

焼却炉由来の煤塵による CO₂ 固定化における
含水比と反応速度の関係性の実験的評価

早稲田大学 学生会員 ○横井 亨朱, 伊藤 大知
早稲田大学 正会員 小峯 秀雄, 王 海龍, フェロー会員 後藤 茂
(株) ミダック 非会員 鈴木 清彦, 國弘 彩, 疋田 貴大

1. はじめに

脱炭素社会実現に向け、CO₂ 排出量の削減に向けた取り組みが必要である。日本国内 CO₂ 排出量の約 40%を占めるエネルギー転換部門で発電所・石油精製工場等から発生する CO₂ の削減が求められ、さらに産業活動に伴い生じる産業副産物の有効活用は重要な課題である。著者らは遊離 Ca を含む産業副産物による CO₂ 固定化の研究を行い、工場から排出される CO₂ と産業副産物を反応させる CO₂ 固定化用プラント(図 1)を提案している。副産物中の含有水分に遊離している Ca²⁺と、CO₂ と試料の接触によって含有水分に溶出した CO₃²⁻が炭酸化反応により CaCO₃ が生成される。上記の反応で CO₂ が試料に固定化すると考えられる。本論文は副産物の CO₂ 固定化の反応速度と含水比の影響に関する実験的評価を目的として、焼却炉由来の煤塵に対して各目標含水比に調整し、一定流量通気型 CO₂ 固定化試験を実施した。反応収束時間までの CO₂ 固定化量を示す最大反応速度、及びその時の含水比(以降、最大反応速度含水比と記述)を実験的に導出し、さらに経過時間ごとの累積 CO₂ 固定化量を図示することで一定時間あたりの CO₂ 固定化量を示す反応速度を経過時間毎に各含水比で比較した。

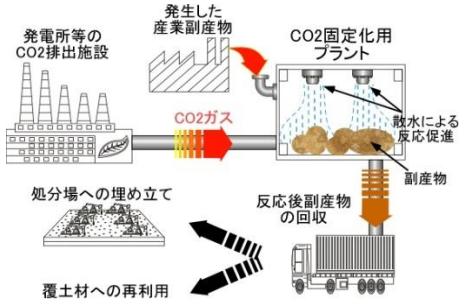


図 1 CO₂ 固定化用プラントの概要

2. 使用した試料と一定流量通気型 CO₂ 固定化試験の概要

本研究では、焼却炉由来の煤塵の一種である煤塵 FC を試料として用いた。本資料は食品の包装袋等で発生するセルロース、ポリプロピレン、ポリエチレンといった端剤、及び有機汚泥、無機汚泥といった排水処理汚泥等を焼却炉にて RPF を固定燃料として焼却した際に発生する煤塵である。表 1 は煤塵 BBF の基本的性質である。Ca²⁺溶出量は環境庁告示第 46 号溶出試験により溶液を作製し、イオンクロマトグラフィーによってイオン濃度を測定した。

表 1 煤塵 FC の基本的性質

土粒子の密度 (g/cm ³)	2.61
試料入手時含水比 (%)	1.37
Ca 含有量 (%)	27.3
Ca ²⁺ 溶出量 (mg/L)	1988
pH	12.52

一定流量通気型 CO₂ 固定化試験(以降、カラム試験と記述)は、円筒カラムに充填した試料に対して実験室内の空気(CO₂ 濃度: 約 400~1000(μL/L))を一定流量で通気し、試料への CO₂ 固定化量を定量評価する試験である。図 2 は試験装置の概略図である。試料が CO₂ を固定化する場合、カラム通気前の CO₂ 濃度: C_{in}(μL/L)に対してカラム通気後の CO₂ 濃度: C_{out}(μL/L)が低下する。その際の CO₂ 濃度差を、送風空気を理想気体とみなすことで CO₂ 質量差に変換し、試料の CO₂ 固定化量とみなす。本試験で使用した CO₂ 測定器の測定範囲は 0~5000(μL/L)であり、測定精度は 30(μL/L)±読み値の 5%である。本試験は CO₂ 濃度を 1 分間隔で測定し、毎分ごとの CO₂ 固定化量を算出、及びその積分値を試料が試験中に固定化した CO₂ 固定化量とする。以下に固定化量算出に用いた式(1)を示す。

