

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05824

研究課題名(和文) 循環型過熱水蒸気利用による金属廃棄物の高効率高温脱脂技術に関する研究

研究課題名(英文) Study on a High-efficiency Degreasing Technology with High-temperature Processing for Oily Waste Metal Cutting Chips using Circulation-type Superheated Steam

研究代表者

丸山 直樹 (Maruyama, Naoki)

三重大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20209703

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：金属加工工場から排出される金属切削屑をリサイクルする際の品質向上を目的に、過熱水蒸気を用いる不活性雰囲気の下、油分付き切削屑の脱脂処理を行った。加熱処理温度、蒸気流量、処理時間をパラメータとして、脱脂処理後の油分付着率と処理時の消費エネルギーを分析評価した。原料として、旋盤作業時に排出される切削油が付着するアルミニウム系切削屑を対象とした。省エネルギー処理の観点で、過熱水蒸気を凝縮させずに循環利用する蒸気循環脱脂システムを構築した。その結果、目的とする脱脂量を達成し、省エネルギー処理を踏まえた高温処理の有効性を定量的に示した。

研究成果の概要(英文)：In order to enhance the quality of recycled metal disposed from metal working factories, oily cutting chips from lace are degreased under inert gas atmosphere using superheated steam. The adhesion rate of waste oil after processing and energy consumption for the processing are evaluated based on the steam temperature, steam flow rate and processing time. An aluminum cutting chip with water-soluble cutting oil disposed from a lace was introduced as a waste material. A demonstration of degreasing system using steam-circulation type is constructed from the viewpoint of energy saving for the operation. As a result, the target adhesion rate is satisfied sufficiently, and the influence of steam temperature, the steam flow rate and processing time on the degreasing performance are evaluated quantitatively.

研究分野：機械工学・熱工学

キーワード：廃棄物再資源化 過熱水蒸気 高温熱処理 エネルギー効率化 環境技術

1. 研究開始当初の背景

非対称分子で構成される過熱水蒸気は、対流伝熱、放射伝熱に加えて、凝縮伝熱により物質を加熱/乾燥できる特徴を持つ。とくに過熱水蒸気は高い比エンタルピーを持ち、不活性雰囲気での加熱/乾燥を実現でき、かつ、加水分解反応により油や樹脂などの有機物の分子間結合を切断することも可能である。このような特徴は、食品や材木などの身近な物品の乾燥や加熱はもとより、工業的には含水性廃棄物や、有機物を含む可燃性廃棄物の乾燥や分離処理に対しても有効な処理方法となる。過熱水蒸気利用により原料を不活性雰囲気中で高温処理できることは、可燃物の有無にかかわらず成分の不明確な廃棄物を熱処理する上で大きな優位性を持つ。しかしながら、工業的に利用する場合、以下の課題があり、これらの解決が期待されている。

1) 熱処理時の消費エネルギー低減

過熱水蒸気処理では、システム全体で消費するエネルギーの多くを水の蒸発潜熱に消費している。このため、加熱処理後の過熱水蒸気を熱損失少なく循環利用するシステムの構築が求められている。

2) 蒸気高温化による熱処理性能の向上

過熱水蒸気を用いた装置のほとんどは、処理室内温度が 400 またはそれ以下である。過熱水蒸気の更なる高温利用ができるようになれば、熱処理の効率が向上し、工業的な応用範囲が広がることが期待できる。

