

ゼオライトを用いた吸着法によるエンジン排気からのCO₂回収に関する研究

著者	野内 忠則, 竹内 優太, 田中 金太, 山? 誠志
雑誌名	静岡理工科大学紀要
巻	30
ページ	1-6
発行年	2022-08-31
URL	http://id.nii.ac.jp/1617/00000291/

ゼオライトを用いた吸着法によるエンジン排気からの CO₂ 回収に関する研究Investigation of CO₂ Capture Characteristics from Engine Exhaust Gas using Adsorption Method with Zeolite

野内 忠則*, 竹内 優太**, 田中 金太**, 山崎 誠志***

Tadanori YANAI, Yuta TAKEUCHI, Kinta TANAKA and Satoshi YAMAZAKI

Abstract: In this study, CO₂ capture characteristics for gasoline engine emissions using the adsorption method with Zeolite was investigated. The test gas used was a representative gas consisting of only air and CO₂ and had a similar gas flow rate and CO₂ concentration to gasoline engine exhaust. The test gas was introduced to a canister with an internal volume of 6.5 L that contained 4.65 kg of Zeolite 13X to adsorb the CO₂. After adsorption, the pressure inside the canister was reduced using a vacuum pump to desorb the CO₂, and then the desorbed CO₂ was introduced to a capture tank. The results showed the CO₂ capture rate was affected by the vacuum decompression time and canister heating during the decompression. The approximate CO₂ capture rate was 50% at 30 minutes after vacuuming and approximately 60% at one hour with heating.

1. まえがき

近年、地球温暖化が深刻化しており、日本では 2050 年にカーボンニュートラルの実現を目指すことが政府より表明されている。これを実現するためには、運輸部門においても脱炭素化が必要であり、バッテリー電気自動車と二酸化炭素 (CO₂) を排出しない再生可能エネルギーでの発電との組み合わせが手段の一つとして考えられている。しかしながら、2050 年時点での世界の四輪自動車台数は、現在より増加して 20 億台 (うち乗用車 14.2 億台) に達すると予測されているのに対して、リチウムイオンバッテリーの製造に必要なリチウムの埋蔵量 (炭酸リチウム換算) は、バッテリー電気自動車 (乗用車) 5 億台分に留まると試算²⁾されている。更に、リチウムイオンバッテリーの単位体積当たりのエネルギー密度は、ガソリンや軽油等の液体燃料と比較すると約 1/40 であり³⁾、高出力が要求される大型自動車や建設機械および船舶等においては、完全な電動化は困難である。即ち、2050 年時点においても、世界的に見れば、内燃機関を利用する交通機械が多く存在する可能性が高い。従って、内燃機関の脱炭素化が必要である。

内燃機関の脱炭素化を実現するための手段の一つとして、カーボンニュートラル燃料の利用がある。その燃料の代表的なものとして、バイオマス燃料が従来から検討^{4,5)}されている。近年では、水素と CO₂ を原料とする人工合成燃料である e-fuel⁶⁾に注目が集まっており、特に、オキシメチレンジメチルエーテル (OME_n) は、石油系燃料に性状が近いことから、エンジン適用に関する研究⁷⁻⁹⁾が活発化している。一方、別の手段として、排気中の CO₂ を分離・回収して、CO₂ の大気放出を防ぐ方法が考えられる。

この技術が実現すれば、既存車両にも装着できる利点がある。また、バイオマス燃料や e-fuel のエンジンと併用すれば、燃料に含まれる炭素量に相当する CO₂ が大気中から取り除かれるため (ネガティブエミッション¹⁰⁾)、動力を発生しながら大気中の CO₂ を回収できる可能性がある。そこで、エンジン排気からの CO₂ 分離・回収に着目した。

CO₂ 分離・回収技術¹¹⁾には、化学吸収法、膜分離法および吸着法等複数の方法が存在する。特徴をまとめると、化学吸収法は、CO₂ 回収率が高いが、モノエタノールアミンや水酸化カリウム等の吸収剤が液体であることや設備が大型となること、吸着液の再生に多量のエネルギーを消費する等の欠点がある。また、膜分離法は、分離膜が固体であるため取り扱いが容易であるが、CO₂ より小さい分子も透過するため、CO₂ 回収率が低くなる欠点がある。一方で吸着法は、ゼオライト¹²⁾等の吸着剤を用いる方法であり、固体で取り扱いが容易なことや、吸着された CO₂ を、理論上、加熱と減圧により脱着できるため、化学吸収法に比べると容易に繰り返し再生できるメリットがある。そこで本研究では、ゼオライトを吸着剤とした吸着法に着目した。

