

令和 6 年 4 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05147

研究課題名(和文) 化学的方法論に基づく廃スラグ変換プロセスの開発とCO<sub>2</sub>吸着・再資源化反応への応用研究課題名(英文) Development of waste slag conversion process based on chemical methodology and its applications in CO<sub>2</sub> capture and utilization

研究代表者

桑原 泰隆 (Kawahara, Yasutaka)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40635330

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、鉄鋼産業において多量に副生成され、複雑な化学組成を有する鉄鋼スラグを原料として、CaO-メソポーラスシリカ複合体へと変換する化学プロセスを開発するとともに、得られた酸化物複合体がCO<sub>2</sub>吸着材として利用できることを実証した。特に、転炉スラグを用いて合成した吸着材は高炉スラグから合成した吸着材よりも高いCO<sub>2</sub>吸着量および高温耐久性を示すことを明らかにした。また、高炉スラグから合成したCaO-メソポーラスシリカ複合体にNiを複合化することで、CO<sub>2</sub>からメタンを合成するメタネーション反応に有効な触媒として機能することを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した化学変換プロセスを利用することで、鉄鋼産業で大量に副生成される鉄鋼スラグをCO<sub>2</sub>吸着材へと変換することが可能となる。また、変換した機能性酸化物複合体は、CO<sub>2</sub>をメタンへと変換するメタネーション反応の触媒担体としても利用できる。本プロセスは現在鉄鋼産業が直面している『廃スラグの有効利用』と『CO<sub>2</sub>排出量の削減』という2つの重要な問題に貢献しうる新しい環境技術として今後の更なる展開が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a new chemical process to convert steel slags, which are by-products of the steel industry in large quantities and have complex chemical compositions, into CaO-mesoporous silica composites, and demonstrated that the resulting oxide composites can be used as CO<sub>2</sub> adsorbents. In particular, the adsorbent synthesized from converter slag exhibited higher CO<sub>2</sub> adsorption capacity and higher durability than the adsorbent synthesized from blast furnace slag. In addition, it was demonstrated that CaO-mesoporous silica composites synthesized from blast furnace slag with Ni particles can function as an effective catalyst for the methanation reaction, which produces methane from CO<sub>2</sub>.

研究分野：資源化学プロセス

キーワード：鉄鋼スラグ リサイクル 多孔質材料 酸化カルシウム CO<sub>2</sub>回収貯留 CO<sub>2</sub>変換

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 鉄鋼スラグは鉄鉱石から鉄鋼製品を製造する還元・製錬工程で発生する副産物である。鉄鋼スラグはその製造工程により、高炉スラグと製鋼スラグの二種類に大別される。前者は鉄鉱石を石灰石やコークスとともに高炉で溶融・還元し鉄銑を製造する製銑工程で副生成し、後者は製鋼炉で溶鋼中の不純物を除去して鋼を製造する製鋼工程で副生成する。2019 年度における鉄鋼スラグの国内生産量は 3617 万トンにも及ぶ。鉄鋼スラグはそのままでは処理費用が嵩むため、水硬セメント、コンクリート骨材、路盤材などといった土木建築用材料の原料として、現在そのほとんどが再利用されているが、公共事業の縮小化や国内スラグ処分場の確保、環境規制の厳格化などといった問題から新たな利用法の開拓が求められている。

(2) 高炉スラグは、主成分として  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  の他、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{S}$  などの微量元素を含んでいる。一方、製鋼スラグは鉄銑を鋼へと精錬する各工程において様々な化学組成のものが生成するが、80%以上を  $\text{CaO}$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{SiO}_2$  が占め、残りをその他の酸化物 ( $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ ) が占める。鉄鋼スラグの組成は複雑ではあるが特徴ある化学組成を有している。例えば、 $\text{SiO}_2$  (および  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) はゼオライトやメソポーラスシリカなどのシリカ多孔体の構成成分である。また、鉄鋼スラグに最も多く含有される  $\text{CaO}$  成分は、可逆的な炭酸化/脱炭酸反応を生じ、 $\text{CO}_2$  吸着材としての機能を示す。すなわち、鉄鋼スラグは、高付加価値な機能性材料合成のための安価な化学原料としてのポテンシャルを有している。

