

◇報告◇

CO₂分離回収技術に関する研究
～セメントキルン排ガスからのCO₂回収小規模実証試験～

Study on CO₂ Separation and Capture Technology
～Small Scale Demonstration Test of CO₂ Capture
from Cement Kiln Exhaust Gas～

千葉 裕己*, 太田 亨*,
和泉 一志**

CHIBA, Yuki*; OTA, Toru*;
IZUMI, Kazushi**

要 旨

既存工程への影響が小さく且つ工場への導入障壁が低いことが期待される, 化学吸収法と呼ばれるCO₂回収技術を採用し, 2019年1月より, 当社藤原工場に小規模テストプラントを導入し, 実排ガスを対象としてCO₂回収実証試験を実施している. 当試験を通じて安定した高純度CO₂ガスの回収性能が確認され, 化学吸収法が当社のキルン排ガスへ適用可能であることを実証した. また, CO₂回収性能はプラント操業条件による影響が課題であることが判明した. 今後のスケールアップ実証に向け, 排ガス性状の影響推定および操業条件の最適化など更なる調査を行う.

キーワード: CO₂排出削減, CO₂分離回収, 化学吸収法, セメント工場, キルン排ガス

*中央研究所 第1研究部 環境技術チーム

Environmental Technology Team, R&D Department I, Central Research Laboratory

**中央研究所 CO₂リサイクル技術グループ 回収技術チーム リーダー

Manager, Capturing Technology Team, CO₂ Recycling Technology Group, Central Research Laboratory

ABSTRACT

A chemical absorption technology was adopted for its simplicity and ease of operation and placed in the Fujiwara plant for the small-scale trials. Demonstration trials have been carried out to evaluate the performance of CO₂ separation and capture from cement kiln exhaust gas since January 2019.

Through the trials, stable CO₂ capture performance and recovery of high-purity CO₂ gas were verified, which demonstrated the applicability of the chemical absorption technology to the cement kiln exhaust gas generated in our existing cement plants.

As it was also found that some components in the kiln exhaust gas degraded the CO₂ capture performance, effects of minor components in the kiln exhaust gas on the CO₂ absorption performance and the optimal operation conditions for effective CO₂ recovery should be studied at future scaled-up trials.

Keywords : CO₂ emissions reduction, CO₂ separation and capture, Chemical absorption, Cement plant, Kiln exhaust gas

1. はじめに

2015年12月に採択されたパリ協定を踏まえ、日本では、地球温暖化対策のための長期的な温室効果ガスの削減目標として、2050年までに二酸化炭素(CO₂)ネット排出量ゼロ(カーボンニュートラル)とする方針を掲げている。

気候変動による環境影響が顕在化する中、パリ協定の掲げる「2℃目標の達成」のため、地球温暖化の原因となる人為起源のCO₂排出削減が世界規模で求められており、CO₂の分離・回収、貯留を行うCCS(Carbon dioxide Capture and Storage)は、気候変動の緩和技術として期待されている。

日本では環境省の「環境配慮型 CCS 実証事業¹⁾」(Fig. 1)において、CCSの各種技術の確立を目指している。このプロジェクトは2016~2020年度までの5年間において実施され、国内での円滑なCCS導入に向けCO₂回収設備の運用性等に関する知見を取得することを目指すものである。

当社はこのプロジェクトに2018年から参画し、化学吸収法と呼ばれるCO₂回収技術を採用し、2019年1月より太平洋セメント株式会社藤原工場に小規模テストプラントを導入してセメントキルン排ガスへの適用を確認するための実証試験を実施している。

2. 化学吸収法(燃焼後回収方式)について

セメント製造では、1,450℃という高温での焼成が必要であること、焼成過程の化学反応により原料である石灰石が脱炭酸(CaCO₃→CaO+CO₂)することなどから、製造過程で多量のCO₂が発生する。セメント製造に伴い発生するCO₂は、約35%がエネルギー、約55%が原料の脱炭酸、約10%が電力使用によるものであり、主原料である石灰石からの発生が半分以上を占める。

CO₂を分離・回収する技術には化学吸収法、物理吸収法、深冷分離法、ケミカルルーピング法²⁾などがあるが、本実証試験では、燃焼後回収方式である化学吸収法を採用した。アミン系吸収液が持つ優れたCO₂吸収・脱離の特性を利用した技術であり、他方式に比べ大容量・低圧ガスからのCO₂分離・回収に適していること、既存のセメント製造プロセスに影響を及ぼさないことが特徴である。既に、国内外で多くの研究開発^{3)~7)}が取組まれているが、国内ではセメントキルン排ガスへの適用を検討した例はない。

