

炭酸塩骨材GX-eビーズ®の開発

～材料設計および適用例の紹介～

上田陽一・野田謙二・丸屋英二

伊藤隆紘・玉滝浩司・久保雄暉・石田剛朗

当社は、CO₂を80～250kg/t（乾燥ベース）固定化できるカーボンネガティブな人工砂「GX-eビーズ®」を開発した。GX-eビーズ®は、その製造工程にてカルシウム（Ca）を含む廃棄物や副産物を活用し、当社独自の促進炭酸化技術によって排ガス中のCO₂を効率的に固定化している。これを低炭素型の結合材を用いて造粒することで、カーボンネガティブな人工砂の開発を国内で初めて実現した。本稿では、GX-eビーズ®の材料設計の考え方やコンクリート・二次製品への適用例について紹介する。

キーワード：人工砂、GX-eビーズ®、カーボンネガティブ、促進炭酸化、高強度造粒

1 諸 言

建設分野では、温室効果ガスの排出削減対策として、施工時の省エネルギーの推進やクリーンエネルギーへの転換のほか、低炭素型コンクリートのような建設材料の脱炭素化の検討が進められている。さらに近年では、カーボンニュートラル社会の実現に向けた取り組みとして、コンクリートへのCO₂の固定、すなわちCCUS技術（CO₂の分離回収・利用・貯留）の開発も盛んとなっている。

CCUSの先行技術としては、①戻りコンクリートや残コンクリート等にCO₂を吸着させて炭酸カルシウム微粉末を製造し、それを混和材として利用する技術、②CO₂と反応して硬化する鉱物をキルン等で焼成製造し、それを混和材として利用する技術、が挙げられる⁽¹⁾。これらは、いずれも粉体材料としての利用であるため、コンクリート中の使用量には制限があり、CO₂固定量を増やすために多量に使用する場合には、配合に工夫を要することとなる。さらに、炭酸カルシウムや鉱物を製造する際に相応のコストが掛かり、材料費が高額となるため、使用量の制約と併せて普通コンクリートのような汎用コンクリートへの適用は難しいという問題がある。

このような背景から、当社では、汎用コンクリートにも適用できるCCUS技術の確立を目指し、コ

ンクリートの構成材料の大部分を占めている骨材（細骨材又は粗骨材）に着目して、CO₂を固定化した人工砂の開発に取り組んだ。

2 人工砂の材料設計および基本技術の検討例

2.1 材料設計の方針

人工砂の開発にあたっては、CO₂発生元でのオンライン製造、すなわち、CO₂を含む排気ガスの発生する場所で、排気ガスを直接利用して製造することを想定した。また、CO₂固定量が高く、かつ、高強度な材料を安価に製造するために、以下の方針を立てた。

- ・ 主原料はCaを含んだ廃棄物や副産物とする。
- ・ 短時間で排気ガス中のCO₂を固定し、十分なCO₂固定量を得る。
- ・ 砂状に造粒するための結合材には低炭素材料を用いる。
- ・ 製造に使用する結合材の量は、人工砂のCO₂固定量と高強度化の両立できる最小限とする。

上記に示した方針を達成するうえで必要となるのは、「促進炭酸化技術」および「高強度造粒技術」である。この両者は独立した要素ではなく、例えば、主原料が完全に炭酸化すると造粒物の高強度化が

困難になる場合もある。このため、工程全体を通して材料設計の最適化が重要な開発要素である。

以降では、当社がこれまでに実施した実験の中で、工業材料を用いた基本技術の検討例を紹介する。

2.2 基本技術の検討例

2.2.1 促進炭酸化技術

(1) 実験方法

供試材料を表1に示す。また、炭酸化実験の状況を図1に示す。炭酸化実験では、20°Cの環境で500mlポリビーカーに消石灰50gと所定量の蒸留水を投入し、かく拌機でかく拌しながらCO₂を所定の流量・時間で通気した。この際、乾燥および湿潤状態の試料は炭酸ガスを試料に吹き付け、スラリー状態の試料は炭酸ガス通気口をスラリー内に入れ、バーリングした。

