

高速炭酸化技術 CarboneTM によるCO₂固定化・資材化技術の開発

Development of CO₂ Mineralization Technology Using the Accelerated Carbonation Technology CarboneTM

前田 有貴*・藤原 大*(工学博士)・後藤 幸宏**・福富 裕太***・南淵 智洋****・Dr. Peter Gunning*****

Yuki Maeda・Hiroshi Fujiwara・Yukihiro Goto・Yuta Fukutomi・Tomohiro Nambuchi

2050年カーボンニュートラル達成に向け、当社では高速炭酸化技術「CarboneTM」の開発に取り組んできた。本開発ではまず都市ごみ飛灰を対象として炭酸化によるCO₂吸収および重金属溶出抑制効果を確認し、続いてその応用展開として木質バイオマス灰等への炭酸化適用および資材化検討を行ってきた。木質バイオマス灰の炭酸化・資材化実証試験においては、炭酸化造粒物が土壌環境基準の溶出基準を満足するとともにカーボンネガティブ資材となる見込みを得た。さらに、炭酸化物がコンクリート材料として利用できることを確認し、コンクリート製品へ適用するとともに CarboneTM の標準ユニットの販売を今年度より開始した。

To achieve carbon neutrality by 2050, we have been working on the development of an accelerated carbonation technology for CO₂ mineralization with O.C.O Technology. This development started with the carbonation of municipal solid waste fly ash, focusing on reducing heavy metal leaching by carbonation, and has also been applied to the carbonation of biomass ash and other materials. In demonstration tests for the mineralization and valorization of biomass ash, the carbonated granulated product satisfied the leaching criteria of the Soil Environmental Standard. Based on initial tests, the product is expected to be a carbon negative material. The development of uses for the valorized products was also studied in parallel. A modularized unit incorporating the accelerated carbonation technology CarboneTM was launched this fiscal year.

Key Words :

炭酸化	Carbonation
木質バイオマス灰	Biomass ash
重金属溶出抑制	Reducing heavy metal leaching
資材化	Valorization
造粒	Pelletizing
カーボンニュートラル	Carbon neutrality
ネガティブエミッション技術	Negative emission technologies
鉱物化	Mineralization

【セールスポイント】

- ・CO₂の固定化・有効利用
- ・産業副産物の資材化
- ・標準ユニット

*技術開発センター 技術開発部 資源循環技術室 **プロセス機器事業部 水素事業推進部 開発室 ***技術開発センター 基盤技術室
****プロセス機器事業部 技術部 装置設計室 *****O.C.O TECHNOLOGY LTD.

ま え が き

2050年カーボンニュートラル達成のためには、従来の省エネ・創エネだけでは削減しきれないCO₂排出量を相殺するために、CO₂を吸収・除去するネガティブエミッション技術が不可欠とされる（図1）。ネガティブエミッション技術とは、大気中のCO₂を回収・吸収し、さらに貯留・固定化することで大気中のCO₂除去に資する技術であり、人為的な工程を加えることで自然のCO₂吸収・固定化の過程を加速させる技術やプロセスである。

当社では、ネガティブエミッション技術になり得る鉱物化技術の一つである、高速炭酸化技術の開発に取り組んできた。都市ごみ焼却飛灰の炭酸化実証試験においては飛灰のCO₂吸収および重金属溶出抑制効果を確認し、その応用展開である製鋼スラグや木質バイオマス灰の炭酸化・資材化検討においてはカーボンネガティブ資材の製造にめどをつけた。

本紙では、当社での高速炭酸化技術の概要および一連の開発経緯を紹介するとともに、検討の一事例として木質バイオマス灰へのCO₂固定およびアップサイクルを目的とした実証試験について報告する。また、炭酸化・資材化技術を商用化した標準ユニッ

トについて紹介する。

1. 高速炭酸化技術「Carbonel™」の概要

高速炭酸化技術「Carbonel™」は、飛灰やスラグ等のCaやK、Mgなどを含んだ産業副産物等を炭酸化原料とし、わずかな水の存在下でCO₂と反応することで炭酸カルシウム（CaCO₃）等の炭酸塩としてCO₂を固定化する技術である。通常、炭酸化反応は自然界では数カ月以上を要するが、本技術では数分～数十分と高速で行うことが特徴である。さらに、本技術は乾式での処理であるため、排水が発生しないシンプルなプロセスである。また、炭酸化（CO₂の固定化）反応に伴うpHの低下などによって、重金属の溶出抑制も可能となり、都市ごみ焼却施設や木質バイオマス発電所から排出される飛灰の重金属溶出抑制薬剤費の低減技術としても有効である。