3. 小規模実証試験

3.1 概要

セメントキルン排ガスからのCO₂分離・回収実証試験の概要をFig. 2に示す。本実証試験の課題は以下である。

- (1) セメントキルン排ガスからのCO₂回収における化学吸収法適用性の検証
- (2) セメントキルン排ガスに含まれるSO_x, NO_x, HCl等が, アミン系吸収液に及ぼす影響およびCO₂回収効率等の確認
- (3) スケールアップに向けたCO₂分離・回収に関する知見の蓄積, 課題の抽出

本実証試験では, 当社藤原工場(三重県いなべ市)5号キルンの最終排ガスを対象とした。選定理由としては, リサイクル原燃料の使用率が高くセメント製造特有の排ガスが得られやすいこと, 排ガス集塵

システムにバグフィルター(BGF)を用いているため実証プラントへのダストの影響が少ないことなどが挙げられる。

実証試験では, BGF出口排ガスの一部を煙道からテストプラントに導入し, ガスおよびアミン系吸収液をサンプリングして分析するとともに, テストプラントの運転データを収集した。プラントからの排出ガスは煙道へ戻し, 排ガストレン水は排出後工場内で適正に処理した。

3.2 セメントキルン排ガスの組成

Table 1に藤原工場5号キルンの煙道入口排ガスのガス組成を示す。この組成をもとに, テストプラントの詳細仕様を決定し, 設計・製作を行った。

なお, 排ガス中のSO_x濃度が低い(0.5volppm未満)ことを考慮し, 本実証試験のテストプラントの中に脱硫装置は組み込まなかった。

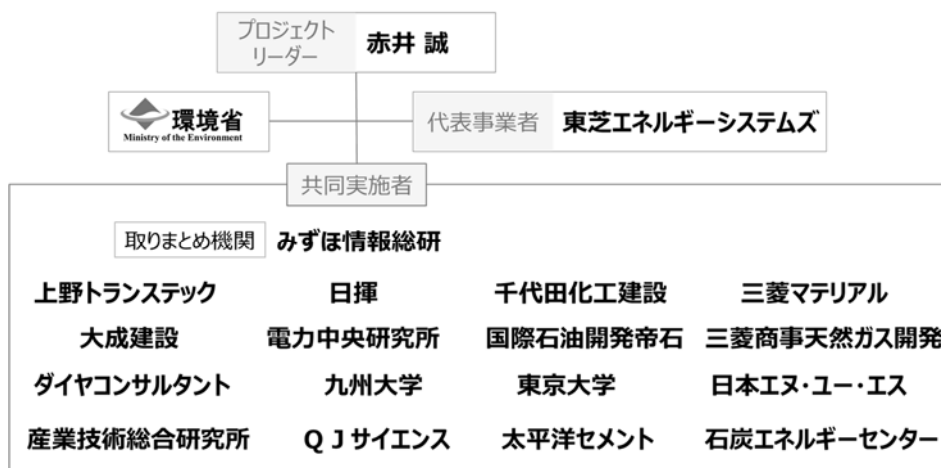


Fig. 1 Sustainable CCS Project Organization hosted by Ministry of the Environment (環境配慮型 CCS 実証事業の実施体制)

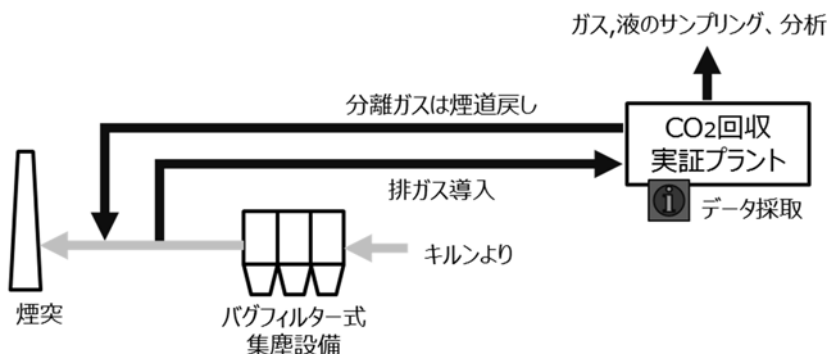


Fig. 2 Schematic diagram of the CO₂ capture test (本実証の概要)

Table 1 Cement kiln exhaust gas composition
(セメントキルン排ガス組成)

ガス温度 (°C)	ダスト量 (g/Nm ³)	O ₂ (vol%)	CO (vol%)	CO ₂ (vol%)	H ₂ O (vol%)	SO _x (volppm)	NO _x (volppm)
110~120	~0.002	10~12	0.12~ 0.25	16~19	7~13	~0.5	~380

Table 2 Fundamental specifications of the CO₂ capture test plant
(CO₂分離回収実証プラントの基本仕様)

項目	仕様
排ガス処理量	4m ³ /h (可変)
CO ₂ 回収量	20kg-CO ₂ /d
装置サイズ	W3850×D1700×H3300 (トラック可搬仕様)

