

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K19855

研究課題名（和文）塩素ドーパ炭素質物質を用いる安価な水銀蒸気除去システムの開発

研究課題名（英文）Development of an Inexpensive Mercury Vapor Removal System Using Chlorine-Doped Carbonaceous Materials

研究代表者

坪内 直人（TSUBOUCHI, Naoto）

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：90333898

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：塩素で表面修飾した炭素ベースHg除去剤の開発のため、Cl担持に及ぼす金属種の影響を検討した。その結果、KやCaを含む炭素とHClの反応の程度は炭素活性サイトの増加で増大し、炭素単独と比較し無機と有機のCl種に帰属されるXPSピークの強度が顕著に増大した。また、安価な原料からの活性炭の製造を目指し、泥炭に尿素と埋蔵量に富む天然ソーダ灰を混合し800～900℃に加熱したところ、表面積と細孔容積の大きな活性炭を製造できることが見出された。さらに、もみ殻からのSiの回収残渣である塩素ドーパ炭素質物質のガス状金属水銀吸着能は高く（従来の2倍以上）、水銀と塩素の相互作用は強いことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には、安価な原料から調製した炭素質物質の表面をClで修飾し、Hg除去剤として用いる点に最大の特徴がある。このような試みは「低品位の褐炭由来の炭素活性サイトはHClと容易に反応して、有機Cl種に変化する」という発見に基づいており、極めて独創的な研究である。本成果は、コークス炉、焼結機のみならず高炉や電気炉の排ガスならびに石炭やバイオマスの燃焼排ガス、ガス化とガスタービンもしくは燃料電池を組み合わせた複合発電システム用の燃料ガスなどに適応可能な簡便で低コスト型の高温ガス精製法に展開する可能性が多いに期待され、その社会的意義は非常に大きい。

研究成果の概要（英文）：To develop a carbon-based Hg remover surface modified with chlorine, the effect of metal species on chlorine doping was investigated. The results showed that the extent of reaction of HCl with carbon containing K and Ca increased with increasing carbon active sites, and the intensity of XPS peaks attributed to inorganic and organic Cl species increased significantly compared to carbon alone. In addition, to produce activated carbon from inexpensive raw materials, peat was mixed with urea and natural soda ash, which has abundant reserves, and heated to 800-900℃. It was found that activated carbon with a large surface area and pore volume could be produced. Furthermore, the adsorption capacity of chlorine-doped carbonaceous material, a Si recovery residue from rice husks, for gaseous metallic mercury was high (more than twice that of conventional materials), indicating that the interaction between mercury and chlorine is strong.

研究分野：環境化学

キーワード：環境技術 環境対応 有害化学物質 表面・界面物性

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

水銀 (Hg) は食物連鎖により人体に蓄積され健康被害を引き起こすことから、国際連合環境計画 (UNEP) が主体となり Hg 排出量を規制する「水銀に関する水俣条約」が制定され、平成 29 年 8 月に発効された。我が国の鉄鋼産業由来の大気への Hg 排出ポテンシャル (7.5 t/年) は世界的には少ないものの、国内の Hg 排出量 (21~28 t/年) の 3~4 割を占め、これは主に石炭と鉄鉱石を使用するコークス炉 (3 t/年) と焼結機 (4 t/年) に由来すると試算されている<sup>1</sup>。また、鉄鋼基因の Hg 排出ポテンシャルは、今後の石炭/鉄鉱石品質の低下や不純物の増加にともない増大する可能性がある。Hg は国境を越えて拡散するので、高温プロセスからの Hg の排出量を抑制する技術の開発が課題となっている。したがって、コークス炉ガスや焼結機ガス中の Hg の除去剤の設計・製造および最適除去条件の探索・構築は重要であるが、殆ど研究されていない。