3) 熱処理後の蒸気/原料/不純物の分離

過熱水蒸気を循環利用するためには、蒸気と原料/不純物を適切に分離する必要がある。蒸気循環経路の圧力損失を少なく、これらを回収できる手法の構築が望まれている。

4) 原料の連続処理

工業的に利用するためには、原料の連続処理ができることも重要である。蒸気を循環しつつ原料を連続投入処理できるシステムの構築が課題となっている。

2. 研究の目的

過熱水蒸気を用いて、油分付き金属切削屑を付加価値高く再資源化するための、過熱水蒸気循環型脱脂システムの高性能化、加熱処理のパラメーターが脱脂性能に及ぼす影響を評価することを目的とする。これには、現有の処理温度約 300 のシステムを元に高温処理化の改良を行い、アルミニウム系金属切削屑を原料例として高温熱処理の実証試験を行う。高温化に関しては、金属脱脂の高効率化が期待できる処理温度 450 以上での熱処理を目標とする。そして、連続脱脂処理を行う上での過熱水蒸気の高温利用の課題、蒸気制御方法の最適化を熱力学視点から解決し、熱処理温度、蒸気循環流量、加熱時間をパラメーターとして、本システムの有効性を脱脂量、稼働時のエネルギー消費量の観点で定量的に評価する。

3. 研究の方法

まず、循環型過熱水蒸気の高温化を視野に入れた脱脂システムの構成、熱計算、仕様の検討、要素機器の設計を行い、現有のシステム(平成 23 年度補助金:課題番号 23560228 で導入)を基礎に改良を加えることにより進めた。

対象とする廃棄物は、金属加工工場から排出される油分付きアルミ系切削屑であり、これを不活性雰囲気中で高温加熱することにより油分を蒸発させ、金属屑から分離する。原料の投入と処理室にはそれぞれロータリーキルンを導入し、連続定量処理する。金属から蒸発分離した油分は過熱水蒸気と混合され、加熱処理室から排出される。共に気体で排出される水蒸気と油蒸気は、粉塵回収用サイクロンを通過後、蒸気と切削油の凝縮温度差を利用して、油水分離器で油分のみを凝縮回収する。そして、蒸気はその後ブロウで加圧、再加熱器で加熱され、処理室に戻り循環する。これにより、水の蒸発潜熱分を排気放出することなく、有効利用できるシステムを構築した。

システム改善のための理論計算では、高温熱処理に要する加熱量、システム効率分析のための蒸気流量計や油水分離フィルタの挿入による圧力損失を考慮に入れた過熱水蒸気循環のための対策、システムを構成する各機器の熱バランスの計算を行った。とくに、従来 350 程度であった処理温度を 450 以上にできるように、これまでにない高温過熱水蒸気雰囲気の処理室を構築することと、過熱水蒸気を循環しながら金属屑と油分を高い分離率で回収するシステム構築のための機器要素設計と導入を進めた。

その後、実験装置と実験条件を調整しながら、実証実験によるデータ収集と蓄積を行った。実験条件としては、主に加熱温度(K)、蒸気循環流量(kg/s)、加熱処理時間(min)とし、これらを種々変更することで、各機器単位の消費エネルギー(電力)、脱脂量を得る。処理温度の高温化により、油分付着率 1.0 wt%以下を目指す。これらにより、システムの性能評価を行う。原料の高温処理化と油水分離方法の改善で高効率処理のための方策を分析評価した。ミスト状に浮遊する油分をトラップするための対策について、フィルタの材質、密度、構造等を工夫して対応を試みた。温度管理、熱収支の観点で実測値と理論計算結果を比較して、熱収支計算の妥当性の検証と最適化、本システム稼働評価を行った。

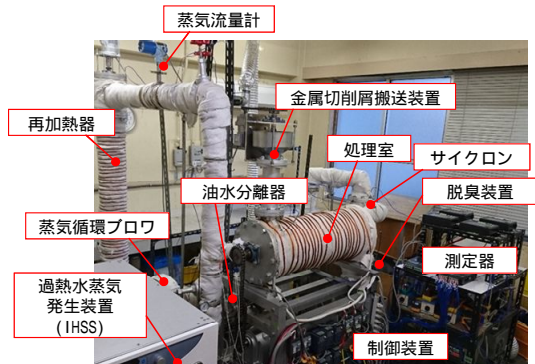
本研究で目標とする処理温度 450 以上への高温化に関しては、処理室をはじめとする構成機器の耐熱温度に依存するものの、加熱量と加熱方法の工夫により対応した。