(3) 現在、鉄鋼産業が直面しているもう一つの重要な問題が、高炉で還元剤として添加されるコークスや融剤として添加される石灰石 ( $\text{CaCO}_3$ ) の使用により発生する大量の二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の排出である。 $\text{CO}_2$  は 2017 年度において国内で年間 11 億 9000 万トン排出されており、このうち鉄鋼産業から排出される  $\text{CO}_2$  は年間 1 億 6300 万トン (国内  $\text{CO}_2$  総排出量の約 14% に相当) に上り、鉄鋼産業における  $\text{CO}_2$  回収貯留 (CCS: Carbon Capture and Storage) は喫緊の課題となっている。排ガスからの  $\text{CO}_2$  回収の代替法として、固体  $\text{CaO}$  の可逆的な炭酸化/脱炭酸反応を利用する方法 (カルシウムルーピング) がある。 $\text{CaO}$  は高い理論  $\text{CO}_2$  吸着量に加え安価な製造コストが利点である。しかしながら、反応に  $700^\circ\text{C}$  付近の高温を必要とするため、稼働時のエネルギーコストや高温での連続使用による吸着性能の劣化が課題となっている。

(4) 上記の背景から、化学的アプローチによって鉄鋼スラグを  $\text{CaO}$  とメソポーラスシリカの複合体へと変換できれば、有用な  $\text{CO}_2$  吸着材として利用できるのではないかと着想した。しかしながら、多数の元素が強固な金属-酸素結合を介して複雑に絡み合った独特の化学組成を有する鉄鋼スラグから、これらの金属 (金属酸化物) を選択的に抽出することは容易ではない。

### 2. 研究の目的

大別して以下の 3 点を目的とした。

(1) 鉄鋼スラグ (高炉スラグおよび種々の製鋼スラグ) を原料として高表面積を有する  $\text{CaO}$ -メソポーラスシリカ複合体を製造するための化学的変換プロセスの開発

(2) 鉄鋼スラグを原料に合成した  $\text{CaO}$ -メソポーラスシリカ複合体の  $\text{CO}_2$  吸着回収への応用

(3) 鉄鋼スラグを原料に合成した  $\text{CaO}$ -メソポーラスシリカ複合体を触媒に用いた  $\text{CO}_2$  資源化反応への応用

これら研究を通じ、鉄鋼スラグを原料とする資源循環プロセスの基盤構築と、 $\text{CO}_2$  の回収・貯留 (CCS) と  $\text{CO}_2$  回収・利用 (CCU) に貢献しうる新しい環境技術を創成することを目的とした (図 1)。

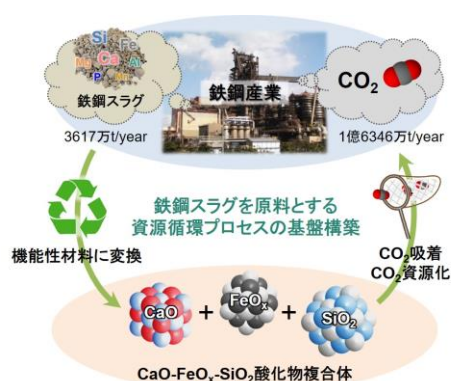


図 1 本研究課題の概要

### 3. 研究の方法

(1) 高炉スラグを原料とした  $\text{CaO}$ -メソポーラスシリカ複合体の合成

高炉スラグを原料とした  $\text{CaO}$ -メソポーラスシリカ複合体 (BFslag CaO-MS) の合成は、SBA-15 メソポーラスシリカの合成法を改良して行った。まず、高炉スラグに  $3.0 \text{ mol/L}$  の酸を加え、完全に溶解させて高炉スラグに含まれる金属イオンを抽出した (図 2)。このとき酸として三種類の酸 (ギ酸 (FA)、硝酸 ( $\text{HNO}_3$ ) または塩酸 (HCl)) を使用し、これら酸の種類が酸化物複合体の構造や  $\text{CO}_2$  吸着特性に与える影響について調査した。この酸溶液に、細孔形成剤である Pluronic P123<sup>®</sup> (P123) を加えた。こうして得られた溶液を  $40^\circ\text{C}$  で 24 時間熟成した後、テフロンボトルに移し  $100^\circ\text{C}$  の静置条件下でさらに 24 時間水熱処理した。得られた懸濁液からエバポレーターを用いて水を蒸発乾固させ、大気中  $600^\circ\text{C}$  で焼成した。