### 2. 研究の目的

上記した背景より、本研究では『安価で容易に入手可能な褐炭から製造した炭素質物質の炭素活性サイトは HCl と容易に反応し、有機 Cl 種に変化する』という本申請者らの発見と『Hg と Cl は容易に反応するという高温での Hg のケミストリー』に関する従来研究の結果に基づき<sup>2,4</sup>、「塩素で表面修飾した炭素質物質を用いる安価な Hg 蒸気除去システムの開発」を目的とする。具体的には、Cl ドープに及ぼす金属の影響の解明、安価な原料からの活性炭の調製、Cl ドープ炭素質物質の Hg 吸着能の定量評価と除去機構の確立に取り組み、得られた結果に従い、簡便で低コスト型の Hot Gas Cleanup 法を確立することを目標に掲げた。

### 3. 研究の方法

Hg 除去剤の開発のための炭素質物質への塩素ドープに及ぼす金属種の影響研究では、最初に、フェノール樹脂を He 雰囲気下 950°C で 1 h 加熱して炭素を調製し、これを 20% O<sub>2</sub>/He 中 500°C で所定時間賦活した。特に断らない限り 100 min 間賦活した炭素 (表面積は 640 m<sup>2</sup>/g) を使用し、CH<sub>3</sub>COOK または Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> のエタノール溶液により含浸担持 (金属分で 0.4 mass%) した。試料表面の炭素活性サイト数を定量するため、高純度 He 気流中 2°C/min で昇温脱離 (TPD) 実験を行い、CO<sub>2</sub> と CO をマイクロ GC で on line 分析した。HCl と炭素の反応では、500°C に保持した試料上に、100 ppm HCl/N<sub>2</sub> または 100 ppm HCl/50% CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> を流通し、HCl 濃度の変化を IR 分析装置で追跡した。反応後、高純度 N<sub>2</sub> 中で試料を室温まで急速冷却し、TPD 測定により脱離する HCl 量を分析した。HCl 反応後の表面種の化学形態は XPS (Mg-Kα 線) を用いて調べた。試料を In 板に保持し、結合エネルギーの値は In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の In 3d<sub>5/2</sub> (444.9 eV) を基準とした。

安価な原料からの活性炭 (AC) の調製では、試料として北海道産の泥炭 (Peat) (C, 59; H, 6.8; N, 2.0; S, 0.38 mass%-daf; Ash, 8.9 mass%-dry)、米国 Wyoming 産の天然ソーダ灰 (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (>99%)) 並びに市販の尿素 (Urea) (>99%) を用いた。Peat の粒径は 150~212 μm であり、Peat、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 及び Urea は室温にて任意の割合で物理的に混合した。熱分解にはガス流通式の固定床反応器を使用し、Peat ならびに混合試料を He 中 10°C/min で 500~900°C まで加熱して、0~1 h 保持した。熱処理後の試料は、洗浄液中に Na<sup>+</sup>カチオンが検出されなくなるまで温水で繰り返し洗浄した。加熱前後ならびに洗浄後の試料のキャラクタリゼーションは主に、N<sub>2</sub> 吸着 (BET、α<sub>s</sub> 法) および XRD にて行なった。

Hg<sup>0</sup> 吸着実験では、炭素源として初殻を 800°C で熱分解して調製した炭化物 (RC) を用いた。RC の塩素化には固定床反応器を用い、Cl<sub>2</sub> 気流中 20°C/min で 300~1000°C まで加熱し、0~30 min 保持した。RC の灰分構成元素の揮発率は、燃焼法で得た灰の完全溶解液を ICP で分析して求めた。ガス状 Hg<sup>0</sup> 吸着実験は、ガス流通式固定床反応器で行った。反応器内に充填した塩素化残渣 (Cl ドープ炭素 (RCC)) を N<sub>2</sub> 雰囲気下にて 60°C もしくは 140°C に加熱したのち、100 ppb Hg/N<sub>2</sub> を流通させた。反応器出口の Hg<sup>0</sup> 濃度は Hg 分析計で 1 s 間隔で on line 測定した。RC、RCC ならびに吸着実験後の試料のキャラクタリゼーションは主に、XRD、FT-IR、XPS、Hg/HCl/CO/CO<sub>2</sub>-TPD、イオンクロマトおよび N<sub>2</sub> 吸着法で行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 塩素ドープに及ぼす炭素質物質中の金属種の影響

