

研究開発部門 佳作

# 再生路盤材を利用した 二酸化炭素固定化システムの検討

前田道路(株) 技術研究所 高橋 知  
 // // 谷中 哲  
 (公財)地球環境産業技術研究機構 CO<sub>2</sub> 貯留研究グループ 三戸 彩絵子  
 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 上河内 貴

## 1 はじめに

2020年(令和2年)10月、政府は2050年までに温室効果ガスの排出を全体として実質ゼロにする、カーボンニュートラルを宣言した。建設業界においても、カーボンニュートラルの達成に向け、様々な手法により取り組んでいる。

これまで、当社は廃グリセリンや未活用木質タールによる化石燃料の削減や、自社太陽光発電から得られる再生エネルギーを利用した合材製造などに取り組んできた。2021年度の当社の二酸化炭素(以下CO<sub>2</sub>)排出は約28.7万t-CO<sub>2</sub>である。排出量のうち約86%を占めている製造部門への対策が効率的である。また、当社には全国に92カ

所の破碎工場があり、約350万t/年のコンクリート廃材を受け入れて路盤材として再生させている。これらの状況を最大限に活かせるのは、CO<sub>2</sub>吸着(吸収、固定化)技術と捉えた。そこで、合材工場の排ガスを直接再生路盤材に固定するシステムを考案した(図-1)ので、ここに報告する。

## 2 再生路盤材によるCO<sub>2</sub>の固定のメカニズム

コンクリート廃材を破碎して製造する再生路盤材には、コンクリート同様にセメント水和物であるCa(OH)<sub>2</sub>が含まれている。Ca(OH)<sub>2</sub>はCO<sub>2</sub>との炭酸化反応によりCaCO<sub>3</sub>を生成し、CO<sub>2</sub>を固定化する(式-1、図-2)。

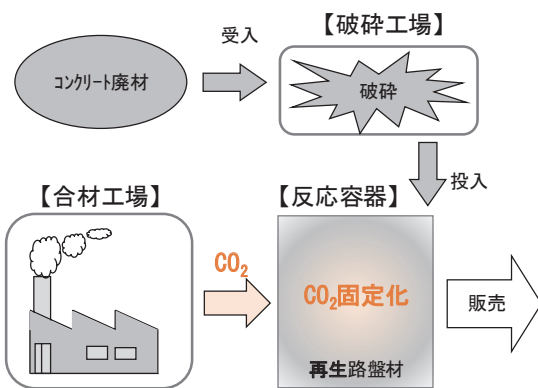


図-1 CO<sub>2</sub>固定化システムのイメージ

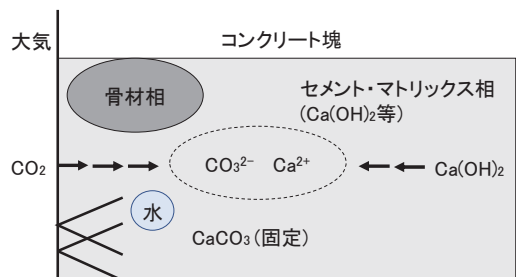


図-2 CO<sub>2</sub>固定化の模式図<sup>2)</sup>

この炭酸化(CO<sub>2</sub>固定)は一般的には中性化と呼ばれており、鉄筋コンクリート構造物の耐久性の観点では抑制すべき現象である。一方、本研究では、再生路盤材を利用するものであり、かつ再資源化後には鉄筋と一体として利用されることはないため、中性化したとしても再生路盤材の品質の低下はないと考えている。

### 3 CO<sub>2</sub>固定量算出方法

再生路盤材に加工する前のコンクリート廃材の一部は、もともとCO<sub>2</sub>を固定している。また、再生路盤材を野積みしている間にも大気中のCO<sub>2</sub>を吸収し、固定する<sup>3)</sup>。再生路盤材中のCO<sub>2</sub>量の測定は、固定量の試算に誤差を生じやすいと考えられた。そこで本研究では、写真-1に示すような装置を作製し、再生路盤材に反応させる前と後のガス中のCO<sub>2</sub>濃度を測定した(図-3)。CO<sub>2</sub>濃度を測定しているガス出入口以外は密閉空間であるため、「CO<sub>2</sub>濃度低減量≒CO<sub>2</sub>固定量(推定値)」とできる。