(2) 炭酸化率の計算方法

炭酸ガス通気後、乾燥・湿潤状態の試料は有姿のまま、スラリー状態の試料は5種Cろ紙で吸引ろ過した後に回収した。これらを乾燥機に入れ、70°Cで1晩乾燥させた後、必要に応じて乳鉢で粉碎し、TG-DTAでCaCO₃の脱炭酸に由来する減量を求めて試料の炭酸化率を算出した。なお、炭酸化率は、原料のCaOがCaCO₃へと変化した比率で表した。

(3) 実験結果

CO₂の通気時間を120分とした場合について、消石灰の水/粉体比と炭酸化率の関係を図2に示す。図より、消石灰の炭酸化率は水/粉体比の影響を大きく受け、水/粉体比0.8を境界として以下のとおり特徴的な変化を示した。

〔水/粉体比が0.8以下の場合〕

乾燥状態(水/粉体比が0)では炭酸化率が10%程度と非常に小さく、水/粉体比が0.3まではその増加とともに炭酸化率が増加し、0.5を超えると炭酸化率が減少する二次関数のような挙動を示す。

〔水/粉体比が0.8を超える場合〕

水/粉体比が0.8を最小として、水/粉体比が2.0までその増加とともに炭酸化率が増加する挙動を示す。

炭酸化反応における水の影響については、既往の検討例も多く、上記の挙動を示す原因としては、以下のように理解できる。

表1 供試材料

分類	材料	備考
Ca系材料	消石灰	粉体
炭酸源	液化炭酸ガス	99.5vol%以上

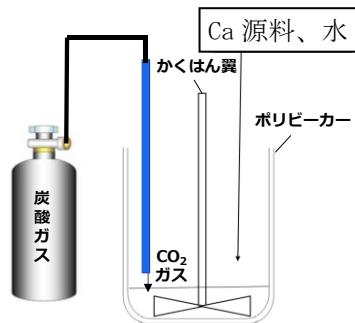


図1 炭酸化実験の状況

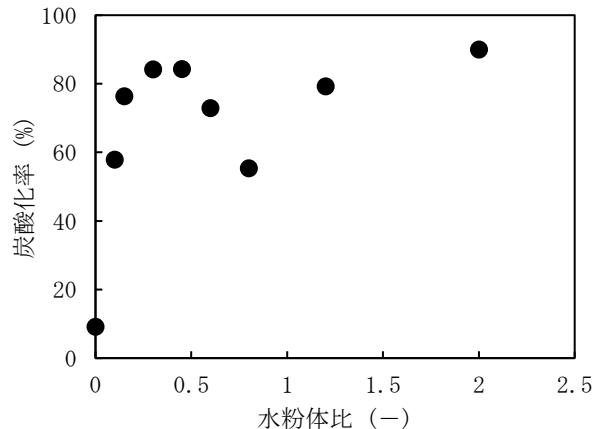


図2 消石灰の水/粉体比と炭酸化率の関係
(通気時間 120 分)

- 消石灰表面に水が存在すると、①消石灰のCaと通気したCO₂が水に溶解およびイオン化して速やかに反応し、②生成したCaCO₃の結晶が液中に偏在することで造膜による反応抑制が防止されるため⁽²⁾、炭酸化反応が促進される。
- 水/粉体比が0.3~0.5までは上記作用が発揮されるが、それ以上になると、粉体中の液相の存在比率が増すことで気相の連続性が減少し、CO₂が供給されにくくなる。
- 水/粉体比が0.8は粒子間が液相で満たされたキャピラリー域に近く、流動性も無い状態であるため、粒子表面へのCO₂の供給が最も乏しくなる。これを超えるとスラリー状態として液相中のCO₂と粒子との接触機会が増し、炭酸化反応が進みやすくなる。

次に、CO₂の通気時間を7.5分とした場合の実験結果を図3に示す。水/粉体比の影響が大きいことや、水/粉体比0.8を境界として挙動が変化する点は図2と同様であるが、炭酸化率が最大となる最適水/粉体比は大きく異なっている。すなわち、通気時間が120分の場合は、水/粉体比が2あるいはそれ以上とすることで最大の炭酸化率を得ることができるが、通気時間が7.5分の場合は、水/粉体比が0.3で最大値を示す。このように、炭酸化反応の影響因子である通気時間と水/粉体比とには密接な関わりがあり、これらを踏まえて最適な条件を定める必要があると知見した。