Hg 除去剤の開発のため、フェノール樹脂から調製した純炭素と HCl の反応に及ぼす O<sub>2</sub> 賦活/金属塩ドープ/雰囲気ガスの影響を調べ、生成 Cl 種の表面組成や熱的安定性を検討した。

図 1 に、100 ppm HCl/N<sub>2</sub> を流通した時の HCl 濃度の時間変化を示す。炭素単独 (100 min 間 O<sub>2</sub> 賦活、図中の C alone) では、濃度は初期に急激に減少し約 6 min で最小となり、その後速やかに 100 ppm に戻った。また、O<sub>2</sub> 賦活時間が長くなると濃度の低下は顕著となった。つまり、HCl は 500°C で炭素と容易に反応し (化学吸着を含む) その量は賦活時間とともに増加した。図 1 に見られるように、K ドープ炭素 (K/C) での HCl 濃度の変化は炭素単独とほぼ同じであったが、Ca ドープ炭素 (Ca/C) では 6 min 以降の濃度変化は他の試料に比べ緩やかであり、20 min 後に 100 ppm に復した。以下では、減少した HCl 量を HCl 反応量とした。

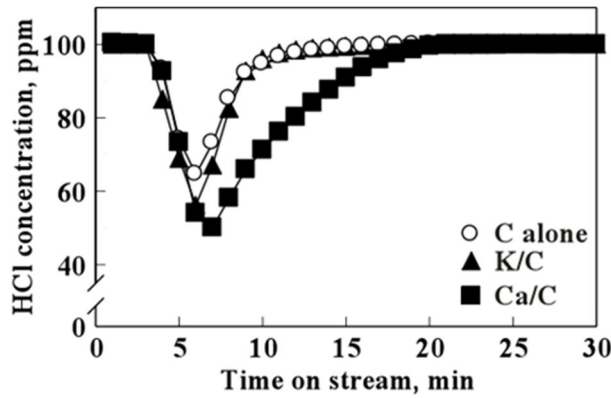


図1 500°Cでの100 ppm HCl/N<sub>2</sub>流通時におけるHCl濃度の時間変化

よく知られているように、炭素表面には種々の含O官能基が存在し、これらは加熱時に活性サイトに变化する。そこで、TPD実験を行い、HClと炭素の反応温度である500°Cまでに含O官能基から脱離するCO<sub>2</sub>とCOの和を炭素活性サイトとして求めた。図2は、活性サイト数とHCl反応量の関係を表す。ここでは、O<sub>2</sub>賦活時間の異なる試料の結果も示した。サイト数は賦活時間とともに増加し、また、C alone ≤ K/C < Ca/Cの序列であった。興味深いことに、反応量はサイト数の増加で直線的に増し、含O官能基がHClとの反応サイトとして機能していることが明らかとなった。Ca/Cでは、原料塩のCa(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>の分解で生成するCaOとHClの反応も起こり得る。HClと炭素の反応の雰囲気ガスを不活性N<sub>2</sub>から酸化性の50%CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>に変えたところ、Ca/Cで顕著な効果が現れ、HCl反応量は1.3倍増加した。この理由は不明であるが、CO<sub>2</sub>がCaOとCの相互作用を促進し、炭素活性サイトが増加したためではないかと推測される。

