

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03451

研究課題名(和文) タール・チャー間の反応と流動挙動の高度制御による高効率な新型石炭ガス化炉の開発

研究課題名(英文) Development of a novel coal gasifier with controlling volatile-char reactions and hydrodynamics

研究代表者

伏見 千尋 (Fushimi, Chihiro)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50451886

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：石炭製ダウナー(気固下降流)型熱分解炉の上部から、900Cに加熱した活性炭または黒鉛粒子を供給し石炭の熱分解・水蒸気ガス化実験した。加熱粒子にタールが迅速吸着し問題であるタルの放出を抑制できた。三塔式循環流動層ガス化炉モデルを構築した。熱収支計算から冷ガス効率は800-900Cで85.0%、82.7%、80.9%となった。冷ガス効率とガス化炉体積と熱媒体粒子循環量がトレードオフにあり、850Cを低温ガス化の最適温度とした。CFDを用いて高速に粒子循環しているダウナー内での粒子の詳細な流動特性を明らかにした。DEMと粗視化モデルを導入して循環流動層の流動モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

炭素系資源のガス化によるガス燃料(主にH<sub>2</sub>とCO)の生成効率指標として冷ガス効率があるが、これまで熱力学的に低温で効率が上がることが示唆されていた。本研究では、熱収支から冷ガス効率の熱力学的な理論最大値と、ガス化反応速度と反応時間および流動層内の粒子循環速度から実機の反応器大きさを明らかにした。熱分解ガス化で問題であるタールをガスに変換するためにチャー(熱分解後の固体残渣)を用いた研究は多い。本研究では熱分解時に反応温度まで加熱した粒子を供給し、初期のタルの粒子への付着挙動やその付着炭素のガス化反応特性を初めて明らかにした。この得られた知見はバイオマスの低温ガス化にもそのまま適用可能である。

研究成果の概要(英文)：Experiments of coal pyrolysis and gasification was conducted in a novel downer (i.e. co-current down flow) pyrolyzer and bubbling fluidized bed gasifier. The effect of activated carbon or non-porous carbon particles preheated at 1173 K was investigated. Results show the AC and the non-porous carbon greatly suppress the emission of tar owing to the decomposition of aromatic hydrocarbons into coke.

Cold gas efficiency (CGE)s of 85.0, 82.7 and 80.9% can be achieved at gasification temperatures of 800, 850 and 900C, respectively. There is a trade-off between the CGE and the gasifier design parameters. We conclude that a gasification temperature of 850C is the most suitable for TBCFB gasifiers.

By using Computational Fluid Dynamics (CFD), we simulated hydrodynamics of solids in a downer or a novel conical downer with very large solids mass flux. By integrating the CFD with Coarse-grained Discrete Element Method CFD method, we simulated flow behaviors of the gas and solids in the TBCFB.

研究分野：化学工学

キーワード：ガス化炉 流動層 高効率ガス化 ダウナー 反応速度 気固分離

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

世界での発電量の 40% を占める石炭火力発電の更なる高効率化が強く求められる。研究代表者らは、ガスタービンや燃料電池の排熱を使って石炭をガス化する「エクセルギー再生ガス化」とこの方式の実現に三塔式循環流動層型ガス化炉を共同提案した[1,2]。このシステムの発電効率が最大 54% に達することを示した[3]。この方式の実現には、現在の高温気流層ガス化炉 (1100–1800 °C) とは異なり、ダウンナー (気固下降流) 型熱分解炉、気泡流動層型ガス化炉、ライザー型チャー燃焼炉から成り、基本概念の特徴である 1000 °C 未満の低温で、1) 石炭熱分解、2) タールの完全改質、3) チャー (固体) の迅速ガス化の 3 つが同時に可能であり、4) 冷ガス効率 (H<sub>2</sub>, CO などの気体燃料の発熱量/石炭などの燃料の発熱量) が 80% を超える新規ガス化炉の開発ができる唯一の構造である。

それまでの研究では、石炭やバイオマスの熱分解後で生成する揮発分 (気体とタール) とチャーの間に強力な相互作用があることが報告されていた。この相互作用により、1) チャーでは、触媒作用のあるアルカリ金属 (Na, K など) が揮発し、ガス化反応性が大きく低下する。一方、2) タールの改質反応が進行し、気体燃料の生成が増加する。また、揮発したアルカリ金属はシリカ・アルミナ粒子に捕集されやすく、すぐに触媒活性を失う[4]。このため、低温でのタール完全改質には、揮発分・チャー間の相互作用とアルカリ金属の揮発・触媒作用を高度に制御する必要があった。

