

NEDO脱炭素技術分野成果報告会2025

プログラムNo.5

「製鋼スラグ中Caの溶媒抽出を用いた CO₂固定化プロセスの技術開発」

カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／

CO₂排出削減・有効利用実用化技術開発／

コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへのCO₂利用
技術開発

発表：2025年7月15日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

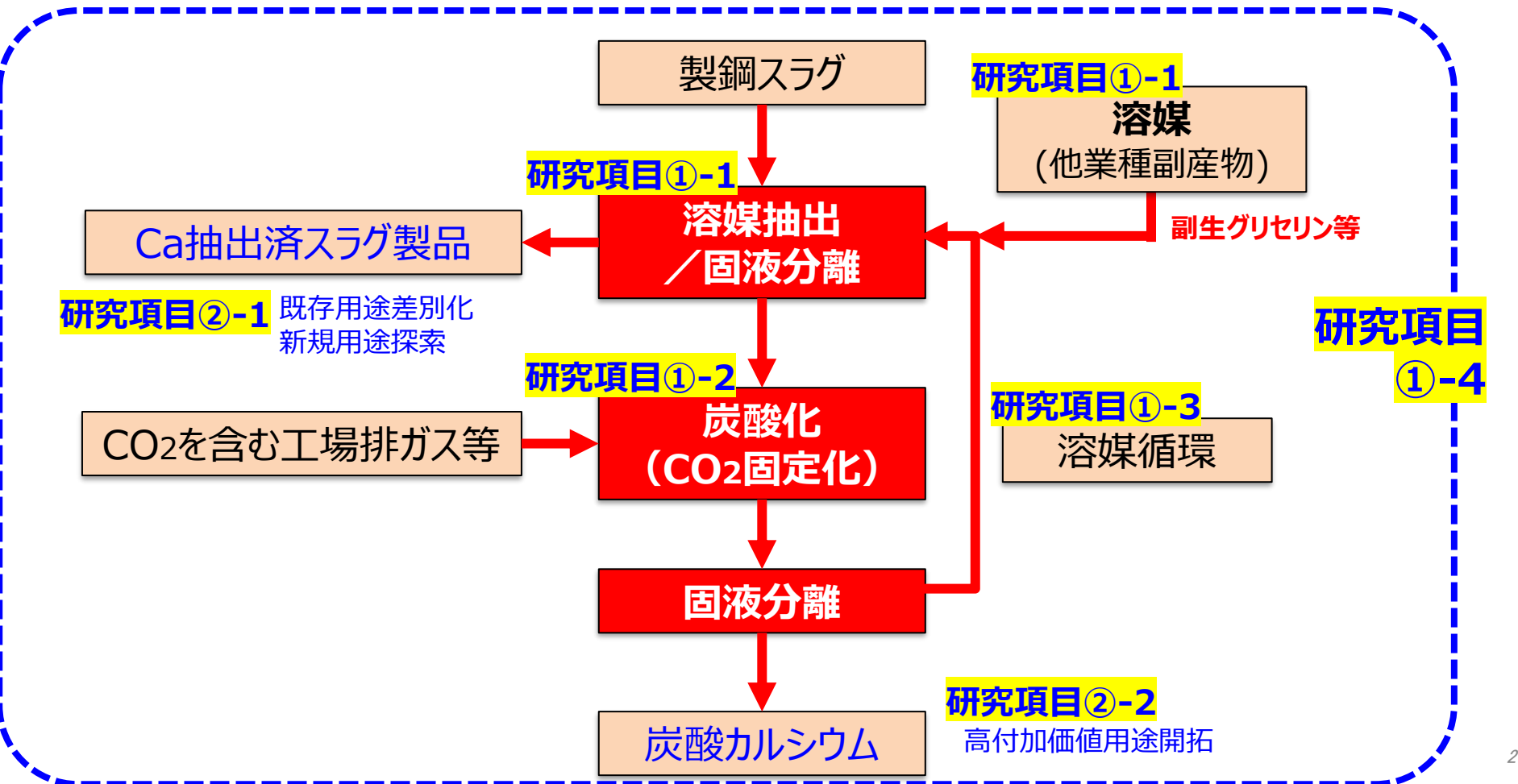
発表者名 木下 繁

*団体名 (株)神戸製鋼所、(株)神鋼環境ソリューション

問い合わせ先 (株)神戸製鋼所 E-mail:kinoshita.shigeru@kobelco.com TEL:079-445-7475

背景、目的、事業概要

- カーボンリサイクル技術ロードマップにおいて早期実現が期待される鉱物によるCO2固定化について、製鉄プロセスの副生成物である製鋼スラグに着目した
- 製鋼スラグに含まれるカルシウムを溶媒抽出し、工場排ガス等で発生するCO2を固定化して炭酸カルシウムを生成するプロセスの要素技術を確立し、プロセス全体とビジネスモデルを構築する