本研究では処理温度として 450 を目標にしているが、更なる高温化処理の可能性が示唆されれば、油水の蒸発に限らず、不活性雰囲気下での化学物質の高温熱分解にも寄与できると考えられる。本実験装置の処理室に

は、誘導加熱に対応できるように磁性 SUS430 を採用している。SUS430 の耐熱性を考慮に入れながら、更なる高温加熱処理の可能性に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) 過熱水蒸気循環型脱脂システムの改善
 現有のシステム（平成 23 年度補助金：課題番号 23560228 で導入）を基礎に改良を加えた。過熱水蒸気循環型脱脂システムの概略、原料とするアルミニウム系金属切削屑を図 1 に示す。本システムは、過熱水蒸気発生装置、処理室、金属切削屑搬送装置、サイクロン、油水分離器、蒸気循環ブロウ、再加熱器、蒸気流量計、等で構成される。主に、油水分離器の改善、切削屑搬送装置、蒸気流量計の導入、再加熱器の改良を行った。切削屑は、旋盤加工により排出されるアルミニウム系切削屑であり、圧縮脱脂法や遠心分離法では油分分離が困難な複雑な形状である。



(a) 実験装置外観



(b) 切削金属屑（アルミニウム系）

図 1 実験装置概要と切削屑の一例

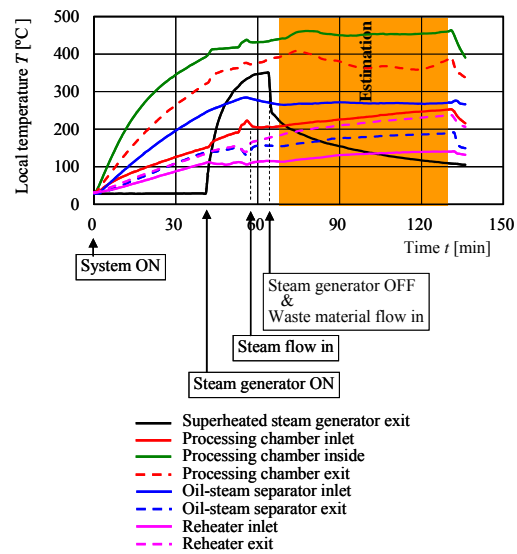
(2) 実験条件と実験結果例

本研究では、処理時の蒸気温度を 350, 400, 450 および 500 クラスに、蒸気循環量を 27 ~ 60 m³/h クラス、処理時間を 6, 12 分に設定し、装置運転に要する消費電力と脱脂後の油分付着率を分析評価した。過熱水蒸気および金属切削屑の流量を含めた実験条件と切削屑の物性の概要を表 1 に示す。個々の実験では定量測定をしているが、対象とする切削屑は廃棄物であるために形状や流量を一定に揃えた実験を行うことは困難であり、本表では「実験条件の区分（クラス）」として示す。

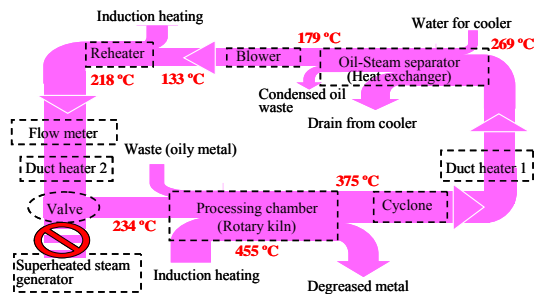
表 1 実験条件と切削屑の物性

処理蒸気温度	350, 400, 450, 500 °C クラス
過熱水蒸気循環流量	27, 40, 60 m ³ /h クラス (約 4 ~ 8 kg/h)
熱処理時間	6.0, 12.0 min
切削屑の質量流量	約 30 ~ 57 kg/h
切削油の質量流量	処理前の金属切削屑を計量し、10%添加
切削屑	
材質	アルミニウム系
比熱	0.9 kJ/(kg·K)
切削油	
材質	汎用水溶性切削油
比熱	2.1 kJ/(kg·K) (液), 2.4 kJ/(kg·K) (気)
蒸発潜熱	320 kJ/(kg·K)
蒸発温度	150 ~ 250 °C