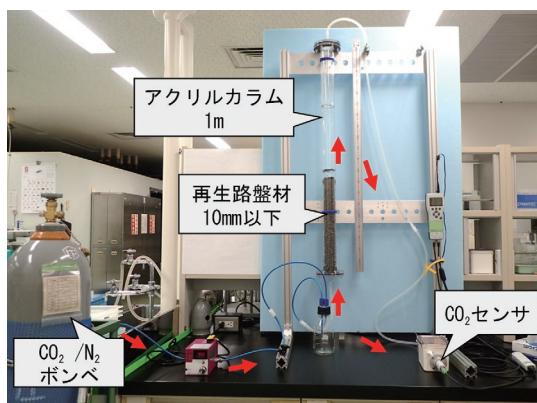


写真-1 室内実験例

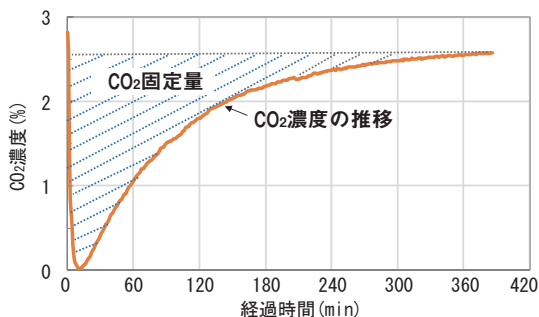


図-3 再生路盤材通過後のCO<sub>2</sub>濃度の経時変化例

CO<sub>2</sub>固定量の算定式は式-2、3に示すとおりである。測定記録を一定間隔で取得することにより、平均値aを用いて簡便にCO<sub>2</sub>固定量を算出することが可能となる。

$$S = a \times b \times (c \div d) \dots \text{式-2}$$

$$T = S \times (1000 \div e) \dots \text{式-3}$$

S : CO<sub>2</sub>固定量[kgCO<sub>2</sub>]

T : 単位重量当たりのCO<sub>2</sub>固定量[kgCO<sub>2</sub>/t]

a : CO<sub>2</sub>濃度差平均値[v/v]

b : 全ガス流量[m<sup>3</sup>]

c : CO<sub>2</sub>の質量[kg/mol]

d : CO<sub>2</sub>の体積[m<sup>3</sup>/mol]

e : 再生路盤材の量[kg]

CO<sub>2</sub>濃度の測定には、室内実験では主にGMP 251(ヴァイサラ(株)製)、屋外実験ではCGP 31(東亜ディーケーケー(株)製)のCO<sub>2</sub>センサを利用した。適宜、標準ガスにより校正し利用した。

### 4 野積み保管後の再生路盤材によるCO<sub>2</sub>固定化

再生路盤材は、屋根付きの有無による違いはあるものの、屋外に野積み保管される。野積み中に空気中のCO<sub>2</sub>を吸収・固定化すれば、それ以上CO<sub>2</sub>を固定化できない可能性がある。そこで、野積み保管した再生路盤材がどの程度のCO<sub>2</sub>を新規に固定できるか、室内試験で検証した。

はじめに、破碎して間もない再生路盤材をコンクリート盤上に野積みし、自然放置した(写真-2)。60日後、表面から中心にかけて、①~④の位置から再生路盤材を採取した。