上記に例示した炭酸化の挙動は、通気時間や水/粉体比以外にも、使用するCa原料の種類、試料のかく拌条件、通気速度等の影響を受けるが、これらの解明と最適化を行うことで、促進炭酸化技術を確立した。

2.2.2 高強度造粒技術

(1) 実験方法

既往の研究では、炭酸塩(CaCO₃)を高含有し、かつ、高強度な骨材を製造した事例は見当たらない。そこで、基本条件を探るため、表2に示す供試材料を用い、以下の各検討を行った。

① 配合比率の検討

各種材料と水を種々の配合で混合し、ハンドミキサーで混練した後、ペーストを1×1×6cmの小型型枠に充填して直方体の供試体を成形した。これを密封養生した後、材齢7日で脱型して圧縮強度を測定した。

② 造粒方式の検討

造粒技術には乾式法と湿式法があり、後者はさらに押出し造粒、転動造粒などの種類が存在する。本実験では、異なる造粒方法で造粒物を成型し、これを用いたJISモルタルを調製して材齢7日の圧縮強度を測定し、天然骨材である珪砂との強度比を評価した。

(2) 実験結果

配合比率の検討例として、水/粉体比と圧縮強度の関係例を図4に示す。図中の各プロットは、炭酸カルシウムの配合量や結合材の種類・配合量が異なるものであるが、高強度を得るために水/粉体比の調整が重要であるとわかる。

海外では、人工砂の結合材としてポルトランドセ

メントを用いる事例もあるが⁽³⁾、セメントを使用せずに高強度化を図ることは可能であり、本開発では、低炭素結合材を用いて配合設計を進めることとした。

次に、造粒方式の検討例として、異なる造粒方式で試製した人工砂を使用した、モルタルの圧縮強度を図5に示す。造粒方法によって砂の強度が変化し、モルタルの強度が大きく異なることがわかる。

以上のように、高強度な造粒物を得るためにには、原料(Ca系材料を炭酸化したものや結合材)の配合、水/粉体比、造粒方法を最適化する必要がある。

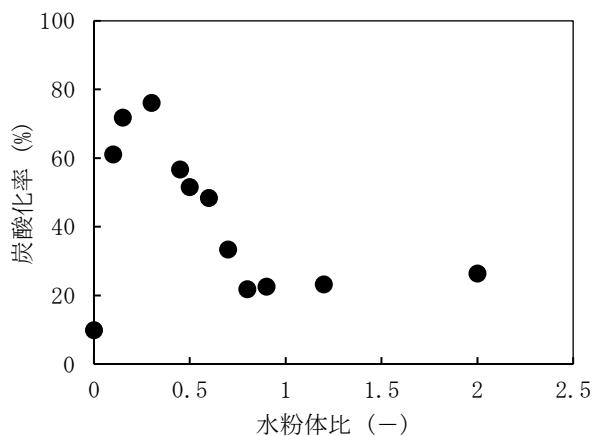


図3 消石灰の水/粉体比と炭酸化率との関係
(通気時間7.5分)

