

# CO<sub>2</sub>を資源に転換して建設材料に再利用するカーボンリサイクル技術の開発

(株)鴻池組 正会員 ○世羅 敦史 岡田 和成  
(株)鴻池組 正会員 大山 将 小山 孝  
(株)鴻池組 正会員 加藤 満 中島 卓夫  
(株)鴻池組 正会員 高馬 崇 竹中 夏子

## 1. はじめに

2020年10月に「2050年カーボンニュートラル」が宣言され、2021年4月には、国内の温室効果ガス削減目標として、2030年に2013年度比で46%削減という方針が示された。また、2021年6月には、2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略<sup>1)</sup>が策定され、重要分野として取り上げられた14分野の一つに「カーボンリサイクル・マテリアル産業」がある。カーボンリサイクル技術とは、CO<sub>2</sub>を資源として捉え、これを分離・回収し、鉱物化によるコンクリート、人工光合成等による化学品、メタネーション等による燃料への再利用等とすることで、従来通り化石燃料を利用した場合と比較して大気中へのCO<sub>2</sub>排出を抑制し、カーボンニュートラル社会の実現に貢献する技術である<sup>2)</sup>。カーボンリサイクルは、再生可能エネルギー、原子力、水素・アンモニアとともに、カーボンニュートラルの達成のための重要な要素として位置づけられており、特にCO<sub>2</sub>フリー水素を必要としない技術に関しては、早期の社会実装が期待されている<sup>2)</sup>。

建設業界においても、カーボンニュートラルの実現に向けて、建設機械の電動化や軽油代替燃料の使用といったクリーンエネルギーへの転換や、電炉鋼材などの低炭素な建設資材の活用が推進されている。その中でも、コンクリート・セメント分野においては、セメント製造工程においてCO<sub>2</sub>が大量に排出されるため、セメント会社を中心となって、原料であるセメントと製品であるコンクリートの両面からCO<sub>2</sub>排出量削減に向けた取り組みが進められている<sup>3)</sup>。

著者らは、副生成物由来のカルシウム源と事業所等の排ガスに含まれるCO<sub>2</sub>を原料とした軽質炭酸カルシウムの製造に取り組んでいる。さらに、コンクリートや地盤改良材への適用といった用途開発まで取り組むことにより、建設分野におけるカーボンリサイクルのサプライチェーンの構築を図っている(図-1)。

本報告では、製造した軽質炭酸カルシウムの概要、製造プロセスと物質収支を説明する。また、軽質炭酸カルシウムを用いたCO<sub>2</sub>吸収コンクリートならびにCO<sub>2</sub>吸収地盤改良材などの用途開発の状況を報告する。

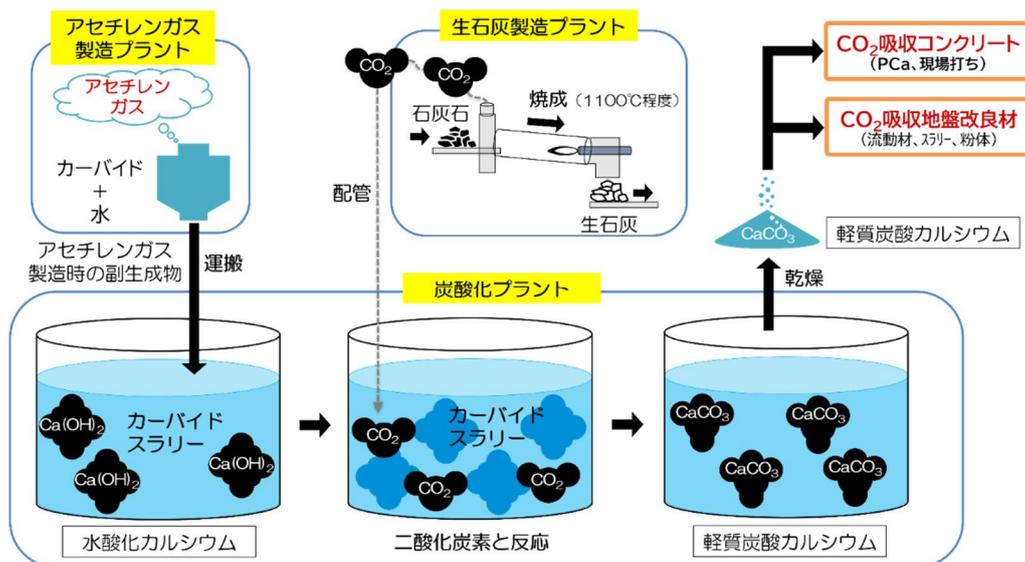


図-1 CO<sub>2</sub>を資源に転換して再利用するカーボンリサイクルのサプライチェーン

キーワード CO<sub>2</sub> CCU カーボンリサイクル カーバイド軽カル CO<sub>2</sub>吸収コンクリート CO<sub>2</sub>吸収地盤改良材