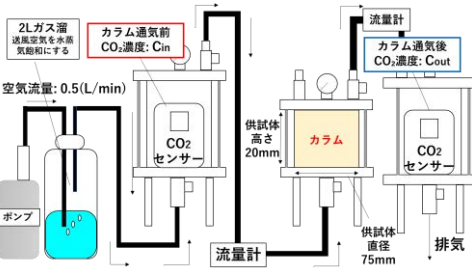


図 2-1 一定流量通気型 CO₂ 固定化試験の概

$$M = \sum_{t=0}^{t=end} \left(V_{in} \times \frac{C_{in} - C_{out}}{10^6} \times \frac{T}{T_t} \times \frac{p_t}{p} \times \frac{M_{CO_2}}{V} \right) \quad (1)$$

M: 試料の CO₂ 固定化量 (g- CO₂), V_{in}: 空気流量(L/min), T: 理想気体の温度(K), P: 理想気体の圧力(Pa), T_t: 時刻 t における温度(K), P_t: 時刻 t における圧力 (Pa), M_{CO₂}: CO₂ の分子量(=44 g/mol), V: 気体 1 mol あたり体積 V(=22.4(L/mol))としている。本論文では M を乾燥質量で割った乾燥質量あたりの CO₂ 固定化量により試料の CO₂ 固定化性能を評価している。

表 2 カラム試験の試験条件

目標含水比 (%)	送風空気	空気流量 (L/min)	供試体寸法 (mm)
試料入手時含水比, 20,30,40,50,60	水蒸気飽和	0.5	75(直径) 20(高さ)

3. 最大反応速度含水比の実験的導出

煤塵 FC を各目標含水比に調整し、カラム試験を行うことで最大反応速度含水比を実験的に導出した。表 2 は試験条件である。試験条件の水蒸気飽和は送風空気をカラム通気前に水へ吹き込み、送風空気を水蒸気で飽和させるという条件である。水蒸気飽和空気を送風することで通気による試料の乾燥を防ぐことができる。供試体寸法はカラムに充填する試料の寸法を示す。試料はカラムの約 10(cm)上方から一定距離で試料を自由落下させながら充填した。

キーワード 地球温暖化 産業副産物 炭酸化反応 反応速度

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 58 号館 203 号室 早稲田大学 地盤工学研究室 TEL 03-5286-2940

図3は通気前CO₂濃度: C_{in}と通気後CO₂濃度: C_{out}の比である C_{out}/C_{in}の経過時間推移である。各含水比における濃度比推移において試験開始時に試料がCO₂を固定化するため、C_{out}がC_{in}を下回り C_{out}/C_{in}が0に近い値となっていることが分かる。試験時間が経過するにつれて C_{out}とC_{in}が同一濃度へと近づき、C_{out}/C_{in}が1に収束することが確認できる。C_{out}/C_{in}が1に収束以降は試料のCO₂固定化反応が終了したと考え、試験を終了させた。

表3は試験結果である。表3より目標含水比60%を除く各含水比において、乾燥質量あたりCO₂固定化量は約0.173[g-CO₂/g-ms]付近に分布していることが分かる。相対的に低含水比の場合は、試験経過に伴い通気による試料の乾燥が早期に進むため、CO₂固定化反応の不完全な箇所が存在すると考えられる。しかし本試験では送風空気を水蒸気飽和条件で実施したため、低含水比においても乾燥が進行せずに十分に水分が保持されたことで乾燥質量あたりのCO₂固定化量が各含水比で同一の値に分布したと考えられる。一方、目標含水比60%での試験では0.120[g-CO₂/g-ms]であり、固定化量が減少していた。含有水分がある一定値域を超えた場合、試料の微細な間隙への空気の通気が含有水分によって阻まれ、CO₂固定化反応の不完全な箇所が存在したことが要因として考えられる。図4は各含水比における反応速度の結果である。図4から含水比30%における反応速度がピークの値として確認でき、煤塵FCにおける最大反応速度含水比が30%であることが分かった。