プロセス概要

- ① スラグ中の**free-CaO**を微粉碎を行うことなく**低エネルギー**に**高効率抽出**可能。
- ② **常温常圧プロセス**、かつ、人体に無害な**グリセリン/水混合溶媒**を使用
- ③ free-CaO選択抽出による**スラグの改質効果**(膨張性・アルカリ溶出特性低減、粉碎性・造粒性向上)と副生成物として**炭酸カルシウム**を製造可能。

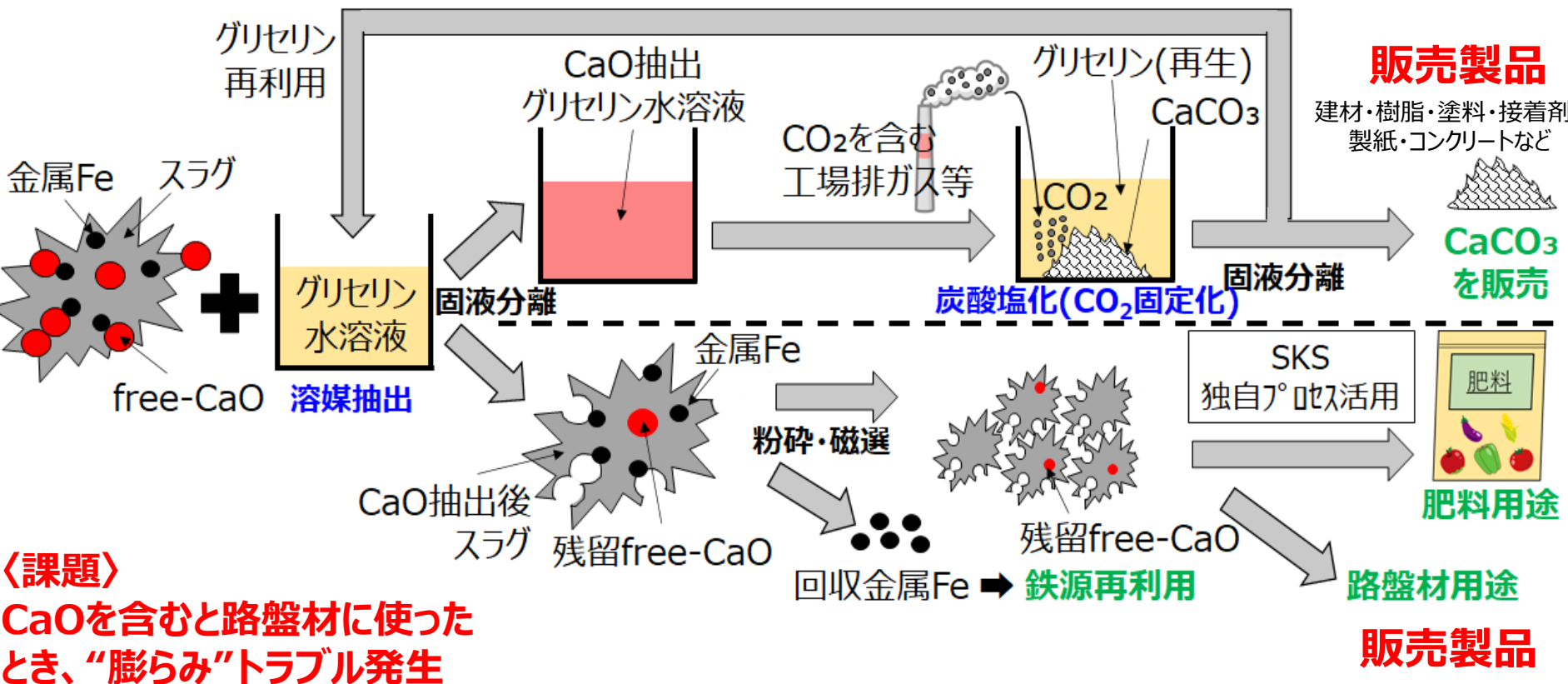


図 溶媒抽出を用いたCO2固定化プロセスの模式図

研究開発項目と開発目標、実施内容一覧表

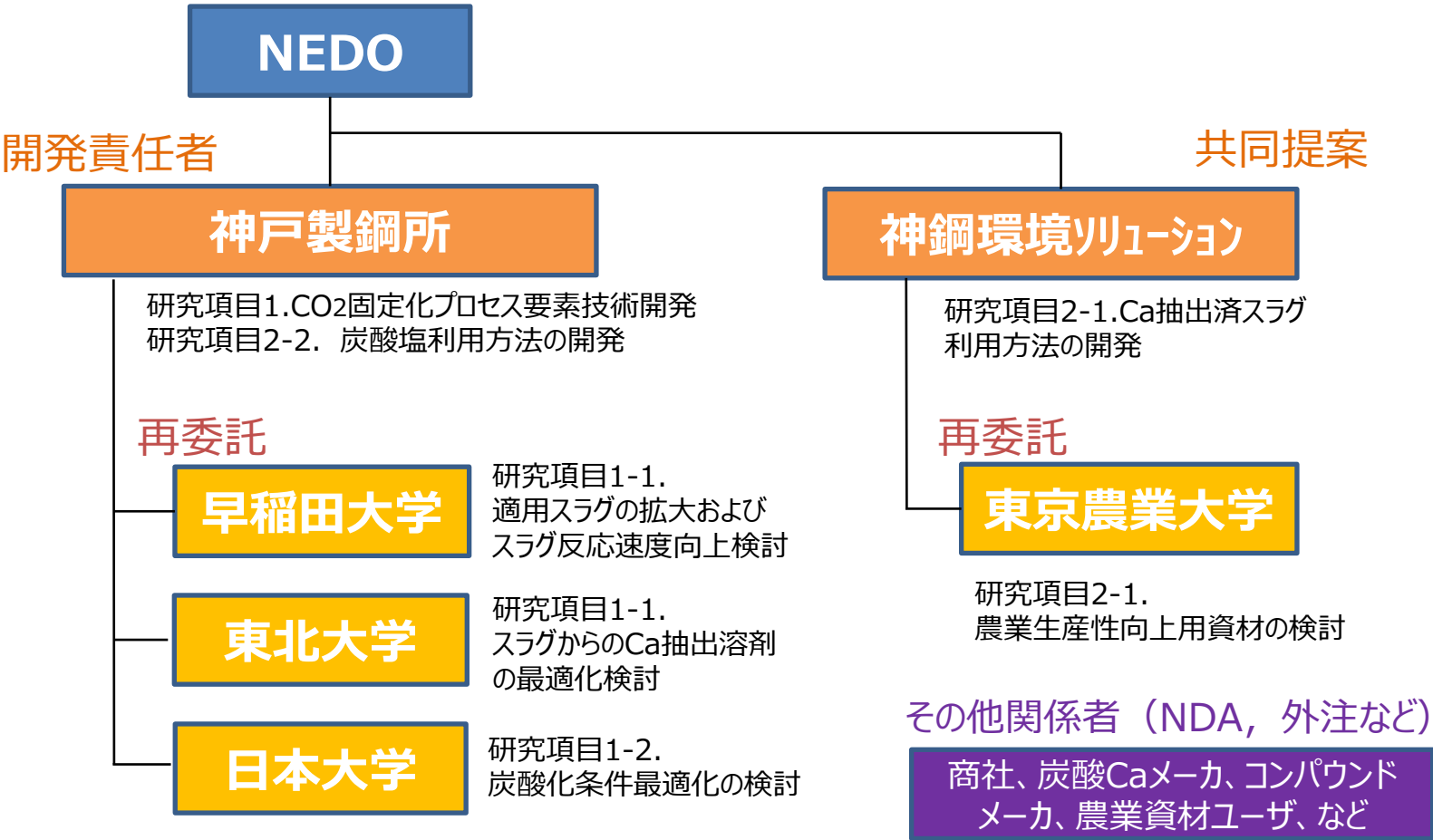
研究開発項目	開発目標	実施内容
①-1 「スラグからのCa抽出技術の開発」	ベンチスケールユニット(BSU) 試験装置での模擬連続化試験により抽出工程連続プロセスの要素技術を確立する。(f-CaO 抽出率:75%以上)	- ラボ試験において、製鋼スラグからグリセリンなどグリコール溶媒を用いて効率的にCa 抽出するための抽出方式・条件を決定するとともにCa 抽出済溶媒中にある微量成分の除去方法を開発する。 - 他業種副産物のグリセリンを利用するにあたって、それに含まれる不純物成分のCa 抽出技術への影響解明と対策を検討する。 - スラグ量数十kg 規模の小型抽出試験装置（静置方式及び流動攪拌方式）を用いてCa 抽出挙動などの基礎データを取得する。 - BSU試験装置の導入、抽出試験の実施により、スケールアップデータを取得する。
①-2 「炭酸化技術の開発」	- ベンチスケール(BSU) 試験装置で模擬連続化試験により炭酸化工程連続プロセスの要素技術を確立する。 - カルサイト型含有率90%以上を安定的に得られる反応条件を明確化する。	- ラボスケールの炭酸ガス吹込試験において①-1 で得られたCa 抽出液を炭酸化するプロセスの基礎データを取得する。 - 工場排ガス等に含まれる不純物の影響やガス吸収塔方式等を調査する。 - 炭酸Ca 析出において菱面体状（カルサイト型）の生成条件等を得る。 - 数十L 規模の炭酸化用小型試験装置を製作し、菱面体状炭酸Ca 生成データやCO2 導入速度データ等を取得する。 - 小型試験機のデータ等に基づき、炭酸化プロセスを検証するとともに、数百L 規模のBSU 試験装置用のガス吸収塔方式を決定し、BSU 試験装置の導入、炭酸化試験の実施によって、スケールアップデータを取得し、炭酸Caの性状と反応条件の関係を明確化する。
①-3 「溶媒循環技術の開発」	BSU 試験装置で模擬連続化試験により連続プロセスでの溶剤循環に関する要素技術を確立する。(溶媒回収率：95%以上)	①-1、2 で得られた要素技術について、溶媒を循環利用するための物質収支の評価を行う。 ①-1 のラボ試験や小型抽出試験装置（静置方式及び流動攪拌方式）を用いて、スラグからのCa 抽出工程とスラグ/溶媒固液分離工程におけるスラグおよび溶媒の物質収支を評価する。 ①-2 のラボ試験や炭酸化用小型試験装置を用いて、Ca 炭酸化、炭酸Ca/溶媒固液分離工程での残溶解Ca、析出炭酸Ca および溶媒の物質収支を評価する。 - BSU 試験装置で溶媒循環に関する物質収支データを取得し、連続運転時の基本プロセスフローを構築し、スラグ、炭酸Ca の性状を制御可能な溶媒循環プロセスを確立する。
①-4 「全体プロセスの検討」	各要素技術の組み合わせによる全体プロセス構築とプロセス生成物用途の見極めにより、想定されるビジネスモデルを構築する。また、CO2 削減量の簡易評価を実施する。	- 研究項目①-1～3 で開発した各要素技術を組み合わせ、全体プロセスを検討する。 - 研究項目①-1～3 で得られた各種試験結果に基づき、BSU 試験装置および実機を想定した実証設備に適用するプロセス工程毎の機器を検討し選定する。 - これらにより、全体プロセスフローに基づいた設備コスト、操業コスト、生成物収益から、経済性評価を行う。さらに、CO2 削減効果について評価を行う。