連絡先 〒559-0034 大阪府大阪市住之江区南港北 1-19-37 環境エンジニアリング本部 環境企画部 TEL 06-6245-6584

## 2. 軽質炭酸カルシウム

製造した軽質炭酸カルシウム (CaCO<sub>3</sub>) は、カーバイドスラリーと排ガス CO<sub>2</sub> を原料としたカーバイド軽カル (写真-1) であり、CCU (Carbon dioxide Capture and Utilization : CO<sub>2</sub> 回収・有効利用) 材料である。カーバイドスラリーは、カーバイド (CaC<sub>2</sub>) と水 (H<sub>2</sub>O) の反応によってアセチレンガス (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) を製造した際に発生する副生成物であり<sup>4)</sup>、従来は酸洗浄廃液の中和処理などに活用されてきた。主成分は水酸化カルシウム (Ca(OH)<sub>2</sub>) であるため、CO<sub>2</sub> との反応性に富み、著者らの製造プロセスにおいては、導入する排ガス CO<sub>2</sub> の70%以上を吸収することが可能である。もう一方の原料である CO<sub>2</sub> は、生石灰製造工程における排ガス由来である。なお、生石灰製造における排出量削減に向けて、新炉導入や低炭素燃料の利用などが模索されているが、現時点での実用には至っていない<sup>5)</sup>。したがって、この排ガスを有効活用することによって、生石灰製造時排出量の削減に寄与することができる。

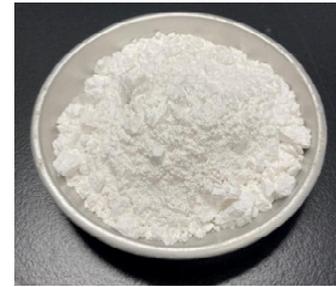


写真-1 カーバイド軽カル

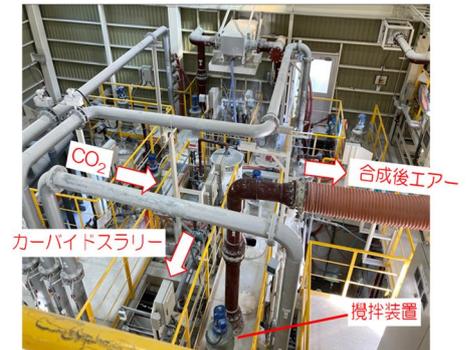


写真-2 カーバイド軽カル製造パイロットプラント

これらの物質を原料とするカーバイド軽カルの製造技術は、排ガス CO<sub>2</sub> の大気放出を抑制し、炭酸カルシウムという形で有効利用するカーボンリサイクル技術である。著者らは、ラボスケールからのスケールアップについて検討を重ね、2023 年秋にパイロットプラント (写真-2) でのカーバイド軽カル 10 トンの製造に成功している<sup>6)</sup>。

## 3. カーバイド軽カル製造における物質収支

図-2 に示すように、アセチレンガス製造時の副生成物であるカーバイドスラリーと排ガス CO<sub>2</sub> を反応させ、カーバイド軽カルを製造するプロセスにおける物質収支を検討した。前処理残渣は、カーバイド由来の固形物であり、反応前に分級装置で取り除く。