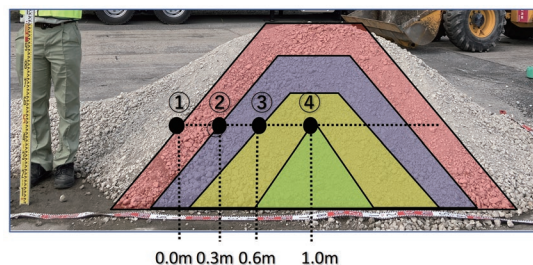


写真-2 野積み保管状況と採取位置

室内実験に用いる調整ガスのCO<sub>2</sub>濃度は、合材工場から排出するCO<sub>2</sub>濃度に近い必要がある。複数の合材工場の排ガス中CO<sub>2</sub>濃度は2～5%であるため、CO<sub>2</sub>濃度3%、N<sub>2</sub>濃度97%を標準の調整ガスとして使用した。

①～④から採取した再生路盤材それぞれ1kgに、調整ガスを0.5L/minで通気させてCO<sub>2</sub>濃度を測定し、固定量を算出した(表-1)。

表-1 野積み保管後の再生路盤材による新規CO<sub>2</sub>固定量

採取位置	表面から中心までの距離(m)	CO <sub>2</sub> 固定量(kgCO <sub>2</sub> /t)
①	0.0	1.7
②	0.3	7.1
③	0.6	12.0
④	1.0	13.2

CO<sub>2</sub>固定量は表面からの距離が深くなるほど増加した。表面から採取した①の再生路盤材は、野積み保管中に空気中のCO<sub>2</sub>を吸収・固定して中性化したため、新規のCO<sub>2</sub>固定量が少なくなったと考えられる。一方、0.3mから採取した②の再生路盤材は、①に比べ約4倍のCO<sub>2</sub>を固定した。空気にさらされにくくなったことにより中性化の進行が妨げられ、Ca(OH)<sub>2</sub>が残存し、新規にCO<sub>2</sub>を固定する能力が保たれていたと考えられる。さらに0.6mより深い位置にあった再生路盤材は、表面部分の7倍以上、CO<sub>2</sub>を固定した。

本検討の結果、野積みした再生路盤材によるCO<sub>2</sub>固定化は空気にさらされた表面付近であっても可能であるが、空気にあまりさらされていない再生路盤材を活用することが、CO<sub>2</sub>固定量の増加につながる事が分かった。つまり、野積みや地中に締め固められた状態の路盤層などの自然状態では、空気にさらされる機会が限定されるため、積極的にCO<sub>2</sub>と接触する仕組みづくりがCO<sub>2</sub>削減に効果を発揮することを示している。

## 5 実排気ガスによる屋外検証実験

### 5-1 実排気ガスによるCO<sub>2</sub>固定量の評価

再生路盤材により、新規にCO<sub>2</sub>を固定できる見込みを得たため、合材工場の実排気ガス(以下、

実排気ガス)を使用する屋外実証実験を行った。屋外実験の状況を写真-3に示す。合材工場の煙突からブロワで実排気ガスを引き込み、あらかじめ反応槽内に入れた再生路盤材(約200kg)に通気させた。再生路盤材は破砕してから1週間以内かつ自然含水のものを使用した。煙道から引き込む実排気ガス中のCO<sub>2</sub>濃度は稼働状況によるため、反応槽前後の配管部でCO<sub>2</sub>濃度を測定し、CO<sub>2</sub>固定量を算出した。



写真-3 実排気ガスによる検証状況

各工場で行った実験条件およびCO<sub>2</sub>固定量は表-2に示すとおりである。A工場とB工場では、反応槽に引き込む排気ガス流量の検討を行った。CO<sub>2</sub>固定実験に加え、A工場では、排気ガスのばいじん測定などを行った(実験No.6)。反応槽の入口と出口のCO<sub>2</sub>濃度の経時変化を図-4、5、6に示す。

表-2 実排気ガスによるCO<sub>2</sub>固定量の評価条件と結果

実験No.	工場	測定時間(min)	ガス流量(m <sup>3</sup> /hr)	CO <sub>2</sub> 固定量(kgCO <sub>2</sub> /t)
1	A	140	28	9.4
2		45	85	5.1
3		25	158	2.8
4	B	145	28	12.6
5		25	153	3.5
6	A	160	28	5.5