3.3 テストプラントの仕様

テストプラントの基本仕様を Table 2 に、外観を Fig. 3 に、機器の構成を Fig. 4 に示す。煙道からセメントキルン排ガスを分取し、排ガスクーラー前段およびクーラーによる冷却(5~20°C)でドレン水(L1, L2)を除去した後のガス(G2)を吸収塔に導入する。吸収塔ではガスと吸収液が向流で接触し、吸収液にCO₂が吸収され、CO₂以外のガス(G3)は煙道に戻す。CO₂含有量が多い吸収液(以下リッチ液:L3)は熱交換器を通して再生塔に導入し、再生塔の下部に設置した加熱ヒーターによってリッチ液を所定の温度に加熱することでCO₂を脱離させCO₂濃度の高いガス(G4)が回収される。本実証試験では、回収CO₂は貯蔵を行わず煙道に戻している。CO₂含有量が少ない吸収液(以下リーン液:L4)は再び吸収塔に戻し循環利用する。CO₂を脱離させるための加熱には、通常は蒸気が用いられる^{3)~6)}が、本実証試験では電気ヒーターを用いた。



Fig. 3 CO₂ capture test plant
(CO₂分離回収プラント)

4. 試験方法

4.1 使用したCO₂吸収液

実証試験では、以下の2種類のアミン系吸収液を使用し、吸収液の種類の違いによるCO₂吸収性能を比較した。

- (1) アミン系高性能吸収液(以下、高性能吸収液)
- (2) 30wt%モノエタノールアミン水溶液(以下、MEA)

4.2 運転条件

実証試験において操作した運転条件を Fig. 5 に示すが、それぞれの運転条件は独立して制御することが可能である。インプットCO₂量に関する排ガス量、CO₂回収率や回収量に関する吸収液流量および再生塔温度を操作した。排ガス量は4.0~8.0m³/h、吸収液流量は60~120L/h、再生塔温度は110~115°Cにそれぞれ制御し、CO₂回収特性への影響を確認した。なお、再生塔内の圧力設定は絶対圧200kPaで固定とし、リッチ液加熱時のCO₂脱離反応の安定化を図った。

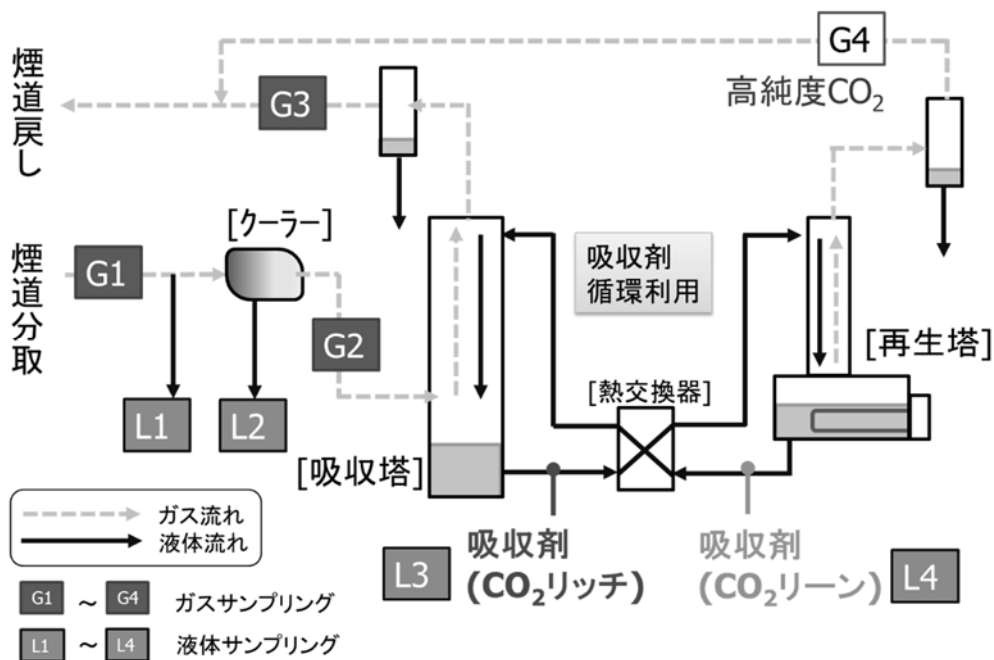


Fig. 4 Gas and liquid flows in the CO₂ capture test plant (CO₂分離回収プラント内のガス・液体のフロー)