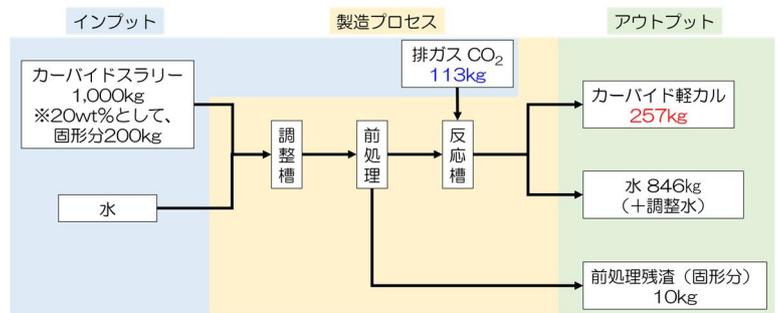


図-2 カーバイド軽カル製造における物質収支

また、カーバイドスラリー以外のカルシウム (Ca) 源としてコンクリートスラッジや廃コンクリートを起点とした炭酸カルシウム製造プロセスについて、セメント中の Ca 含有量を 32.25wt%<sup>7)</sup> とした上で、原料中の Ca 全量が CO<sub>2</sub> と反応して CaCO<sub>3</sub> が生成すると仮定し、CO<sub>2</sub> 固定化量・CaCO<sub>3</sub> 製造量・副産物の発生量を試算し、比較検討を行った。なお、コンクリートスラッジは生コン工場洗浄水を想定し、固形分割合を 3%<sup>8)</sup>、液体分に含まれるセメント量を 3%<sup>9)</sup> とした。また、廃コンクリートについては、含まれるセメント量を廃コンクリート総重量の 1/3<sup>10)</sup>、セメントからの Ca 抽出率を 80%<sup>11)</sup> とした。表-1 に物質収支比較表を示す。本検討において、カーバイドスラリーを原料とするプロセスは、CO<sub>2</sub> 固定化量が最も多く、副産物量 (固形分) は最も少ないことから、カーボンリサイクルの効率が高く、かつ環境負荷の小さい製造プロセスであると考えられる。

表-1 物質収支比較表

インプット			アウトプット	
原料	原料 (kg)	CO <sub>2</sub> 固定化量 (kg-CO <sub>2</sub> )	CaCO <sub>3</sub> 製造量 (kg)	副産物量 (kg)
カーバイドスラリー (20wt%)	1,000	113	257	固形分: 10 水: 846(+調整水)
コンクリートスラッジ (固形分割合3%)	1,000	14	31	固形分: 38 水: 945
廃コンクリート	1,000	95	215	固形分: 880 (骨材667kgを含む)

#### 4. CO<sub>2</sub>吸収コンクリート

製造したカーバイド軽カルは、コンクリートの原材料として利用可能であり、当社においては 2 つの用途開発に取り組んでいる。1 つ目の用途として、プレキャストコンクリート製品への適用を進めている。コンクリート分野においても、セメント製造工程における CO<sub>2</sub> 排出量の削減は重要な課題である。当社では、脱炭素に資するコンクリートである「環境配慮型コンクリート」として、結合材の高炉スラグ微粉末の配合割合を 80%とした「低炭素型コンクリート」や、低炭素型コンクリートに混和材としてカーバイド軽カルを使用した「CO<sub>2</sub> 吸収コンクリート」の開発に取り組んでいる。ここでは、低炭素型コンクリートと CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートにおける CO<sub>2</sub> 排出量の検討および試作したプレキャストコンクリート製品について報告する。

##### (1) CO<sub>2</sub> 排出量の検討

表-2 に配合条件、表-3 に低炭素型コンクリートと CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートの配合を示す。いずれの配合においても、配合条件を満たすことを試験練りによって確認した<sup>12)</sup>。表-4 に示す各材料の CO<sub>2</sub> 排出原単位 (kg-CO<sub>2</sub>/t) を用いて、低炭素型コンクリートと CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートについて、CO<sub>2</sub> 排出量を算出した。図-3 に示すように、普通ポルトランドセメントを 100%用いた標準 (N) と比較した場合、低炭素型コンクリートでは 72%の削減となった。さらに、カーバイド軽カルを使用した CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートでは 110%の削減となり、コンクリートの材料由来の CO<sub>2</sub> 排出量はマイナスとなった。したがって、カーバイド軽カルをコンクリートに適用した CO<sub>2</sub> 吸収コンクリートは、建設分野における CO<sub>2</sub> 排出量の大幅な削減に資する建設資材と考えられる。

表-2 配合条件

項目	条件
最大骨材寸法	15mm
設計基準強度	材齢14日 30N/mm <sup>2</sup>
スランプフロー	600±100mm
空気量	2.0±1.5%
塩化物含有量	0.30kg/m <sup>3</sup> 以下