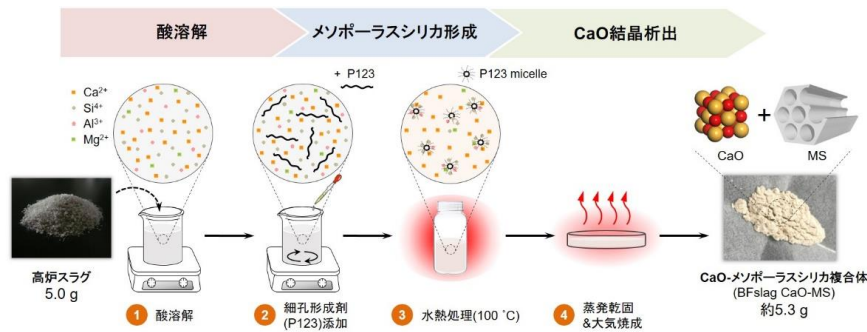


図2 高炉スラグを原料としたCaO-メソポーラスシリカ複合体(BFslag CaO-MS)の合成

## (2) 製鋼スラグを原料としたCaO-メソポーラスシリカ複合体の合成

上記(1)の合成法を利用し、種々の製鋼スラグ(転炉スラグ、脱リンスラグ、脱珪素スラグ)からのCaO-メソポーラスシリカ複合体の合成を行った。また、溶解酸としてギ酸(FA)、硝酸(HNO<sub>3</sub>)、塩酸(HCl)の他、酢酸(AA)、クエン酸(CA)を検討し、これら酸の種類が酸化複合体の構造やCO<sub>2</sub>吸着特性に与える影響について調査した。

## (3) CO<sub>2</sub>吸着への応用

熱重量分析装置(TG)を用い、CO<sub>2</sub>流通下での重量変化からCO<sub>2</sub>吸着量・吸着速度を定量的に評価した。CO<sub>2</sub>吸収反応(CaO + CO<sub>2</sub> → CaCO<sub>3</sub>)は製鉄所から排出される燃焼排ガスを想定し10%CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>気流中、700°Cの条件で行った。その後、100%N<sub>2</sub>気流に切り替え、700°Cまたは750°Cの条件でCO<sub>2</sub>放出反応(CaCO<sub>3</sub> → CaO + CO<sub>2</sub>)を行った。得られたデータを元に、吸着材の結晶構造やナノ構造、化学組成がCO<sub>2</sub>吸着能に及ぼす影響について調査した。

## (4) 高炉スラグを原料としたNi担持CaO-メソポーラスシリカ触媒の合成とメタネーション反応への応用

上記(1)で合成したCaO-メソポーラスシリカ複合体に触媒活性種であるNi粒子を固定化し触媒を調製した。Ni担持量は10wt%とした。固定床流通式反応器を用い、400~500°CでCO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>を流通させ、CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>の混合ガスを流通させ、メタネーション反応(CO<sub>2</sub> + 4H<sub>2</sub> → CH<sub>4</sub> + 2H<sub>2</sub>O)を実施した。様々な反応条件で反応を実施し触媒性能を評価した。