図 2 に実験結果の代表例として、加熱処理温度 450 クラス、蒸気循環量 40 m³/h クラス、加熱時間 6.0 min で行った(a)装置全体の流路主要箇所の温度経過と(b)定常時の熱バランスを示す。



(a) 流路主要箇所の温度変化



(b) 定常時の局所温度と熱バランス

図 2 脱脂処理時の流路主要箇所の温度と定常時の熱バランス（450 クラス（452 ）、40 m³/h クラス（37.5 m³/h）、6.0 min.）

まず、装置内の過熱水蒸気の凝縮を避けるため、蒸気流路温度が 100 以上になるように熱ガスで加熱する。この行程に約 40 分を要している。その後、過熱水蒸気発生装置を稼働し、装置内の熱ガスを過熱水蒸気に置換すると共に、処理室の温度を目的の温度に近づける。蒸気に置換後、過熱水蒸気の流入を停止して蒸気循環流路に切り替えると共に、原料となる切削屑を投入する。その後、処理室の温度を目的の温度に維持しながら、脱脂処理を約 60 分間行う。この間の金属切削屑の処理量と投入電力量に基づいて、脱脂能力及び消費電力を評価した。熱処理時間中、流路の最低温度は蒸気循環ブロー出口で生じるが、100 以上に維持されており、蒸気状態で循環していることがわかる。

(3) 脱脂処理の稼働条件評価

図 3 に、加熱処理温度を 350~500 クラスに変化させ、かつ蒸気流量を 27~60 m³/h クラス、加熱処理時間 6 分の結果を示す。脱脂後の油分付着率の算出は、油分付着前後の切削屑をそれぞれ秤で計量してその差から算出したため、秤の計測誤差が含まれる。約 10 kg の計量に対して最大 ±10g の誤差が生じるため、最終的な付着率には約 ±0.2% の誤差が生じる。このため、一部の結果には負の値が生じている。

実験結果より、処理温度 350~400 の間で脱脂性能に大きな変化が生じていることがわかり、400 以上の熱処理が有効であることがわかる。一方、500 以上の熱処理では、処理室容器の表面温度の上昇により一部切削屑の溶融が見られるため、アルミニウム系切削屑の脱脂処理には 400~500 程度の処理温度が適切であることがわかった。

また、蒸気流量の観点からは、前述の計測誤差も考慮に入れると 400 以上の熱処理では脱脂性能に大きな差は無く、目的とする油分付着率 1.0%以下を達成できている。しかしながら、350 クラスの処理では蒸気流量が少なくなると脱脂能力が低下し、目的の油分付着率を達成できていない。蒸気流量が少ないことにより、蒸発した油分が蒸気と十分混合しないためであると推察される。

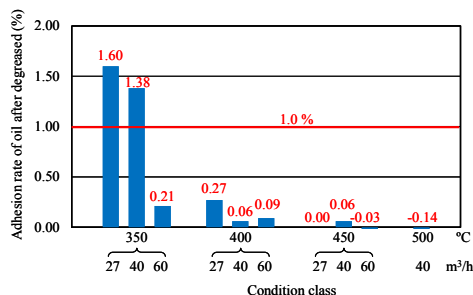
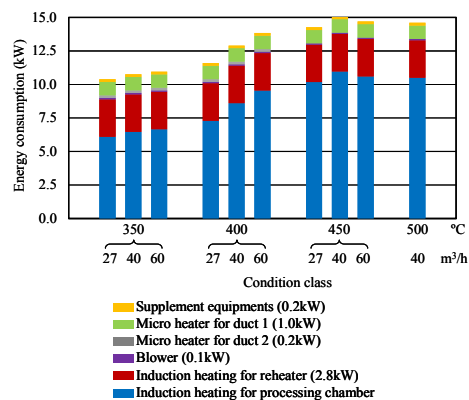