本技術はイギリスのO.C.O Technology社の技術をベースとしており、CO₂濃度が希薄な排ガスを直接CO₂源として利用するなど、同社と共同で改良を行った技術である。同社は2012年よりイギリス国内で飛灰を原料として炭酸化・資材化を行い、現在イギリス国内で4工場を運営し、年間約40万tonの骨材を製造・販売している。

2. 各種原料の炭酸化・資材化検討

2.1 都市ごみ焼却飛灰の炭酸化実証試験²⁾

当社でははじめに都市ごみ焼却飛灰への炭酸化プロセスの適用から検討を開始し実施で実証試験を行った。本試験では、一般廃棄物焼却施設から発生する焼却排ガスを用いた炭酸化試験を行い、飛灰のCO₂吸収および、炭酸化によるPb、Cr(VI)の溶出抑制効果を確認した。

また、従来のキレート処理と炭酸化処理におけるCO₂削減要因と増加要因から算出したCO₂削減効果を表1に示す。いずれの処理においても装置動力由来のCO₂が発生するが、炭酸化処理においては従来

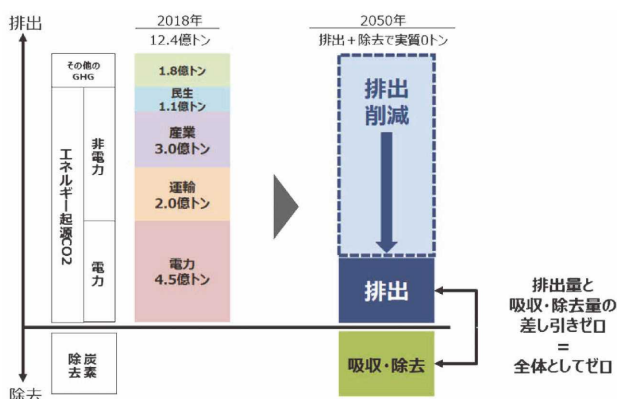


図1 ネガティブエミッション技術の位置づけ¹⁾

表1 廃棄物焼却施設におけるCO₂削減効果

		項目	従来 (連続式混練機)	炭酸化 (バッチ式混練機)	備考
CO ₂ 削減要因	①	灰が吸収するCO ₂	0.00	-1.06	飛灰に対しCO ₂ 吸収量2%と仮定
	②	キレート剤 (従来:4.0%添加⇒炭酸化:0%)	5.61	0.00	CO ₂ 排出量原単位: 2.6583 kg-CO ₂ /キレートkg※1
CO ₂ 増加要因	③	灰処理に要する消費電力由来	0.24	0.38	CO ₂ 排出量原単位: 0.497 kg-CO ₂ /kWh※2
	④	SK-1 (従来:0%添加⇒炭酸化:0.3%)	0.00	0.05	CO ₂ 排出量原単位: 0.3282 kg-CO ₂ /SK1-kg
合計			5.85	-0.62	
削減量 kg-CO ₂ /焼却ごみトン				6.47	

CO₂排出量原単位:

※1財団法人クリーンジャパンセンター「ごみ焼却灰リサイクルの温室効果ガス排出削減・ライフサイクル管理に関する調査研究」より、※2北陸電力(2019年度)

のキレート処理に比べ、薬剤使用に伴うCO₂排出量が少なく、さらに飛灰がCO₂を吸収することから、CO₂排出量の削減が可能となる見込みが得られた。

このことから、当社の都市ごみ焼却施設案件での提案を開始し、2施設での採用が決定している。

2.2 他原料の炭酸化・資材化検討

次に、Carbonel™の応用展開として、製鋼スラグや木質バイオマス灰を原料とした、炭酸化・資材化プロセスの検討を行った。炭酸化によりCO₂を固定した製鋼スラグや木質バイオマス灰にフィラー、バインダーなどを加えて造粒物を製造し、土木・建築資材や肥料としての利用可能性を検討した。

本検討ではまず、1バッチ数十kgのラボスケールで炭酸化造粒試験を行い、CO₂吸収量の最大化や目標強度を満たす造粒物製造方法等の処理条件の最適化の検討を行った。検討の結果、製造した炭酸化造粒物は目標強度を十分に達成しており、既存の人工軽量骨材と同等の物理性状を示すことを確認できた。