研究開発項目と開発目標、実施内容一覧表

研究開発項目	開発目標	実施内容
②-1 「Ca 抽出済スラグ有効利用方法の開発」	- Ca 抽出済スラグの農業用資材としての製造方法を確認するとともに、コマツナ等の生育試験により適用性を確認する。 - Ca 抽出済スラグの CO2固定化量を評価する。 - Ca 抽出済スラグの路盤材としての適用性を評価する。	- Ca 抽出済のスラグを用いて、既存用途である土木材料を検討しながら、付加価値の高い肥料や土壌改良材などの農業用資材としての適用可能性を探る。 - Ca 抽出済スラグの農業用資材用途への適用可能性を検討する。 - Ca 抽出済スラグの路盤材としての品質を確認する。 - 研究開発項目①の検討で得たCa 抽出が最大となる抽出フローで生成するCa 抽出済みスラグの農業用資材としての適用性評価とともに、CO2 固定化量も評価する。
②-2 「炭酸塩利用方法の開発」	BSU 試験装置により試作した炭酸Ca のユーザー評価が終了し、炭酸Ca 販売サプライチェーンのモデルを構築する。	- 炭酸Ca の情報を調査することで想定する使用用途毎に要求される品質を調査・整理し、開発課題を明確化し、当面の品質目標を設定する。 - ラボスケール試験・小型試験により試作した炭酸Ca の品質評価を行うとともにビジネスモデルを検討し、必要に応じて品質目標値を見直し、BSU 仕様に反映する。 - 用途および炭酸Ca に必要な性状を設定し、サンプルの試作、ユーザー評価によって顧客が要求する品質を満たす製造方法を明確化する。

本事業の実施体制

- 神戸製鋼所がプロセス開発および炭酸塩用途開発、神鋼環境リソリューションがCa抽出済スラグ用途開発を担当
- 再委託先の大学では、主にプロセスを構築する要素の基礎研究を実施
- その他関係者は、外注、NDA締結等を行い、溶媒調達先調査や炭酸塩評価を実施