参考文献[1] G. Guan, C. Fushimi et al., *Particuology*, **8**, 602–606, 2010 [2] C. Fushimi, G. Guan et al., *Powder Technol.*, **209**, 1–8, 2011 [3] R. Hoya and C. Fushimi *Fuel Process. Technol.*, **164**, 80–91, 2017 [4] C.-Z. Li, *Fuel*, **86**, 1664–1683, 2007

### 2. 研究の目的

本研究では、粒子落下型熱分解炉に高速気固分離器とガス化炉を統合した新規石炭ガス化炉を開発する。従来は難しかった 750–900 °C でのタールの完全改質とチャーの迅速ガス化を促進するため、石炭から生成するチャーを熱媒体兼タール改質触媒として使い、タール・チャー相互作用 (反応) 粒子と揮発分の流動と伝熱の 3 つを高度制御することにより、冷ガス効率 85–90% の達成を目指す。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 熱分解・ガス化実験

図 1 に示すような実験装置図において、900 °C に加熱した石英製ダウンナー型熱分解炉 (内径 20 mm, 長さ 1000 mm) の上部からスクリュフィーダーを用いて石炭粒子 (Loy Yang 褐炭、粒径: 250–300 μm) と、900 °C に予熱した活性炭を供給し、石炭の熱分解を行った。試料は表 1 に示すとおりである。熱分解炉への活性炭供給量  $F_{AC}$  [g/min] を変えて、石炭の熱分解生成物であるガス、タール、チャーの収率の変化を調べた。

ガス分については GC-2014 (Shimadzu, TCD 検出器) によって H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> の定性、定量を行った。また、生成されるガスの経時変化については、ガスバッグ入口前に micro GC (INFICON: 3000 micro GC ガス分析器) を接続して定性及び定量を行った。なお、ガス分については、活性炭からも生成するため、ブランク実験として、活性炭のみ供給した場合の、活性炭 1 g あたりのガスの生成量 [mol] を求め、その値を本実験のガスの生成量から差し引いて実際の収率を算出した。タールトラップ、コールドトラップをジクロロメタンで洗浄することにより得られたタール分を重質タール (heavy tar) と定義し、チャー、重質タールについては CHN 分析装置 (J-SCIENCE, MICRO CODER IM10) を用いて定量分析を行った。軽質タール (light tar) についてはメタノールに溶解し、20 種類の芳香族標準試料を用いて GC-2014 (Shimadzu, FID 検出器) によって定性、定量を行った。活性炭表面に付着した炭素分 (Deposited carbon) については活性炭のみを供給した時の活性炭供給量と回収量の比と石炭熱分解実験での活性炭供給量と回収量の比を用いて算出した。Deposited carbon の定性分析として FT-IR (日本分光製: FT-IR 4100) を用いて実験前後の活性炭の官能基を調べた。また、窒素吸脱着法により比表面積と細孔容積、細孔径分布を調べ、比重法により活性炭の実験前後の粒子密度の変化を調べた。

ガス化実験では、石英製ダウンナー型熱分解炉下部に石英製気泡流動層ガス化炉 (内径 43 mm, 高さ 200 mm) を接続したものを反応器とした。スクリュフィーダーを用いて石炭粒子 (Loy Yang 褐炭) 及び 900 °C に予熱した炭素粒子 (人造黒鉛 PGA-120, 粒径: 106–150 μm) を、下部から窒素及びガス化剤として水蒸気を供給して、石炭の熱分解と Char 及び付着炭素 (deposited

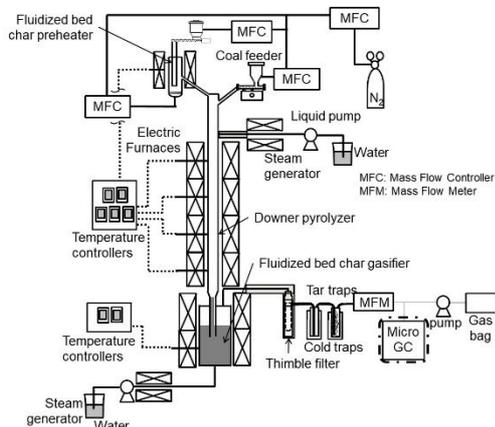


図 1 熱分解・ガス化実験装置図

表 1 Loy Yang 炭の工業分析値と元素分析値[5]