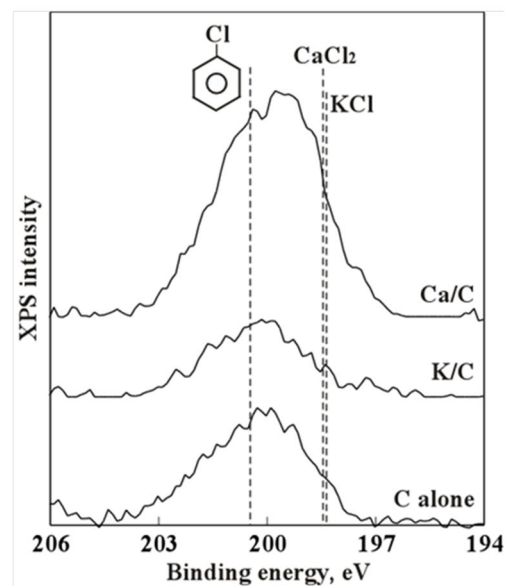
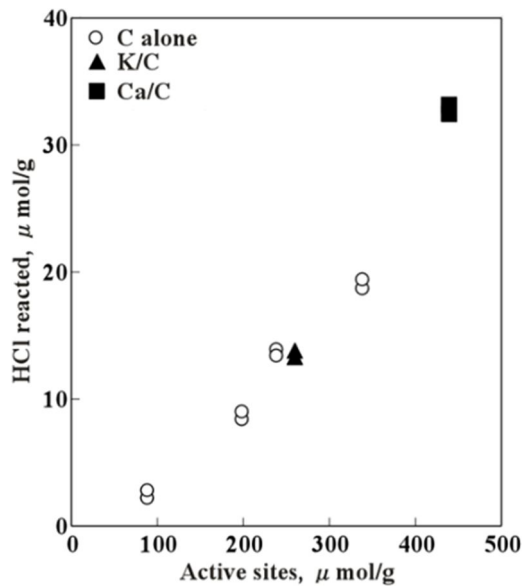


図2 活性サイト数とHCl反応量の関係 図3 HCl/N<sub>2</sub>中での反応後のCl 2p XPSスペクトル

図3に、HCl/N<sub>2</sub>中での反応後のCl 2p XPSスペクトルを示す。ここでは、KCl、CaCl<sub>2</sub>、クロロベンゼンの結合エネルギー(各々198.3、198.4、200.5 eV)も併せ示した。炭素単独とK/Cでは、200 eV付近にピークを有する類似のスペクトルが観測され、Cl/C原子比も2.1~2.2×10<sup>-3</sup>でほぼ同じであった。これに対し、Ca/Cでは、ピークトップが低結合エネルギー側にシフトし、一方、XPS強度は無機のみならず有機の塩素の領域で著しく増大し、Cl/C比は炭素単独時の約3倍に上った。この値はHCl反応量の結果(図2)とほぼ一致し、Ca存在下で有機Clが増えることは興味深い。クロロベンゼンとCaCl<sub>2</sub>の結合エネルギーを用いてピーク分離を行った結果、両者の比は57:43となり、Ca 2p XPS測定ではCaCl<sub>2</sub>に基因するピークが認められた。従って、図1と図2のCl反応量には、炭素活性サイトとCaOの寄与が含まれていると解釈すべきである。HCl/N<sub>2</sub>雰囲気中で反応させた試料を室温に冷却し、TPDを行ったところ、炭素の種類によらず560~570°CにHClの脱離ピークが現れたが、このピークはCa/Cで最も大きくて、ブロードであった。800°Cまでの脱離量はC alone < K/C < Ca/Cの順で、後者2種上の塩素種は炭素単独のものより容易にHClに変化した。特にCa/Cでは、反応したHClの>90%が脱離したが、不活性ガス中のTPDでCaCl<sub>2</sub>からHClが発生することは考えにくいので、HClの脱離は有機Cl由来であろう。先にCa/C上にはCaCl<sub>2</sub>が存在する可能性を指摘したが、HClとの反応で固相中に取り込まれた

