

◇論文◇

低炭素型炭酸化養生インターロッキングブロックの開発と
CO₂削減貢献量の評価Development of Carbonation-cured Low-carbon
Interlocking Blocks and Evaluation of Avoided CO₂ Emissions

星野 清一*, 小林 和揮**, 扇 嘉史**,
橋本 真幸***, 細川 佳史****, 一坪 幸輝*****,
野村 幸治*****

HOSHINO, Seiichi*; KOBAYASHI, Kazuki**; OHGI, Yoshifumi**;
HASHIMOTO, Masayuki***; HOSOKAWA, Yoshifumi****; ICHITSUBO, Koki *****;
NOMURA, Koji*****

要 旨

セメント系材料を活用したCCU技術の開発を目的に、化学成分の調整によって低炭素化するとともに炭酸化用養生を行うことによって硬化する特性を持つ低炭素型セメントを開発した。本セメントを用いたコンクリート製品の一例として、炭酸化養生を行った低炭素型炭酸化養生インターロッキング(IL)ブロックを製造し、その特性を評価した。その結果、本報にて開発した普通ブロックはJIS A5371の車道用ILブロックの規格を、透水性ブロックは歩道用の透水性ILブロックの規格を満足することが示された。またLCAにより、従来のILブロックに代わって本低炭素型炭酸化養生ILブロックを適用した場合のCO₂削減貢献量を評価した。その結果、低炭素型炭酸化養生ILブロック1tの適用によるCO₂削減貢献量は、69.1 kg/tと評価された。以上の特性評価結果およびCO₂削減貢献量の評価結果から、本報にて開発した低炭素型炭酸化養生ILブロックはCCU技術として有効であることが示された。

キーワード : 低炭素型セメント, 炭酸化養生, インターロッキングブロック, 強度,
CO₂排出量, CO₂削減貢献量, CCU

*カーボンニュートラル技術開発プロジェクトチーム 企画管理グループ

Planning & Administration Group, Carbon Neutral Technology Development Project Team

**中央研究所 セメント・コンクリート研究部 セメント化学チーム

Cement Chemistry Team, Cement & Concrete Research Department

***中央研究所 セメント・コンクリート研究部 コンクリートソリューションチーム

Concrete Solution Team, Cement & Concrete Research Department

****中央研究所 セメント・コンクリート研究部 セメント化学チーム リーダー

Manager, Cement Chemistry Team, Cement & Concrete Research Department

*****カーボンニュートラル技術開発プロジェクトチーム 技術グループ 炭酸塩利用技術チーム リーダー

Manager, Carbonation Technology Team, Engineering & Technology Group, Carbon Neutral Technology Development Project Team

*****カーボンニュートラル技術開発プロジェクトチーム 企画管理グループ リーダー

Manager, Planning & Administration Group, Carbon Neutral Technology Development Project Team

ABSTRACT

A low-carbon cement was developed in this study as part of development of CCU technologies using cementitious materials. The cement is made low in carbon by adjusting its chemical composition and characterized by its ability to harden during carbonation curing. As an application of the low-carbon cement to precast concrete products, two types of carbonation-cured low-carbon interlocking (IL) blocks were manufactured by carbonation curing in CO₂ gas, and their properties were evaluated. It was found that the IL blocks of ordinary type and of water permeable type satisfied the JIS A 5371 requirements specified for roadway IL blocks and for permeable sidewalk IL blocks, respectively. Evaluation was also made by means of LCA on avoided CO₂ emissions to be achieved by substituting the carbonation-cured low-carbon IL blocks for conventional IL blocks. The results showed that the avoided CO₂ emissions by the use of the carbonation-cured low-carbon IL blocks would be 69.1 kg/t. These results of evaluation on the properties and avoided CO₂ emissions indicated the effectiveness of the carbonation-cured low-carbon IL blocks developed in this study as a CCU technology.

Keywords : *Low-carbon cement, Carbonation curing, Interlocking block, Strength, CO₂ emissions, Avoided CO₂ emissions, CCU*

1. はじめに

世界的なカーボンニュートラルに向けた動向の中、セメント産業においても二酸化炭素(CO₂)排出量の削減はひとつの重要な課題となっている。セメントに関連するCO₂削減の方法としては、セメント自体のCO₂排出量を低減することのほか、セメント系材料を活用してCO₂を吸収、固定化させてCO₂の利用を図っていくCCU (Carbon dioxide Capture and Utilization) 技術の活用などが挙げられる¹⁾²⁾。

これまで当社では、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの助成事業として“炭素循環型セメント製造プロセス技術開発“(JPNP20013. 事業期間：2020年7月～2022年3月)を進めてきた³⁾⁴⁾。本事業では、セメント産業を中心としたCO₂や建設廃棄物の有効利用を行うための一連の技術開発ならびにプロセスの構築を目的に、セメント工場などにおいて実証試験を進めている。同試験では、アミン系化学吸収法によるCO₂分離・回収設備(Fig. 1)によりキルン排ガス中のCO₂を回収するとともに、そのCO₂を廃コンクリートやコンクリートスラッジ等のセメント系材料や廃棄物に固定化することで有効利用を図っていくための技術開発を行っている⁵⁾。セメント系材料によるCO₂の有効利用(CCUC)についてはい