表-3 コンクリートの配合

種別	W/P (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
				W	C	BS	CP	S1	S2	G	SP
低炭素型	33.0	33.0	44.0	170	103	412	—	499	225	959	2.7
CO <sub>2</sub> 吸収	33.0	62.5	43.0	175	56	224	250	671	—	940	5.3

表-4 各材料の概要と CO<sub>2</sub> 排出原単位<sup>13)</sup>

材料名	記号	概要	CO <sub>2</sub> 排出原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /t)
水	W	地下水	0
普通ポルトランドC	C	密度: 3.16g/cm <sup>3</sup>	766.6
高炉スラグ微粉末	BS	4000プレーン品 密度: 2.88g/cm <sup>3</sup>	26.5
カーバイド軽カル	CP	純度: 90%以上 密度: 2.4~2.8g/cm <sup>3</sup> 比表面積: 2500cm <sup>2</sup> /g以上	-366
細骨材	S1	山砂、絶乾密度: 2.52g/cm <sup>3</sup>	3.70
	S2	石灰石砕砂、絶乾密度: 2.57g/cm <sup>3</sup>	
粗骨材	G	砕石、絶乾密度: 2.67g/cm <sup>3</sup>	2.90
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系	350

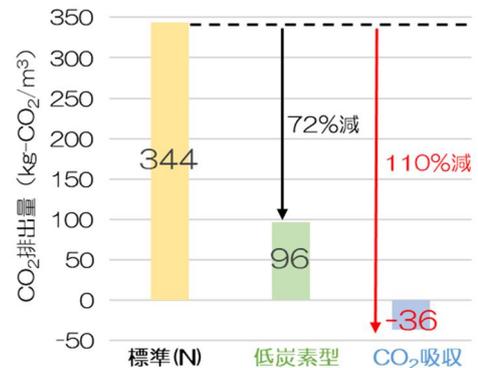


図-3 コンクリート 1m<sup>3</sup> 当りの CO<sub>2</sub> 排出量

##### (2) プレキャスト製品の製造

低炭素型と CO<sub>2</sub> 吸収の 2 種類の配合を用いて、ベンチフリューム 2 種 300 (U 字溝) と L 形側溝 500B (エプロン) を実際のプレキャスト製造工場において製造した。練り混ぜには、強制二軸式 (容量 2.75m<sup>3</sup>) のミキサを使用し、粗骨材を除くモルタルを 180 秒間練り混ぜた後、粗骨材を投入し 90 秒間練り混ぜを行った。打込みには、軽便バイブレータを使用し、通常の配合と同様の方法で打込みを行った。打込み完了から 2 時間経過した後、約 45°C で 5 時間蒸気養生を実施し、翌朝まで徐冷を行い、材齢 18 時間で脱型した。脱型後の各製品の状況を写真-3 に示す。外観上各製品



写真-3 試作した PCa 製品 (エプロン・U 字溝)

ともに、通常製品と比べると白色度が増した。品質面においては、ひび割れ、充填不良や欠け等の不具合はなく、通常配合で製造する製品と同等であることを確認した。また、試作した両プレキャスト製品について、直射日光および降雨の影響を受ける屋外ヤードに約1ヶ月静置した後、Torrent法により表層透気係数（kT値）を測定した。その結果を表-5に示す。低炭素型コンクリートにおけるkT値は0.0003～0.0001未満（ $\times 10^{-16} \text{m}^2$ ）、CO<sub>2</sub>吸収コンクリートにおけるkT値は0.0024～0.0007（ $\times 10^{-16} \text{m}^2$ ）となり、いずれも5段階評価で最も高いグレードである「優」であり、高い緻密性を有していることを確認した。

表-5 表層透気試験結果

部材	部位	低炭素型コンクリート			CO <sub>2</sub> 吸収コンクリート		
		水分率 (%)	表層透気係数 ( $10^{-16} \text{m}^2$ )		水分率 (%)	表層透気係数 ( $10^{-16} \text{m}^2$ )	
			kT <sub>6</sub>	グレード		kT <sub>6</sub>	グレード
エフロン	排水部上面	4.6	0.0003	優	4.3	0.0024	優
	縁石部側面	4.5	0.0001未満	優	4.2	0.0024	優
U字溝	底板上面	4.5	0.0001未満	優	4.5	0.0007	優