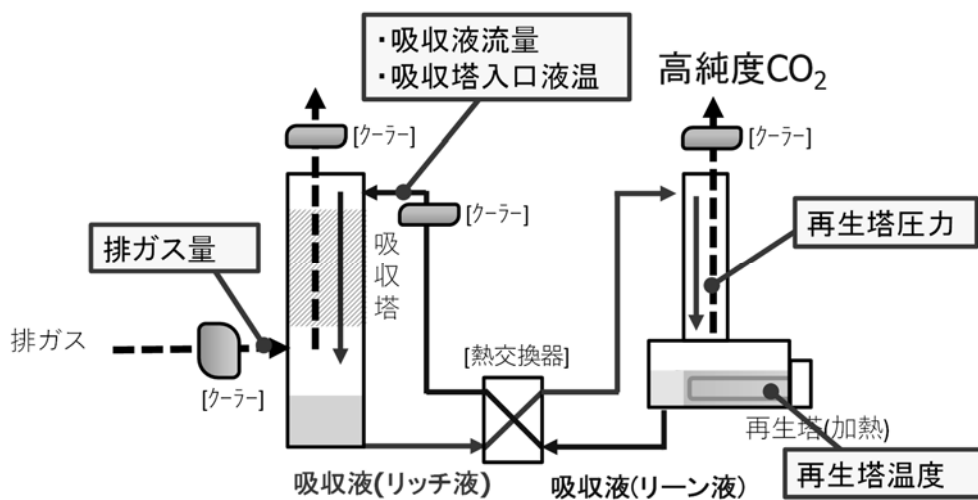


Fig. 5 Operating conditions of the CO₂ capture test plant (プラントの運転条件)

4.3 測定項目

テストプラントの各所に設置したガス流量計およびCO₂濃度計により、吸収塔入口ガス(G2)、吸収塔出口ガス(G3)および再生塔出口ガス(G4)の流量およびCO₂濃度の連続データを収集し、式[1]-[4]によりCO₂回収プラントのCO₂バランスを算出するとともに、CO₂回収量およびその回収率を評価した。

$$G2_CO_2 = C_{at-in}/100 \times V_{at-in} \times 44 \times 24/22.4 \quad [1]$$

$$G3_CO_2 = C_{at-out}/100 \times V_{at-out} \times 44 \times 24/22.4 \quad [2]$$

$$G4_CO_2 = C_{st-out}/100 \times V_{st-out} \times 44 \times 24/22.4 \quad [3]$$

$$G4/G2_CO_2 = G4_CO_2/G2_CO_2 \quad [4]$$

ここで、

G2 吸収塔入口ガスCO₂量(kg/d)

C_{at-in}: 吸収塔入口ガスCO₂濃度(vol%)

V_{at-in}: 吸収塔入口ガス流量(Nm³/h)

G3 吸収塔出口ガスCO₂量(kg/d)

C_{at-out}: 吸収塔出口ガスCO₂濃度(vol%)

V_{at-out}: 吸収塔出口ガス流量(Nm³/h)

G4 再生塔出口ガスCO₂量(kg/d)

C_{st-out}: 再生塔出口ガスCO₂濃度(vol%)

V_{st-out}: 再生塔出口ガス流量(Nm³/h)

G4/G2 吸収塔入口ガスCO₂量に対するCO₂回収量の比率(%)

また、実証試験で得られた再生塔出口ガス(G4)およびCO₂吸収液(L3, 4)のサンプリングを行い、Table 3に示す項目について下記の方法により定量分析した。

- ① CO₂濃度(G4)
直接捕集-ガスクロマトグラフ(TCD)法により、CO₂濃度を測定した。
- ② HCl濃度(G4)
JIS K0107 7.1イオンクロマトグラフ法に準拠して、HCl濃度を測定した。

- ③ SO_x濃度(G4)
JIS K0103 7.1イオンクロマトグラフ法に準拠して、SO_x濃度を測定した。
- ④ NO_x濃度(G4)
JIS K0104 7.3イオンクロマトグラフ法に準拠して、NO_x濃度を測定した。
- ⑤ MEA濃度(L3~4)
キャピラリー電気泳動(CE)により、MEA濃度を測定した。
- ⑥ SO₃²⁻濃度(L3~4)
イオンクロマトグラフ法により、SO₃²⁻濃度を測定した。
- ⑦ SO₄²⁻濃度(L3~4)
JIS K0102:2019 41.3イオンクロマトグラフ法に準拠して、SO₄²⁻濃度を測定した。
- ⑧ NO₃⁻濃度(L3~4)
JIS K0102:2019 43.2.5イオンクロマトグラフ法に準拠して、NO₃⁻濃度を測定した。
- ⑨ NO₂⁻濃度(L3~4)
JIS K0102:2019 43.1.2イオンクロマトグラフ法に準拠して、NO₂⁻濃度を測定した。
- ⑩ Cl⁻濃度(L3~4)
JIS K0102:2019 35.3イオンクロマトグラフ法に準拠して、Cl⁻濃度を測定した。