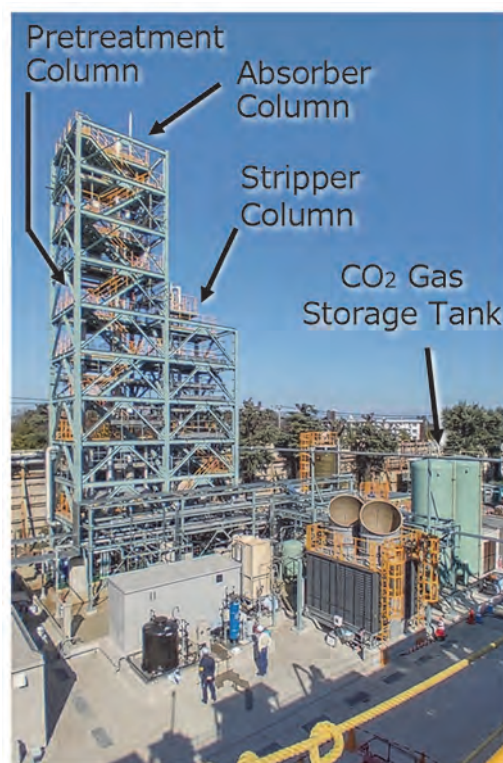


Fig.1 CO₂ capture facility based on the amine absorption method for demonstration test (Kumagaya Plant)
(アミン吸収法によるCO₂分離・回収
実証試験設備(熊谷工場))

くつかの技術開発を実施しているが、このうちの一つに ” 低炭素型炭酸化養生コンクリート製品の製造技術 “がある。本技術では、製造時のCO₂排出量が削減できるようにCaO成分の割合を低減し、かつ炭酸化養生により強度を発現する特性を持つ低炭素型セメントを新たに開発した。また、コンクリート製品の一例として、本低炭素型セメントを適用したインターロッキングブロック（以下、低炭素型炭酸化養生ILブロックと称す）の技術開発を行った。なお、低炭素型セメントは、本報で示すNEDO助成事業で得られた知見などをベースに、カーボフィクス®セメントとして新たに開発、商標登録を行っている。

一方、セメント系材料を活用したCCU技術の開発や実用化に際しては、その技術を実際に社会に適用した場合に得られるCO₂の削減効果について、LCA（Life Cycle Assessment）手法を用いた評価によって検証しておくことも重要である。

本研究では、セメント系材料を活用したCCU技術として、この低炭素型炭酸化養生ILブロックを実際のコンクリート製品工場の生産ラインで製造を行い、その性能を検討した。また、従来のILブロックに代わって低炭素型炭酸化養生ILブロックを適用した場合のCO₂削減貢献量を評価することにより、低炭素型炭酸化養生ILブロックのCCU技術としての有効性を検討した。

2. 低炭素型炭酸化養生ILブロックの製造

2.1 試験方法

(1) 低炭素型セメントとそのCO₂排出原単位

試験に用いる新たに開発した低炭素型セメントは、1時間当たりの製造量が約1tの小型の試験キルンにより製造した。Table 1に低炭素型セメントのモジュラスを示す。表中には、比較例として一般的な普通ポルトランドセメント(OPC)のモジュラスも示した。本試験で使用した低炭素型セメントはOPCよりもHMが低くCaO量が少ない組成となっており、これにより原料石灰石由来のCO₂排出量が削減される。

Table 1 Moduli of the low-carbon cement
(低炭素型セメントのモジュラス)

	HM	SM	IM
Low-carbon cement	1.39	2.99	1.66
OPC (example for reference)	2.24	2.46	1.80

HM (Hydraulic modulus) = $\text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$

SM (Silica modulus) = $\text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$

IM (Iron modulus) = $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3$

また、焼成温度も低下することから製造時におけるエネルギー由来のCO₂排出量も削減される。これら両者の効果によりセメントとしてのCO₂排出量が削減される。また、本低炭素型セメントは新たなモジュラス（化学成分）の設計とすることにより、炭酸化養生を行うことによってCO₂を固定化するとともに、強度を発現する特性を有している。

低炭素型セメントのCO₂排出量は、原料の脱炭酸由来と焼成エネルギー由来のCO₂排出量の和として求めた。原料の脱炭酸由来のCO₂排出量は、石灰石に含まれる炭酸カルシウムと炭酸マグネシウムによるものとして与えた。また、焼成エネルギー由来のCO₂排出量は以下の計算によって求めた。低炭素型セメントクリンカーの製造に要する熱エネルギー（クリンカー焼成熟）をJIS R 0303「セメント工業用窯炉の熱勘定方式」に基づいて算定した。その際、原料には石灰石、代替原料、珪石を用いてクリンカーを製造することを想定して、クリンカー焼成用熱を計算した。続いて、クリンカーの製造に必要なエネルギー（入熱）を求めた。既往の知見では、セメント工場でのクリンカー焼成用熱は入熱に対して53%とされている⁶⁾。低炭素型セメントの基材クリンカーを焼成する際もこれと同様であると仮定し、上記で計算したクリンカー焼成用熱から、入熱に要するエネルギーを計算した。クリンカーの製造に必要な入熱のエネルギーは、石炭の燃焼により供給するものとして計算した。この際、石炭の燃焼に伴う、エネルギーあたりのCO₂排出量（CO₂排出係数）は既往の知見を用いた⁷⁾。この石炭のCO₂排出係数を、上記で得られたクリンカー1tあたりの入熱に要するエネルギーに乗じることで、クリンカーの焼成エネルギー由来のCO₂排出量を求めた。

低炭素型セメントのCO₂排出削減量を求める際の比較となるOPCのCO₂排出量には、日本のポルトランドセメントにおけるCO₂排出量の公表データ（グロス値：824.2 kg/t⁸⁾）を用いた。