Proximate analysis [wt %]			
Moisture	Ash	Volatiles	Fixed carbon
15.3	0.8	45.0	38.9
Ultimate analysis [wt%, d.a.f]			
H	C	N	O
4.7	62.8	0.6	31.9

carbon: D.C.)のガス化を 850 °Cで行った。この実験では、熱分解由来の燃料ガスと、ガス化由来の燃料ガスを分離するために、熱分解とガス化は同時に行わず、8 min かけて熱分解を行った後、ガス化を開始した。ガス化時間は、熱分解を開始してから 158 min 以上行うこととし、CO ガスの生成が見られなくなるまで実験を行った。ガス化実験でもブランク実験として、人造黒鉛のみ供給した場合のガスの生成量[mol]を求め、その値を本実験のガスの生成量から差し引いて実際の収率を算出した。

参考文献[5] C. Fushimi et al., *Fuel Processing Technology*, **167**, 136-145, 2017

### 3.2 ガス化反応器モデルの構築と最大熱効率の計算

低温ガス化向けに設計された三塔式循環流動層ガス化炉の計算モデルを作成し、熱収支計算により低温ガス化での冷ガス効率、ガス化時間およびガス化炉の大きさの推定を行った。三塔式循環流動層ガス化炉モデルはダウナー型熱分解炉モデル、ライザー型燃焼炉をプロセスシミュレータ Aspen Plus®を用いて作成し、気泡流動層ガス化炉モデルについては別途 Excel®を用いて作成した。ガス化炉モデルでは低温での Langmuir-Hinshelwood model 型の反応速度式を用いることにより、実験データ[6,7]に基づいて、水素ガスによる水蒸気ガス化の反応阻害の影響を考慮にいった。気泡流動層は、濃厚層とフリーボード（希薄相）に分けた。さらに、濃厚層はエマルション相と気泡相の二つに分け、それぞれ完全混合層(Continuously stirred tank reactor: CSTR)のセルから構成されるものとした。気泡相の流れが押し出し流れ(plug flow)に近づくように、11 個のセルを逐次に繋げるモデルとした。

参考文献 [6] K. Matsuoka, S. Hosokai, K. Kuramoto, Y. Suzuki *Fuel Process. Technol.*, **109**, 43–48, 2013

[7] K. Matsuoka, S. Hosokai, Y. Kato, K. Kuramoto, Y. Suzuki, K. Norinaga, J.-i. Hayashi *Fuel Process. Technol.* **116**, 308–316, 2013

### 3.3 Computer fluid dynamics (CFD)によるダウナー熱分解炉とガス化炉の流動解析

CFD を用いて、従来の円筒型ダウナーを含む 4 つのダウナーと、ダウナー出口の内径( $D_0$ )が異なる 3 つの円錐ダウナーをシミュレーションした。3 つの異なるガス流速( $U_g$ )で流動挙動を調べた。CFD の計算には、気相の k- $\epsilon$  乱流モデルと、kinetic theory of granular flow (KTGF) に基づく TFM を統合して計算した。シミュレーションは、市販の FLUENT ソフトウェア 15.0 を使用して実行した。支配方程式は有限体積法を用いて解いた。2D 計算領域は、解のメッシュ密度への依存を最小限に抑えるために選択された 122,500 の長方形のセルによって離散化した。対流項を離散化するために、first-order upwind scheme と implicit formulation を使用した。2 つの連続する繰り返しの相対誤差は、残差コンポーネントごとに  $10^{-3}$  の収束基準を指定した。SIMPLE アルゴリズムを多相流に拡張した位相結合 SIMPLE (PC-SIMPLE) アルゴリズムを、圧力と速度の結合に適用した。

### 3.4 高効率気固分離器の開発実験

作製した装置はアクリル製の円筒パイプでできたダウナー部(Downer section)、気固分離部(Separator section)、流動層部(BFB section)から構成される。気固分離部からのガスシールのパイプが流動層部の蓋をしているゴム栓を貫通して挿入されている。実験では供給する粒子として人造黒鉛粒子(PAG-120、日本黒鉛製)をふるいにかけて、粒径 106–150  $\mu\text{m}$  の範囲のものを用いた。流動層の流動化ガスは空気とした。ダウナー反応器からの生成ガスのモデル流体として、空気との判別が容易な  $\text{CO}_2$  ガスを用いた。粒子を流動層部に所定の高さ( $H_b$ )まで充填し、さらに装置上部のフィーダーについても設定した粒子量で充填した。