図 3 脱脂処理後の油分付着率

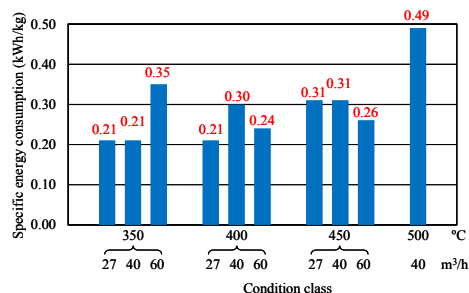
図 4 に、各運転条件における定常運転時の消費電力の時間平均値と単位処理量あたりの消費電力量を示す。実験時には、各条件に

おいて加熱処理室への投入熱量のみを変化させて、再加熱器をはじめとするその他の機器への投入エネルギーを同じとした。定性的な傾向として、処理温度を上昇させると共に消費電力は増加し、また、蒸気循環流量を増加させることにより、消費電力は増加する。これは、理論と同傾向をとる。ただし、加熱には実験室温も影響を与えるため、実験値には若干の増減が見られる。

図 4 (b) に示される単位処理量あたりの消費電力量は、実験条件に対して明瞭な差異を示すことができなかったが、定性的な傾向としては、処理温度が低下するに従い消費電力量が減少する傾向となる。また、一部金属の溶融を伴った 500°C クラスに実験においては、他の条件に対して大きな値をとっている。定量的傾向が示されなかった理由として、本研究で対象とする切削屑は廃棄物であるために、実験の度に形状のばらつきに起因する密度のばらつきが大きいために、切削屑の質量流量を一定に保てなかったことが挙げられる。



(a) 定常処理時の消費電力



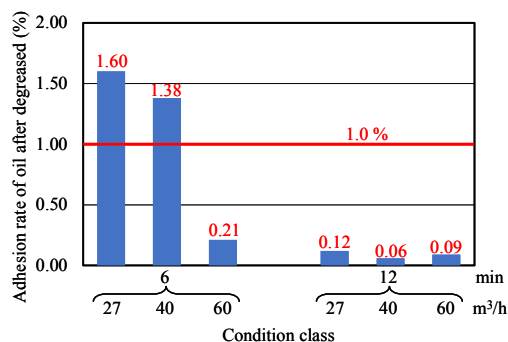
(b) 単位処理量あたりの消費電力量

図 4 脱脂処理と蒸気流量による消費エネルギー

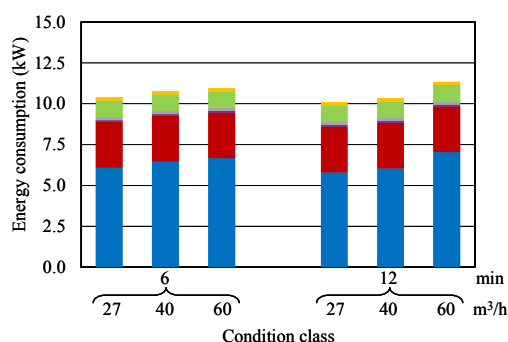
脱脂処理時間が脱脂性能に及ぼす効果について、図 5 に脱脂処理後の切削油付着率、消費エネルギーおよび単位質量当たりの消費エネルギーを示す。

図 5 (a) に、加熱処理時間の差異が顕著に表れた加熱温度 350 クラスの脱脂処理後の切削油付着率を示す。処理時間 6 分では、目標とする切削油付着率 1.0%を上回る結果も

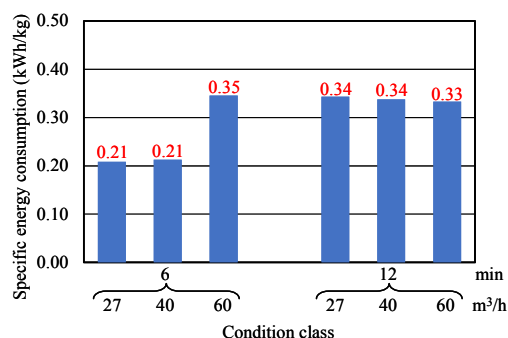
生じたが、12分で行うことで脱脂効率が改善した。一方、400℃以上の加熱処理では、切削油が素早く蒸発して短時間処理が可能であったと考えられる。しかし、処理温度が低温の場合、切削油が完全に蒸発する前に排出されてしまうということが考えられ、適切な処理時間により脱脂が達成されたと考えられる。