(2) ILブロックの製造方法

低炭素型炭酸化養生ILブロックの製造には、前項に示す低炭素型セメントを用いた。ILブロックは普通ブロック、透水性ブロックの2種類を作製した。低炭素型炭酸化養生ILブロックの製造プロセスの概略をFig. 2に示す。ILブロックは、実際のコンクリート製品工場の設備を用い、ミキサーによって練り混ぜたコンクリートを加圧振動成型機（ブロック成型機）で成形した。その後、脱型したブロックを炭

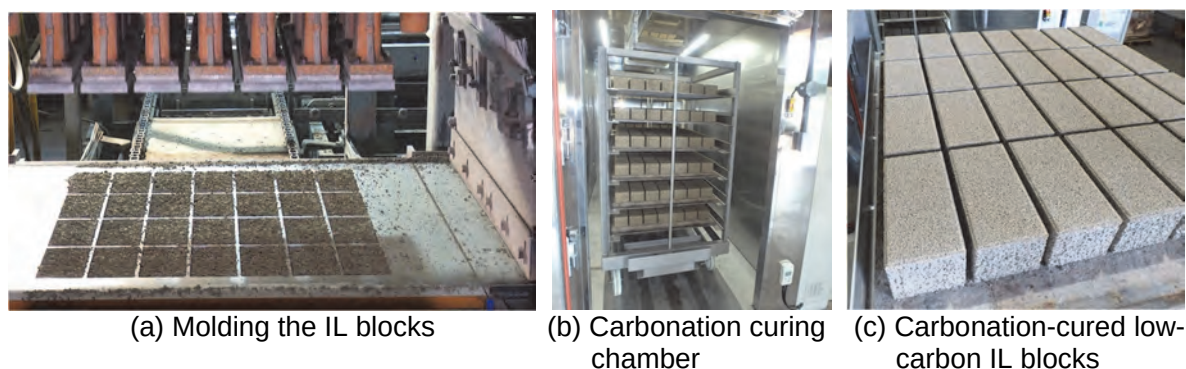


Fig.2 Outline of the carbonation-cured low-carbon IL block manufacturing process
(低炭素型炭酸化養生 IL ブロックの製造プロセスの概略)

炭酸化養生槽内で養生することによって製造した、ILブロックは、 $98 \times 198 \times$ 厚さ 80 mm の形状とした。炭酸化養生は、**Fig. 2(b)**に示す養生設備(層内寸法： $3.1 \times 1.5 \times$ 高さ 2.1 m)にて、温度 30°C 、相対湿度 80% 、 CO_2 濃度 80% (N_2 濃度 20%)の条件で6日間行った。本報の試験における炭酸化養生では、セメント工場から分離・回収した CO_2 ではなく、市販の CO_2 ガスを代用した。なお、これら CO_2 ガスの違いによるILブロックの特性への影響はほとんどないものと考えている。ILブロックは、1回の試験で336個製造した。試験は、普通ブロック、透水性ブロックともに2回ずつ行い、それぞれ672個のILブロックを製造した。

(3) ILブロックの曲げ強度、透水係数および CO_2 固定量

各試験回における炭酸化養生後のILブロックからそれぞれ3個を抜き取り、曲げ強度および透水係数の測定を行った。曲げ強度および透水係数は、日本工業規格JIS A 5371「プレキャスト無筋コンクリート製品」に準拠し測定した。透水係数は、透水性ブロックのみについて測定を行った。

ILブロックへの CO_2 の拡散・吸収の状態については、ブロックの破断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧することにより確認した。またILブロックへの CO_2 の固定量については、粗砕したILブロックを振動式ディスクミルにて粉碎した後、炭素・硫黄分析装置 Carbon/Sulfur analyzer (EMIA-Step, HORIBA社製)で全炭素量を測定することによって求めた。

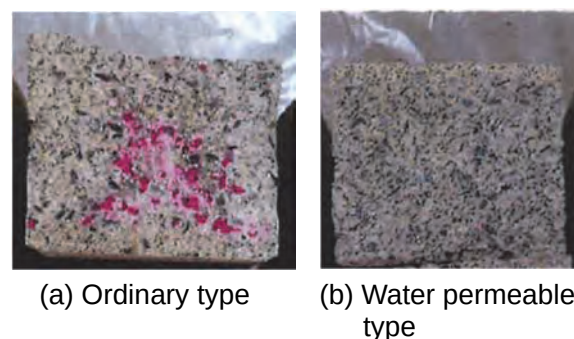


Fig.3 Carbonation test for the carbonation-cured low-carbon IL blocks
(低炭素型炭酸化養生 IL ブロックの炭酸化の状況)

2.2 試験および評価の結果

(1) 低炭素型セメントの CO_2 固定量と CO_2 削減効果

フェノールフタレイン溶液の噴霧によりILブロックの炭酸化の状況を確認した結果を**Fig. 3**に示す。普通ブロックは、中心部にわずかに呈色した部分がみられたが、周囲の部分はほとんど呈色しておらず、炭酸化養生によって多くの部分で炭酸化していることが確認された。また、透水性ブロックは全面で呈色しておらず、内部のすべての部分にわたって炭酸化が進行していることが確認された。これは、透水性ブロックは普通ブロックに比べてポーラスであり、 CO_2 ガスが内部まで拡散しやすいためと考えられた。

Table 2に、低炭素型セメント 1 t あたりの CO_2 削減効果として、セメントの低炭素化による製造時の CO_2 削減量、低炭素型炭酸化養生ILブロックにおけるセメントの CO_2 固定量、およびそれらによる合計削減量を示す。普通ブロックおよび透水性ブロックは、単位セメント量当たりそれぞれ $243, 236 \text{ kg/t}$ の CO_2 を固定していることが示された。一方、低炭素型セメントの製造時の CO_2 排出量は、OPCよりも 265 kg/t