常温常圧下にて  $\text{CO}_2$  ガスを装置上部から流入し、気固分離部から排出ガスに含まれる  $\text{CO}_2$  ガスの量をマイクロ GC (Fusion, INFICON)で測定した。ガスの分離効率  $\eta_G$  [%]を次式のように定義して、気固分離器のガスの分離性能を評価した。

$$\eta_G = \frac{\text{気固分離部のCO}_2\text{回収量[L/min]}}{\text{装置に流入したCO}_2\text{量[L/min]}} \times 100 \quad (1)$$

また、固体の分離効率を明らかにするために、気固分離部からの排出ガス中に含まれる粒子を円筒ろ紙フィルターで捕集した。

本実験では、流動層部の分散板(不織布)からガスシールの先端位置までの高さを  $H_b$  と定義し、それぞれの高さにおいて実験を行った。また、6 ヶ所に圧力センサー(AP-C35, KEYENCE)を設置して圧力変化を 1 Hz で測定した。圧力センサーのデータは、Data Logger(CONTEC)を使用して PC に取り込んだ。それらの結果から  $H_b$  と圧力と分離性能の関係を調べた。

粒子の供給は、ストップバルブを開放することで設定された流量でフィーダーに  $\text{CO}_2$  流れ込むようにすることで行った。流れ込む  $\text{CO}_2$  の流量を変えることにより、粒子供給フラックス  $G_s =$

9.29, 12.4, 31.0 kg/m<sup>2</sup> s で炭素粒子の供給を行った。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 熱分解・ガス化実験

AC 供給無しの石炭熱分解では、炭素と水素の収支はそれぞれ 74.5%と 59.6%であった。AC を石炭と共に使用した場合、炭素と水素の収率はそれぞれ 89.53%と 82.58%であった。実験の標準偏差は±6.2%であった。両方の場合を比較すると、炭素収支は 15.03 mol-C / 100 mol-C 増加し、水素は 22.98 mol-H / 100 mol-

H 増加した。活性炭の供給により Heavy tar の収率の大幅な減少、Light tar 生成の完全抑制と付着炭素 (Deposited carbon) が見られた。タールの分解が促進されたことを示している。既往の研究[8]では低沸点成分は炭素物質(その文献では活性炭のこと)に触媒され分解、高沸点成分についてはコーキングが進み、活性炭

表面に付着し Deposited carbon となると報告されている。また、他の文献[9]で固定層を用いてバイオマスから発生するタールをチャーで削減する研究がなされたが、この文献でも Heavy tar 成分は比較的分解しづらいと報告されている。本実験結果もこれらの文献の報告と同様に Heavy tar の完全分解はできなかったが、Light tar の生成を完全に抑えることができた。

850°C での水蒸気ガス化実験では、ガス化前期 (0-30 min) では C/C (供給炭素中の炭素量/石炭の炭素量) が大きいほどガス化速度が向上する傾向にあった。これは C/C が大きいほど炭素粒子によるタール吸着量が増加し、Char の反応性が向上したためだと考えられる。また、この傾向は炭素供給量が多いときには確認できなかった。また、ガス化後期 (30 min 以降) ではガス化速度が減速傾向にあった。この傾向は C/C の値が大きいほど顕著であることから、Char の反応が終了し反応性の低い付着炭素のみ残留したためと考えられる。また、C/C の増加によって付着炭素の成分の一部が変化したことが確認された。これは、石炭に対する炭素粒子量が多いほど付着炭素の分布が希薄化し、炭素成分による改質効果を受けやすくなったためだと考えられる。

参考文献[8] D.M.L. Griffiths, J.S.R. Mainhood, *Fuel*, **46**, 167–176, 1967

[9] J. Park et al. *Biomass and Bioenergy*, **90**, 114–121, 2016

##### 4.2 ガス化反応器モデルの構築と最大熱効率の計算

三塔式循環流動層ガス化炉モデルを用いた 800-900 °C における熱収支計算の結果、冷ガス効率は 800 °C で最大の 85.0%となり、850 °C と 900 °C では減少しそれぞれ 82.7%と 80.9%となった。熱分解とガス化において未回収の水素分があり、これを H<sub>2</sub> ガスとして回収できた場合は、冷ガス効率がさらに 8.6%上昇する可能性があることがわかった。