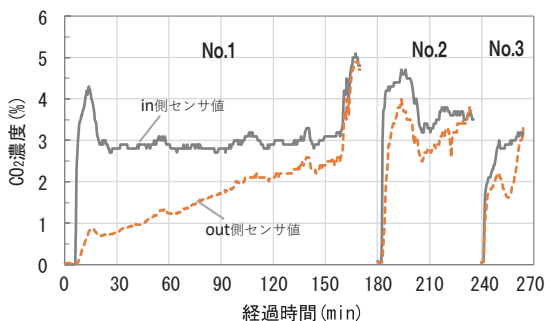


図-4 実験No.1～3のCO<sub>2</sub>濃度変化 (A工場)

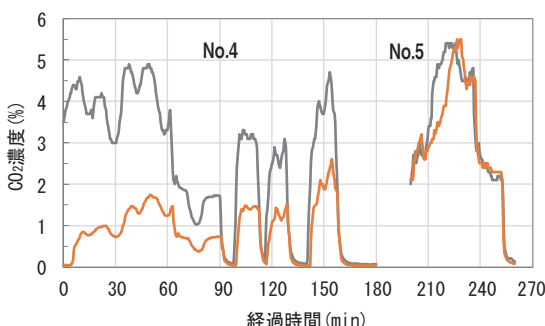


図-5 実験No.4～5のCO<sub>2</sub>濃度変化 (B工場)

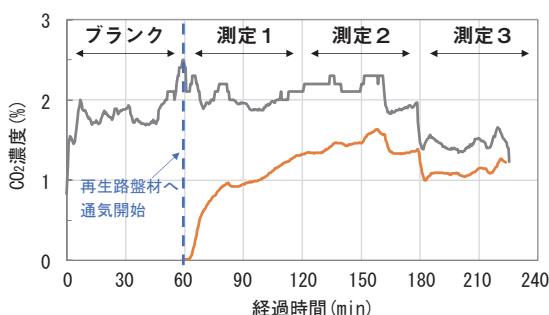


図-6 実験No.6のCO<sub>2</sub>濃度変化および排ガス測定状況 (A工場)

黒線で示した実排ガス中のCO<sub>2</sub>濃度はおよそ1～6%の範囲で変動したが、いずれの濃度においても橙線で示した出口側のCO<sub>2</sub>濃度は低下し、CO<sub>2</sub>固定が可能であった。実験No.4を除き、入口と出口のCO<sub>2</sub>濃度が一致するまで実験できた。

実験No.4では、CO<sub>2</sub>濃度が0にまで底打ちしているが、これはバーナを停止したことによる。バーナのON/OFFを繰り返しても、実排ガスの導入に連動してCO<sub>2</sub>固定が継続している様子が伺えた。145分経過しても出入り口のCO<sub>2</sub>濃度は一致しておらず、表-2に示した12.6kgCO<sub>2</sub>/tよりも実際の固定量は多くなると見込める。

屋外実験の結果は、ガス流量が少ないほどCO<sub>2</sub>固定量が多くなった。一方、ガス流量が多いと、CO<sub>2</sub>固定量は少なく、短時間で出入り口のCO<sub>2</sub>濃度が等しくなった。ガスは再生路盤材の詰まり方の粗い部分を優先的に通り抜け、通り道にある材料表面のみで固定化が進むと考えられる。ガス流量の少ない方が、細いガスの通り道にあるCa(OH)<sub>2</sub>にも接触でき、CO<sub>2</sub>固定量が増加したと推察した。

### 5-2 排ガス組成に与える再生路盤材の影響

再生路盤材を通過したことによる実排ガス組成への影響を確認するため、実験No.6では通気前後のばいじんなどの測定を実施した(表-3)。再生路盤材を通気した排ガスのばいじん濃度は減少した。硫黄酸化物SO<sub>x</sub>は実排ガスで0.34g/m<sup>3</sup>未満であり、通気後の変化はなかった。窒素酸化物NO<sub>x</sub>の濃度は減少傾向を示した。

