0.60 とすれば，処理室の加熱に

$$E_{pc} = \frac{\dot{Q}_{h,pc}}{\eta_i \eta_c} = 2,160 \text{ W}\quad (10)$$

の電力を消費する．

サクシオンブロワの消費電力は，実測値で，

$$E_b = 600 \text{ W}\quad (11)$$

であった．

結果として，ワンスルー型システムの消費エネルギーは，

$$\begin{aligned}E_{ot} &= E_{sg} + E_{pc} + E_b \\ &= 5.0 + 2.2 + 0.6 = 7.8 \text{ kW}\end{aligned}\quad (12)$$

$$e_{ot} = \frac{E_{ot}}{\dot{m}_m + \dot{m}_o} = 1.1 \text{ MJ/kg}\quad (13)$$

と算出される．

循環型システムにおいては，再過熱器分のエネルギー消費が増加する反面，定常状態時には過熱水蒸気発生器を停止することができる．再過熱器の稼働に要する熱量ならびに消費電力は，

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{h,sh} &= \dot{m}_s (h_{s,4} - h_{s,3}) \\ &= 1.25 \times 10^{-3} \times (3.28 \times 10^6 - 2.78 \times 10^6) = 625 \text{ W}\end{aligned}\quad (14)$$

$$E_{sh} = \frac{\dot{Q}_{h,sh}}{\eta_i \eta_c} = 1.1 \text{ kW}\quad (15)$$

と算出される．結果として，循環型システムの消費エネルギーは，

$$\begin{aligned}E_{ci} &= E_{pc} + E_{sh} + E_b \\ &= 2.2 + 1.1 + 0.6 = 3.9 \text{ kW}\end{aligned}\quad (16)$$

$$e_{ci} = \frac{E_{ci}}{\dot{m}_m + \dot{m}_o} = 0.54 \text{ MJ/kg}\quad (17)$$

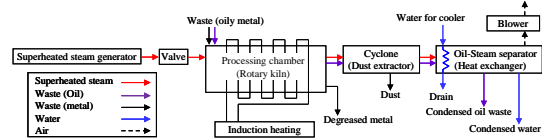
と算出される．

すなわち，過熱水蒸気循環型処理システムでは，およそ半分のエネルギー消費で処理できることが試算された．

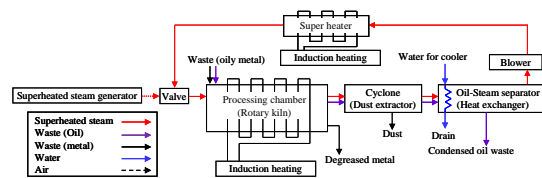
(3) 小型実証機の製作と有効性評価

過熱水蒸気循環型脱脂システムの有効性を示すため，小型実証機を製作し，循環型とワンスルー型の評価を行った．

図 2 に，各システムの構成図を示す．実証機においては，配管での放熱による蒸気の凝縮を防ぐために，マイクロヒータで配管を加熱すると共に断熱材を用いた．また，図 3 にシステムの写真ならびに切削屑の一例を示す．

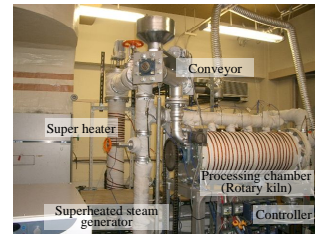


(a) Once-through type system



(b) Circulation-type system

Fig. 2 System configuration of degreasing system using superheated steam



(a) Demonstration system



(b) Oily metal waste

Fig. 3 Superheated steam degreasing demonstration system and example of waste material

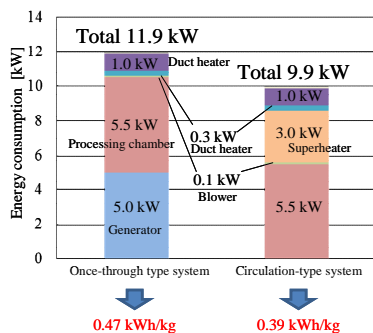
各システムの性能評価試験を行う際，まず，処理室内を過熱水蒸気に置換する．表 2 に，実験条件を示す．実験条件は，予備実験である金属屑搬送試験と蒸気供給試験から決定した．

Table 2 Experimental condition

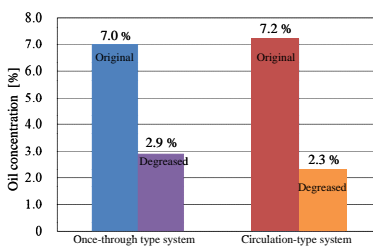
Mass flow of superheated steam	1.3×10^{-3} kg/s
Mass flow of metal	7.0×10^{-3} kg/s
Mass flow of oil	7.0×10^{-4} kg/s
Branch pipe for micro heater output	1.0 kW
Oil-water separator inlet from the cyclone for micro heater output	0.3 kW

図4に、ワンスルー型と循環型各システムの消費エネルギーを示す。プロワ、処理室用誘導加熱インバータ、配管加熱用マイクロヒータそれぞれの消費エネルギーは同じ値となるため、差異要因にはならない。しかし、過熱水蒸気発生器、再過熱器の各消費エネルギーの差 3.0 kW があり、循環型システムの法が優位となった。