吸着法をエンジン排気へ適用する場合、従来の火力発電所の適用と比べて、小型化による単位体積当たりの排気流量増大 (高空間速度) や低い吸着圧力 (≒ 常圧)、及び異燃料種による未燃焼成分や燃焼時副生成物の成分や濃度等に違いがあり、不明な点が多い。エンジン排気中の CO₂ に対するゼオライトの吸着特性は、University of Michigan の Christina D. Reynolds¹³⁾、Vellore Institute of Technology の Saravanan S ら¹⁴⁾、および野内ら¹⁵⁾が報告しているが、何れも CO₂ の脱着特性や回収率までは検討されていない。

2022 年 5 月 27 日受理

* 理工学部 機械工学科

** 大学院 理工学研究科 システム工学専攻

*** 理工学部 物質生命科学科

そこで本研究では、ゼオライトを用いた吸着法によるエンジン排気からの CO₂ 回収の可能性を明らかにすることを目的として、ガソリンエンジンを無負荷で 30 分間駆動した時の排気を想定して、CO₂ 吸着および脱着特性、並びに CO₂ 回収率を実験的に検討した。

2. 供試ゼオライト諸元

本研究に用いたゼオライトの種類は、ゼオライトの中でも細孔径と細孔容積が最大で、単位重量当たりの吸着量が多い、ゼオライト 13X である。ゼオライト 13X の骨格構造を図 1 に示す。ゼオライト 13X は、スーパーケージと呼ばれる直径 1.3 nm のほぼ球状の空間と直径 0.74 nm の窓を 4 つ持つ構造である。また、カチオン（正電荷）を有することから、静電相互作用により、この細孔径以下の分子を選択的に吸着する。なお、実験には、市販の合成ゼオライト（東ソー、F-9）を使用している。形状は球状で、直径が φ 2.36 ~ 4.75 である。

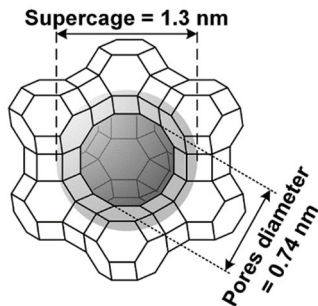


Fig. 1 Skeletal structure of Zeolite 13X

3. 実験装置

実験装置を図 2 に示す。ガス供給部、CO₂ 吸着部、同回収部及びガス分析部から構成される。諸元を表 1 に示す。

試験ガス供給部は、エアコンプレッサと CO₂ ガスボンベから成る。空気と CO₂ の流量を調整して、エンジン排気相当の流量と CO₂ 濃度のガス（模擬ガス）を供給した。

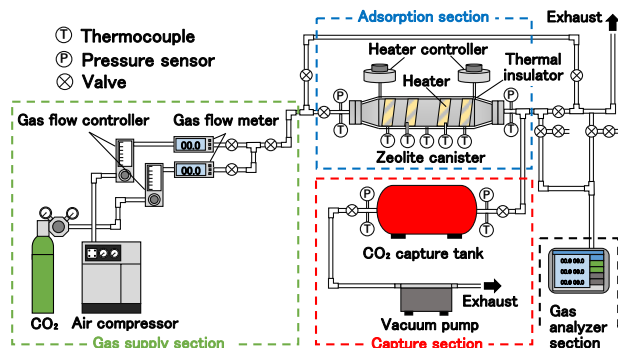


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

CO₂ 吸着部は、ゼオライト 13X を 4.65 kg 封入したステンレス製の容器（内容積 6.5 L）である。このゼオライトの量で、理論上約 665 L の CO₂（気体）が吸着できる¹⁵⁾。また、容器の両端にはゼオライトの粒径よりも小さな網目

を持つ目皿を取り付け、ゼオライトを容器内に保持すると共に試験ガスの通気性を確保した。容器形状の詳細は、既報¹⁵⁾を参照されたい。また、容器外周部には、CO₂ 脱着促進の加熱を行うためにリボンヒータを取り付け、その上から断熱材を巻いている。ゼオライト容器の内部温度を計測するために、T 型熱電対を、先端が容器の丁度中心に来るようにして、200 mm の間隔で 3 ヶ所（上流、中間および下流）に取り付けている。更に、ゼオライト容器の入口と出口側の温度と圧力を計測するために、入口と出口側に其々 T 型熱電対と圧力計を取り付けている。