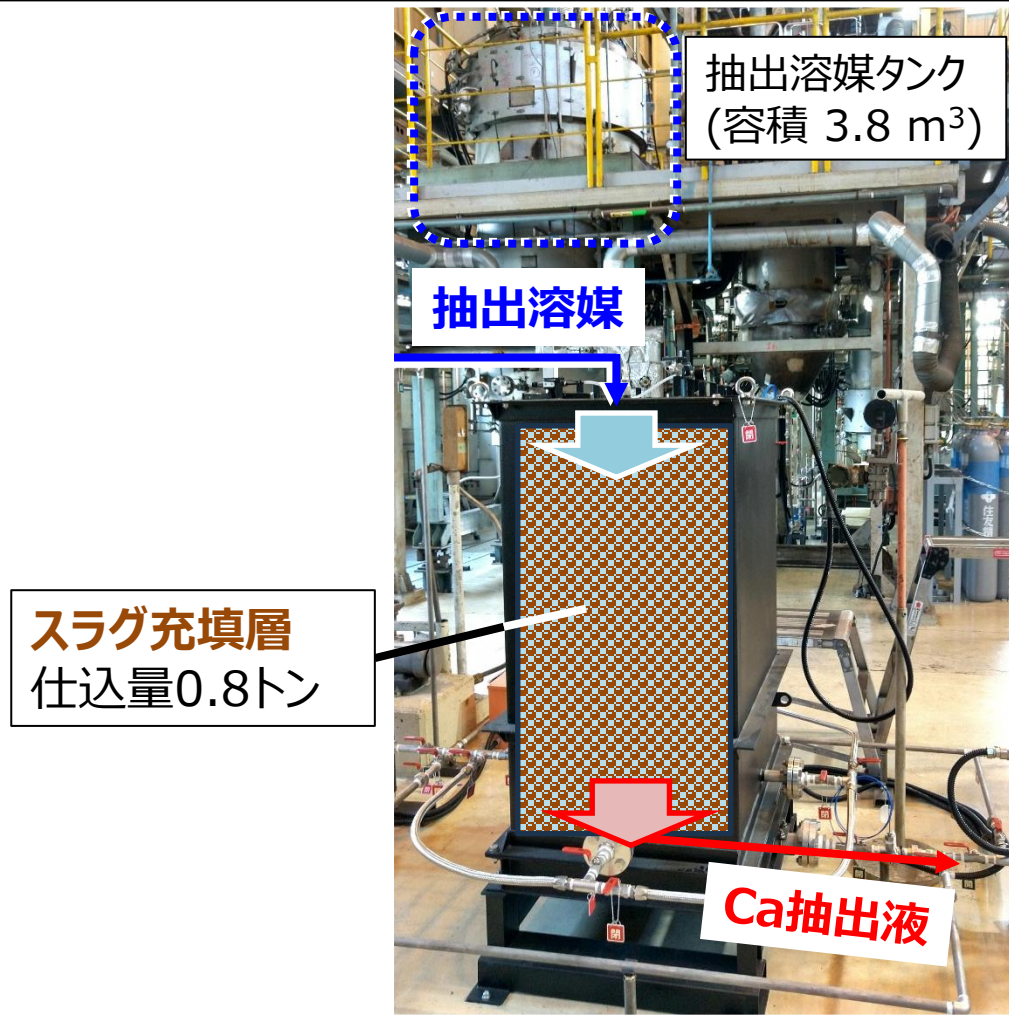
製鋼スラグ中Caの溶媒抽出を用いたCO2固定化プロセスの技術開発

研究開発スケジュール

研究項目	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度
①-1 「スラグからのCa抽出技術の開発」	ラボ試験（抽出影響因子調査等）			
		小型抽出試験	BSU試験	
	適用スラグ拡大検討（早稲田大学）			
	抽出溶媒最適化検討（東北大学）			
①-2 「炭酸化技術の開発」	ラボ試験（反応因子調査等）			
		小型炭酸化試験	BSU試験	
	炭酸化最適化検討（日本大学）			
①-3 「溶媒循環技術の開発」	溶媒回収最適検討、回収溶媒組成把握			
①-4 「全体プロセスの検討」	プロセス主要機器検討			
		経済性評価		サプライチェーン整理
②-1 「Ca 抽出済スラグ有効利用方法の開発」	農業生産性向上資材検討			
	造粒バインダー検討			
	CO2吸収固定量最大化			
	路盤材用途			
②-2 「炭酸塩利用方法の開発」	用途探索課題設定			
	目標性状プロセス検討			
	製品試作、ユーザ評価			

①-1「スラグからのCa抽出技術の開発」事業成果

- ＜BSU抽出試験＞
- ラボ・小型(スラグ100kg規模/run)抽出試験データを元にスラグ0.8トン規模/runのベンチスケールユニット(BSU)抽出試験装置を設計/導入、スケールアップ検証を実施。
 - 抽出条件や通液方法等を検討し、目標Ca抽出率75%を達成可能な条件を調査。



基本条件
抽出槽サイズ：W600×L800×H1200
スラグ充填量：0.8トン/run
(粒径10mm以下)
抽出溶媒量：約0.4トン/run
抽出溶媒中グリセリン濃度：40wt%
抽出溶媒流量：80～310L/h
温度：室温（12-30℃）

図 BSU抽出試験装置

①-1「スラグからのCa抽出技術の開発」事業成果

- < BSU抽出試験結果 >
- 適切な溶媒通液条件を設定する事で**目標Ca抽出率75%を達成**が可能と確認
 - 処理スラグ量に対し、3.5～4倍相当の抽出溶媒を通液する事でCa抽出率75%以上を得る事が出来、当初想定していた10倍相当量に対して**溶媒量は半分未満に低減**できる事を把握