(a) 脱脂処理後の油分付着率



(b) 定常処理時の消費電力



(c) 単位処理量あたりの消費電力量

図5 脱脂処理時間による評価（処理温度 350℃クラス）

処理時の消費エネルギーを図5(b)に示す。処理時間を6分から12分にすることで、消費エネルギーは減少した。処理時間を長くすることで、切削屑の質量流量が減少、すなわち原料への加熱量と排出時に持ち去る熱量

が減少するためと考えられる。また、原料流量が減少することで、切削油の蒸発に要する熱量も少なくなったと考えられる。

図5(c)に、単位処理量当たりの消費エネルギーを示す。処理時間12分実験と比較して、6分実験の消費エネルギーは少なかった。これは、処理時間が長くなることにより原料の流量が減少するため、単位処理量あたりの消費エネルギーは大きくなったと考えられる。

(4) まとめ

本研究は油分の付着した金属切削屑の再資源化の品質向上を目的に、より高温での熱処理システムの構築と実証試験を行った。実験では、省エネルギー処理を目的に、蒸気循環型の切削油脱脂システムを構築し、脱脂性能向上のためのシステム改良を行った。加熱処理温度、過熱水蒸気循環流量と処理時間を実験パラメータとして、脱脂後の油分付着率と処理時の消費電力を評価パラメータとした。とくに処理温度では、アルミニウム系切削屑の処理には金属の溶解との兼ね合いから、400～500℃で目的の脱脂能力を達成することができ、高温処理の有効性を示すことができた。また、本実験対象がアルミニウム系切削屑であったために高温処理では一部金属の溶融が生じたが、本システムの処理方法は、より溶解温度の高い金属処理に対しても適用できるものと考えられる。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文) (計10件)

丸山直樹, 大河内祥, 的場文哉, 廣田真史, 過熱水蒸気の温度と流量が金属切削屑の脱脂性能に及ぼす影響, 日本機械学会東海支部第67期総会・講演会講演論文集, 査読無, 2018, USB, 2p.

Naoki Maruyama, Hiroaki Ito, Sho Okochi and Masafumi Hirota, Influence of superheated steam flow rate on improved degreasing of oily metal waste, Proc. of the 8th TSME International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME2017), 査読有, 2017, pp. 1490-1497.

大河内祥, 丸山直樹, 高木宏樹, 廣田真史, 循環型過熱水蒸気の処理温度が金属切削屑の脱脂性能に及ぼす影響, 日本機械学会伝熱学会東海支部第66期総会・講演会論文集, 査読無, 2017, USB, 2p.

大河内祥, 丸山直樹, 高木宏樹, 廣田真史, 過熱水蒸気循環型脱脂における蒸気条件が金属屑の脱脂性能に及ぼす影響, 日本機械学会第27回環境工学総合シンポジウム論文集, 査読無, 2017, pp. 152-155.

Naoki Maruyama, Hiroaki Ito, Sho Okochi and Masafumi Hirota, Theoretical and experimental investigation for oily waste

metal cutting chip recycling from a superheated steam process temperature perspective, Proc. of 6th International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE 2016), 査読有, 2016, USB, 4p.

Naoki Maruyama, Hiroaki Ito, Sho Okochi and Masafumi Hirota, Influence of Superheated Steam Temperature in Steam Circulation-type Degreasing Systems on Improved Degreasing of Oily Metal Waste, Proc. of The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 2016), 査読有, 2016, USB, 5p.