全塩素中の  $\text{CaCl}_2$  の割合は小さく、表面近傍のみに存在していると思われる。現在、この熱的に安定な炭素上 Cl 種の Hg 除去性能を調べているところである。

## (2) 安価な原料からの活性炭の調製

(1) で述べた純炭素の表面積は  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$  以下と小さかった。大量の Hg 吸着サイトを持つ除去剤の製造のためには、高表面積化が非常に重要である。そこで、本セクションでは高性能 Hg 除去剤の開発の一環として、安価な原料（泥炭/天然ソーダ灰/尿素）から高表面積活性炭を製造可能な最適条件を解明することを目的とした。

図 4 に、 $\text{Peat}/\text{Na}_2\text{CO}_3$  と  $\text{Peat}/\text{Urea}/\text{Na}_2\text{CO}_3$  を各々、重量比で 1/1 と 1/1/2 で物理混合した試料を事前に決定した温度まで加熱したのち温水洗浄して得た活性炭 ( $\text{AC}_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$  と  $\text{AC}_{\text{urea}/\text{Na}_2\text{CO}_3}$ ) の  $\text{N}_2$  吸着等温線から求めた表面積を示す。 $\text{Peat}$  単独と  $\text{Peat}/\text{Urea}$  を重量比 1/1 で混合した試料からの AC の表面積は、いずれの場合においても  $1 \text{ m}^2/\text{g}$  以下であった。一方、 $\text{AC}_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$  では  $800^\circ\text{C}$  ( $30 \text{ m}^2/\text{g}$ ) から表面積が発達し、その値は  $900^\circ\text{C}$  で  $450 \text{ m}^2/\text{g}$  となった。 $\text{Peat}/\text{Urea}/\text{Na}_2\text{CO}_3$  の混合物の熱処理では、 $700^\circ\text{C}$  を超えると表面積は急激に増大し、 $800$  と  $900^\circ\text{C}$  では各々  $950$  と  $1100 \text{ m}^2/\text{g}$  に達した。また、同一のサンプルを  $700$  と  $800^\circ\text{C}$  にて 1h 保持すると、前者では表面積が  $100$  から約  $730 \text{ m}^2/\text{g}$  に大きく増加し、後者でも増加する ( $1050 \text{ m}^2/\text{g}$ ) 傾向を示した。図 5 は、調製した AC のメソ孔とミクロ孔の量を示す。 $900^\circ\text{C}$  加熱で得た  $\text{AC}_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$  では後者のポアが発達しており、その傾向は  $\text{AC}_{\text{urea}/\text{Na}_2\text{CO}_3}$  でも認められた。一方、 $\text{AC}_{\text{urea}/\text{Na}_2\text{CO}_3}$  を  $700$  と  $800^\circ\text{C}$  で 1h 保持すると、前者の温度ではミクロ孔が増大するのに対して、後者ではメソ孔が若干増加した。

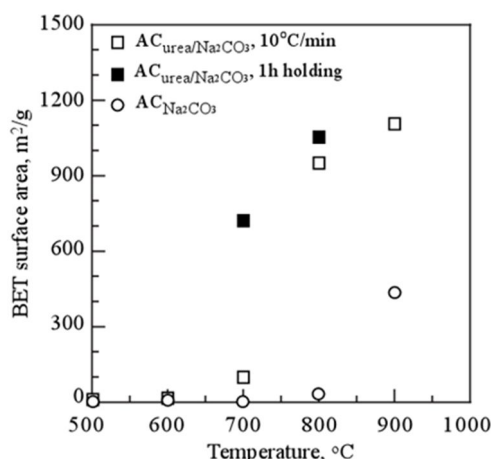


図 4 Peat、Urea、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の混合物から調製した活性炭の BET 表面積