800-900°C における必要ガス化反応時間の計算の結果、800 °C で最大の 266.7 分となり 900 °C では減少し 19.5 分となった。さらに必要ガス化反応時間は 850 °C を下回ると急激に増大することが分かった。

また反応器を循環する熱媒体粒子量について計算するとガス化温度の上昇に伴い熱媒体粒子量は増大する傾向が得られた。得られた必要ガス化反応時間と熱媒体粒子量を基に気泡流動層ガス化炉の体積を推算した結果、ガス化温度の低下に伴いガス化炉体積は増大する傾向が得られた。また気泡流動層ガス化炉の体積は 850 °C を下回ると急激に増大することが分かった。以上の計算結果からガス化温度の上昇は冷ガス効率の増大および気泡流動層ガス化炉体積の減少につながるが、熱媒体粒子の循環量は増大することが分かった。冷ガス効率の増大および気泡流動層ガス化炉体積の減少と熱媒体粒子の循環量のトレードオフの関係にあり、ガス化温度変化に対するそれぞれの応答性から 850 °C が低温ガス化における最適温度だと考えられる。

##### 4.3 Computer fluid dynamics (CFD)によるダウン型熱分解炉とガス化炉の流動解析

CFD を用いて、ダウン型熱分解炉の下部を小さくした conical downer での粒子濃度を計算した。それぞれ、3 つの異なる  $U_g$  でシミュレーションを行い、シミュレーション時間は 40 秒とした。多くの場合で、シミュレーション時間が 25 秒を超えたときに流れ場が定常状態に達したことから、この研究では 25-40 秒の非定常流れシミュレーションデータの平均結果の値を用いる。

従来のダウン型での欠点である粒子濃度を大きくすることができることを明らかにした。D<sub>0</sub> の減少に伴い、中央領域での粒子密度がわずかに増加した。

また、Discrete Element Method (DEM) と Computational Fluid Dynamics (CFD) を連成した固体-流体連成シミュレーション手法 (DEM-CFD 法) に、符号付距離関数と埋込境界法を融合した壁境界モデルと DEM 粗視化モデル (分担者が独自開発したスケーリング則) を導入してシンプルなアルゴリズムで循環流動層の数値シミュレーションを実行できる計算手法を開発した。(

##### 4.4 高効率気固分離器の開発実験

フィーダーから粒子を投入した状態での CO<sub>2</sub> ガスの回収率を測定した。いずれの H<sub>s</sub> の場合でも、粒子フラックスが大きいほどガスの分離効率  $\eta_G$  が低下していることがわかった。流動層からの空気の混入を考えると H<sub>s</sub> が 12.0 cm のときに  $\eta_G$  が最も大きくなり、85%以上に到達した。また、粒子フラックスが増えると  $\eta_G$  が減少する傾向がみられた。これは粒子噴流の影響で流動