CO₂ 回収部は、CO₂ 回収タンクと真空ポンプから成る。CO₂ 吸着後に容器内を真空減圧して CO₂ を脱着させる。脱着した CO₂ は CO₂ 回収タンクに導入される。本研究では、真空ポンプ作動時にポンプ出口から脱着した CO₂ が大気放出されるが、最終的には圧縮ポンプ、冷却装置及び液化回収タンクを用いて、その CO₂ も回収する計画である。

ガス分析部は、自動車用排ガス測定器である。CO₂ は非分散型赤外線吸収法、O₂ は電気化学セル法で計測した。実験中のガスサンプリングは連続して行った。

Table 1. Specifications of experimental equipment

Zeolite type	-	Synthetic zeolite, 13X (Tosoh F-9)
Zeolite shape (diameter)	-	Spherical (φ 2.36 – 4.75)
Zeolite canister volume	L	6.5
Zeolite total amount in the canister	kg	4.65
CO ₂ adsorption capacity (ideal)	L	≒ 665
Vacuum pump exhaust flow rate	L/min	7
CO ₂ capture tank volume	L	39

4. 実験方法および条件

4.1 実験方法

実験方法を図 3 に示す。実験は、吸着実験、ゼオライト昇温、脱着実験および空気パージの 4 つの工程に分かれる。実験条件を表 2 に示す。

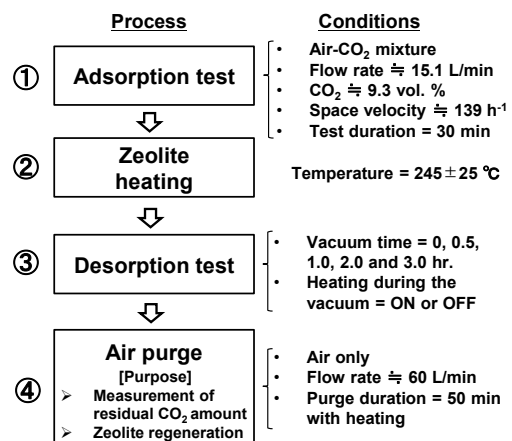


Fig. 3 Test procedure

① 吸着実験

吸着実験では、総ガス流量 15.1 L/min (空間速度 \approx 139 h⁻¹)、CO₂ 濃度 9.3 vol. % の模擬ガスを 30 分間、ゼオライトに流通させた。模擬ガスは、微粒子状物質の排出が少ないガソリンエンジン (排気量 25 cc : ゼオライト容器の 1/260 容積) のアイドリング時 (無負荷, 回転速度 3830 rpm) の排気¹⁵⁾ を想定した。ガス流通時間を長期化すれば CO₂ 吸着量は増加するが、吸着率は低下することがこれまでに分かっている¹⁵⁾。高い吸着率を確保することと、吸着量を飽和させない稼働時間を想定して流通時間は 30 分とした。

② ゼオライト昇温

ゼオライト昇温工程では、CO₂ の脱着を促進させるために、リボンヒータの加熱によりゼオライトの表面温度を上昇させた。目標温度は、メーカー推奨の再生温度¹⁶⁾ を参考として、245 ± 25°C とした。

③ 脱着実験

脱着実験では、ゼオライト容器の入口と出口バルブを閉じて、CO₂ 回収タンクのみと接続した後、真空ポンプにより容器内を真空状態にした。この真空減圧操作によって吸着した CO₂ を脱着することが可能か検討した。更に、減圧時間と減圧中の加熱が脱着特性に及ぼす影響も検討した。

④ 空気パージ

空気パージ工程では、ゼオライト容器の入口と出口バルブを再び開放して、空気を容器に導入して、脱着実験で脱着されずに容器内に残留していた CO₂ を強制的に脱着した。空気流量は、脱着促進のために比較的高流量の 60 L/min とした。パージ時間は、容器出口の CO₂ 濃度がゼロとなるまでの 50 分間とした。パージ中はリボンヒータの最大負荷で加熱した。CO₂ 残留量を求めるために、空気パージ中に、容器出口側 CO₂ 濃度を計測した。計測した容器出口側 CO₂ 濃度の時系列変化から、図積分法を用いて CO₂ 残留量を算出した。空気パージ工程終了後は、ゼオライトが再生されるため、条件を変更して別実験を行った。