## 5. CO<sub>2</sub>吸収地盤改良材

2つ目の用途として、地盤改良材への適用を進めている。一般的な地盤改良材では、製造工程でCO<sub>2</sub>が大量に排出されるセメント系の固化材が使用されているため、製造時のCO<sub>2</sub>排出量がセメントよりも少ない代替材料を固化材として利用した環境配慮型地盤改良材の利用が望まれる。当社らは、「地盤改良をしながらCO<sub>2</sub>を地盤中に貯留する技術」として「強制拡幅と圧入締固めを併用する流動材圧入静的締固め工法」の開発に取り組んでいる<sup>14)</sup>。この工法では、セメント系の固化材を使用せず、かつ、カーバイド軽カルを混合したCO<sub>2</sub>吸収地盤改良材を使用する。カーバイド軽カルは、排ガスCO<sub>2</sub>を固定・鉱物化した材料である。そのため、CO<sub>2</sub>吸収地盤改良材を地中に圧入することにより、地下深くの貯留層に超臨界状態のCO<sub>2</sub>を圧入するCCS（Carbon dioxide Capture and Storage）と比較して、特殊な設備を用いることなく、地盤改良を行いながら容易にCO<sub>2</sub>を貯留できることが期待される。また、地震等の外力により圧入したCO<sub>2</sub>が貯留層外部に漏洩する等の懸念がない。ここでは、CO<sub>2</sub>吸収地盤改良材とそれを用いた新工法の概要について報告する。

### (1) 配合とCO<sub>2</sub>排出量の検討

図-4にCO<sub>2</sub>吸収地盤改良材の組成を示す。

固化材にはセメントを使用せず、高炉スラグ微粉末（石膏添加品）とアルカリ刺激剤（珪酸ソーダ）の混合物を用いる。骨材には、未利用資源として碎石スクリーニングスや碎石粉、副産物としてコンクリートスラッジ破砕骨材、高炉スラグ細骨材などを使用することができる。不活性フィラーとして、カーバイド軽カルを骨材

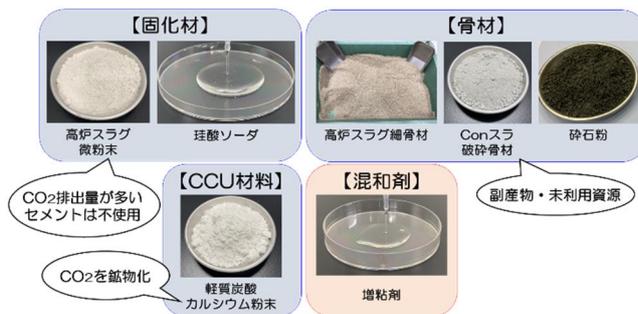


図-4 CO<sub>2</sub>吸収地盤改良材の組成

や固化材の一部に置き換えて混合する。混和剤は、圧送時の材料分離抑制のために用いる。水に対して0.1～4wt%の範囲で、外割で添加する。

表-6に各材料の概要と製造に係るCO<sub>2</sub>排出原単位を示す。なお、参考文献<sup>12) 15) 16)</sup>に記載のないCO<sub>2</sub>排出原単位はメーカーにヒアリングをして得ている。

表-6 各材料の概要とCO<sub>2</sub>排出原単位<sup>12)15)16)</sup>

材料名	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	概要	CO <sub>2</sub> 排出原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /t)
水	W	$\rho_w=1.0$	上水道水	0.235
高炉スラグ微粉末	BS	$\rho_b=1.0$	JIS A 6206、SO <sub>3</sub> =2～4% 比表面積：3500～5000cm <sup>2</sup> /g	26.5
カーバイド軽カル	F	$\rho_f=2.4\sim 2.8$	CaCO <sub>3</sub> 純度：90%以上 比表面積：2500cm <sup>2</sup> /g以上	-366
骨材	S1	$\rho_{s1}=2.6\sim 2.9$	JIS A 5011-1 高炉スラグ細骨材 (5mm以下)	26.5
	S2	2.2～2.8	コンクリートスラッジ破砕骨材 (5mm以下)	1.2
	S3	2.45以上	碎石スクリーニングス (2.5mm以下)	2.9
	S4	2.5以上	碎石粉 (2.5mm以下) JIS A 5041:2009	2.9
珪酸ソーダ	WG	$\rho_{wg}=1.49\sim 1.53$	SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> Oモル比=2.0 Na <sub>2</sub> O=14.1～14.5%	300
混和剤	BT1	$\rho_{BT1}=1.045\sim 1.065$	高流動性充填材用特殊増粘剤	—
	BT2	$\rho_{BT2}=1.02$	界面活性剤型液体増粘剤	—