5. 実証試験の結果

5.1 CO₂回収プラントの特性把握

運転条件の及ぼす影響調査および課題解決に向けCO₂回収プラントの操業上の課題抽出を実施した。再生塔の温度が高い場合、リーン液流量(吸収液/排ガス比)を増加させた場合には、CO₂回収量および回収率は向上するものの、再生塔内の液面レベルの変動が大きくなりCO₂回収プラントの運転が不安定になることが確認された。この運転の不安定化は、吸収塔から再生塔へ送液するリッチ液流量を適正化することにより解消することができた。

Table 3 Analyzed samples and measurement items
(サンプリング対象と測定項目)

	No.	対象	測定項目
ガス	G2~3	吸収塔入口・出口ガス	CO ₂
	G4	再生塔出口ガス	CO ₂ , HCl, SO _x , NO _x ,
液体	L3~4	リッチ液・リーン液*	MEA, SO ₃ ²⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , Cl ⁻

* : MEA 水準の試験で測定

また、吸収塔に送液される吸収液の温度(以下、吸収塔入口液温)とCO₂回収特性との関係を調査した結果、特定の温度域(高性能吸収液: 30~35℃, MEA: 25~30℃)でCO₂回収量および回収率が極大となることがわかった。

リーン液流量および吸収塔入口温度などの操作条件を最適化することにより、4m³/hのセメントキルン排ガスより約20kg/dのCO₂を回収することができ、設計どおりの性能が確認された。

5.2 連続運転によるCO₂回収性能評価

前述のとおり適性化された条件により、Table 4に示す条件で連続運転した場合の性能評価および安定運転の可否を調査した。安定したCO₂回収が可能であった条件、すなわち排ガス量4m³/h、再生塔温度110℃、リーン液流量60L/hの条件を基本条件とした。CO₂吸収液に高性能吸収液およびMEAを使用した場合の基本条件が、それぞれ#1-1および#2-1に対応する。

高性能吸収液使用条件下では、基本条件(#1-1)に対してリーン液流量のみを120L/hに増加させた条件#1-2、リーン液流量を120L/hとし再生塔温度を115℃に高めた条件#1-3に加え、さらに排ガス処理量を8m³/hまで増加させた条件#1-4でCO₂分離・回収実験を実施した。MEA使用条件下では、基

本条件(#2-1)でのデータを収集した後、排ガス処理量を8m³/h、再生塔温度を115℃、リーン液流量を120L/hとした条件で、1週間(#2-2)および2週間(#2-3)の延べ3週間程度の連続運転を実施した。なお、#2-2および#2-3の連続運転の後に、操作条件をMEAの基本条件(#2-1)に戻してMEAのCO₂吸収性能(回収率)に変化がないかを確認した。

回収率および回収量の連続データの一例として、#1-1における結果をFig. 6に示す。1週間にわたる連続試験期間中、回収率は86~92%、回収量は23~

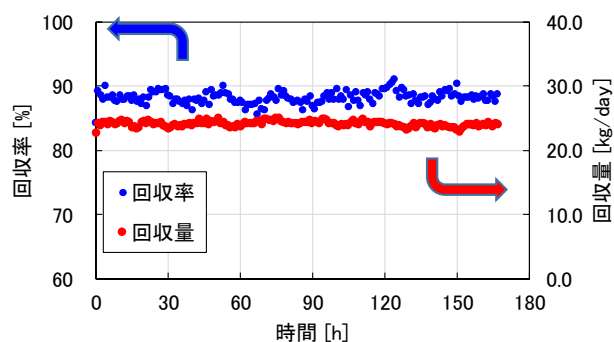


Fig. 6 Changes of CO₂ capture rate and CO₂ volume during the continuous operation #1-1
(連続運転(#1-1)における回収率・回収量の推移)

Table 4 Operation conditions of the CO₂ capture test
(実証試験の水準)

水準	運転期間	吸収液	排ガス量	再生塔温度	リーン液流量	吸収塔入口液温
			(m ³ /h)	(℃)	(L/h)	(℃)
#1-1	1週間	高性能吸収液	4	110	60	30~35
#1-2	1週間	高性能吸収液	4	110	120	30~35
#1-3	1週間	高性能吸収液	4	115	120	30~35
#1-4	2週間	高性能吸収液	8	115	120	30~35
#2-1	3日間	MEA	4	110	60	25~30
#2-2	1週間	MEA	8	115	120	25~30
#2-3	2週間	MEA	8	115	120	25~30

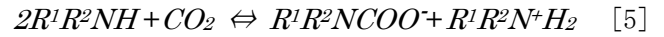
25kg/dの範囲で推移し、テストプラント内のCO₂バランスを計算した結果(Fig. 7), 高性能吸収液に吸収されたCO₂のほぼ全量(24kg/d)が回収できたことを確認した。