Table 2 Experimental conditions

Adsorption test	Total gas flow rate	L/min	\approx 15.1
	Air flow rate	L/min	\approx 13.7
	CO ₂ flow rate	L/min	\approx 1.41
	CO ₂ concentration	vol. %	\approx 9.3
	Space velocity	h ⁻¹	\approx 139
	Adsorption time	min	30
Desorption test	Temperature inside canister at the beginning of the tests	°C	245 ± 25
	Vacuum decompression time	h	0.5, 1.0, 2.0, 3.0
	Heating	-	ON, OFF
Air purge	Air flow rate	L/min	60
	Air purge time	min	50
	Heating	-	ON

4.2 計算方法

① CO₂ 吸着率

CO₂ 吸着率の算出には、ゼオライト容器入口側と出口側の CO₂ 流量を求める必要がある。容器出口 CO₂ 質量流量は、既報¹⁵⁾ の結果から、O₂ と N₂ がゼオライト 13X に殆ど吸着されないと仮定して、式 (1) で定義した。

$$q_{CO_2}(out) = \rho_{CO_2} \left(\frac{C_{CO_2} \cdot Q_{air}(in)}{100 - C_{CO_2}} \right) \quad (1)$$

ここで、 $q_{CO_2}(out)$: 容器出口 CO₂ 質量流量 [g/sec], ρ_{CO_2} : CO₂ 密度 [g/L] (気体@20°C), C_{CO_2} : 容器出口 CO₂ 濃度 [vol. %], $Q_{air}(in)$: 容器入口空気流量 (@20°C) [L/sec] である。容器出口 CO₂ 流出量は式 (2) で定義した。

$$m_{CO_2}(out) = \sum \left\{ \frac{q_{CO_2}(out)_i + q_{CO_2}(out)_{i+1}}{2} \cdot \Delta T \right\} \quad (2)$$

ここで、 $m_{CO_2}(out)$: 容器出口 CO₂ 流出量 [g], $q_{CO_2}(out)_i$: 第 i 番目の容器出口 CO₂ 質量瞬時流量 [g/sec], ΔT : データサンプリング時間間隔 [sec] である。

CO₂ 吸着率は、供給量と流出量から式 (3) で定義した。

$$\eta_{ads} = \left(1 - \frac{m_{CO_2}(out)}{m_{CO_2}(sup)} \right) \times 100 \quad (3)$$

ここで、 η_{ads} : CO₂ 吸着率 [%], $m_{CO_2}(out)$: CO₂ 容器出口流出量 [g], $m_{CO_2}(sup)$: CO₂ 供給量 [g] である。

② CO₂ 脱着量および脱着率

減圧での CO₂ 脱着量は、吸着量 (供給量 - 流出量) から減圧後の残留量を減じて求め、CO₂ 脱着率は脱着量を吸着量で除して求めた。夫々、式 (4) および式 (5) に示す。

$$m_{CO_2}(des) = m_{CO_2}(ads) - m_{CO_2}(res) \quad (4)$$

ここで、 $m_{CO_2}(des)$: 真空減圧による CO₂ 脱着量 [g], $m_{CO_2}(ads)$: CO₂ 吸着量 [g], $m_{CO_2}(res)$: 真空減圧後の CO₂ 残留量 [g] である。

$$\eta_{des} = \frac{m_{CO_2}(des)}{m_{CO_2}(ads)} \times 100 \quad (5)$$

ここで、 η_{des} : CO₂ 脱着率 [%], $m_{CO_2}(des)$: 真空減圧による CO₂ 脱着量 [g], $m_{CO_2}(ads)$: CO₂ 吸着量 [g] である。

③ CO₂ 回収率

CO₂ 回収率は、吸着率と脱着率の積で定義した式 (6)。

$$\eta_{cap} = \eta_{ads} \cdot \frac{\eta_{des}}{100} \quad (6)$$

ここで、 η_{cap} : CO₂回収率 [%], η_{ads} : CO₂吸着率 [%], η_{des} : CO₂脱着率 [%]である。

4.3 実験番号および条件

実験は、真空減圧時間と減圧中の加熱をパラメータとして全7種行った。実験番号に対応する条件を表3に示す。

Table 3 Test number and parameters

Test no.	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Vacuum decompression time [h]	0	0.5	1	2	0.5	1	3
Heating dur. vacuum	-	OFF			ON		