CO<sub>2</sub>固定化反応ではCaCO<sub>3</sub>生成時に水が発生するため(式-1)、自然含水比の再生路盤材にこの水分が加水され、ばいじんの飛散やSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>濃度の増加が抑制され、排ガス組成への影響が小さくなったと考えられる。

表-3 排ガス測定結果

測定項目	実排ガス blank	再生路盤材通気後		
		測定1	測定2	測定3
ばいじん濃度 (g/m <sup>3</sup> )	0.0092	0.0042 未満	0.0042 未満	0.0042 未満
SO <sub>x</sub> 濃度 (volppm)	0.34 未満	0.34 未満	0.34 未満	0.34 未満
NO <sub>x</sub> 濃度 (volppm)	8.5	7.4	8.2	5.8

### 5-3 CO<sub>2</sub>固定による再生路盤材の強度への影響

実排ガスを再生路盤材へ通気させることによる強度への影響を検討した。試験にはCO<sub>2</sub>固定量の多かった実験NO.4のサンプルを利用した。修正CBR試験などの結果(表-4)、通気前後の再生路盤材は同程度の値を示し、強度への影響が少ないことを確認した。

表-4 実排ガス通気前後の再生路盤材性状

項目	通気前	通気後
最適含水比 (%)	12.9	13.3
最大乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.793	1.823
修正CBR (%)	126	130

## 6 CO<sub>2</sub>固定化率の向上に関する基礎実験

### 6-1 CO<sub>2</sub>固定化条件の検討

実排ガス試験において、CO<sub>2</sub>濃度は再生路盤材を通過した後に低下しているものの、まだまだ低減の余地がある。そこで、室内実験により、流量、試料量、CO<sub>2</sub>濃度、試料種などを比較し、CO<sub>2</sub>固定に効果的な項目を検討した(表-5、図-7、8)。実排ガスの代わりに、濃度が一定の調整ガス(CO<sub>2</sub> 3%および6%)を用いているため、入口のCO<sub>2</sub>濃度は測定しておらず、出口の初期値として図中に示されている。一般に、粒径を小さくすることにより表面積を増加させ、CO<sub>2</sub>固定量を増やすことも考えられるが、最終的には再生路盤材を販売することを見据え、現行の破碎工程を変更せずにCO<sub>2</sub>固定を効率的に実施するための検討を行った。

表-5 室内試験条件と結果

実験	試料	CO <sub>2</sub> 濃度 (%)	流量 (L/min)	CO <sub>2</sub> 固定量 (kgCO <sub>2</sub> /t)
①	RC 1kg	3	0.5	3.3
②	RC 1kg	3	0.25	4.5
③	RC 2kg	3	0.5	3.9
④	RC 1kg	6	0.5	6.4
⑤	モルタル 1kg	3	0.5	7.4

注①：RCは再生路盤材を10mm以下に分級した試料

注②：モルタルは1:3モルタル

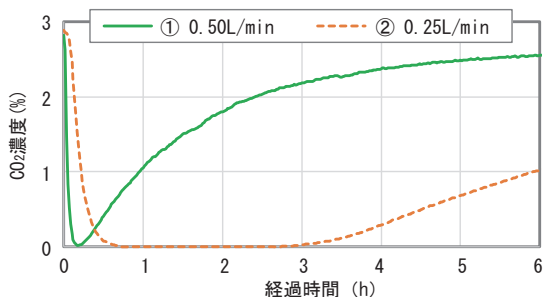


図-7 調整ガスの流量の比較

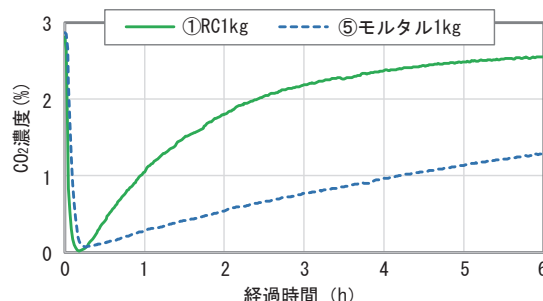


図-8 再生路盤材とモルタルの比較

図-7の緑線で示した実験①では、再生路盤材通過後、CO<sub>2</sub>濃度は3%から速やかに0%にまで低下した。ガス流量を半分にした実験②では、CO<sub>2</sub>濃度の低下速度は若干遅いものの、0%を記録する時間が実験①よりも長くなった。