層部へ CO<sub>2</sub> ガスが流れ込みやすくなったためだと考えられる。また、本実験での G<sub>s</sub> の範囲においては、実験前後での気固分離部ガス出口のフィルターに質量変化は見られず、粒子の分離が十分にできていることが分かった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Wenhao Lian, Jingxuan Yang, Peng Li, Junli Wang, Zhonglin Zhang, Chihiro Fushimi, Xiaogang Hao, Wei Huang, Guoqing Guan	4. 巻 336
2. 論文標題 Numerical simulation of hydrodynamic behaviors in a novel gas-solids conical downer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 573-583
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.029">https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.029</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Wataru Yonamine, Sivasakthivel Thangavel, Hidenori Ohashi, Chihiro Fushimi	4. 巻 174
2. 論文標題 Performance analysis of a water gas shift membrane reactor for integrated coal gasification combined cycle plant	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Energy Conversion and Management	6. 最初と最後の頁 552-564
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.022">https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.022</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sivasakthivel Thangavel, Siti Norazian Ismail, Miho Kobayashi, Masayo Koyama, Chihiro Fushimi	4. 巻 51
2. 論文標題 Experimental Analysis of Coal Pyrolysis with Activated Carbon for Tar Capturing and Reforming	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Chemical Engineering of Japan	6. 最初と最後の頁 342-348
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1252/jcej.17we306">https://doi.org/10.1252/jcej.17we306</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yusuke Furusawa, Haruka Taguchi, Siti Norazian Ismail, Sivasakthivel Thangavel, Koichi Matsuoka, Chihiro Fushimi	4. 巻 193
2. 論文標題 Estimation of cold gas efficiency and reactor size of low-temperature gasifier for advanced-integrated coal gasification combined cycle systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fuel Processing Technology	6. 最初と最後の頁 304-316
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.05.023">https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.05.023</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wenhao Lian, Xueer Pan, Zhengchen Li, Jingxuan Yang, Hui Zhang, Chihiro Fushimi, Atsushi Tsutsumi, Xiaogang Hao*, Wei Huang*, Guoqing Guan	4. 巻 214
2. 論文標題 A drag model considering the distribution of particle size via multi-subgrid for the simulation of downer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Science	6. 最初と最後の頁 115363
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.115363">https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.115363</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wenhao Lian, Xueer Pan, Shuang Zheng, Jingxuan Yang, Peng Li, Wei Zhang, Chihiro Fushimi, Xiaogang Hao*, Wei Huang*, Guoqing Guan*	4. 巻 205
2. 論文標題 Mechanism analysis of the solids holdup variations in downer reactors based on volumetric flux	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Science	6. 最初と最後の頁 259-268
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.04.045">https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.04.045</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhongkai Zhao, Yohanes Andre Situmorang, Chihiro Fushimi, Atsushi Tsutsumi, Jingxuan Yang, Xiaogang Hao, Akihiro Yoshida, Abuliti Abudula, Guoqing Guan	4. 巻 in press
2. 論文標題 Numerical simulation of hydrodynamic behaviors in a gas-solids dense downer reactor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Siti Norazian Ismail, Yusuke Furusawa, Haruka Taguchi and Chihiro Fushimi
2. 発表標題 Design of triple bed circulating fluidized bed (TBCFB) gasifier model with cold gas efficiency over 80%
3. 学会等名 第27回 日本エネルギー学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伏見 千尋
2. 発表標題 低温石炭ガス化複合発電システムとダウンナー熱分解炉の開発
3. 学会等名 第50回 化学工学会 秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古澤 祐介、田口 遥香、Ismail Siti Norazian Binti、Thangavel Sivasakthivel、伏見千尋
2. 発表標題 冷ガス効率80%を超える石炭循環流動層ガス化炉モデルの設計
3. 学会等名 第50回 化学工学会 秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古澤 祐介、田口 遥香、Ismail Siti Norazian Binti、Thangavel Sivasakthivel、伏見千尋
2. 発表標題 ASPEN Plus(R)を用いた石炭循環流動層ガス化炉モデルの開発