5. 実験結果および考察

5.1 CO₂吸着特性の検討

図4に、模擬ガスをゼオライトに30分間流通させた時の容器入口と出口のCO₂濃度を時間に対して示す。流通開始直後は、出口側CO₂濃度はゼロ付近であり、ほぼ全量が吸着されていることが分かる。しかし、時間の経過と共にCO₂濃度は上昇した。これは、供給したCO₂の量が全ゼオライトの平衡吸着量に到達していなくても、ゼオライトに導入されたCO₂の一部が吸着されずに流出するためである。即ち、CO₂とゼオライト間の静電相互作用の大きさに対して、ガスの空間速度が高過ぎるためと考えられる。

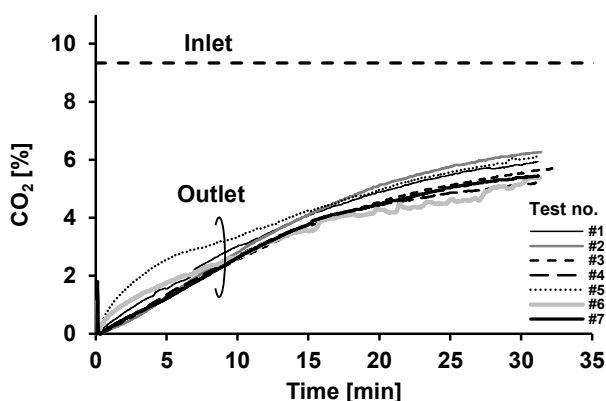


Fig. 4 CO₂ adsorption characteristics

図5に、全実験条件(7種)におけるCO₂投入量(上部)と吸着率(下部)の結果を示す。投入量は平均で80.9 mg, 変動係数は1.2%であった。吸着率は平均で63%, 変動係数は4.3%となった。なお、吸着率の値は既報¹⁵⁾に比べて低下しているが、吸着率の再現性は概ね得られていることから、これ以降の検討には問題ないと判断した。

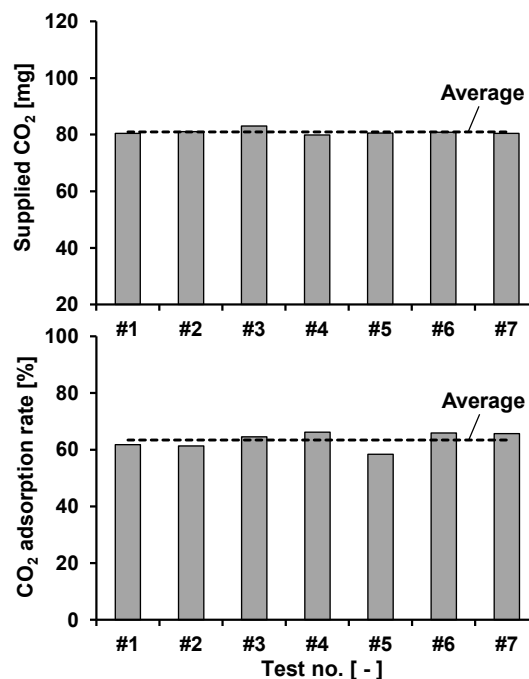


Fig. 5 Amount of supplied CO₂ and CO₂ adsorption rate for all tests

5.2 CO₂脱着特性の検討

次に、吸着されたCO₂を脱着させるために真空減圧を行い、更にその後、空気パージにより脱着しきれなかった残留量を調査した。図6に、真空減圧(減圧中加熱有り)後に空気パージを行った時の容器出口側のCO₂濃度履歴を示す。横軸の0分はパージ用空気の導入開始時であり、線種は真空減圧時間の違いを示している。図6上部を見ると、真空減圧無し時(0 hr)は、空気パージ直後にCO₂濃度が急増し、20%を超えた。これは、多量の残留CO₂が短時間で脱着したためと考えられる。図6下部に、同上部の点線部を拡大して示す。真空減圧によりCO₂濃度は大きく減少し、減圧時間30分でCO₂濃度の最大値は6%程度となった。この結果から、真空減圧によりCO₂を脱着できる事が分かった。図7に、図積分法を用いて求めたCO₂残留量を真空減圧時間に対して示す。真空減圧0時間の残留量は、吸着量と同量と仮定した。残留量は30分で10 mg程度となった。減圧時間を長期化した場合、減圧中の加熱無し時は大きな変化は見られないが、加熱時は減少した。