6時間後のCO<sub>2</sub>固定量は実験①に比べ、②で約1.5倍となった。6時間後のCO<sub>2</sub>濃度はまだ3%に回復しておらず、通気時間を延ばせば固定量の増加が見込めた。

試料量を倍にした実験③は、流量を減らした実験②と同じ傾向を示し、CO<sub>2</sub>濃度0%の時間が続いた。CO<sub>2</sub>濃度を倍にした実験④は、実験①と同様の傾向を示した。再生路盤材で比較すると、流量の低減や試料の増加により、調整ガスが再生路盤材に滞留する時間も増え、固定量の増加につながると考えられた。

また、1:3モルタルを用いた実験⑤では、再生路盤材と同様にCO<sub>2</sub>濃度は3%から速やかに0%にまで低下した(図-8)が、0%からの回復は緩やかであり、CO<sub>2</sub>固定量の増大が認められた。試料中のCa(OH)<sub>2</sub>量が多いため固定量が増えている。

CO<sub>2</sub>固定を再生路盤材試料からも確認するため、通気前後の再生路盤材表面の化学組成をSEM-EDSにより分析した。通気前は骨材成分のSiO<sub>2</sub>が試料の大半を占め、セメント由来のCaOが33%検出された。ここでは化学組成を酸化物として表現しているが、実際はCa(OH)<sub>2</sub>が多く含まれている。実験①から選んだ通気後試料はCO<sub>2</sub>量が増加し、それに伴い他の成分の割合が低下した(図-9)。Caの割合はほとんど変化しておらず、路盤材表面でCO<sub>2</sub>と結合して炭酸塩となり、骨材表面を覆ったと考えられる。

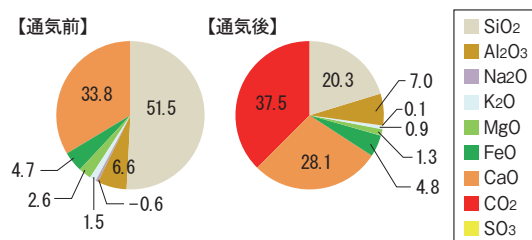


図-9 SEM-EDSによる化学組成分析結果(質量%)

## 6-2 スラッジ水の活用

再生路盤材のCO<sub>2</sub>固定化能力を左右するCa(OH)<sub>2</sub>は、当初のコンクリート配合やコンクリートの材齢により含有量が大きく異なる。より安定的、効率的なCO<sub>2</sub>固定化を行うために、再生路盤材以外からCa(OH)<sub>2</sub>を供給する方法も検討した。コンクリート製造時に発生するスラッジ水を噴霧する技術を有する住友大阪セメント(株)と共同で、以下の検討を実施した。

スラッジ水とは、生コンクリート製造時のミキサや運搬に用いられるミキサ車を洗浄した後の水であり、セメント水和物であるCa(OH)<sub>2</sub>を含有している。

スラッジ水のCO<sub>2</sub>固定化能力の確認は、図-10の実験装置を用いてスラッジ水とCO<sub>2</sub>との反応性により評価した。基礎実験の条件および結果を図-11に示す。スラッジ水をCO<sub>2</sub>含有ガス中(CO<sub>2</sub>濃度：0.24%)に噴霧した結果、反応容器中のCO<sub>2</sub>濃度は低下した。

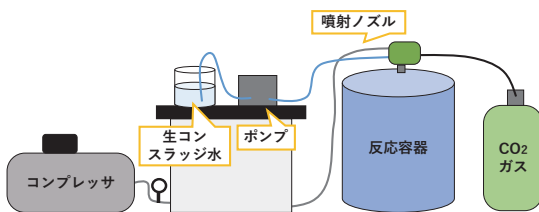


図-10 生コンスラッジ水噴霧実験装置 (模式図)