## 4. 研究成果

### (1) 高炉スラグを原料としたCaO-メソポーラスシリカ複合体の合成

溶解酸としてギ酸を用いて合成したBFslag CaO-MS試料のXRDパターンには、CaOと大気中CO<sub>2</sub>との反応によって生成するCaCO<sub>3</sub>由来の回折ピークが観察された(図3(b))。低角度側のXRDパターンには、規則配列したメソ細孔に由来する特徴的なピークが見られた(図3(a))。一方、硝酸または塩酸を使用して合成した試料では、CaCO<sub>3</sub>相由来の回折パターンは確認されたものの、ギ酸を使用して合成した場合と比較して結晶性が低かった。また、N<sub>2</sub>吸脱着測定から、ギ酸を用いて合成したBFslag CaO-MSの比表面積は128 m<sup>2</sup>/gと見積もられ、細孔分布解析により発達したメソ細孔を有することも確認された。一方、硝酸や塩酸を使用して合成した試料ではメソポーラスシリカの形成は確認されなかった。これら酸による結晶構造、細孔構造の違いは、酸解離定数の違いによって金属酸化物の析出沈殿プロセスが異なったためであると考えられた。

ギ酸を用いて合成したBFslag CaO-MSを制限視野電子回折(SAED)およびEDXにより分析したところ、粗大で無細孔のCaCO<sub>3</sub>粒子と多孔質状でアモルファス構造を有するメソポーラスシリカ粒子の2種類の粒子が観察された。また、金属原子数から計算した高炉スラグの正味のリサイクル効率は100%に近く、本研究で提案した変換プロセスにより高炉スラグに含まれる金属成分のほぼ全てをリサイクルできたことが示された。

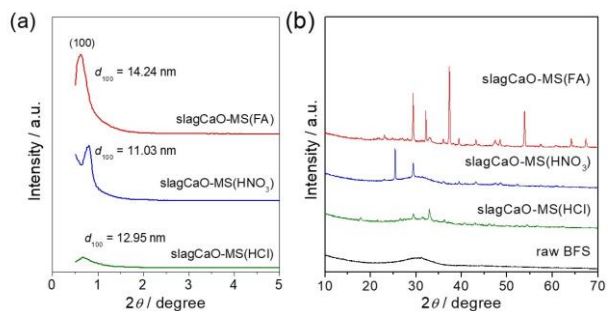


図3 異なる酸を用いて合成したBFslag CaO-MSおよび原料スラグ(BFslag)の(a)低角度XRDパターン、(b)高角度XRDパターン

### (2) 高炉スラグを原料としたCaO-メソポーラスシリカ複合体のCO<sub>2</sub>吸着への応用



吸着温度 700 °Cにおいてギ酸を用いて合成した BFslag CaO-MS は吸着材重量あたり 18.8 wt%の CO<sub>2</sub> 吸着量を示し、750 °C, 100%N<sub>2</sub>に切り替えることで可逆的に CO<sub>2</sub>を脱離した(図4)。この CO<sub>2</sub>吸着量は試料に含まれる CaO 単位重量あたりに変換すると 46.9 wt%に相当し、市販の CaO (49.9 wt%)と同等の CO<sub>2</sub>吸着量であった。無機酸を用いて合成した試料や原料の高炉スラグは同条件下でほとんど CO<sub>2</sub>吸着能を示さなかった。ギ酸を用いて合成した試料でのみ高い CO<sub>2</sub>吸着量が得られた理由は、CO<sub>2</sub>と反応性を有する結晶性の CaO 相が存在するためである。また、細孔形成剤である P123 を使用せずに同様の手順で合成した類似体は BFslag CaO-MS と類似の化学組成と結晶相を有するにもかかわらず、CO<sub>2</sub>吸着量は半分程度であった。メソ細孔が存在することで、CaO 粒子が分散化されるとともに粒子内の CO<sub>2</sub>の拡散が促進され、吸着材としての CO<sub>2</sub>吸着能力が向上したものと推察された。