この理由について考察する。ゼオライト13XのCO₂吸着等温線¹⁷⁾より、温度が上昇するに従い平衡吸着量が減少する。これは、分子の振動が激しくなり、吸着力が低下するためと考えられる。即ち、温度が上昇すると、上昇前の平衡吸着量との差の分だけ吸着できなくなり、脱着すると思われる。また、吸着等温線より、平衡吸着量は雰囲気圧力の低下によっても減少する。図8に、加熱有り減圧3時間と加熱無し減圧2時間における、真空減圧中のゼオライト容器内の圧力(入口出口の平均値)と温度(3ヶ所平均値)の履歴を示す。容器内の圧力は、加熱有りの方が

やや低かったが、減圧時間を増加しても40分以降は両者共にほぼ一定であった。そのため、加熱無しの条件では、減圧時間を長期化しても、脱着量が増加しなかったと考えられる。一方で容器内の温度は、加熱無しでは2時間後に約170℃まで低下したが、加熱有りでは3時間後に約320℃まで上昇した。従って、加熱有りでは、減圧時間長期化による真空圧値の変化は殆ど見られないことから、脱着量が増加した主な理由は、加熱量の増大によるゼオライトの温度上昇と考えられる。なお、脱着現象は吸熱を伴うが、本結果では、脱着による明確な温度低下は見られなかった。これは、脱着量に対して使用したゼオライトの量が多い(熱容量が高い)ことが理由の一つとして考えられる。

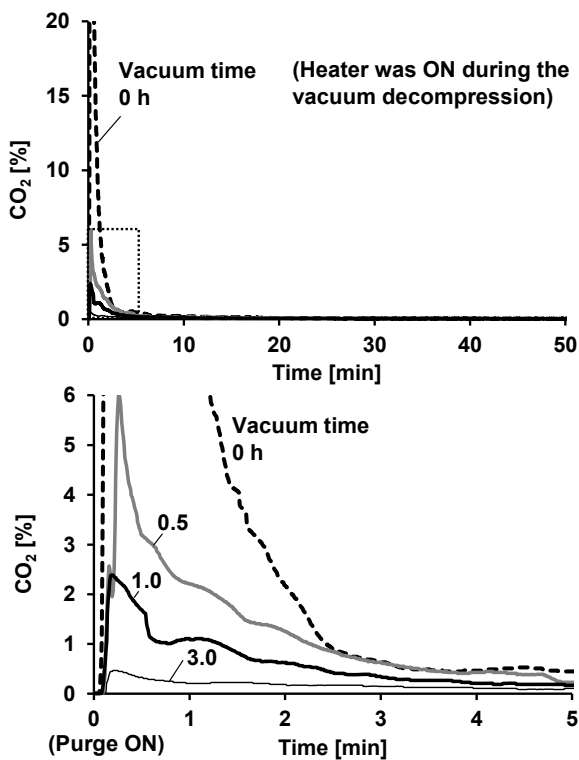


Fig. 6 Residual CO₂ concentration when air-purge (60 L/min) was implemented at different vacuum times