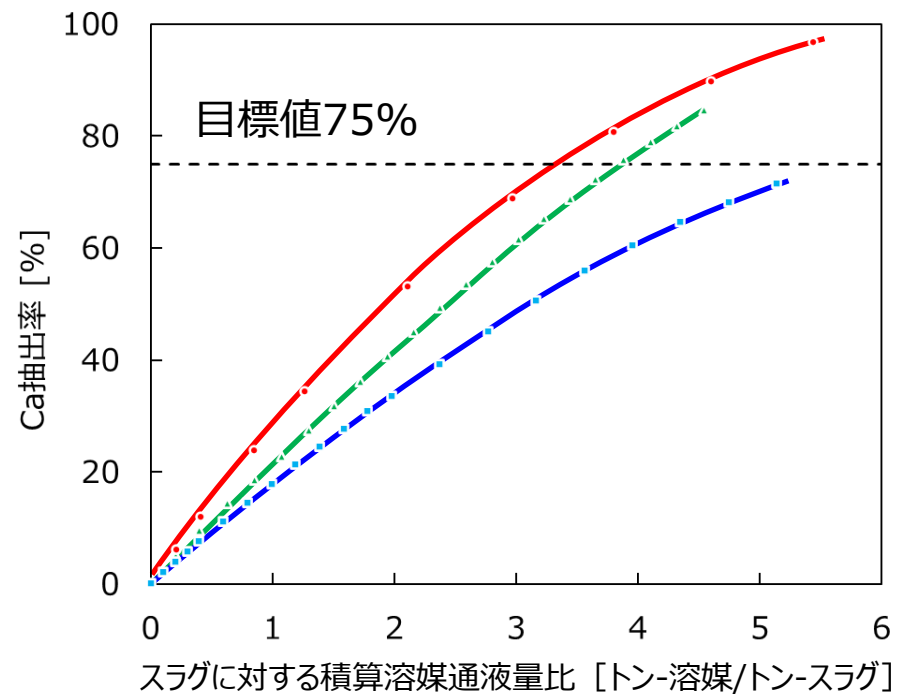


図 BSU抽出試験結果 スラグに対する積算溶媒通液量比とCa抽出率の関係

①-2「炭酸化技術の開発」事業成果

<BSU炭酸化試験装置>

- ラボ・小型炭酸化試験データを元に設計、**24年度に合計9回の運転を実施。**
- 1回の運転当たり20～30kgの炭酸カルシウムを安定して製造可能。**

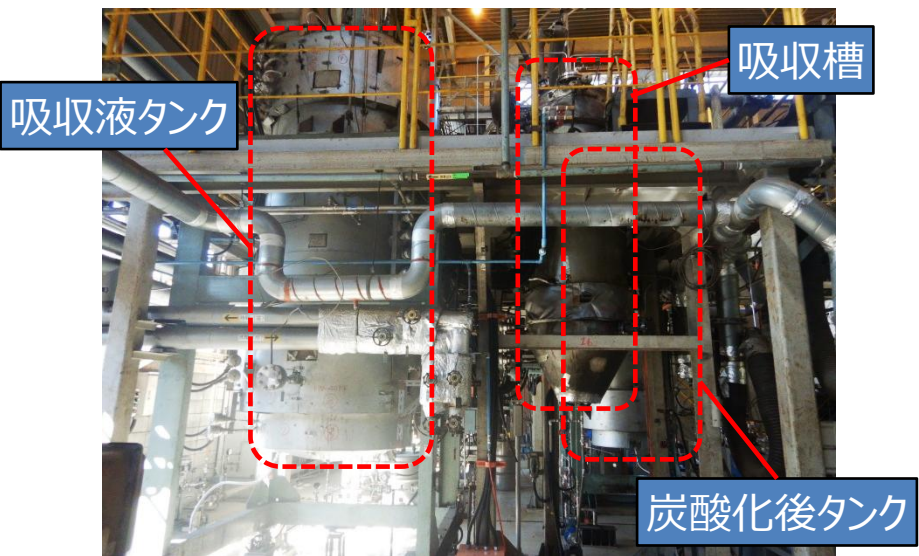


図. BSU炭酸化装置外観

基本条件

吸収槽サイズ：φ600×H2800
吸収液処理量：約4000kg/run
CO₂混合ガス流量：3～9Nm³/h
CO₂濃度：20%
温度：15-40℃

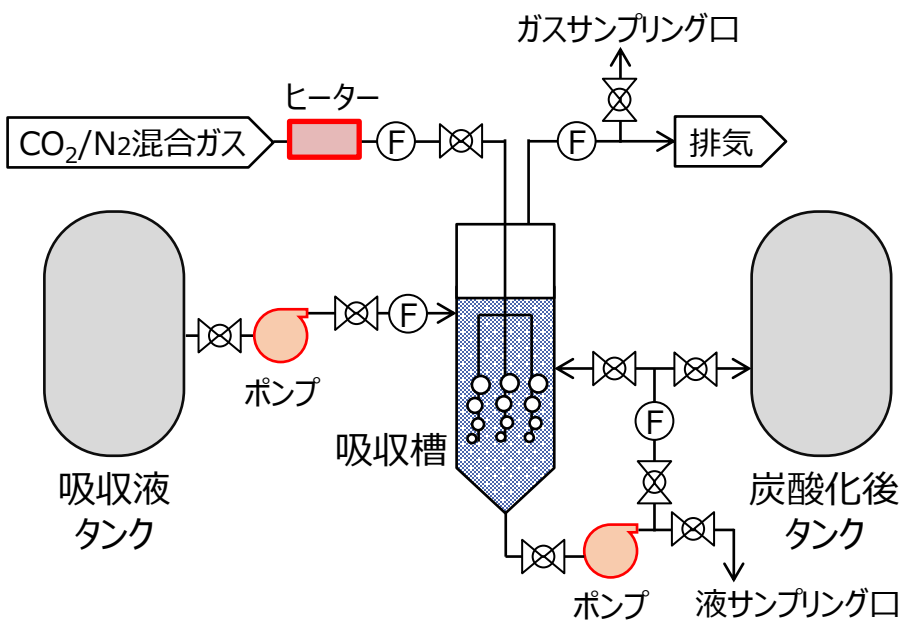


図. BSU炭酸化装置概略図

①-2「炭酸化技術の開発」事業成果

<BSU炭酸化試験装置>

- BSU炭酸化装置によるスケールアップ検証より、**吸収槽へのCO2とCaの供給比（供給モル流量比 [mol-CO2/mol-Ca]）でCO2吸収率・Ca利用率・pHが整理可能**であることを明らかにし、**炭酸化工程の設計指針を得た。**