表2 供試材料

分類	材料
Ca系材料	炭酸カルシウム
	消石灰
結合材	ポルトランドセメント、 低炭素結合材など
その他添加剤	減水剤、増粘剤など

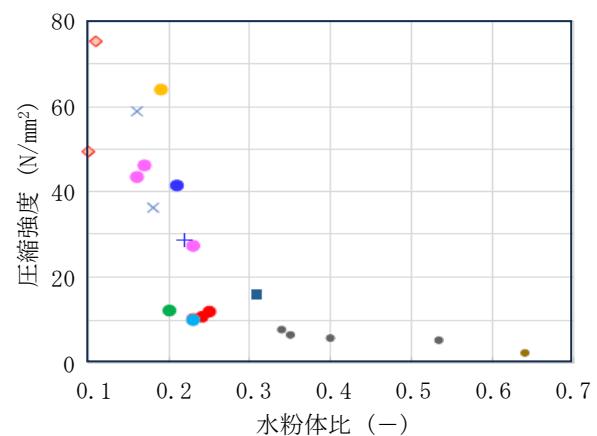


図4 水/粉体比と圧縮強度の関係例

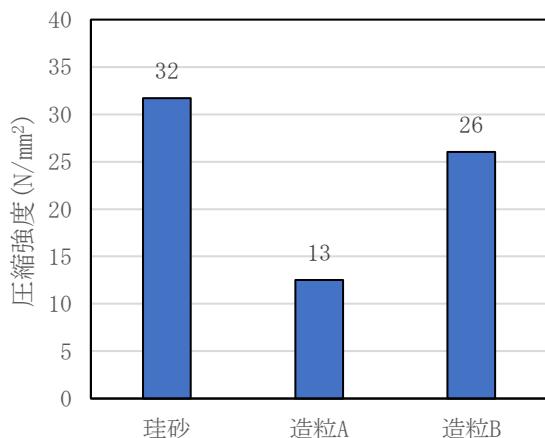
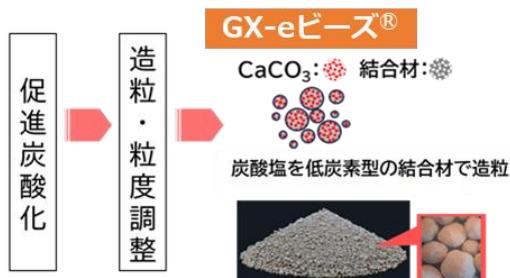
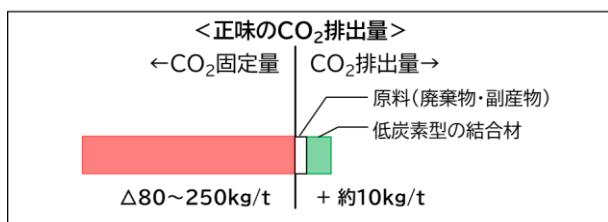


図 5 造粒方式によるモルタル圧縮強度の比較

図 6 開発したカーボンネガティブ人工砂
(GX-e ビーズ®, 最大粒径 5mm)図 7 GX-e ビーズ®の CO₂ 排出量 (材料由来)

加えて、造粒機の運転条件も人工砂の緻密化・高強度化に影響する因子であり、これらの最適化を行うことで高強度造粒技術の知見を蓄積した。

上記で示した各種実験を経て開発した促進炭酸化技術および高強度造粒技術をベースとし、図 6 に示すカーボンネガティブな人工砂を開発した。CO₂ 固定量は Ca 系材料の種類によって変動するが、現状、80~250kg/t (乾燥ベース) となることを確認している。また、図 7 に示したように材料由来の CO₂ 排出量はマイナスであり、普通ポルトランドセメントや高炉セメントと組み合わせて、様々な環境負荷低減型コンクリートの製造が可能になると期待される。

3 コンクリートへの適用例

GX-e ビーズ®を用いてコンクリート試験を実施した。使用材料を表 3、配合を表 4 に示す。フレッシュ性状の目標はスランプ 12±2.5cm、空気量 4.5±1.5%とした。また、硬化性状は GX-e ビーズ®の置換率 0%、50%の水準において、材齢 7 日、28 日の圧縮強度および静弾性係数を測定した。

フレッシュ性状について、一例として水セメント比 55%の試験結果を表 5 に示す。GX-e ビーズ®を使用したコンクリートは普通骨材を使用したものと比べ、同一スランプを得るための AE 減水剤の添加率が減少した。これは、GX-e ビーズ®の形状が球体に近いことが要因と考えられる。

硬化性状について、図 8 にセメント水比と圧縮強度の関係を示す。GX-e ビーズ®を用いたコンクリートは、普通骨材を使用したものと比べ圧縮強度が低下する傾向があるものの、その影響は小さかった。図 9 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図 9 に示す建築学会式は、普通コンクリートから高強度コンクリートに至るまで汎用的に利用されるコンク

表 3 使用材料

種類	記号	概要	
水	W	上水道水	
セメント	C	高炉セメント B 種、密度 : 3.04g/cm ³	
膨張材	EX	低添加型	
細骨材	S1	山砂、表乾密度 : 2.59g/cm ³ 、混合比 70%	
	S2	石灰碎砂、表乾密度 : 2.69g/cm ³ 、混合比 30%	
		GX-e ビーズ®、表乾密度 : 1.96g/cm ³	
粗骨材	G1	碎石 2005 (石灰岩)、表乾密度 : 2.69g/cm ³ 、実積率 : 61%	
	G2	碎石 2005 (石灰岩)、表乾密度 : 2.69g/cm ³ 、実積率 : 61%	
化学 混和剤	AD	AE 減水剤標準形	
	AE	AE 剤	
	D	消泡剤	