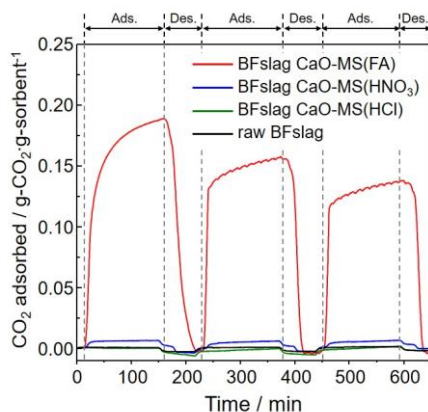


図4 異なる酸を用いて合成した BFslag CaO-MS および原料スラグ (BFslag)の CO<sub>2</sub>吸着脱離プロファイル

### (3) 転炉スラグを原料とした CaO-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>複合体の合成

高炉で製造した銑鉄は転炉に移され、生石灰などを入れ高圧の酸素を吹き込むことで銑鉄に含まれる不純物を取り除かれ、鋼が製造される。この際、鋼1トンに対し約110kgの転炉スラグが副生する。転炉スラグは、遊離した CaO を多く含むために高アルカリ性や膨張特性を有することや、FeO含有量が多い特異な組成を持つことから、高炉スラグに比べその利用用途が限られており、転炉スラグの有効な再利用方法の開発は、鉄鋼産業において重要な課題の一つである。上記で開発した化学プロセスを転炉スラグに適用し、CaO-メソポーラスシリカ複合体(Cslag CFS)の合成を試みた。転炉スラグを原料とし溶解酸にギ酸を用いた場合、Fe成分が Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>粒子として溶け残り、XRD測定では CaCO<sub>3</sub>相と Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>相に帰属される回折パターンが観察された。一方、硝酸や塩酸を用いた場合には CaCO<sub>3</sub>相は形成されなかった。

SAED像およびEDXスペクトル測定から、結晶性CaO粒子とFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>粒子、およびアモルファス状のSiO<sub>2</sub>粒子の三種類の粒子が確認された(図5)。微量不純物元素のうち、MnはCaO相に、P、TiはFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>相に、Al、MgはSiO<sub>2</sub>相にそれぞれ濃化しやすいことがわかった。また、N<sub>2</sub>吸脱着測定から、Cslag CFSはメソ細孔を有することが確認されたが、比表面積(S<sub>BET</sub> = 64 m<sup>2</sup>/g)は高炉スラグを原料とした場合よりも低かった。これは転炉スラグのSiO<sub>2</sub>含有量(11.0 wt%)が高炉スラグのSiO<sub>2</sub>含有量(34.6 wt%)よりも少なく、試料重量あたりに含まれるメソポーラスシリカ粒子の割合が少なかったためである。

同様の方法で製鋼スラグの一種である脱リンスラグや脱珪素スラグを原料とし、CaO-FeO<sub>x</sub>-SiO<sub>2</sub>複合体への変換を試みた。脱リンスラグを原料とした場合、比表面積 59.1 m<sup>2</sup>/g の結晶性 CaO 粒子を有する CaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-メソポーラスシリカ複合体が、脱珪素スラグを原料とした場合、比表面積 85.8 m<sup>2</sup>/g の結晶性 CaO 粒子を有する CaO-メソポーラスシリカ複合体が得られた。

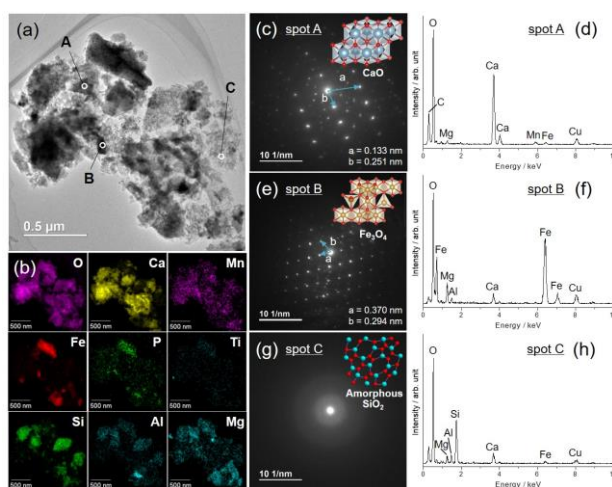


図5 (a) Cslag CFSのSTEM像と(b)元素マッピング像、CaO粒子の(c)SAED像と(d)EDXスペクトル、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>粒子の(e)SAED像と(f)EDXスペクトル、SiO<sub>2</sub>粒子の(g)SAED像と(h)EDXスペクトル