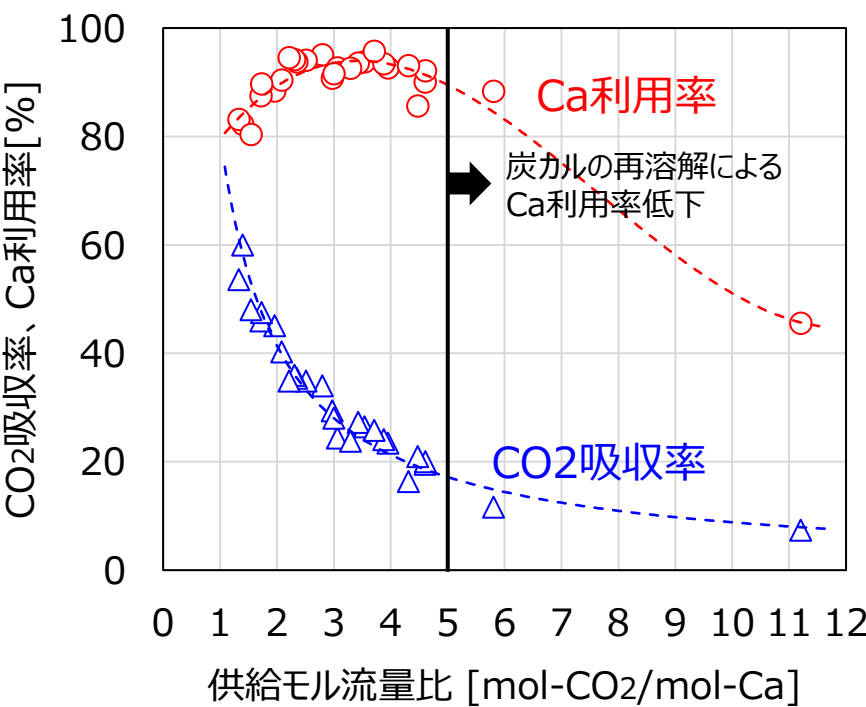


図. 供給モル流量比とCO2吸収率・Ca利用率の関係

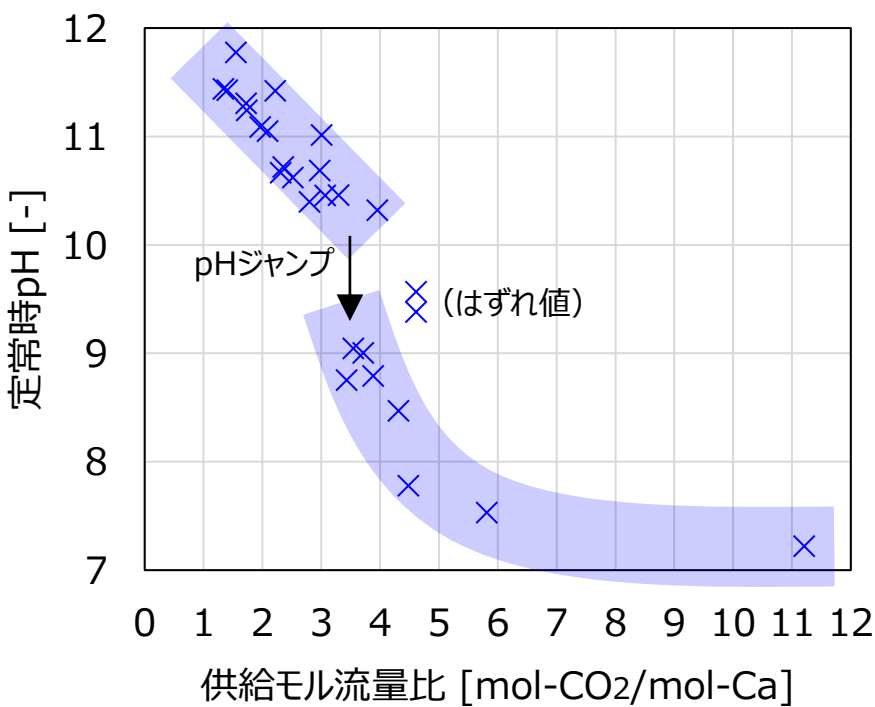


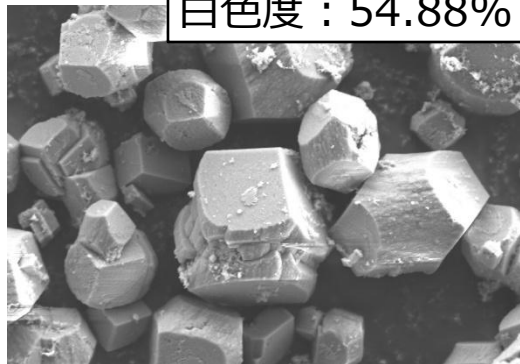
図. 供給モル流量比と定常時pHの関係

①-2「炭酸化技術の開発」事業成果