3. 木質バイオマス灰の炭酸化・資材化実証³⁾

上記結果を受けて、次ステップとして実機スケールでの実証試験に移行し、土木・建築資材の試作等に必要な炭酸化造粒物のサンプル製造を行った。本章では本件検討の一例として、木質バイオマス灰を原料とした実証試験について報告する。

3.1 実証試験 コンセプト

木質バイオマス発電は2012年7月に再生可能エネルギーの固定価格買取制度が開始されて以降、全国各地で建設、運用が急増した一方、大量にバイオマス灰が発生し、その多くは重金属が含まれる等が原因で産廃処分されていることから、環境負荷や処分費の軽減に向け、木質バイオマス灰を再資源化および有効利用することが求められている。

一般にカーボンニュートラルとされる木質バイオマス発電とCCSとを組み合わせた技術はBECCS(Bio Energy with Carbon Capture and Storage)と呼ばれており、バイオマス燃焼時のCO₂を貯留することで、大気中のCO₂を除去・減少できるネガティブエミッション技術の一つと考えられている。

当社は木質バイオマス発電所から排出されるバイオマス由来のCO₂を、同施設で発生する灰に固定化し、CO₂排出量マイナスを実現することに加え、CO₂を固定化した炭酸化物を資材化、有効利用することで環境負荷と灰処分費の軽減に貢献することを目標に本検討に取り組んだ(図2)。

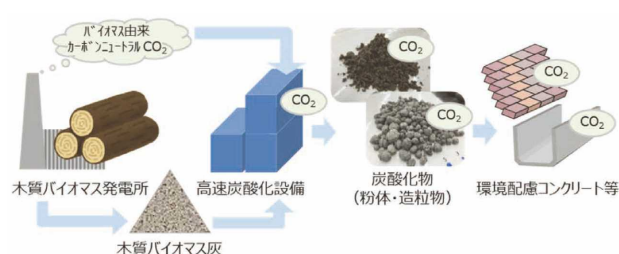


図2 実証試験 コンセプト

3.2 実証設備 概要

当社技術研究所内に1バッチ数百kgの実証設備を設置し、2022年より運転を開始した。実証設備の全景を図3、実証設備における炭酸化・資材化フローを図4に示す。実証設備は1.2節の都市ごみ焼却飛灰の炭酸化で用いた実機スケールのミキサーやペレタイザを中心に、木質バイオマス灰・フィラー・バインダーの供給ライン、CO₂供給器等の付帯設備から構成されている。未処理の木質バイオマス灰(以下、原灰)をミキサーに充填した後、重金属溶出抑制剤と水を添加して混合した。CO₂ガス(純度>99.6%)と大気を、所定のCO₂濃度になるよう混合した模擬排ガスをミキサーへ導入して炭酸化処理を行い、炭酸化物Ⅰ(粉体)を製造した。また、粉体にフィラー、バインダーおよび水を加え、ペレタイザで造粒し、大気雰囲気下で所定期間養生することで炭酸化物Ⅱ(造粒物)を製造した。



図3 炭酸化・資材化実証設備

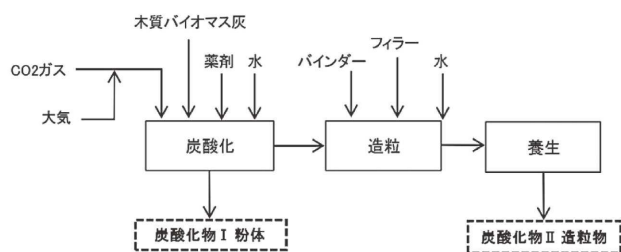


図4 炭酸化・資材化フロー



図5 炭酸化物（左：粉体，右：造粒物）

3.3 試料

本試験では3カ所の木質バイオマス発電所から発生する木質バイオマス灰（原灰）を使用した。各原灰の性状を表2に示す。いずれも主な成分はSi, Ca, Kであり，化学組成において大きな違いがないことを確認した。なお，灰Bと灰Cは混合処理されることを想定し，一定の比率で混合して試験に供した（以下，灰BC混合灰）。

3.4 分析方法

原灰1 tonあたりのCO₂吸収量は，炭酸化処理による全炭素量（以下，TC）の増加が炭酸塩の生成によるものとし，炭酸化処理前後の灰サンプルについてTCを測定し，以下の式を用いて算出した。

<数式>

CO₂吸収量 [kg-CO₂/ton-原灰]

$$= (TC_{\text{炭酸化灰}} - TC_{\text{原灰}}) \times (M_{\text{CO}_2} / M_{\text{C}}) \times 1,000 \text{ [kg/ton]}$$