### (4) 転炉スラグを原料とした CaO-FeO<sub>x</sub>-SiO<sub>2</sub>複合体の CO<sub>2</sub>吸着への応用

吸着温度 700 °C、10%CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>流通下で CO<sub>2</sub>吸着性能を評価したところ、転炉スラグから合成した Cslag CFS の CO<sub>2</sub>吸着量(23.4 wt%)は高炉スラグから合成した BFslag CaO-MS の吸着量(21.5 wt%)と比較して、初期吸着量で約 1.1 倍であった(図6)。これは転炉スラグの CaO 含有量(43.8 wt%)が高炉スラグの CaO 含有量(40.1 wt%)よりも多く、吸着材重量あたりに含まれる CaO 粒子の割合が多かったためである。また、P123 を添加せずに合成した試料は Cslag CFS と同じ化学組成・結晶構造を有するにも関わらず、若干低い CO<sub>2</sub>吸着量を示した。メソ細孔の形成により

CaO 粒子が高分散担持されたことや、粒子内の CO<sub>2</sub> の拡散性が増したことが要因と推測された。さらに、吸着材の耐久性を評価したところ、BFslag CaO-MS では 10 サイクル後の CO<sub>2</sub> 吸着量が初期 CO<sub>2</sub> 吸着量の約 55% まで低下したのに対し、Cslag CFS では 91% を維持した (図 6)。XRD 測定の結果、BFslag CaO-MS はメソポーラスシリカ相の含有量が多い (約 37 wt%) ため、高温での繰り返し使用時に緻密なカルシウムシリケート相の形成が起こり、これに伴って CO<sub>2</sub> 吸着量が減少したことがわかった。一方、Cslag CFS ではメソポーラスシリカ相の含有量が少ない (約 12 wt%) ことに加え、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 相が担体としての役割を担うことで CaO 相の相転移や CaO どうしのシンタリングが抑制され、再利用性が向上することがわかった。

また、脱リンスラグを原料に合成した CaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-メソポーラスシリカ複合体の CO<sub>2</sub> 吸着量は同条件で 17.0 wt% であった。脱リンスラグには P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> として約 7.1 wt% のリンが含まれるが、CO<sub>2</sub> 吸着特性に及ぼす影響は限定的であった。脱珪素スラグを原料に合成した CaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-メソポーラスシリカ複合体の CO<sub>2</sub> 吸着量は同条件で 21.0 wt% であった。CaO の結晶性と CO<sub>2</sub> 吸着量との間には相関が見られ、高機能な CO<sub>2</sub> 吸着材への変換にはギ酸や酢酸などの酸解離定数の大きな有機酸の使用が有効であることが改めて確認された。

#### (5) 高炉スラグを原料とした Ni 担持 CaO-メソポーラスシリカ複合体触媒の合成とメタネーション反応への応用

高炉スラグを原料に合成した CaO-メソポーラスシリカ複合体に含浸法により触媒活性種である Ni を担持し、Ni 担持 CaO-メソポーラスシリカ複合体触媒 (Ni/BFslag CaO-MS) を調製した。Ni/BFslag CaO-MS を触媒に用いてメタネーション反応を実施し、触媒性能を評価した。反応温度の最適化の結果、反応温度 400 °C において最も CO<sub>2</sub> 転化率および CH<sub>4</sub> 選択率が高くなった。高炉スラグから合成した Ni/BFslag CaO-MS (Ni 担持量: 10 wt%) は試薬から合成した同等触媒である Ni/CaO/SBA-15 と同程度の活性および CH<sub>4</sub> 選択性を示すことが明らかとなった (図 7)。一方で、その他の担持 Ni 触媒 (Ni/MS, Ni/CaO) との比較から、担体の化学組成やナノ構造が触媒活性に与える影響は小さく、主に Ni 粒子の担持量や粒子径に支配されることがわかった。Ni/BFslag CaO-MS は他の担持 Ni 触媒と比較して優れた耐久性を示し、長時間の反応でも安定した触媒活性 (CO<sub>2</sub> 転化率約 60%) と CH<sub>4</sub> 選択性 (約 94%) を示した。