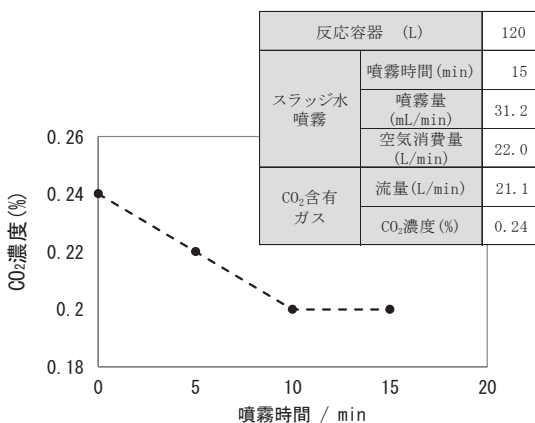


図-11 スラッジ水のCO<sub>2</sub>固定効果

その際に得られた反応生成物をXRD、TG-DTAで確認した結果、CaCO<sub>3</sub>として96%である

ことから、CO<sub>2</sub>の安定固定化が確認された。また、通気したCO<sub>2</sub>が0.24%の低濃度であるにも関わらず反応しており、スラッジ水は合材工場が発生するCO<sub>2</sub>濃度(2~5%)でも反応可能であることが示唆された。

本結果でのCO<sub>2</sub>低減率は約17%であるが、スラッジ水(Ca濃度：約900ppm)中のCa濃度を増加させることにより更なるCO<sub>2</sub>低減効果が期待できる。

## 7 工場や施工でのCO<sub>2</sub>削減効果

アスファルト合材工場でのCO<sub>2</sub>削減効果について、出荷量の異なる2工場を例に試算した(表-6)。CO<sub>2</sub>固定量は、屋外実験で最もCO<sub>2</sub>固定量の小さかった2.8kgCO<sub>2</sub>/t(表-2中の実験No.3)を係数としてコンクリート廃材受入量に掛けて算出した。低減率は、固定量/排出量である。

表-6 合材工場での年間CO<sub>2</sub>低減率の試算結果

As 合材工場	CO <sub>2</sub> 排出量 (t)	Co廃材受入量 (t)	CO <sub>2</sub> 固定量 (t)	CO <sub>2</sub> 低減率 (%)
工場① (20万t)	6,500	168,000	470	7.2
工場② (10万t)	3,400	91,000	255	7.5
全工場	247,000	3,970,000	11,116	4.5

両工場ともCO<sub>2</sub>低減率は7%程度となった。また、2021年度における当社の全工場に適用した場合にはその低減率は4.5%であった。この試算は、現状考えられる最低限の見積もり結果であり、前述の室内試験結果を屋外試験に上手く適用できれば、更なる削減効果が期待できる。CO<sub>2</sub>削減への再生路盤材の活用の有用性を示唆する結果が得られた。

また、工場のみならず、施工時のCO<sub>2</sub>削減効果についても検討した。設計CBR4、信頼度90%の舗装断面(交通量区分N5、設計期間10年)を100m<sup>2</sup>施工した際のCO<sub>2</sub>低減量を検討した(表-7)。なお、表層と基層で用いる加熱合材にフォームドアスファルトによる中温化技術や、再生電力

100%を適用し試算したところ、通常施工と比較して10.7kgCO<sub>2</sub>/tの低減が見込める結果が得られた。なお、上層および下層路盤材には工場の場合と同様に、2.8 kgCO<sub>2</sub>/tをCO<sub>2</sub>固定量の代表値として試算した。

舗装工事において、本CO<sub>2</sub>固定化技術とフォームドアスファルトによる中温化技術等の適用により、100m<sup>2</sup>当たり約466kgのCO<sub>2</sub>低減が可能であった。