Table 2 CO₂ reduction effect per ton of low-carbon cement (kg-CO₂/t-cement)
(低炭素型セメント1tあたりのCO₂削減効果)

Type of the Carbonation-cured low-carbon IL blocks	CO ₂ emissions reduction by low-carbon cement	CO ₂ absorption by carbonation curing	Total
Ordinary type	265	243	508
Water permeable type		236	501

低減されるとの結果が2.1(1)項による算定から得られている。このセメントの低炭素化によるCO₂排出削減量と炭酸化養生によるCO₂固定量の合計値より、低炭素型炭酸化養生ILブロックはOPCで製造したILブロックと比較して、セメント1tあたり普通ブロックでは508 kg/t、透水性ブロックでは501 kg/tのCO₂削減効果が得られることが明らかとなった。

(2) 曲げ強度および透水性

低炭素型炭酸化養生ILブロックの曲げ強度および透水係数の測定結果をFig. 4に示す。普通ブロックは第1回、第2回製造品の平均曲げ強度がそれぞれ5.8, 6.3 N/mm²であり、日本工業規格JIS A 5371の車道用ILブロックの規格強度である5 N/mm²以上を満足した。また、透水性ブロックの第1回、第2回製造品の平均曲げ強度はそれぞれ3.4, 3.9 N/mm²であり、歩道用ILブロックの規格強度である3 N/mm²以上を満足した。透水性ブロックの透水係数は、第1回、第2回製造品のそれぞれで 11.4×10^{-4} m/s, 6.6×10^{-4} m/sとなり、JIS規格である 1.0×10^{-4} m/s以上を満足した。

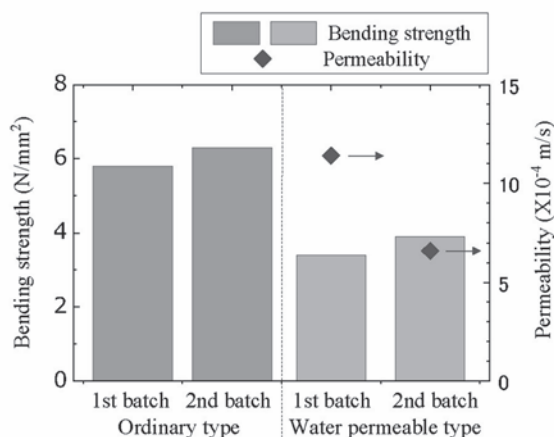


Fig.4 Bending strength and permeability of the carbonation-cured low-carbon IL blocks
(Averages of three arbitrarily sampled blocks)
(低炭素型炭酸化養生ILブロックの曲げ強度と透水係数)

以上の結果より、本報で製造した低炭素型炭酸化養生ILブロックの普通ブロックは、車道用ILブロックのJIS規格を、また透水性ブロックは歩道用透水性ILブロックの規格を満足するものであり、実用可能な性能を有していることが示された。

3. 低炭素型炭酸化養生ILブロックのCO₂削減貢献量の評価

ここでは、前項までに開発を行った低炭素型炭酸化養生ILブロックについて、従来のILブロックとCO₂排出量を比較し、そのCO₂削減貢献量を評価した。前項までの検討では、主に材料面の結果について述べたが、本項におけるCO₂削減貢献量の評価は、材料や製品の範囲のみならず、それに必要な輸送や、CO₂の分離・回収、コンクリート製品の製造など、実際の社会に適用するうえで必要となる一連のプロセスも考慮して行った。

3.1 CO₂排出量およびCO₂削減貢献量の評価方法

(2) 評価のシステム境界

評価におけるシステム境界をFig. 5に示す。機能単位はILブロック1tの製造とし、その際のCO₂排出量や削減貢献量について評価を行った。CCU技術を適用した低炭素型炭酸化養生ILブロックのプロセス（以下、「適用プロセス」）では、以下を評価範囲とした。

- 1) セメント工場の排ガスからCO₂を分離・回収する工程
- 2) 分離・回収したCO₂を液化する工程
- 3) 液化したCO₂をコンクリート製品工場に輸送する工程
- 4) 低炭素型セメントをセメント工場からコンクリート製品工場まで輸送する工程
- 5) 低炭素型炭酸化養生ILブロックを製造する工程
- 6) 製造したILブロックを使用先まで輸送する工程