表 4 配合

W/C (%)	GX-e ビーズ®置換率 (%)	単位量(kg/m ³)					
		C	W	S1	S2	G1	G2
65	0	239	155	867	-	315	735
	50			435	325		
55	0			833	-	320	747
	25			626	157		
	50	273	150	417	312		
	75			210	468		
	100			-	623		
45	0	334	150	765	-	325	758
	50			383	286		

リートの圧縮強度と静弾性係数の関係式であり、GX-e ビーズ[®]を 50% 使用した場合も同様の傾向を示した。

コンクリート試験の結果より、GX-e ビーズ[®]を使用したコンクリートは、一般的なコンクリートと同程度のフレッシュ性状および強度発現性が得られることを確認できた。一方、耐久性の評価については現在実施中である。今後は、GX-e ビーズ[®]を使用したコンクリートの配合設計方法を決定し、幅広い分野での適用を目指す。

表 5 フレッシュ性状の試験結果 (W/C=55%)

GX-e ビーズ [®] 置換率 (%)	混和剤 添加率 [*] (%)	フレッシュ性状 [*]	
		スランプ (cm)	空気量 (%)
0	1.00	11.0	4.5
25	0.95	10.5	4.9
50	0.95	11.5	4.7
75	0.90	12.5	4.8
100	0.80	11.0	5.0

*AE および D の添加率一定

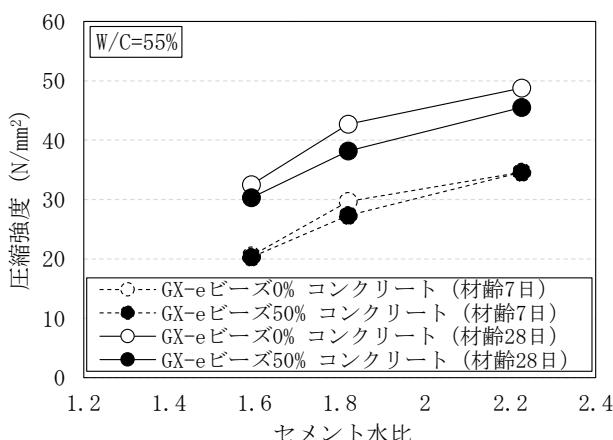


図 8 C/W と圧縮強度の関係

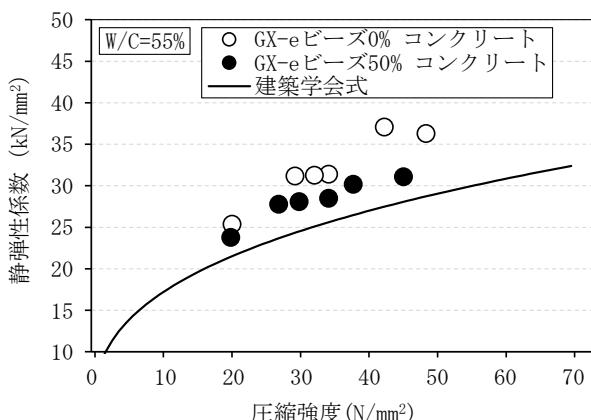


図 9 圧縮強度と静弾性係数の関係

4 二次製品への適用例

サンヨー宇部株式会社（本社：山口県山口市）とともに、GX-e ビーズ[®]を使用したインターロッキングブロックの実機試験製造および試験施工を実施した。インターロッキングブロックの商品名は「スリムペイブ」⁽⁴⁾であり、その概要を表 6 に示す。表層は擬石調タイプとし、白色と灰色のスリムペイブを製造した。GX-e ビーズ[®]は、基層の材料中の細骨材に対して 25 および 50vol%置換して使用した。（図 10）

製造直後のスリムペイブを写真 1 に示す。GX-e ビーズ[®]を使用したスリムペイブは、25 および 50vol%置換においても、通常品と同じ製造条件で問題なく成形された。GX-e ビーズ[®]を使用したスリムペイブおよびその断面を写真 2 に示す。断面中に確認できる白色の細骨材が GX-e ビーズ[®]である。製造したスリムペイブの適合性評価結果を表 7 に示す。いずれの置換率でも、歩道用および車道用として適用可能な曲げ強度 (3.0 および 5.0N/mm²) を満足していることを確認した。また、GX-e ビーズ[®]の使用によりブロックが軽量化していることが分