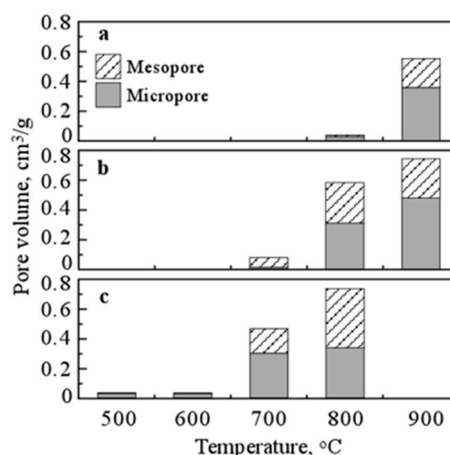


図 5 Peat、Urea、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の混合物から調製した活性炭のメソ孔とミクロ孔の容積: a,  $\text{AC}_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$ ; b,  $\text{AC}_{\text{urea}/\text{Na}_2\text{CO}_3}$  10°C/min; c,  $\text{AC}_{\text{urea}/\text{Na}_2\text{CO}_3}$  1h holding

$800^\circ\text{C}$  を越えると表面積の顕著な発達が認められたことから、温度を  $800^\circ\text{C}$  一定とし、AC の表面積に及ぼす  $\text{Peat}/\text{Urea}/\text{Na}_2\text{CO}_3$  混合比の影響を検討した。その結果、 $\text{Peat}$  の割合を  $0.5 \sim 2.0$  に変化させると、 $\text{AC}_{\text{urea}/\text{Na}_2\text{CO}_3}$  の表面積は混合比 1.0 で極大を与えた。 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の混合割合が  $1.0 \sim 4.0$  の場合は、混合比 2.0 で極大 ( $950 \text{ m}^2/\text{g}$ ) が観測されたが、 $4.0$  では減少した。一方、 $\text{Urea}$  の割合を  $0.5 \sim 3.0$  に変化させた場合は、表面積は混合比が 1.0 までは著しく増大したものの、その後は混合割合が増えても顕著な増加は認められなかった。 $\text{Peat}/\text{Urea}/\text{Na}_2\text{CO}_3 = 1/2/2$  と  $1/3/2$  でのメソ孔とミクロ孔の容積は、それぞれ、 $0.3 \sim 0.4$  と  $0.6 \text{ cm}^3/\text{g}$  であった。以上の結果は、 $\text{Peat}$  から高表面積かつ高細孔容積の活性炭を調製するためには、原料中の窒素の含有量が極めて重要な因子であることを示しており、高表面積活性炭製造の最適条件が明らかとなった。

## (3) 安価な原料から調製した塩素ドーブ炭素質物質の水銀吸着性能

まず、籾殻を  $800^\circ\text{C}$  で熱分解して調製した炭化物 (RC) を塩素化処理に供したところ、Si は  $300^\circ\text{C}$  を超えると脱離し、 $1000^\circ\text{C}$  で 10 min 保持すると 80% が揮発した。一方、塩素化残渣 (Cl ドーブ炭素 (RCC)) 中の Cl 量は、初期の 0.1% から  $600^\circ\text{C}$  で 25% に達したあと減少した。また、RCC の表面積の温度変化は Si の揮発挙動とほぼ一致した。つまり、細孔の発達は灰分の除去に基因した。Si の揮発が完了する  $1000^\circ\text{C}$  で 10 min 保持後の Cl 量と表面積は、それぞれ、7.5% と  $325 \text{ m}^2/\text{g}$  であった。炭素質物質を  $\text{Cl}_2$  中で熱処理すると、表面の C、C-H あるいは含 O 官能基と反応し、Cl 原子が炭素上に取り込まれると報告されているが<sup>5</sup>、XRD や FT-IR では塩素化実験前後での差異は認められなかった。一方、 $\text{CO}/\text{CO}_2$ -TPD 測定では、含 O 官能基の分解に基因する種々のピークの強度が RC に比べ RCC で小さかった。これは、Cl が RC 表面上の含 O 官能基と反応してドーブされたことを指摘する。担持 Cl の熱的安定性と化学形態を調べるため HCl-TPD 測定を行ったところ、HCl は  $200^\circ\text{C}$  付近から脱離し、 $250^\circ\text{C}$  と  $450^\circ\text{C}$  に種々のピークを持つ脱離プロファイルを与えたが、多くは熱的に安定な形態で存在することが明らかとなった。さらに、XPS 分析から Cl は Cl や C-Cl 結合で存在することが見出された。この結果に従い、 $60^\circ\text{C}$  および  $140^\circ\text{C}$  で Hg<sup>0</sup> 吸着実験を行った。その結果を図 6 に示す。 $60^\circ\text{C}$  では、RC は Hg<sup>0</sup> 流通後ただちに