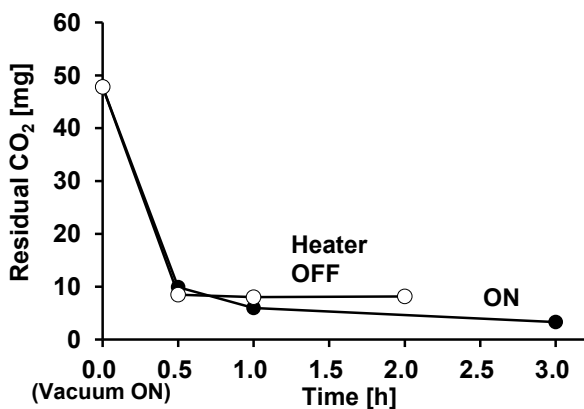


Fig. 7 Influence of vacuum duration and heating on amount of residual CO₂

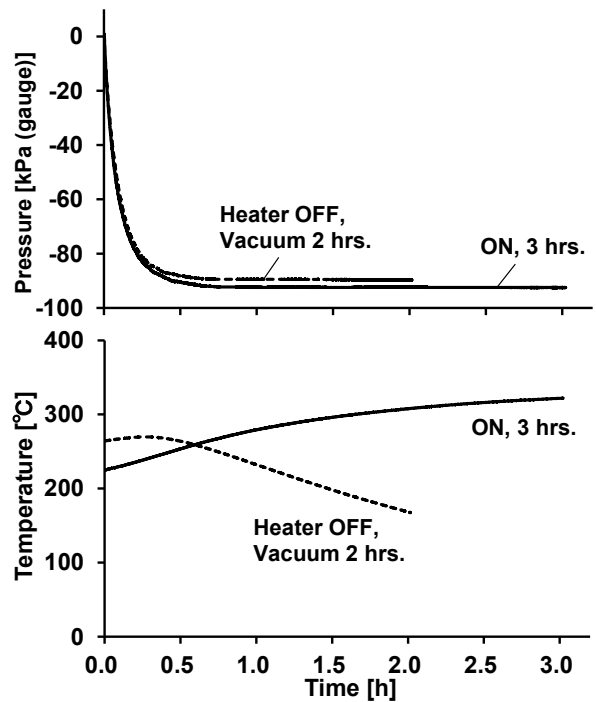


Fig. 8 In-zeolite canister pressure and temperature history during vacuum decomposition

図9に、図7の結果を用いて計算したCO₂脱着率を、真空減圧時間に対して示す。30分で脱着率は約80%に達した。また、真空減圧時間の長期化と減圧中の加熱により、脱着率は改善し、3時間(+加熱)で約90%まで向上した。更に脱着率を向上させるには、更なる減圧や温度の上昇が必要になると思われる。

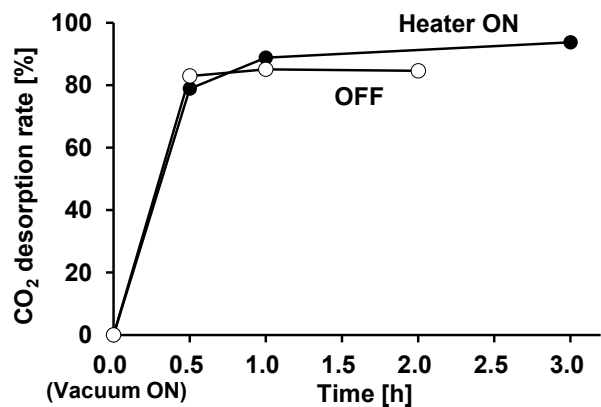


Fig. 9 Impact of vacuum duration and heating on CO₂ desorption rate

5.3 CO₂回収率の評価

これまで示したCO₂吸着率と脱着率の積で求めたCO₂回収率を、減圧時間に対して図10に示す。減圧30分で約50%、1~3時間と加熱により約60%を得た。また、回収率向上には、吸着率と脱着率の両方の改善が必要である。本結果からは、吸着率に改善の余地が大きいといえる。

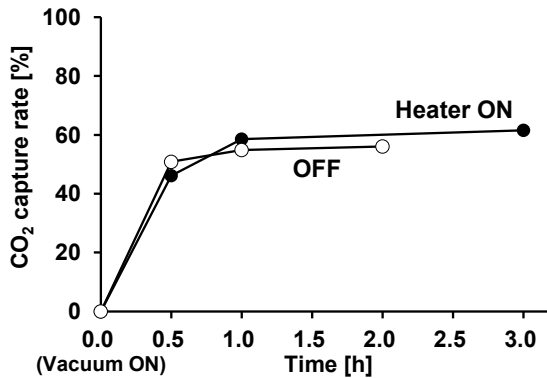


Fig. 10 CO₂ capture rate

6. まとめ

本研究では、ゼオライトを用いた吸着法によるエンジン排気からの CO₂ 回収の可能性を明らかにすることを目的として、CO₂ 吸着および脱着特性、並びに CO₂ 回収率を実験的に検討した。その結果、以下の知見を得た。

模擬ガス (空気・CO₂ 混合ガス, 空間速度: 139 h⁻¹, CO₂: 9.3 %) において、CO₂ の吸着は可能であり、30 分で吸着率約 60 % を達成した。また、ゼオライト容器の真空減圧により吸着した CO₂ を脱着することが可能であり、30 分で脱着率約 80 % を達成した。また、脱着率は、真空減圧時間の長期化と減圧中の加熱により改善し、3 時間の減圧と加熱で脱着率は約 90 % まで向上できた。以上の結果から、CO₂ 回収率は、本研究の範囲では、減圧 30 分で約 50 %, 1~3 時間 (+ 加熱) で約 60 % を得られることが分かった。