3. 学会等名 第24回 流動化・粒子プロセッシングシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森 勇稀、酒井幹夫、伏見千尋、河野孝志、喜多照行
2. 発表標題 DEM粗視化モデルを用いた大規模循環型流動層の数値解析
3. 学会等名 第24回 流動化・粒子プロセッシングシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小山雅代、Siti Norazian Ismail, 内野貴行、村越亮、Sivasakthivel Thangavel, 伏見千尋
2. 発表標題 熱分解直後の石炭・コークガス化反応速度の解明
3. 学会等名 第84回 化学工学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sivasakthivel Thangavel, Miho Kobayashi, Masayo Koyama, Siti Norazian Ismail, Chihiro Fushimi
2. 発表標題 Experimental Analysis of Coal Pyrolysis Process in a Novel Downer Reactor for Integrated Coal Gasification Combined Cycle Plant
3. 学会等名 Third International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering (MMPE 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sivasakthivel Thangavel, Miho Kobayashi, Masayo Koyama, Siti Norazian Ismail, Chihiro Fushimi
2. 発表標題 Enhancement of Gas Production of Low Rank Coal by Downer-Gasification Reactor
3. 学会等名 6th Sino-Australian Symposium on Advanced Coal and Biomass Utilisation Technologies (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田口遥香、古澤祐介、Sivasakthivel Thangavel、伏見千尋
2. 発表標題 冷ガス効率80%を超える高効率循環流動層ガス化炉モデルの設計
3. 学会等名 第23回 流動化・粒子プロセッシングシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 與那嶺 航・Sivasakthivel Thangavel・伏見 千尋
2. 発表標題 水素分離膜反応器と水素専焼タービンを組み合わせた石炭ガス化複合サイクル発電の開発
3. 学会等名 第83回化学工学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zhongkai Zhao, Chihiro Fushimi, Atsushi Tsutsumi, Xiaogang Hao, Akihiro Yoshida, Abuliti Abudula, Guoqing Guan
2. 発表標題 Numerical simulation of hydrodynamic behaviours in a novel gas-solids moving bed reactor under a downer
3. 学会等名 Fluidization XVI, May 26-31, 2019, Guilin, China (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chihiro Fushimi and Guoqing Guan
2. 発表標題 Development of a Triple-Bed Combined Circulating Fluidized Bed
3. 学会等名 AIChE Annual Meeting 2019, November11, Orlando, FL, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川 研志郎、Ismail S.N.B.、内野 貴行、村越 亮、小山 雅代、酒井 裕香、伏見 千尋
2. 発表標題 熱媒体粒子存在下における気泡流動層ガス化炉でのチャーと付着炭素の反応性の評価
3. 学会等名 第22回 化学工学会 学生発表会 東京大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Guoqing Guan, Wenhao Lian, Zhongkai Zhao, Xiaogang Hao, Abuliti Abudula, Chihiro Fushimi, Atsushi Tsutsumi
2. 発表標題 High-density solids holdup operations in downers: Theoretical analysis and simulation
3. 学会等名 8th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (APCChE 2019), Sept. 23-27, 2019, Sapporo, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y.Mori, M.Sakai
2. 発表標題 Validation Study on an Eulerian-Lagrangian Method in a Circulating Fluidized Bed
3. 学会等名 AIChE annual meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森 勇稀、酒井 幹夫
2. 発表標題 Numerical simulation of a large-scale circulating fluidized bed with a coarse grain model
3. 学会等名 化学工学会第50回秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森 勇稀、酒井 幹夫
2. 発表標題 大規模流動層数値解析のための数値安定化アルゴリズムの開発
3. 学会等名 化学工学会室蘭大会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森 勇稀、酒井 幹夫
2. 発表標題 大規模DEM-CFDシミュレーションにおける数値安定化アルゴリズムの開発
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京農工大学 伏見研究室 website <a href="http://web.tuat.ac.jp/~cfushimi/">http://web.tuat.ac.jp/~cfushimi/</a>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	酒井 幹夫  (Sakai Mikio)  (00391342)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授   (12601)	
研究分担者	官 国清  (Guan Guoqing)  (90573618)	弘前大学・地域戦略研究所・教授   (11101)	
研究協力者	ハオ シアオガンク  (HAO Xiaogang)	太原理工大学・Professor	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	タンガベル シバサクティブル (THANGAVEL Sivasakthivel)	東京農工大学・工学府 応用化学専攻・元研究員	
研究協力者	酒井 裕香 (SAKAI Yuka)	東京農工大学・工学府 応用化学専攻・元研究員	
研究協力者	田口 遥香 (TAGUCHI Haruka)	東京農工大学・工学府 応用化学専攻・博士前期課程学生	*平成30年3月修了
研究協力者	小林 美穂 (KOBAYASHI Miho)	東京農工大学・工学府 応用化学専攻・博士前期課程学生	*平成30年3月修了
研究協力者	古澤 祐介 (FURUSAWA Yusuke)	東京農工大学・工学府 応用化学専攻・博士前期課程学生	*平成31年3月修了
研究協力者	小山 雅代 (KOYAMA Masayo)	東京農工大学・工学府 応用化学専攻・博士前期課程学生	*平成31年3月修了
研究協力者	イスマイル シティ ノラジアン (Ismail Siti Norazian)	東京農工大学・工学府 応用化学専攻・博士後期課程学生	
研究協力者	矢藤 健太郎 (YATO Kentaro)	東京農工大学・工学府 応用化学専攻・博士前期課程学生	*令和2年3月修了

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	村越 亮  (MURAKOSHI Ryo)	東京農工大学・工学府 応用化学専攻・博士前期課程2年	
研究協力者	内野 貴行  (UCHINO Takayuki)	東京農工大学・工学府 応用化学専攻・博士前期課程2年	
研究協力者	長谷川 研志郎  (HASEGAWA Kenshiro)	東京農工大学・工学府 応用化学専攻・博士前期課程1年	