破過 ( $C_i/C_0 = 0.1$ ) したのに対して、RCC は 56 h 後まで性能が維持され、これは 140°C でもほぼ同じで、RCC の破過点での Hg 吸着量と Cl 利用率は、各々、0.56 ~ 0.87 mg/g と 3 ~ 4% であった。無機塩化物を活性炭に含浸担持した先行研究の結果<sup>1</sup> と比べたところ、RCC は 2 倍以上性能が高かった。Hg-TPD 法で Hg<sup>0</sup> の吸着形態を検討したところ、HgCl<sub>2</sub> や HgO として存在することが示された (図 7)。HgO 生成は RCC 中の含 O 種との反応に基因するのかもしれない<sup>6</sup>。

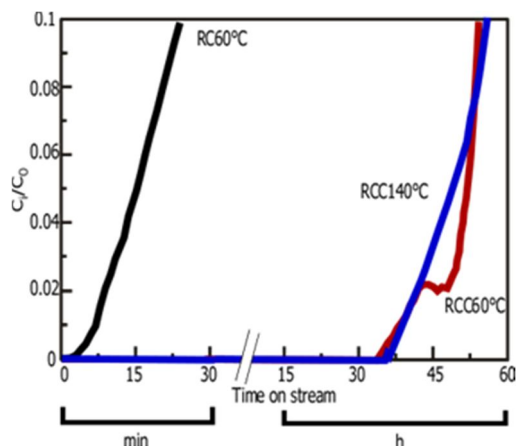


図 6 ガス状 Hg<sup>0</sup> の吸着破過曲線

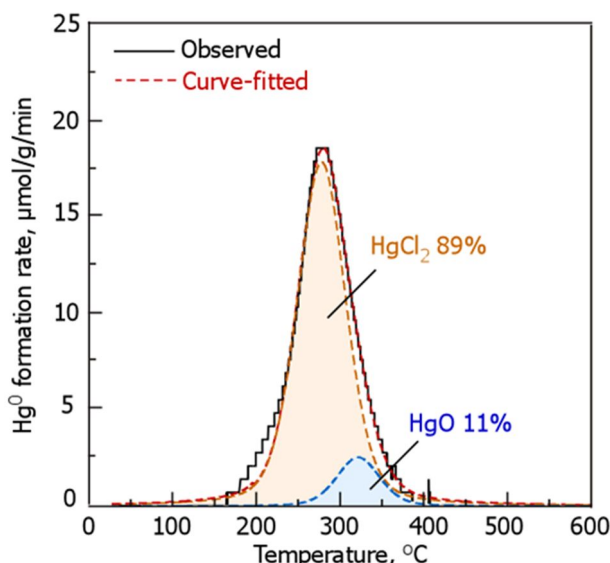


図 7 吸着実験後の RCC の Hg-TPD プロファイルの波形分離

以上より、本研究では下記の重要な結論が得られた。

- 塩素で表面修飾した炭素ベース Hg 除去剤の開発のため、塩素ドーブに及ぼす炭素質物質中の金属種の影響を調べた。その結果、K や Ca をドーブした炭素と HCl の反応の程度は炭素活性サイト数の増加とともに増大し、Ca ドーブで最も大きくなり、その Cl 2p XPS 測定では炭素単独と比較し、無機と有機の Cl 化合物に帰属されるスペクトルの強度が顕著に増大した。
- 安価な原料からの活性炭の製造を目指して、北海道産の泥炭に尿素と埋蔵量が非常に豊富な天然ソーダ灰を重量比 Peat/Urea/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> = 1/1 ~ 3/2 で混合し、800 ~ 900°C に加熱したところ、表面積と細孔容積の大きな活性炭を製造できることが明らかとなった。
- 安価な原料から調製した塩素ドーブ炭素質物質の水銀吸着性能の検討では、もみ殻からの Si 回収残渣である塩素ドーブ炭素質物質のガス状 Hg<sup>0</sup> の吸着性能は高く (従来研究の 2 倍以上)、水銀と塩素の相互作用は強いことが明らかとなった。

#### < 引用文献 >

- Takaoka et al., *Report of the Steel Foundation for Environmental Protection Technology*: SEPT; Tokyo, Japan, 2006.
- Tsubouchi et al., *Energy Fuels*, **27**, 2013, 87-96.
- Tsubouchi et al., *Energy Fuels*, **27**, 2013, 5076-5082.
- Tsubouchi et al., *Energy Fuels*, **30**, 2016, 2320-2327.
- González et al., *Carbon*, **37**, 1999, 1979-1988.
- Luo et al., *J. Hazard. Mater.*, **376**, 2019, 21-28.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 坪内直人	4. 巻 13
2. 論文標題 製鉄プロセスに係わる水銀の発生挙動と排出抑制	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 鉄鋼環境基金研究討論会要旨集	6. 最初と最後の頁 1-2
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 無
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 Javzandolgor Bud, Yuuki Mochizuki, Naoto Tsubouchi	4. 巻 62
2. 論文標題 Evolution of Mercury from Iron Ores in Temperature-Programmed Heat Treatments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 20～28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-295	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 Javzandolgor Bud, Yuuki Mochizuki, Naoto Tsubouchi	4. 巻 308