吸着率はゼオライト量増大、脱着率は真空圧と加熱量の増大で改善すると考えられ、車載性とエネルギー消費を考慮して、今後、目標 CO₂ 回収率を検討する。また、等ゼオライト量でも容器内のガス拡散促進やゼオライト粒子の小径化でゼオライトと CO₂ の接触時間と面積を増加すれば吸着率改善が期待できる。今後はエンジン排気でも同様に検討するが、排気中の CO, HC 及び NO_x が共吸着となり CO₂ 吸着率の低下が予想される。しかし、これらは三元触媒で酸化又は還元される為、同触媒下流に本装置を設置すれば影響は排除できる。三元触媒が無くてもこれらの成分濃度は CO₂ に比べて低く、影響は小さい可能性がある。

謝辞

本研究は、静岡理工科大学 令和 2 年度グループ研究推進支援費を受けて実施された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1) 藤村俊夫, “自動車の将来動向: EV が今後の主流になりうるのか”, PwC Japan 合同会社, <https://www.pwc.com/jp/ja/knowledge/thoughtleadership/automotive-insight/vol3.html> (参照 2022-3-20)

- 2) 木村修二, 他, “内燃機関搭載車両におけるカーボンニュートラルに向けた技術シナリオの検討”, 自動車技術会 2021 年秋季大会予稿集, No.20216181 (2021)
- 3) 資源エネルギー庁 HP, “エンジン車でも脱炭素? グリーンな液体燃料「合成燃料」とは”, https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/gosei_nenryo.html (2021) (参照 2022-3-20)
- 4) Lee R. Lynd, “Overview and evaluation of fuel ethanol from cellulosic biomass: Technology, Economics, the Environment, and Policy”, *Annu. Rev. Energy Environ*, Vol. 21, pp. 403 - 465 (1996)
- 5) Tadanori Yanai, Geraint Bryden, Shouvik Dev, Graham T. Reader and Ming Zheng, “Investigation of Ignition Characteristics and Performance of a Neat n-Butanol Direct Injection Compression Ignition Engine at Low Load”, *Fuel*, 208 C, pp. 137 - 148 (2017)
- 6) エネルギー総合工学研究所, “図解でわかるカーボンリサイクル”, 技術評論社 (2020)
- 7) Sarah Deutz, et al., “Cleaner production of cleaner fuels: wind-to-wheel - environmental assessment of CO₂-based oxymethylene ether as a drop-in fuel”, *Energy & Environmental Science*, Vol. 11, pp. 331-343 (2018)
- 8) 佐々木旺雅, 他, “実機相当雰囲気における OME-軽油混合燃料の噴霧および燃焼特性”, 日本機械学会論文誌, Vol. 87, No. 895, 20-00361 (2021)
- 9) 小坂英雅, 他, “オキシメチレンジメチルエーテル (OME) 燃料を用いたディーゼルエンジンのエミッション・燃焼特性”, 第 32 回内燃機関シンポジウム, No. 20214840 (2021)
- 10) 藤間剛, “2°C 目標、ネガティブ・エミッション技術として BECCS”, *林業経済*, Vol. 70, No. 9, pp. 22-26 (2017)
- 11) 風間伸吾, “二酸化炭素の回収・貯留および再資源化”, *化学と教育*, Vol. 59, No. 8, pp. 428 - 431 (2011)
- 12) 原伸宜, 高橋浩, “ゼオライト—基礎と応用—, 講談社サイエンティフィク”, 330 p. (1975)
- 13) Christina D. Reynolds, “Decarbonizing Freight Transport: Mobile Carbon Capture from Heavy-Duty Vehicles”, Ph.D thesis of the University of Michigan (2019)
- 14) Saravanan S, et al., “Experimental Investigations on CO₂ Recovery from Engine Exhaust Using Adsorption Technology”, *SAE Technical Paper 2019-28-2577* (2019)
- 15) 野内忠則, 田中金太, 山崎誠志, “ゼオライトを用いたエンジン用 CO₂ 分離・回収システムの研究”, 自動車技術会論文集, Vol.53, No.3, pp. 459 - 465 (2022)
- 16) 富士フィルム和光純薬 (株) HP, “合成ゼオライト・モレキュラーシーブス”, <https://labchem-wako.fujifilm.com/jp/category/01677.html> (参照 2022-03-20)
- 17) 辰巳敬, “機能性ゼオライトの合成と応用 (普及版)”, シーエムシー, p. 210 (1999)