また、セメント工場から排出される当該技術利用分のCO₂量についても評価に加えた。

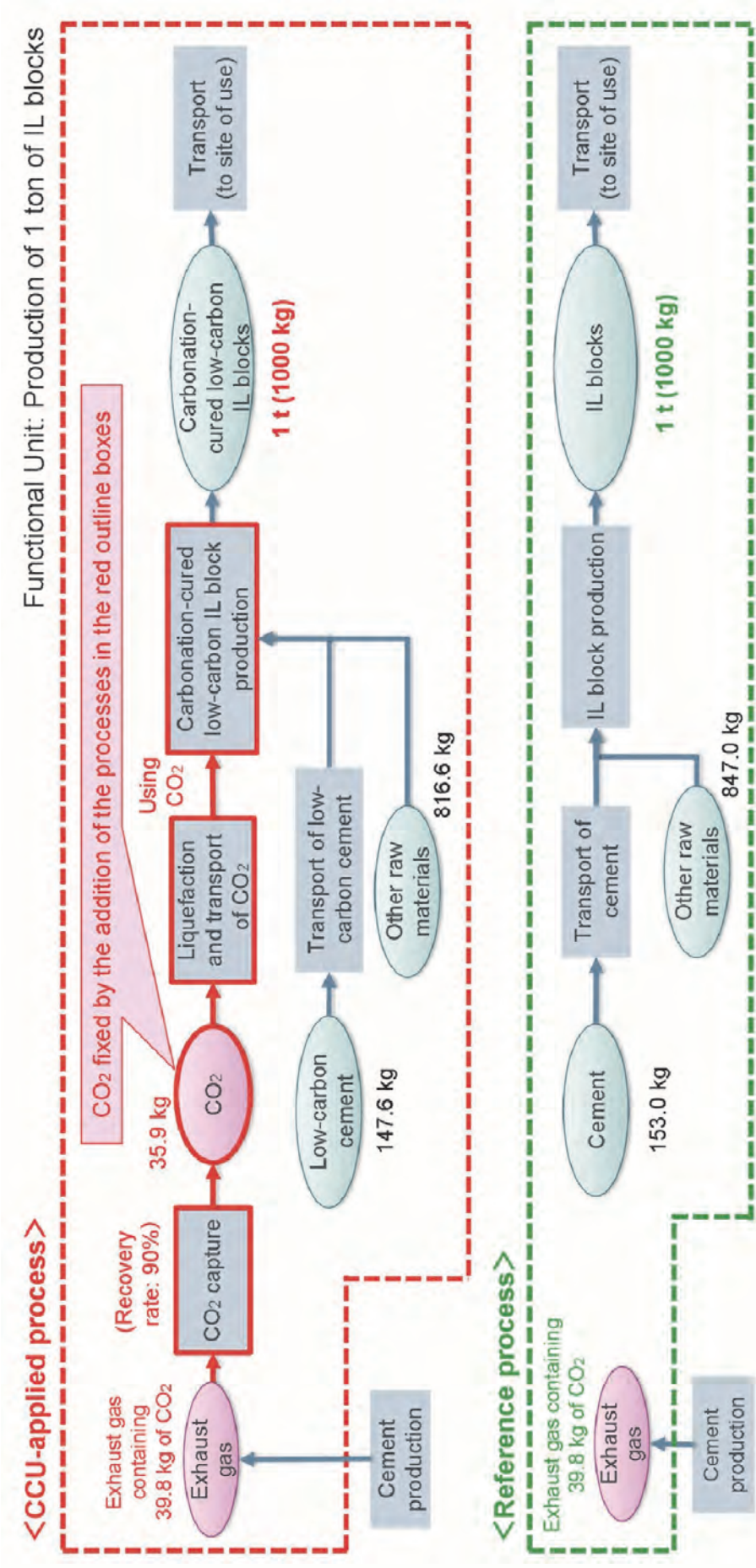


Fig.5 System boundary of the evaluation
(評価におけるシステム境界)

リファレンスとした一般の IL ブロックのプロセス（以下、「リファレンスプロセス」）では、以下を評価範囲とした。

- 1) セメント（OPCを想定）をセメント工場からコンクリート製品工場まで輸送する工程
- 2) ILブロックを製造する工程
- 3) 製造したILブロックを使用先まで輸送する工程

また、リファレンスプロセスに対しては、適用プロセスと評価範囲を統一するため、適用プロセスにおいて設定しているセメント工場から排出される当該技術利用分のCO₂についても評価範囲に加えた。

(2) 評価の方法

Fig. 5のシステム境界に基づき、適用プロセス、リファレンスプロセスそれぞれのCO₂排出量を算定した。算定において設定したインベントリ項目およびデータを**Table 3**に示す。算定では、電力のCO₂排出係数には、2019年における日本の電力の標準的なCO₂排出係数である0.47 kg-CO₂/kWh⁹⁾を用いた。また、輸送のCO₂排出量には、ライフサイクルインベントリデータベースIDEA v2¹⁰⁾をもとに、トラックの積載重量と輸送距離を考慮して求めた排出量を与えた。

適用プロセスでは、以下のとおりCO₂排出量を算定した。CO₂分離・回収にはアミンを用いた化学吸収法を設定し、回収率90%でセメント排ガスからのCO₂を回収するものとした。本算定における機能単位はILブロック1tの製造としているが、**Table 2**などをもとに別途求めた結果、この時に固定化されるCO₂の量は35.9 kgであり、そのためには39.8 kgのCO₂が含まれるセメントキルン排ガスが必要と見積もられた。CO₂分離・回収設備の運転によるCO₂排出量は、**Fig. 1**に示される実証試験設備で消費される電力および熱エネルギーの設備スペック値をもとに算出した。CO₂の液化は、文献¹¹⁾をもとに、35.9 kgのCO₂を液化する際に要する電力量を求め、CO₂排出量を算定した。液化CO₂の輸送は10tトラックを想定し、また輸送距離は50kmを想定した。

ILブロック製造の“製造(manufacturing)”に係わるインベントリには、IDEA v2¹⁰⁾の“道路用コンクリート製品”のインベントリを代用した。また、各材料の量は、セメント、セメント以外の材料および固定化されるCO₂の合計が1tとなるように設定した。各材料のCO₂排出原単位については、低炭素型セメントには2.1. (1)項によって求めたCO₂排出量を、セメント以外の材料についてはそれぞれIDEA v2に