宮崎祥希, 丸山直樹, 伊藤広晃, 大河内祥, 廣田真史, 過熱水蒸気の蒸気温度が金属切削屑の脱脂性能に及ぼす影響, 日本機械学会東海支部第 65 期総会・講演会論文集, 査読無, 2016, USB, 2p.

Naoki Maruyama, Hiroaki Ito, Shouki Miyazaki and Masafumi Hirota, Experimental Investigation of a Circulation-type Superheated Steam Degreasing System for Oily Metal Waste Recycling, Proc. of The 6th TSME International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 2015), 査読有, 2015, USB, 6p.

Naoki Maruyama, Hiroaki Ito, Shouki Miyazaki and Masafumi Hirota, Superheated Steam Degreasing System for Oily Metal Waste Recycle, Proc. of World Engineering Conference and Convention 2015 (WECC2015), 査読無, 2015, CD-ROM, 6p.

伊藤広晃, 丸山直樹, 宮崎祥希, 廣田真史, 過熱水蒸気を用いた金属切削屑の脱脂技術の開発, 日本機械学会第 25 回環境工学総合シンポジウム論文集, 査読無, 2015, CD-ROM, 2p.

[学会発表] (計 10 件)

丸山直樹, 大河内祥, 的場文哉, 廣田真史, 過熱水蒸気の温度と流量が金属切削屑の脱脂性能に及ぼす影響, 日本機械学会東海支部第 67 期総会・講演会講演会, 2018.

Naoki Maruyama, Hiroaki Ito, Sho Okochi and Masafumi Hirota, Influence of superheated steam flow rate on improved degreasing of oily metal waste, The 8th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 2017.

大河内祥, 丸山直樹, 高木宏樹, 廣田真史, 循環型過熱水蒸気の処理温度が金属切削屑の脱脂性能に及ぼす影響, 日本機械学会伝熱学会東海支部第 66 期総会・講演会, 2017.

大河内祥, 丸山直樹, 高木宏樹, 廣田真史, 過熱水蒸気循環型脱脂における蒸気条件

が金属屑の脱脂性能に及ぼす影響, 日本機械学会第 27 回環境工学総合シンポジウム, 2017.

Naoki Maruyama, Hiroaki Ito, Sho Okochi and Masafumi Hirota, Theoretical and experimental investigation for oily waste metal cutting chip recycling from a superheated steam process temperature perspective, 6th International Conference on Sustainable Energy and Environment, 2016.

Naoki Maruyama, Hiroaki Ito, Sho Okochi and Masafumi Hirota, Influence of Superheated Steam Temperature in Steam Circulation-type Degreasing Systems on Improved Degreasing of Oily Metal Waste, The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 2016.

宮崎祥希, 丸山直樹, 伊藤広晃, 大河内祥, 廣田真史, 過熱水蒸気の蒸気温度が金属切削屑の脱脂性能に及ぼす影響, 日本機械学会東海支部第 65 期総会・講演会, 2016.

Naoki Maruyama, Hiroaki Ito, Shouki Miyazaki and Masafumi Hirota, Experimental Investigation of a Circulation-type Superheated Steam Degreasing System for Oily Metal Waste Recycling, The 6th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 査読有, 2015.

Naoki Maruyama, Hiroaki Ito, Shouki Miyazaki and Masafumi Hirota, Superheated Steam Degreasing System for Oily Metal Waste Recycle, World Engineering Conference and Convention, 2015.

伊藤広晃, 丸山直樹, 宮崎祥希, 廣田真史, 過熱水蒸気を用いた金属切削屑の脱脂技術の開発, 日本機械学会第 25 回環境工学総合シンポジウム, 2015.

[その他]

Naoki Maruyama, The 8th TSME International Conference on Mechanical Engineering 2017 において, Honorable Mention in Thermal systems and Fluid Mechanics(TSF)受賞.

丸山直樹, 誘導加熱を導入した過熱水蒸気循環型金属切削屑脱脂技術, 平成 28 年度三重県産業支援センターAMIC セミナー, 誘導加熱 (IH) の市場動向と応用製品, 2016.

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