表-7 に流動材の配合と表-6 の排出原単位を用いて算出した配合毎の CO<sub>2</sub> 排出量を示す。No.1 ~4 の配合については、予備試験にて、3 分程度の練り混ぜ時間で流動性が確保できる範囲であることを確認した。いずれの配合においても、CO<sub>2</sub> 排出量はマイナスとなる。したがって、カーバイド軽カルを地盤改良材に適用した CO<sub>2</sub> 吸収地盤改良材は、建設分野における脱炭素に資する建設資材であると考えられる。

表-7 流動材の配合と CO<sub>2</sub> 排出量

No.	1m <sup>3</sup> 当り添加量 (kg)						BT2 (kg)	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
	S2	S4	P	F	WG	W		
1	707		256	256	11	537	1.34	-83
2		747	271	271	12	514	1.28	-86
3		896	278	278	14	458	1.50	-87
4		938	340	340	15	397	1.42	-108

## (2) 強制拡幅と圧入締固めを併用する流動材圧入静的締固め工法

「地盤改良をしながら CO<sub>2</sub> を地盤中に貯留する技術」である「強制拡幅と圧入締固めを併用する流動材圧入静的締固め工法」の施工フローを、図-5 に示す。本工法は、強制拡幅治具を用いて土塊を強制的に水平方向に移動させて円筒形の空洞を造成する工程と、流動材を圧入締固めする工程とを併用することによって、より均一な締固め効果を得るとともに拡幅径以上の改良径を確保する工法である。本工法による杭径は、流動材圧入量を等価な円柱に仮定した場合、改良径φ400mm~700mm 程度を想定しており、1/4 スケールの設備による小規模な圧入試験では<sup>14)</sup>、拡幅有りのケースは流動材が同心円状に広がり、拡幅径 100mm 以上であることを確認している（写真-4）。一方で拡幅無しの場合には流動材が特定の方向に偏って圧入され、いびつな形状となり、ロッド外径と同程度の改良径の箇所も存在した（写真-5）。今後は、実機を使用した実証試験を行い、締固め効果や施工性の検証を行う予定である。