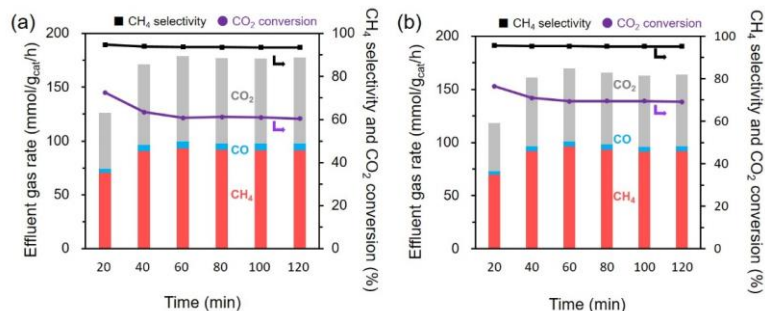


図 7 (a) Ni/BFslag CaO-MS および (b) 同等触媒 (Ni/CaO/SBA-15) のメタネーション反応における性能評価 (反応温度: 400 °C、流量: CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> = 5/20/25 mL/min)

本研究では、複雑な化学組成を有する鉄鋼スラグを原料として、CaO-メソポーラスシリカ複合体へと変換する化学プロセスを開発し、CO<sub>2</sub> 吸着能を有する機能性材料が合成可能であることを実証した。特に、転炉スラグを用いて合成した吸着材は高炉スラグから合成した吸着材よりも高い CO<sub>2</sub> 吸着量および高温耐久性を示した。開発したスラグ変換プロセスは簡便であることから、本プロセスで合成した吸着材は、鉄鋼産業や石炭火力発電所などから排出される排ガスからの CO<sub>2</sub> 吸着分離にも適用可能であると考えられる。また、高炉スラグから合成した CaO-メソポーラスシリカ複合体に Ni を複合化することで、メタネーション反応に有効な触媒を調製できることも示された。実用化に向けては、今後、実際の排ガスを模擬した条件での吸着・反応実験や合成に係る経済性評価が必要であるが、本プロセスは現在鉄鋼産業が直面している『廃スラグの有効利用』と『CO<sub>2</sub> 排出量の削減』という 2 つの重要な問題に貢献しうる環境技術として今後の更なる展開が期待できる。