2. 論文標題 Evaluation of Mercury Form in Iron Ore through Sequential Leaching and Temperature-Programmed Heat Treatment Methods	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fuel	6. 最初と最後の頁 121953～121953
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.fuel.2021.121953	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 Javzandolgor Bud, Yuuki Mochizuki, Naoto Tsubouchi	4. 巻 28
2. 論文標題 Behavior of Mercury Release from Iron Ores during Temperature-Programmed Heat Treatment in Air	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Environmental Science and Pollution Research	6. 最初と最後の頁 66496～66500
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11356-021-17002-7	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 Yuuki Mochizuki, Javzandolgor Bud, Jiaqian Liu, Miki Takahashi, Naoto Tsubouchi	4. 巻 305
2. 論文標題 Mercury (II) Ion Adsorption Performance of Cl-Loaded Carbonaceous Material Prepared by Chlorination of Pyrolyzed Rice Husk Char	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cleaner Production	6. 最初と最後の頁 127176 ~ 127176
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jclepro.2021.127176	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 坪内直人, 望月友貴, Bud Javzandolgor	4. 巻 183
2. 論文標題 製鉄原燃料の加熱過程における水銀の排出挙動	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 材料とプロセス	6. 最初と最後の頁 CD-ROM
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 無
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 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 坪内直人
2. 発表標題 製鉄プロセスに係わる水銀の発生挙動と排出抑制
3. 学会等名 鉄鋼環境基金研究討論会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坪内直人, 望月友貴, Bud Javzandolgor
2. 発表標題 製鉄原燃料の加熱過程における水銀の排出挙動
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第183回春季講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

エネルギー変換システム設計研究室ホームページ  
<https://chemeng-hokudai.jp/>

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
研究協力者	望月 友貴  (MOCHIZUKI Yuuki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------