表 6 スリムペイブの概要

条件	摘要
規格寸法	63mm×298mm
厚さ	60/80mm
使用量	51.3 個/m ²
表層タイプ	擬石調タイプ/標準タイプ
表層カラー	白/灰/黒/薄橙

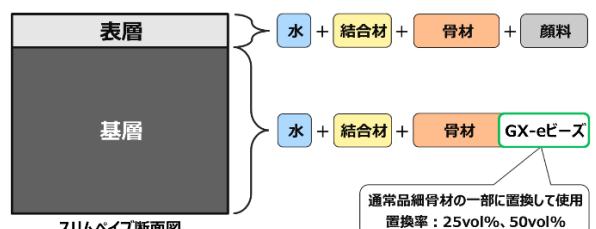


図 10 GX-e ビーズ[®]使用スリムペイブの材料構成



写真 1 製造直後のスリムペイブ

かる。

試験施工は、当社研究所(山口県宇部市)の構内で実施した。施工完了後の状況を写真3に示す。GX-e ビーズ[®]を使用したスリムペイブ（施工面積：約37m²、使用個数：1,833個）は、通常のスリムペイブ（施工面積：約20m²）と共に滞りなく敷設され、不陸もなく良好な仕上がりであった。なお、GX-e ビーズ[®]を使用したスリムペイブの施工により約70kgのCO₂を固定化できた。

今回の実機試験製造および試験施工により、GX-e ビーズ[®]の置換率を更に高めることが可能と分か



写真2 GX-e ビーズ[®]を使用したスリムペイブおよびその断面

表7 スリムペイブの適合性評価結果

	1個当たりの質量 ^{※1}	適合性評価 ^{※2}	
		歩道用	車道用
通常品	2.70kg	○	○
GX-e ビーズ [®] 置換率 25vol%	2.60kg	○	○
GX-e ビーズ [®] 置換率 50vol%	2.48kg	○	○

※1:3本の平均質量

※2:JIS A 5371「プレキャスト無筋コンクリート製品」附属書B 推奨仕様B-3 インターロッキングブロックにおける曲げ強度の規定値



写真3 施工完了後の状況

ったため、今後はCO₂固定量の更なる増加と適用先の拡張を目指す。

5 今後の検討

カーボンネガティブ人工砂の製造条件を確立できたことから、今後は、設備をスケールアップし、安定品質を確保したうえでの量産条件を検討する予定である。本技術は、当社が北九州市と共同で取り組む「カーボンリサイクル資材の社会展開を目指した製造・利用技術の実証事業」（経済産業省の令和6年度「産官学連携による自律型資源循環システム強化促進事業」に採択済）を構成するカーボンリサイクル技術の一つでもあり、このような機会を含めて社会実装を目指していきたい。

参考文献

- 1) 佐々木猛、八木利之：エコタンカル[®](軽質炭酸カルシウム)とその可能性、セメント・コンクリート、2022、No.900
- 2) 松田応作、山田英夫：消石灰の炭酸化について、Gypsum&Lime、97、pp.3-10、1968
- 3) JOGMEC：海外カーボンリサイクル技術実現可能性調査、令和元年度 JOGMEC 石炭開発部成果報告会 海外炭開発高度化調査、2020.8
- 4) サンヨー宇部株式会社 HP、製品一覧「スリムペイブ」、
<https://www.sanyo-.co.jp/products/ilb/slimpave.html>

上田陽一・うえだ よういち

研究所 セメント研究室
リサイクルグループ 研究員

野田謙二・のだ けんじ

研究所 セメント研究室
リサイクルグループ 主査

丸屋英二・まるや えいじ

研究所 セメント研究室
リサイクルグループ グループリーダー

伊藤隆祐・いとう たかひろ

研究所 コンクリート研究室
生コン・特殊コンクリート研究員

玉滝浩司・たまたき こうじ
研究所 コンクリート研究室
生コン・特殊コングループ グループリーダー

久保雄暉・くぼ ゆうき
研究所 コンクリート研究室
建材製品グループ 研究員

石田剛朗・いしだ たけお
研究所 コンクリート研究室
建材製品グループ グループリーダー