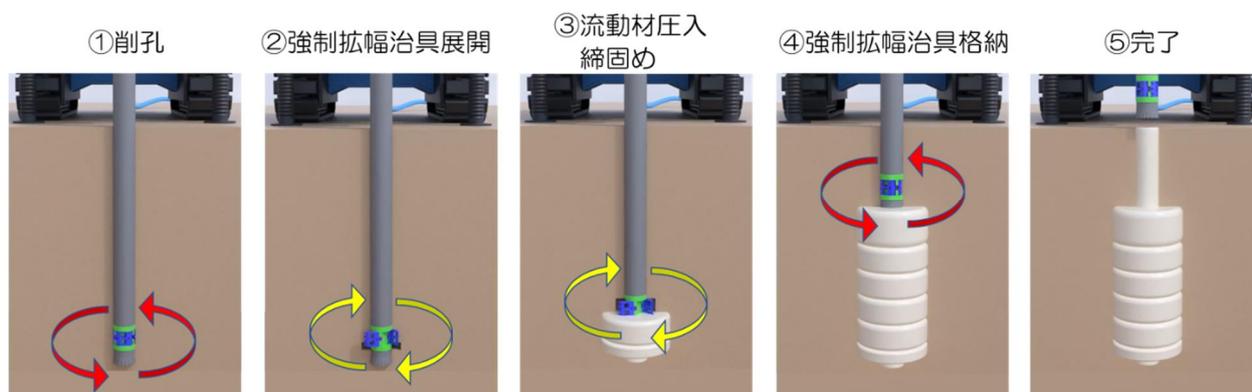


図-5 強制拡幅と圧入締固めを併用する施工フロー



写真-4 出来形（拡幅有り）

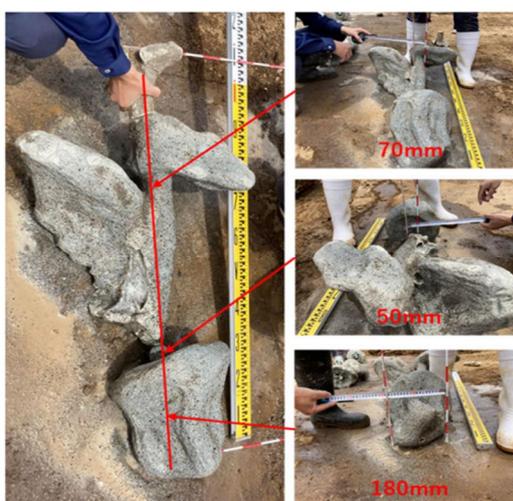


写真-5 出来形（拡幅無し）

## 6. まとめ

著者らの製造したカーバイド軽カルは、副生成物であるカーバイドスラリーと排ガス CO<sub>2</sub> を原料とする CCU 材料であり、その製造プロセスは、廃棄物が少ない上にカーボンリサイクルの効率が高く、環境負荷の小さいプロセスであると考えられる。現在、このカーバイド軽カルを使用して CO<sub>2</sub> 吸収コンクリート、CO<sub>2</sub> 吸収地盤改良材などの用途開発を行い、試作品の製作や現場への適用、実証試験など社会実装に向けて鋭意取り組んでいる。

今後も、2050 年カーボンニュートラルの達成に向けて、カーバイド軽カルの商用生産や量産化に向けた技術開発を推進するとともに、用途開発の幅を広げることも視野に入れて、建設分野におけるカーボンニュートラルに貢献するサプライチェーンの構築に取り組んでいく所存である。

## 7. 参考文献

- 1) 内閣官房,2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(案),2021.6.2
- 2) 経済産業省,カーボンリサイクルの社会実装に向けた日本の取組【直近1年間の進捗】,2023.9.27
- 3) 経済産業省,コンクリート・セメントのカーボンニュートラルに向けた国内外の動向等について,2022.11.2
- 4) 高圧ガス工業(株),ガス製品概要アセチレン, <https://www.koatsugas.co.jp/product/gas/industrial01/>
- 5) 経団連,2050年カーボンニュートラルに向けた石灰製造工業会のビジョン, [https://www.keidanren.or.jp/policy/2022/095\\_kobetsu11.pdf](https://www.keidanren.or.jp/policy/2022/095_kobetsu11.pdf)
- 6) (株)鴻池組,アセチレンガス製造時の副生成物「カーバイドスラリー」と排ガス由来のCO<sub>2</sub>を原料にしたCCU材料の製造技術を共同開発, <https://www.konoike.co.jp/news/2024/202403183319.html>
- 7) 野口美由貴ら,地球温暖化対策としての二酸化炭素の炭酸塩鉱物化プロセス,アジア太平洋研究 特別号(2022),p31-48, [https://www.seikei.ac.jp/university/caps/assets/docs/journal/raps\\_special22.pdf](https://www.seikei.ac.jp/university/caps/assets/docs/journal/raps_special22.pdf)
- 8) 日本コンクリート工業(株)ら,平成22年度~平成23年度 住宅・建築関連先導技術開発助成事業「二酸化炭素を利用したコンクリートスラッジの再資源化に関する技術開発」, <https://www.mlit.go.jp/common/001036980.pdf>
- 9) 吉兼亨,生コン廃水およびスラッジの再利用, Gypsum & Lime No.234(1991), p 122-131, <https://doi.org/10.11451/mukimate1953.1991.390>
- 10) 山崎章弘,廃コンクリートのリサイクルと有効利用プロセス, SCEJ 40th Autumn Meeting, <https://doi.org/10.11491/scej.2008f.0.42.0>
- 11) 住友大阪セメントら,「カーボンリサイクル技術の共通基盤技術開発」成果報告会 カルシウム含有廃棄物からのCa抽出およびCO<sub>2</sub>鉱物固定化技術の研究開発, <https://www.nedo.go.jp/content/100969852.pdf>
- 12) 為石昌宏ら,カーボンネガティブプレキャストコンクリートの表層透気係数について,令和6年度土木学会全国大会,2024
- 13) 土木学会,コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案),コンクリートライブラリー125,2005
- 14) 岡田和成ら,強制拡幅と圧入締固めを併用する流動材圧入静的締固め工法の開発,16th地盤改良シンポジウム
- 15) 河合研至,コンクリートの環境負荷評価①コンクリートに関わる環境負荷,コンクリート工学,Vo.50, No.6, 2012.6
- 16) 東京都水道局,くらしと水道CO<sub>2</sub>計算ツール, <https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/kurashi/co2.html>