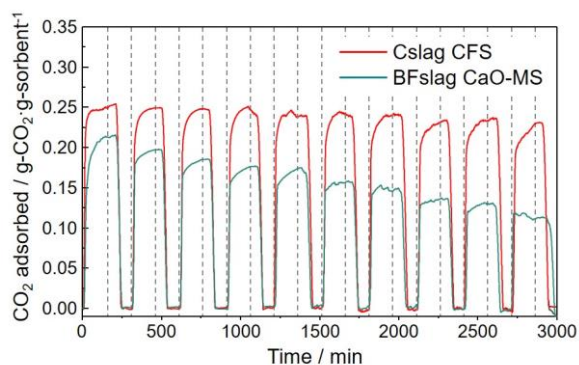


図 6 Cslag CFS および BFslag CaO-MS の CO<sub>2</sub> 吸着脱離プロファイルの比較 (吸着: 700 °C, 10%CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, 脱離: 700 °C, 100%N<sub>2</sub>)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hashim Zaza Hazrina, Kuwahara Yasutaka, Hanaki Aiko, Mohamed Abdul Rahman, Yamashita Hiromi	4. 巻 410
2. 論文標題 Synthesis of a CaO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> composite from a dephosphorization slag for adsorption of CO <sub>2</sub>	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Catalysis Today	6. 最初と最後の頁 264 ~ 272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cattod.2022.03.030	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 Hashim Zaza Hazrina, Kuwahara Yasutaka, Mohamed Abdul Rahman, Yamashita Hiromi	4. 巻 63
2. 論文標題 CO <sub>2</sub> Adsorption on a CaO-Ca <sub>12</sub> Al <sub>14</sub> O <sub>33</sub> Composite Synthesized from a Blast Furnace Slag and its Regenerative Ability	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 190 ~ 196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-310	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 Hashim Zaza Hazrina, Kuwahara Yasutaka, Mohamed Abdul Rahman, Yamashita Hiromi	4. 巻 63
2. 論文標題 Direct Conversion of Desiliconization Slag to a CaO-Mesoporous Silica Composite for CO <sub>2</sub> Capture: Effect of Acid Dissolution Agent	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 579 ~ 585
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-435	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 桑原泰隆、山下弘巳	4. 巻 39
2. 論文標題 鉄鋼スラグを原料とした機能性多孔質材料の合成と環境浄化への応用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ゼオライト	6. 最初と最後の頁 56 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20731/zeorai to.39.2.56	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 Kuwahara Yasutaka, Hanaki Aiko, Yamashita Hiromi	4. 巻 10
2. 論文標題 Direct Synthesis of a Regenerative CaO-Fe3O4-SiO2 Composite Adsorbent from Converter Slag for CO2 Capture Applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Sustainable Chemistry & Engineering	6. 最初と最後の頁 372 ~ 381
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssuschemeng.1c06480	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 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Zaza Hazrina Hashim, Yasutaka Kuwahara, Aiko Hanaki, Hiromi Yamashita
2. 発表標題 Synthesis of a CaO-Fe2O3-SiO2 composite from dephosphorization slag for CO2 adsorption
3. 学会等名 12th International Conference on Environmental Catalysis (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桑原泰隆、花木愛子、山下弘巳
2. 発表標題 鉄鋼スラグを原料としたCaO系酸化物複合体への転換とCO2回収への応用
3. 学会等名 第52回石油・石油化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桑原泰隆、Zaza Hazrina Hashim、山下弘巳
2. 発表標題 製鋼スラグを原料としたCaO-Fe3O4-SiO2複合体への転換における溶解酸の影響
3. 学会等名 日本金属学会2023年春季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 桑原泰隆、Zaza Hazrina Hashim、山下弘巳
2. 発表標題 製鋼スラグを原料としたCaO系酸化物複合体への変換とCO2回収への応用
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第185回春季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 花木愛子、桑原泰隆、山下弘巳
2. 発表標題 転炉スラグを原料とした機能性材料変換プロセスの開発とCO2吸着への応用
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第182回秋季講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 花木愛子、桑原泰隆、山下弘巳
2. 発表標題 転炉スラグを原料とした機能性酸化物複合体の合成とCO2吸着への応用
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 花木愛子、桑原泰隆、山下弘巳
2. 発表標題 廃鉄鋼スラグを原料としたCaO-Fe3O4-多孔質シリカ複合体の合成とCO2吸着への応用
3. 学会等名 第37回ゼオライト研究発表会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 桑原泰隆
2. 発表標題 化学プロセスによる鉄鋼スラグの機能性酸化物への転換と環境保全・CO2吸着への応用
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 評価・分析・解析部会フォーラム 第2回フォーラム研究発表会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桑原泰隆、花木愛子、山下弘巳
2. 発表標題 転炉スラグを原料としたCaO系酸化物複合体への転換とCO2吸着への応用
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第183回春季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桑原泰隆、花木愛子、山下弘巳
2. 発表標題 転炉スラグを原料としたCaO-Fe3O4-SiO2複合体の合成とCO2吸着への応用
3. 学会等名 日本金属学会2022年春季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Aiko Hanaki, Yasutaka Kuwahara, Hiromi Yamashita
2. 発表標題 Synthesis of Porous Functional Materials from Blast Furnace Slag and Evaluation of their CO2 Adsorption Performance
3. 学会等名 1st Japan-China Symposium on Catalysis (1stJCSC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Aiko Hanaki, Yasutaka Kuwahara, Hiromi Yamashita
2. 発表標題 Synthesis of CaO Mesoporous SiO <sub>2</sub> Composite from Blast Furnace Slag and Its Evaluation of CO <sub>2</sub> Adsorption Performance
3. 学会等名 18th Japan-Korea Symposium on Catalysis (18JKSC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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		
マレーシア	Universiti Sains Malaysia		