よる”砂”，”碎石”，”水”のCO₂排出量を用いた。また、CO₂養生では養生時にCO₂ガスを送入する必要があるが、それに要するエネルギーは微小なものと考えられることから、電力量は0 kWhを仮定した。炭酸化養生の過程では低炭素型炭酸化養生 IL ブロックにCO₂が吸収・固定化されるが、このCO₂量を固定量として与えた。ILブロックに使用する低炭素型セメントのセメント工場からコンクリート製品工場までの輸送、および製造したILブロックの使用先までの輸送は10tトラックを想定し、また輸送距離は50kmを想定した。

リファレンスプロセスでは、以下のとおりCO₂排出量を算定した。ILブロック製造の“製造”に係わるインベントリには、適用プロセスと同様のインベントリを用いた。また、セメントのCO₂排出量には、日本のポルトランドセメントのCO₂排出量(gross値)データである824.2 kg/t⁸⁾を用い、細骨材、粗骨材、水には適用プロセスと同様のインベントリを用いた。ILブロックに使用するセメントのセメント工場からコンクリート製品工場までの輸送、および製造したILブロックの使用先までの輸送は、適用プロセスと同様に10tトラックを想定し、また輸送距離は50kmを想定した。

3.2 CO₂削減貢献量の評価結果

(1) 現在におけるCO₂削減貢献量の評価結果

低炭素型炭酸化養生 IL ブロック 1 tあたりのCO₂削減貢献量の評価結果を**Fig. 6**に示す。一般的なILブロックのプロセスであるリファレンスプロセスでは、セメント工場排ガス、ILブロックの製造におけるセメント等材料起源分とエネルギー分、および輸送からの排出により、CO₂排出量は206.6 kg/tと算定された。一方、適用プロセスではリファレンスプロセスと比較してCO₂分離・回収およびCO₂の液化・輸送による排出が増加するものの、ILブロック製造におけるセメント等材料起源分のCO₂排出量が低下したこと、またCO₂固定化による削減効果によって、トータルのCO₂排出量としては137.5 kg/tとリファレンスプロセスより小さくなった。なお、ILブロック製造におけるセメント等材料起源分のCO₂排出量の低減は、セメントに低炭素型セメントを使用したことに起因する。これらCO₂排出量の差分から、低炭素型炭酸化養生 IL ブロック 1 tの適用によるCO₂削減貢献量は、69.1 kg/tと算定された。

本削減貢献量の算定結果は、前述のとおりのセメントを低炭素化したことによる効果と、炭酸化養生に

Table 3 Inventory items and data used in the evaluation (Functional unit: 1 ton of IL blocks produced)
(評価において設定したインベントリ項目およびデータ (機能単位: 1Lブロック1 tの製造))

Processes	Inventory or condition items	Inventory data or conditions		Other conditions and remarks	Factors and others used in CO ₂ emissions calculation
		Reference process	CCU-applied process		
Cement plants	Amount of CO ₂ emissions (for the use of relevant technologies)	39.8 (kg)	39.8 (kg)		
	Electricity	---	2.15 (kWh)		0.47 kg/kWh ⁹⁾
	Thermal energy	---	145.2 (MJ)		CO ₂ emission intensity of natural gas: based on IDEEA v2.
CO ₂ capture facility (CO ₂ throughput: 39.8 kg)	Electricity	---	3.420 (kWh)	Based on the reference ¹⁰⁾ .	0.47 kg/kWh ⁹⁾
	Truck size	---	10 (t)		
	Transport distance	---	50 (km)		
	Load factor	---	50 (%)	Assuming 100% load factor one way.	IDEA v2 truck transport service: 10 ton truck, load factor 50%.
Transport of cement	Transport volume	153.0 (kg)	147.6 (kg)		
	Truck size	10 (t)	10 (t)		
	Transport distance	50 (km)	50 (km)		
	Load factor	50 (%)	50 (%)	Assuming 100% load factor one way.	IDEA v2 truck transport service: 10 ton truck, load factor 50%.
Production of IL blocks (per ton production)	Amount of materials	153.0 (kg)	147.6 (kg)	CCU-applied process: Low-carbon cement Reference: Ordinary portland cement	
	Amount of materials	847.0 (kg)	816.6 (kg)	Coarse aggregate, fine aggregate and water.	Based on IDEEA v2 crushed stone, sand and water inventories (CO ₂ emission intensities).
	Electricity	11.48 (kWh)	11.48 (kWh)		0.47 kg/kWh ⁹⁾
	CO ₂ emissions from fuel-based energy	20.15 (kg)	20.15 (kg)		
	Electricity for the facility (CO ₂ supply)	---	0 (kWh)	Required electricity is considered negligible compared to the above and assumed to be 0 kWh.	
	Amount of fixed CO ₂	---	-35.9 (kg)		
Transport of IL blocks (per ton production)	Truck size	10 (t)	10 (t)		
	Transport distance	50 (km)	50 (km)		
	Load factor	50 (%)	50 (%)	Assuming 100% load factor one way.	IDEA v2 truck transport service: 10 ton truck, load factor 50%.

⁽⁹⁾ Assuming a CO₂ capture rate of 90% at the CO₂ capture facility.