TC_{炭酸化灰}：原灰1 tonを炭酸化した粉体中の全炭素量 [%]

TC_{原灰}：原灰1 ton中の全炭素量 [%]

M_{CO₂}：二酸化炭素のモル質量 [g/mol]

M_C：炭素のモル質量 [g/mol]

製造した炭酸化物の環境安全性評価は，土壤環境基準である環境庁告示第46号（以下，環告46号）試験に基づき行った。

3.5 試験結果

3.5.1 炭酸化物の概要

図5に実証設備を用いて製造した炭酸化物（粉体，造粒物）の外観を示す。粉体は，炭酸化処理時の水

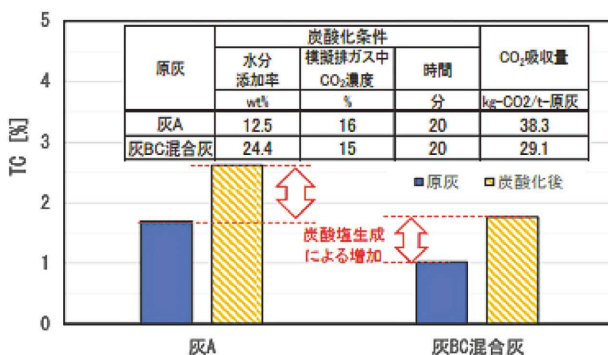


図6 各灰の炭酸化条件およびCO₂吸収量

添加により10～15%程度の水分を含んでいる。造粒物のサイズはベレタイザの運転条件や製造後のふるい分けにより，粒度調整可能である。粉体・造粒物はそれぞれ，混和材やコンクリート骨材・路盤材等の利用を想定している。

3.5.2 CO₂吸収量

図6に実証設備による粉体製造時における炭酸化条件，CO₂吸収量及び炭酸化前後のTC分析結果を示す。各灰のCO₂吸収量は灰Aでは38.3 kg-CO₂/t-原灰，灰BC混合灰では29.1 kg-CO₂/t-原灰であった。

灰BC混合灰より灰AのCO₂吸収量が高かったのは，炭酸化塩を生成するCa, Kの含有量が灰Aの方が多かったためと考えられ，CaだけでなくKも炭酸化してCO₂吸収に寄与したと推定される。

また表3に示すよう，灰Aおよび灰BC混合灰のいずれも，炭酸化に要する実証設備の使用電力由来のCO₂排出量（Scope 2）と比べて，炭酸化によるCO₂吸収量（Scope 1）が大きかったことから，CO₂排出量がゼロ以下となるカーボンネガティブ資材となる見込みを得た。

表2 原灰の種類および化学組成

灰種	燃焼方式	化学組成 [%]						
		Ca	K	Mg	Na	S	Al	Si
灰A	流動床式ガス化燃焼	9.5	8.1	1.7	1.1	0.6	6.4	20
灰BC混合灰	流動層ボイラ(灰B)、 逆送トラベリングストーカーボイラ(灰C)	6.7	6.3	1.7	0.9	0.7	5.0	25

表3 炭酸化物 I（粉体）製造における CO₂排出量収支

【単位: kg-CO ₂ /ton-原灰】				
	対象	灰A	灰BC 混合灰	備考
Scope1 (直接的な排出)	木質バイオマス灰 が吸収するCO ₂	-38.3	-29.1	図6参照
Scope2 (エネルギー起源の 間接排出)	炭酸化する要する 実証プラントの 使用電力由来	11.5	18.3	CO ₂ 排出量原単位: 0.309 kg-CO ₂ /kWh ※3
CO ₂ 排出量収支 (Scope1+2)		-26.8	-10.8	

※3 関西電力全体の調整後のCO₂排出係数(2021年度、2023年2月1日公表)

3.5.3 炭酸化物の環境安全性評価

表4に各原灰および造粒物の溶出試験(環告46号)の結果を示す。重金属溶出抑制剤としてファインアッシュ®SK-1相当品を所定量添加した。原灰において、灰AではCr(VI)・Fが、灰BではCr(VI)・Seが環告46号の基準値を超過していたが、炭酸化・造粒することで重金属等の基準値を満足することを確認した。

また重金属の含有量(環告19号)試験においても、原灰、造粒物のいずれも基準値を満足することを確認しており、これらの結果から造粒物の環境安全性は問題なく、木質バイオマス灰の資材化が可能であ