試験を行ったすべての水準におけるCO₂の分配および回収率をFig. 8にまとめて示すが、テストプラントの運転条件の操作により以下の知見が得られた。

- 1) リーン液流量を120L/hに増加させ、再生塔温度を115℃に高めた(#1-3)ことにより、連続運転期間中に高いCO₂回収率(95%前後)を維持した。
- 2) 上記の条件で、排ガス量を倍の8m³/hとした高負荷条件(#1-4, #2-2, #2-3)とすることで、基本性能(20kg/d)を上回るCO₂を回収することができた。しかし、MEA使用条件では運転中にCO₂回収率および回収量が漸減する傾向が認められた。
- 3) 同一運転条件で比較すると、MEAに比べ高性能吸収液のほうがCO₂回収特性に優れることが示された。
- 4) 連続実証運転を行ったすべての水準でテストプラントの安定運転が確認された。
- 5) 連続運転におけるテストプラントの安定性については、これまで延べ2,200時間にわたる安定操業を確認した。

上記2)のMEA使用時におけるCO₂回収率および回収量の漸減については、以下のように推察する。既

往知見⁷⁾より、アミンのCO₂吸収/脱離の主な反応機構として、アミン化合物とCO₂が結合したカルバメートの生成/CO₂脱離反応(式[5]), アミン化合物および水分子との反応による重炭酸イオン(HCO₃⁻)の生成/CO₂脱離反応(式[6])が提唱されている。



ここで、

R^1, R^2 : 置換基

$R^1R^2NCOO^-$: カルバメート

$R^1R^2N^+H_2$: プロトン化アミン

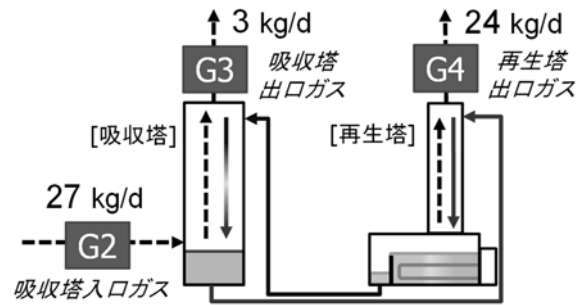


Fig. 7 CO₂ balance during the high performance absorbent operation #1-1 (高性能吸収剤を用いた時(#1-1)のCO₂バランス)

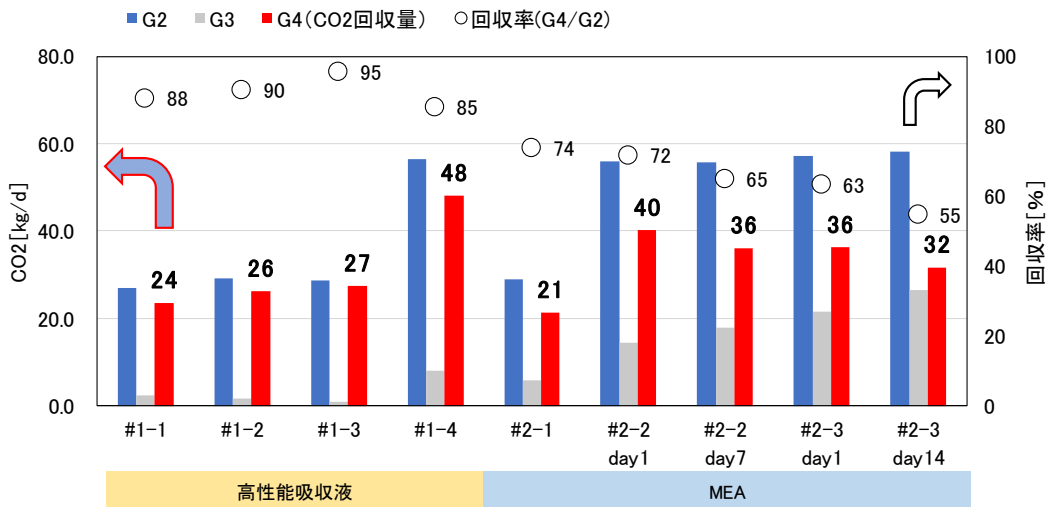


Fig. 8 CO₂ distribution and capture rate by plant operation condition (daily average) (操業条件ごとのCO₂の分配および回収率(日間平均))