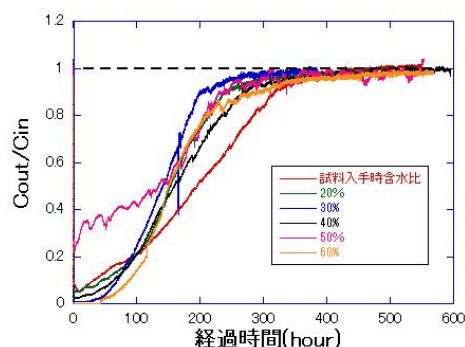


図3 各含水比の試験におけるCO₂濃度推移

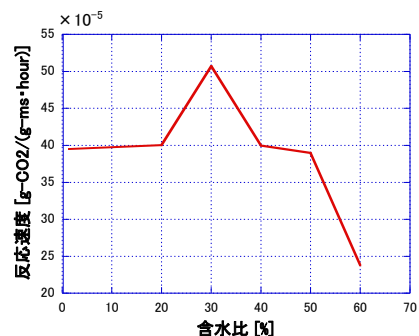


図4 各含水比における反応速度

表3 試験結果

目標含水比 [%]	初期含水比 [%]	試験後含水比 [%]	相対湿度 [%]	CO ₂ 固定時間[hour]	乾燥質量あたりCO ₂ 固定化量 [g-CO ₂ /g-ms]	反応速度 [g-CO ₂ /(g-ms·hour)]
試料入手時含水比	1.368	52.71	91	435.9	0.176	39.51×10 ⁻⁵
20	19.70	42.52	92	431.3	0.173	40.04×10 ⁻⁵
30	27.63	29.52	91	343.1	0.174	50.73×10 ⁻⁵
40	37.49	52.81	91	430.6	0.172	39.96×10 ⁻⁵
50	51.79	42.09	90	445.2	0.173	38.96×10 ⁻⁵
60	54.46	34.34	90	505.1	0.120	23.78×10 ⁻⁵

4. 各含水比における経過時間ごとの累積CO₂固定化量と反応速度

図5は各含水比における経過時間ごとの累積の乾燥質量あたりCO₂固定化量である。コンクリートの中性化深さは $\sqrt{t}$ に比例する^り。そこで図5では $\sqrt{t}$ 法($\sqrt{\text{day}}$)で図示した。図5より各含水比における累積CO₂固定化量は $\sqrt{\text{day}}$ の前半・及び後半では曲線関係となり、その中間では直線関係が確認できた。1($\sqrt{\text{day}}$)までは各含水比において累積CO₂固定化量は同等であるが、以降は最大反応速度含水比30%が他含水比よりも常に累積CO₂固定化量が最大であった。よって最大反応速度含水比は一定時間あたりCO₂固定化量を示す反応速度においても最大となることが分かった。最大反応速度含水比においても反応収束付近である0.16(g-CO₂/g-ms)から0.17(g-CO₂/g-ms)までに反応時間全体の半分を要する。よってプラントへの運用を考慮した際に試料を最大反応速度含水比に調整し、かつ累積固定化量が最大固定化量の9割程度まで反応が進み次第試料を交換する方法が高効率なCO₂固定化として期待される。

5. 結論

各目標含水比でのカラム試験の結果より、煤塵FCはCO₂固定化用プラントにおいて効率的にCO₂を固定化するための含水比調整を行うことができ、プラントへの活用が見いだせた。さらに一定時間あたりCO₂固定化量を示す反応速度も最大反応速度含水比が最大の反応速度を常に示すことが示唆された。 $\sqrt{t}$ 法で整理した際の累積乾燥質量あたりCO₂固定化量が双曲線関数 $\tanh x$ のような対称性が見られたため、今後は実験データと双曲線関数の近似を試みる予定である。

参考文献

- 1) 魚本健人, 高田良章: コンクリートの中性化速度に及ぼす要因, 土木学会論文集 V-17, 1992,8

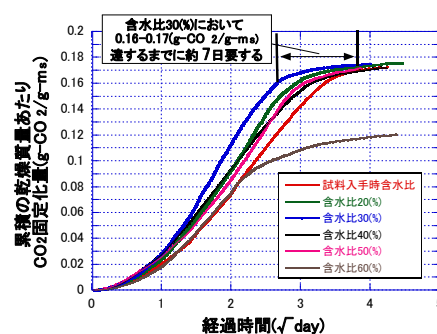


図5 各含水比における経過時間ごとの累積乾燥質量あたりのCO₂固定化量