るという見込みを得た。

3.6 実証試験まとめ

木質バイオマス灰を用いて、実機スケールのミキサーおよびペレタイザなどからなる実証設備による炭酸化・資材化を実証し、原灰1tonあたり29.1～38.3kgのCO₂が吸収／固定化された炭酸化物(粉体、造粒物)の製造を可能とした。粉体状の炭酸化物ではCO₂排出量がゼロ以下であることを確認し、造粒物においては、重金属溶出抑制薬剤との併用により、環告46号の溶出基準を満足することを確認した。

4. 実用化・普及に向けて

4.1 Carbonel™ ユニット

以上の実証試験を踏まえて、炭酸化・資材化プロセスを備えたCarbonel™ユニットの設計を実施し、2024年4月より当社プロセス機器事業部で販売を開始した。Carbonel™ユニットの特徴として、実証設備同様、炭酸化、混合、造粒工程に必要な装置で構成される一方、ユニット化することにより実証設備比約1/2の設置面積となり、車載可能なサイズを実現し、それにより現地工事のコストダウン、工期短縮に寄与することができる。また連続バッチ運転でできるオプションの原料供給装置を加えることによ

表4 環告46号溶出試験結果

単位: mg/L(pHを除く)		Pb	Cr(VI)	Se	F	B	pH
環告46号基準値		≤0.01	≤0.05	≤0.01	≤0.8	≤1	—
灰A	原灰	0.006	0.15	0.01	1.43	0.08	12.2
	造粒物	<0.001	<0.05	0.01	0.48	0.78	11.4
灰BC 混合灰	原灰	<0.001	0.25	0.011	<0.08	1.0	10.1
	造粒物	<0.001	0.016	0.01	<0.08	0.4	8.9

表5 構造用軽量コンクリート骨材の規格および試験値⁴⁾

		人工軽量骨材		炭酸化造粒物		
		規格値(JIS A 5002)		木質灰		
試験項目		試験方法	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材
物理特性	絶乾密度 [g/cm³]	JIS A 1109, JIS A 1110	区分L 1.3未満 区分M 1.3～1.8 区分H 1.8～2.3	区分L 1.0未満 区分M 1.0～1.5 区分H 1.5～2.0	1.76 区分M	1.80 区分H
	実積率 [%]	JIS A 1104	区分A 50以上 区分B 45～50	区分A 60以上 区分B 50～60	69.8 区分A	66.3 区分A
	微粉分量 [%]	JIS A 1103	規定なし	10以下	1.4	1.49
	粘土塊量 [%]	JIS A 1137		1以下	0.2	0.07
	有機不純物	JIS A 1105	試験溶液の色が標準色液より淡い		合格	
	安定性試験 [%]	JIS A 1122	規定なし (副産軽量骨材では20以下)		23.1	73.3
	強熱減量 [%]		1以下 (天然・副産軽量骨材では5以下)		7.8	7.2
化学特性	酸化カルシウム [%]	JIS R 5202	規定なし (天然・副産軽量骨材では50以下)		14.4	13.7
	三酸化硫黄 [%]		0.5以下		1.5	1.5
	塩化物 [%]	JIS A 5002	0.01以下		0.44	0.13

り、灰処理量は年間約3,000 ton、造粒物生産量は年間約5,000 tonを想定している。原料としては、木質バイオマス灰に限らず、Caなどを多く含み、高いCO₂吸収量が期待できる製鋼スラグやペーパースラッジ焼却灰、セメントキルダスト、再生骨材製造時に発生する微粉分等でも適用可能性があり、各産業での灰処分費の削減やCCU材料の製造等での活用が期待される。

4.2 資材化物の土木・建築資材としての適用性評価

木質バイオマス灰を原料として Carbonel™ により製造した造粒物について、土木・建築資材としての適用性を評価することを目的に、構造用軽量コンクリート骨材の規格（JIS A 5002）に準拠して物理化学特性を評価した⁴⁾。その結果、Carbonel™ により製造される造粒物は、物理性状において軽量骨材の規定を満足することを確認した（表5）。また、本技術で製造した造粒物（炭酸化骨材）を用いたコンクリートは、一般的な人工軽量骨材を用いた場合と同等の圧縮強度を示すことが確認され、コンクリート製品として適用できる可能性が示された（図7）。

造粒物は、その他にも路盤材や地盤改良材料、アスファルト混合物など、建設・土木業界での利用も期待される。また、炭酸化原料となりうる製鋼スラグや木質バイオマス灰には、多様な肥料成分も含まれており、肥料・農業資材への適用可能性も考えられる。