1級アミンであるMEA化合物(**Fig. 9**)の場合はカルバメート生成による反応(式[5])が支配的とされる。MEAはCO₂との反応性が高く優れた吸収能力を有する一方、その反応熱が大きいため、カルバメートのCO₂脱離反応に多大なエネルギーを要する点が短所である。CO₂吸収剤にMEAを用い、排ガス処理量を8 m³/h、再生塔温度を115℃、リーン液流量を120L/hとした条件(#2-3)により得られたCO₂バランス(**Fig. 10**)から、同条件におけるCO₂吸収量(G2-G3)に対してCO₂脱離量(G4)が低下する傾向が認められた。上述の通り、MEAがCO₂脱離速度の遅いカルバメートを生成するため、排ガス処理量が多い場合にはリーン液中のMEA濃度が低下し、CO₂回収量および回収率を悪化させたと考えられる。

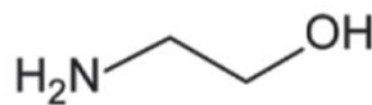


Fig. 9 Molecular structure of monoethanolamine (モノエタノールアミンの分子構造)

#2-3の条件におけるCO₂回収率の低下が排ガス処理量の増加による一時的な現象であるならば、基本条件(#2-1)に戻したときのCO₂回収率は74%に近い結果が得られるはずである。MEAを継続使用し連続運転(#2-2, #2-3)後に基本条件に戻した場合のCO₂回収率を#2-1の回収率とともに**Fig. 11**に示す。**Fig. 11**の結果が示すとおり、延べ600時間程度の試験後のCO₂回収率の低下はわずかであった。このことから、**Fig. 8**で述べたCO₂回収率の低下は高負荷条件(排ガス処理量を増加)によるCO₂バランスが影響しているものと推察する。

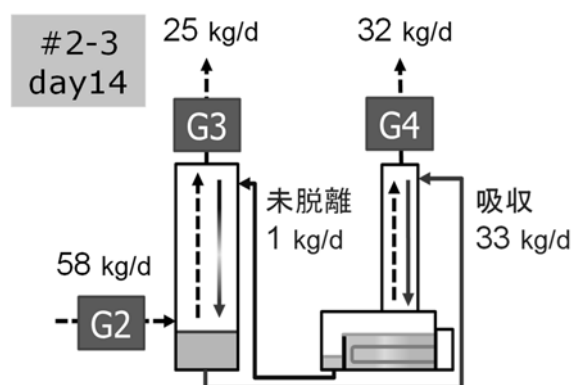


Fig. 10 CO₂ balance during the MEA absorbent operation #2-3 (MEA 吸収剤を用いた時 (#2-3) のCO₂ バランス)

5.3 酸性ガス成分の吸収液への影響

セメントの中間製品であるクリンカは1,450℃という高温で焼成されるが、その際に多量のサーマルNO_xが生成する。前掲の**Table 1**にセメントキルン排ガスの組成を示したが、セメントキルン排ガスには、火力発電所など他産業で発生する排ガスと比べて顕著に高い濃度でNO_x成分が含まれる。既存のCO₂回収プラントでは排ガス中のSO_x成分は前処理装置(主にアルカリスクラバーによるガス洗浄)により除去することができるが、NO_x成分はこのアルカリスクラバーで除去することは困難である。したがって、セメントキルン排ガスの場合には、特にNO_x成分によるアミン系吸収液の劣化が懸念される⁸⁾。

CO₂吸収液にMEAを用いた連続運転(#2-2)後の基本条件による運転で得られたMEAリッチ液およびMEAリーン液のMEA濃度およびその他の成分分析結果を**Table 5**に示す。硫酸イオン(SO₄²⁻)、亜硫酸イオン(SO₃²⁻)、塩素イオン(Cl⁻)濃度はいずれも検出限界未満であったが、硝酸イオン(NO₃⁻)および亜硝酸イオン(NO₂⁻)が、それぞれ80および10mg/L定量

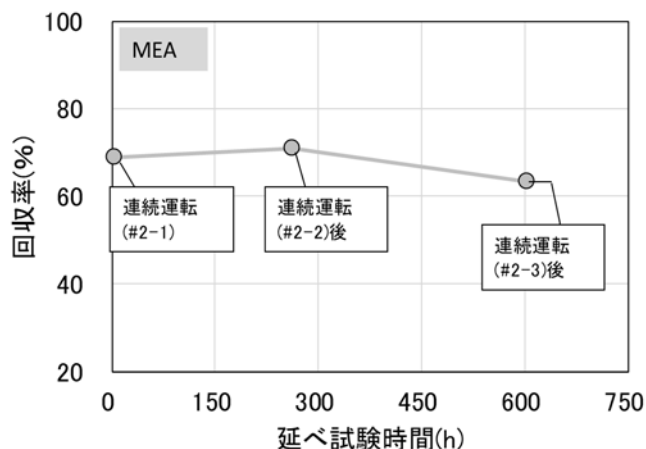


Fig. 11 Change of CO₂ capture rate with time (CO₂ 回収率の経時変化)

Table 5 Composition in the MEA absorbent after 240 hours of operation
(240h 運転後吸収液中の成分)