よってCO₂を利用（固定化）したことによる効果の両者を含んだものとなっている。このうちCO₂の利用に関わる分として、CO₂固定化による低減分と、CO₂の分離・回収および液化・輸送による増加分の合計を求めると、削減量は25.3 kg/tであり、削減貢献量全体に対する寄与割合は37%であった。また、セメントの低炭素化に由来するCO₂削減量は43.8 kg/tであり、削減貢献量全体に対する寄与割合は63%であった。

(2) カーボンフリー化への進行を想定したCO₂削減貢献量の評価結果

ここでは、将来的に電力や輸送のカーボンフリー化が進行した場合を想定し、それらのCO₂排出係数が低下した場合のCO₂排出量や削減貢献量を算定した。算定で与えた電力および輸送のCO₂排出係数をTable 4に示す。2030年における電力のCO₂排出係数には、日本政府が示す野心的な“2030年度におけるエネルギー需給の見通し”にもとづく全電源平均の電力排出係数（目標値）¹²⁾を与えた。またトラックでの輸送については、CO₂排出係数に明確かつ統一的な目標値がなかったことから現在の値を代用した。

カーボンフリー化を想定した時期については、電力、輸送ともにCO₂排出係数には0を与えた。Table 3に示すインベントリに対してTable 4に示す電力、輸送のCO₂排出係数を適用して算定することで、2030年目標値相当およびカーボンフリー化時期のCO₂排出量および削減貢献量を算定した結果をFig. 7に示す。将来的に電力や輸送がカーボンフリー化へ向かって進行した場合を想定した2030年排出係数相当やカーボンフリー化時期の評価結果では、現状と比較して電力や輸送に起因するCO₂排出量が低減した結果として、リファレンスプロセス、適用プロセスともにCO₂排出量は低下することが示された。また、両者の差分である削減貢献量は、現状では69.1 kg/tであるのに対し、2030年相当では70.4 kg/t、完全カーボンフリー化時期には79.6 kg/tと、カーボンフリー化が進行するに従い、より大きな効果が得られるようになることが評価された。

以上の結果では、低炭素型炭酸化養生ILブロックは現状でもCO₂削減効果が得られること、また将来的に電力や輸送がカーボンフリー化に向かって進行した場合にはより大きな削減貢献効果が得られることが示された。これらCO₂削減貢献量の評価結果や、

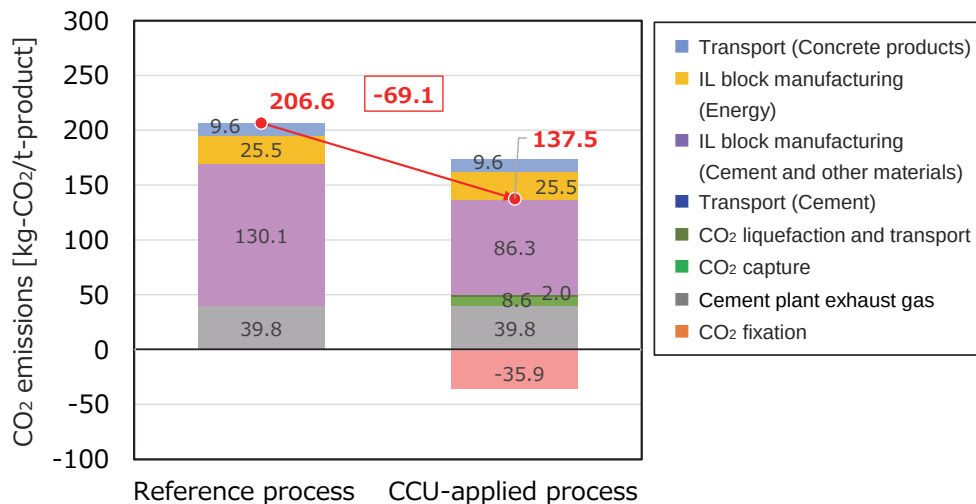


Fig.6 Evaluation results on the avoided CO₂ emissions per ton of carbonation-cured low-carbon IL blocks
(低炭素型炭酸化養生ILブロック1 tあたりのCO₂削減貢献量の評価結果)

Table 4 CO₂ emission factors for electricity and transport given in the calculation
(算定で与えた電力と輸送のCO₂排出係数)

	Present	Target 2030-equivalent state	Carbon-free state
Electricity [kg/kWh]	0.47 ⁹⁾	0.25 ¹²⁾¹³⁾	0
Transport [kg/(t・km)]	0.192	0.192	0

2.2節の性能評価結果においてILブロックとしての性能を満足していることを踏まえると、本報で示した低炭素型炭酸化養生ILブロックは、CCU技術として有効であることが示された。

4. ま と め

本報では、セメント系材料を活用したCCU技術の開発を目的に、化学成分の調整によって低炭素化するとともに炭酸化養生を行うことによって硬化する特性を持つ低炭素型セメントを開発した。本セメントを用いたコンクリート製品の一例として、炭酸化養生を行った低炭素型炭酸化養生ILブロックを製造し、その特性を評価した。また、LCAにより、従来のILブロックに代わって低炭素型炭酸化養生ILブロックを適用した場合のCO₂削減貢献量を評価することで、本技術のCCU技術としての有効性を検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 本報で開発した低炭素型炭酸化養生ILブロックの曲げ強度は、普通ブロックで5.8-6.3N/mm²、透水性ブロックで3.4-3.9N/mm²であった。また透水性ブロックの透水係数は6.6-11.4m/sであった。普通ブロックは、JIS A 5371の車道用ILブロックの規格を、また透水性ブロックは歩道用の透水性ILブロックの規格を満足することが示された。本結果より、本報で開発した低炭素型炭酸化養生ILブロックは、実用可能な性能を有していることが示された。