4.3 資材化物の利用事例

以上の検討などをもとに、木質バイオマス灰を原料として Carbonel™ により製造したCO₂を固定した粉体および造粒物（Carbonel™ 資材）を実際のコンクリート製品として製造した事例を以下に紹介する。極薄コンクリートである HPC®（ハイブリッドプレストレストコンクリート）では、Carbonel™ により製造した造粒物を材料の一部として使用し、

CO₂排出量削減へ貢献するものとして2025年大阪・関西万博のパビリオンで利用されることが決定している⁵⁾（図8）。

また、株式会社坂内セメント工業所においては、Carbonel™ により製造した粉体を利用したU字側溝や防草ブロック、鉄筋の代わりに竹を用いる竹筋コンクリートの試作を行い、製品として製造可能であることを確認している（図9）。竹筋コンクリートとの組合せの取組みでは、鉄筋製造時のCO₂排出量の低減と合わせて粉体の利用によるCO₂固定により、CO₂削減量の最大化が期待される。



図8 Carbonel 資材の利用事例（写真：細矢仁）

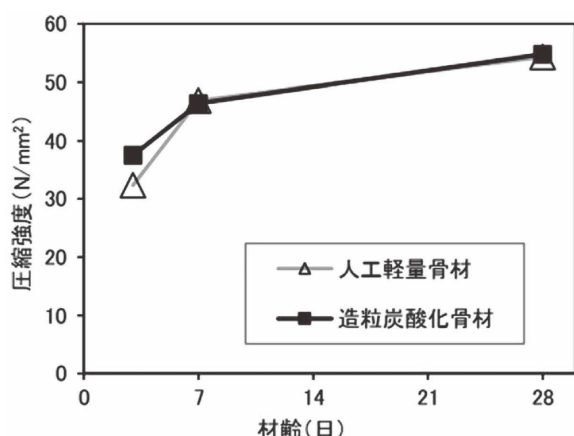


図7 圧縮強度試験結果⁴⁾



図9 Carbonel 資材のU字側溝への利用事例

む す び

高速炭酸化技術「Carbonel™」の都市ごみ焼却施設への適用からの応用展開として、木質バイオマス灰を原料とした実機スケールでの炭酸化・資材化実証試験および資材化物のコンクリート材料としての適用性評価を実施した。検証の結果、以下のことを確認した。

- ・ 原灰1 ton あたり29.1～38.3 kg のCO₂が吸収／固定化された炭酸化物（粉体、造粒物）の製造が可能であることを確認した。
- ・ 炭酸化に要する実証設備の使用電力由来のCO₂排出量と比べて、炭酸化によるCO₂吸収量が大きいため、CO₂排出量がゼロ以下となるカーボンネガティブ資材となる見込みを得た。
- ・ 炭酸化・造粒することで重金属等の溶出基準値を満足することを確認した。
- ・ 木質バイオマス灰を原料としてCarbonel™により製造した造粒物が、構造用軽量骨材の物理性状の規定を満足することを確認した。

Carbonel™により製造したCO₂を固定した粉体・造粒物は、実際のコンクリート製品にも利用されはじめており、CO₂排出量削減への貢献が期待される。

今後は、全国の木質バイオマス発電所などの産業副産物を排出する施設を中心に、排ガスを直接利用して炭酸化・資材化が可能であるCarbonel™ユニットを普及させ、木質バイオマス灰等の産業副産物の資源化による地産地消および天然資源の枯渇抑制し、ひいてはCO₂固定化による脱炭素の促進によりカーボンニュートラルの達成に貢献していく所存である。

[参考文献]

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁, 国立環境研究所 温室効果ガスインベントリオフィス「日本の温室効果ガス排出量データ」
- 2) 前田有貴ら：都市ごみ焼却施設における高速飛灰炭酸化処理技術の検証, 神鋼環境ソリューション技報, Vol.18, No.1, pp13-18 (2021)
- 3) 後藤幸宏ら：高速炭酸化処理による木質バイオマス灰へのCO₂固定化・資材化の実証, 第34回廃棄物資源循環学会発表会講演論文集, pp.431-432 (2023)
- 4) 取違剛ら：造粒炭酸化骨材のセメント系材料への適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.28-33 (2023)
- 5) 阿波根昌樹ら：HPC（ハイブリッドプレストレストコンクリート）の活用, 建築技術, No.894, pp.102-205 (2024)