使用吸収液	MEA	SO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Cl ⁻	(回収率)
	(%)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(%)
MEA (リッチ液)	29	<50	<50	80	10	<10	(78)
MEA (リーン液)	30	<50	<50	80	10	<10	-

Table 6 Composition of the captured gas
(回収したガスの組成)

使用吸収液	CO ₂	SO _x	NO _x	HCl
	(vol%)	(volppm)	(volppm)	(volppm)
MEA	98.4	<3	14	<2

された。セメントキルン排ガス中に含まれている NO_x が MEA に溶解したものと考えられるが、240h の連続運転の後の CO₂ 回収率は 70% 以上を維持していたことから、少なくとも基本条件の運転では MEA の CO₂ 吸収性能に影響しないものと思われる。Table 6 に回収したガスの組成分析結果を示すが、CO₂ 濃度は 98.4 vol% であり、本研究の実証試験により高濃度の CO₂ ガスを回収することができた。酸性ガス成分については、SO_x および HCl はいずれも検出限界未満の濃度であったが、NO_x は 14 volppm 定量された。再生塔でのリッチ液の加熱により CO₂ とともにリッチ液から脱離されたと推察される。

6. まとめ

化学吸収法によるセメントキルン排ガスからの CO₂ 分離・回収実証試験を実施した。その結果で得られた知見を以下に記す。

- 1) 化学吸収法を用いて排ガスから CO₂ を分離し、安定して高濃度で回収することができた。
- 2) 延べ 2,200 時間の CO₂ 分離・回収プラントの安定操業および性能維持を確認した。
- 3) CO₂ 吸収液にモノエタノールアミン(MEA)を用いた場合、プラント操業時の高負荷条件による CO₂ 回収率の低下が確認された。
- 4) セメントキルン排ガス中に含まれる微量ガス成分の影響については引き続き調査を進める。

セメントキルン排ガスを対象とした CO₂ 分離・回収試験により、アミン系吸収液を用いた化学吸収法の適用可能性が実証できた。また、CO₂ 分離・回収プラントの各操業条件による影響を確認し、効率的な CO₂ 回収の知見が得られた。しかしながら、小規模テストプラントの操業実績から CO₂ 分離・回収エネルギーを評価することは難しく、特に CO₂ 脱離には大きなエネルギーを要することから、スケールアッププラントでの評価と最適化が必要である。

今後、実用化に向けた実証設備のスケールアップを検討している。エネルギー効率の評価が可能で CO₂ の有効利用の実証も可能な、10 t-CO₂/d 規模のパイロットスケールの CO₂ 回収実証試験を 2021 年に予定している。これらの実証に取り組むことによって、より積極的な CO₂ 排出低減への可能性を検証していく。

謝 辞

本実証試験は環境省事業「環境配慮型 CCS 実証事業」の一環として実施した。

参考文献

- 1) 環境省. 環境省の CCUS 事業について. CCUS の早期社会実装会議(第2回), 資料1-2. 2020.
<https://www.env.go.jp/earth/ccs/ccus-kaigi/ccus.html> (accessed 2020-12-21)

- 2) 環境省. 国内外の技術動向調査. 平成25年度シヤトルシップによるCCSを活用した二国間クレジット制度実現可能性調査委託業務報告書(資料1/3). 2014, p. 3-73.
https://www.env.go.jp/earth/ccs/h25_report.html (accessed 2020-12-21)
- 3) 北村英夫, 江上法秀, 大橋幸夫. 石炭火力発電所排ガスからのCO₂分離回収パイロットプラント試験. 東芝レビュー. 2010, 65(8), p. 31-34.
- 4) 新日鉄住金エンジニアリング. ESCAP[®] (Energy Saving CO₂ Absorption Process) ~高性能CO₂回収装置~. 新日鉄住金エンジニアリング技報. 2014, 5, p. 73-74.
- 5) 平田琢也, 岸本真也, 乾 正幸, 辻内達也, 島田大輔, 川崎晋平. 排ガスからのCO₂回収装置の当社実績と最近の取組み. 三菱重工技報. 2018, 55(1), p. 42-47.
- 6) 奥野真也, 中村至高, 濱田行貴, 高野健司, 松山俊哉. シミュレーション技術を利用したCO₂分離・回収装置の設計. IHI技報. 2018, 58(2), p. 41-46.
- 7) 寺西 慶, 石川敦之, 中井浩巳. CO₂化学吸収法に対する計算化学研究: エネルギー・環境問題への挑戦. Journal of Computer Chemistry, Japan. 2016, 15(2), p. A15-A29.
- 8) 地球環境産業技術研究機構. 低品位廃熱を利用する二酸化炭素分離回収技術開発 成果報告書(平成18年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業). 2007.