表-7 施工時のCO<sub>2</sub>低減量の試算結果

舗装断面		使用量 (t)	CO <sub>2</sub> 低減量 (t)
表層	密粒度 As 混合物 5cm	11.75	125.7
基層	粗粒度 As 混合物 5cm	11.75	125.7
上層路盤	再生粒度調整碎石 15cm	24	57.6
下層路盤	再生クラッシュラン 15cm	56	156.8
各層に自社技術を適用した際のCO <sub>2</sub> 低減量			465.8kgCO <sub>2</sub> /100m <sup>2</sup>

## 8 まとめ

本研究では、再生路盤材によるCO<sub>2</sub>固定化が今後CO<sub>2</sub>削減技術として有用となることを示した。少なめに見積もったCO<sub>2</sub>固定係数を用いても、合材工場でのCO<sub>2</sub>低減率は約7%と試算された。実排ガスをういた屋外実証実験では、再生路盤材を通過した後の排ガスを煙道へ戻せる可能性を示した。

今後、室内並びに屋外実験から得られた知見の更なる検証に向け、実機装置を利用し(写真-4、5)、再生路盤材の供給方法や、実排ガスと再生路盤材の量的バランスなど、詳細な仕様を検討し、システムの実装化を図る。その際、装置は材料供給量の管理なども機械化し、省力・省人化となるCO<sub>2</sub>固定化装置にする計画である。

再生路盤材を用いたCO<sub>2</sub>固定化技術の実用化により、道路建設業界の脱炭素に大きく貢献できると期待している。

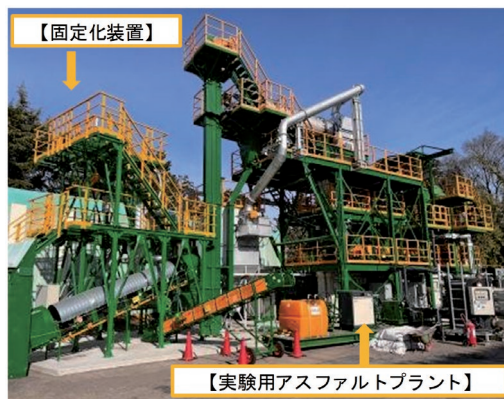


写真-4 実験用アスファルトプラント全貌

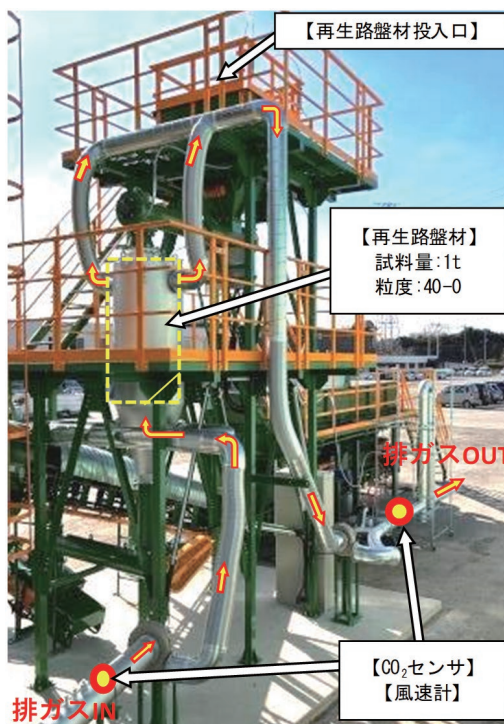


写真-5 CO<sub>2</sub>固定化装置

### 【参考文献】

- 1) (一社)日本道路建設業協会新技術開発部会：舗装分野におけるカーボンニュートラル、道路建設 No.788、pp47、2021.9
- 2) 曾根：コンクリート塊の再資源化による二酸化炭素固定、建設の施工企画、(742)、pp9～13、2011-12
- 3) Shu-Yuan Pan, et al, "An innovative approach to integrated carbon mineralization and waste utilization :A review" Aerosol and Air Quality Research, 15, 1072-1091, 2015, 2020, <https://aaqr.org/articles/aaqr-14-10-ir-0240>、2022.12.4