- (2) ILブロックの製造に必要なCO₂の分離・回収や液化、コンクリート製品の製造、輸送などのプロセスをシステム境界として、低炭素型炭酸化養生ILブロックのCO₂削減貢献量を評価した。ILブロック1tあたりのCO₂排出量は、リファレンスである一般のILブロックでは206.6kg/t、低炭素型炭酸化養生ILブロックでは137.5kg/tと評価された。これらの差分から、低炭素型炭酸化養生ILブロック1tの適用によるCO₂削減貢献量は、69.1kg/tと評価された。
- (3) 将来的に電力や輸送がカーボンフリー化に向かい、それらのCO₂の排出係数が低下するほど、低炭素型炭酸化養生ILブロックは、より大きなCO₂削減貢献が得られることが示された。
- (4) 以上の性能評価結果およびCO₂削減貢献量の評価結果から、本報にて開発した低炭素型炭酸化養生ILブロックはCCU技術として有効であることが示された。

謝 辞

本研究は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業「炭素循環型セメント製造プロセス技術開発」（JPNP20013）の成果によるものである。また3章のCO₂削減貢献量の評価では、みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社様に多大なるご協力をいただいた。記して謝意を表します。

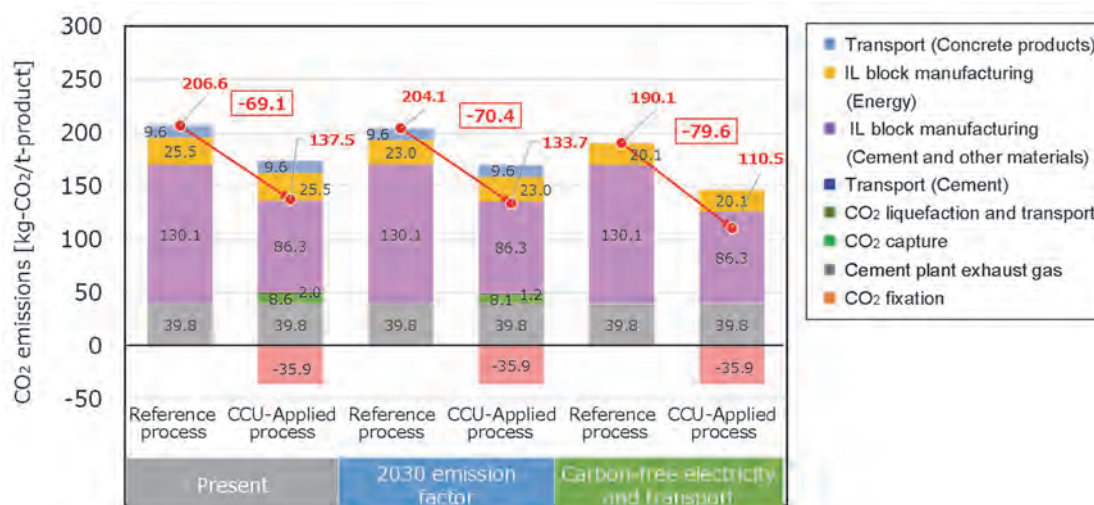


Fig.7 Evaluation results on the avoided CO₂ emissions assuming future carbon-free electricity and transport
(電力・輸送のカーボンフリー化への進行を想定したCO₂削減貢献量の評価結果)

参 考 文 献

- 1) David Sandalow; Roger Aines; Julio Friedmann et al. Carbon Dioxide Utilization (CO₂U) — ICEF Roadmap 2.0. 2017, p. 7-16.
https://www.icef.go.jp/pdf/summary/roadmap/icef2017_roadmap1.pdf, (Accessed 2023-11-08).
- 2) 経済産業省. カーボンリサイクルロードマップ資料. 2023.
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_recycle_rm/20230623_report.html, (accessed 2023-11-08).
- 3) 太平洋セメント. NEDO 課題設定型助成事業「炭素循環型セメント製造プロセス技術開発」に採択. 太平洋セメントニュースレター. 2020-06-18.
<https://www.taiheiyo-cement.co.jp/news/news/pdf/200618.pdf>, (Accessed 2023-11-08).
- 4) 一坪幸輝, 平尾 宙, 野村幸治ほか. 炭素循環型セメント製造プロセス技術開発 (セメント工場を中心としたカーボンリサイクル社会の実現に向けた取組み). コンクリート工学. 2021, 59(9), p. 827-829.
- 5) 太平洋セメント. セメントキルン排ガスからのCO₂分離・回収, 有効利用実証試験設備完成. 太平洋セメントニュースレター. 2022-02-04.
<https://www.taiheiyo-cement.co.jp/news/news/pdf/220204.pdf>, (accessed 2023-11-08).
- 6) セメント協会. セメントの常識 2020 年版. 2020, p. 8.
- 7) 土木学会. コンクリートの環境負荷評価 (その2), (コンクリート技術シリーズ 62). 2004.
- 8) セメント協会. セメントの LCI データの概要, 2022, p. 8.
- 9) 環境省, 経済産業省. 電気事業者別排出係数 (特定排出者の温室効果ガス排出量算定用) — R1 年度実績 (R3. 1.7 環境省・経済産業省公表, R3. 7. 19 一部追加・更新). 2021, p. 13.
https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/r03_coefficient_rev.pdf, (accessed 2023-11-08).
- 10) Kiyotaka TAHARA; Toshio ONOYE; Kensuke KOBAYASHI et al. Development of Inventory Database for Environmental Analysis (IDEA). Proceedings of the 9th International Conference on Ecobalance. 2010, eP-119.
- 11) Steven Jackson; Eivind Brodal. Optimization of the CO₂ Liquefaction Process-Performance Study with Varying Ambient Temperature. Applied Sciences. 2019, 9(20), e4467.
- 12) 環境省. 地球温暖化対策計画における対策の削減量の根拠. 2021, p. 6.
<https://www.env.go.jp/content/000051887.pdf>, (accessed 2023-11-08).