これを単位質量あたりの消費エネルギーに換算すると、ワンスルー型システムでは 0.47 kWh/kg、循環型システムでは 0.39 kWh/kg となり、循環型システムの方が消費エネルギーを削減することが可能である。脱脂量に関しても、ワンスルー型システムが 41%、循環型システムが 32% となり、循環型システムの方が優位であることが示された。



(a) Energy consumption



(b) Degreased oil

Fig. 4 Comparison of performance of energy consumption and degreased oil

(4) 本研究の進展

本研究成果により、過熱水蒸気循環型脱脂システムの有効性が示された。しかしながら、消費エネルギーの低減ならびに脱脂量の増加の観点で、更なる効率向上が望まれる。これまでの実験により、処理温度の高温化、処理室での廃棄物の滞留時間により効率の向上が期待される。今後、これらを目指して研究を展開していく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

Naoki Maruyama, Youhei Watanabe, Hiroaki Ito and Masafumi Hirota, Theoretical Analysis for Energy Consumption of a Circulation-Type Superheated Steam Degreasing System Applied to Oily Metal Waste Recycling, International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), 査読有, Vol. 4, Issue 4(Version 2), 2014, pp. 32-39.

Naoki Maruyama, Youhei Watanabe, Hiroaki Ito, Yaowateera Achawangkul and Masafumi Hirota, Oily Waste Metal Recycle using Circulation-type a Superheated Steam Degreasing System, Proc. of International Conference & Utility Exhibition Green Energy for Sustainable Development (ICUE2014), 査読有, 2014, CD-ROM, pp. 1-7.

渡邊洋平, 丸山直樹, 伊藤広晃, 廣田真史, 過熱水蒸気循環型脱脂システムによる切削金属屑の脱脂技術の構築, 日本機械学会東海支部第63期講演会論文集, 査読無, 2014, CD-ROM, pp. 1-2.

伊藤広晃, 丸山直樹, 渡邊洋平, 廣田真史, 過熱水蒸気循環型脱脂システムによる切削屑脱脂法の性能評価, 日本伝熱学会第51回日本伝熱シンポジウム論文集, 査読無, 2014, CD-ROM, pp. 1-2.

Naoki Maruyama, Youhei Watanabe, Hiroaki Ito, Yaowateera Achawangkul and Masafumi Hirota, Theoretical analysis for energy balance of circulation-type superheated steam degreasing system, Proc. of International Symposium on EcoTopia Science 2013 (ISETS2013), 査読無, 2013, CD-ROM, p.1.

Naoki Maruyama, Youhei Watanabe, Hiroaki Ito, Yaowateera Achawangkul and Masafumi Hirota, Theoretical analysis for energy balance of material recycle using circulation type superheated steam evaporation system, Proc. of The Fifth International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB V), 査読有, 2013, CD-ROM, pp. 1-6.

[学会発表](計6件)

Naoki Maruyama, Youhei Watanabe, Hiroaki Ito, Yaowateera Achawangkul and Masafumi Hirota, Energy Balance of

Circulation-type Superheated Steam degreasing System for Oily Metal Recycle, 12th International Energy Conversion Engineering Conference 2014 (IECEC2014), 2014年7月28日～2014年7月30日, Cleveland Medical Mart & Convention Center, (Ohio, USA), 発表予定

伊藤広晃, 丸山直樹, 渡邊洋平, 廣田真史, 過熱水蒸気循環型脱脂システムによる切削屑脱脂法の性能評価, 日本伝熱学会第51回日本伝熱シンポジウム, 2014年5月21日～2014年5月23日, アクトシティ浜松・コンgresセンター ,(浜松市)

渡邊洋平, 丸山直樹, 伊藤広晃, 廣田真史, 過熱水蒸気循環型脱脂システムによる切削金属屑の脱脂技術の構築, 日本機械学会東海支部第63期講演会, 2014年03月18日～2014年03月19日, 大同大学 ,(名古屋市)

Naoki Maruyama, Youhei Watanabe, Hiroaki Ito, Yaowateera Achawangkul and Masafumi Hirota, Oily Waste Metal Recycle using Circulation-type a Superheated Steam Degreasing System, International Conference & Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development, 2014年3月19日～2014年3月21日, Jomtien Palm Beach Hotel and Resort, (Pattaya City, Thailand)

Naoki Maruyama, Youhei Watanabe, Hiroaki Ito, Yaowateera Achawangkul and Masafumi Hirota, Theoretical analysis for energy balance of circulation-type superheated steam degreasing system, International Symposium on EcoTopia Science, 2013年12月13日～2013年12月15日, 名古屋大学 ,(名古屋市)

Naoki Maruyama, Youhei Watanabe, Hiroaki Ito, Yaowateera Achawangkul and Masafumi Hirota, Theoretical analysis for energy balance of material recycle using circulation type superheated steam evaporation system, The Fifth International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being, 2013年9月4日～2013年9月6日, The Grand Luang Prabang Hotel & Resort, (Luang Prabang, Lao PDR)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸山 直樹 (MARUYAMA, Naoki)
三重大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：20209703