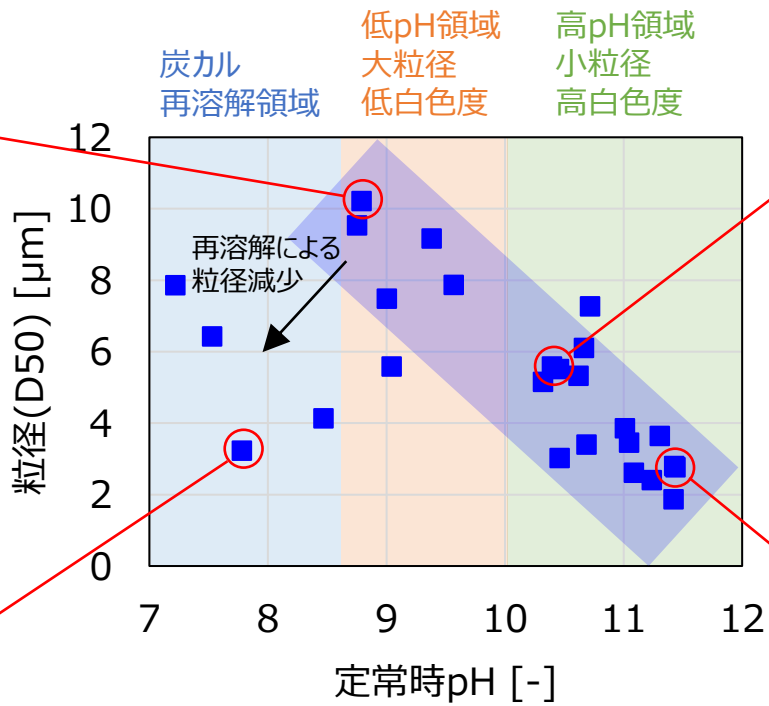
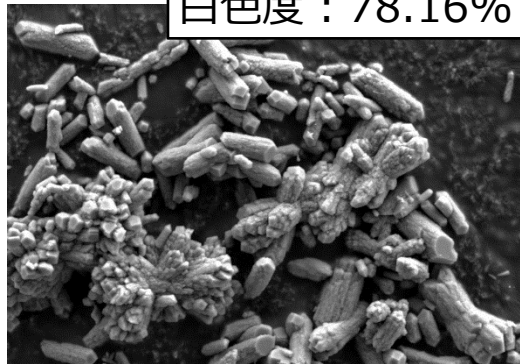
<BSU炭酸化試験装置>

- 炭酸カルシウム性状としては概ねpHに依存することを確認した。
⇒炭酸カルシウム性状も供給モル流量比により間接的に制御可能
- 高pH領域では小粒径・高白色度、低pH領域では大粒径・高白色度の炭酸カルシウムが得られる、トレードオフの関係にあることが分かった。**

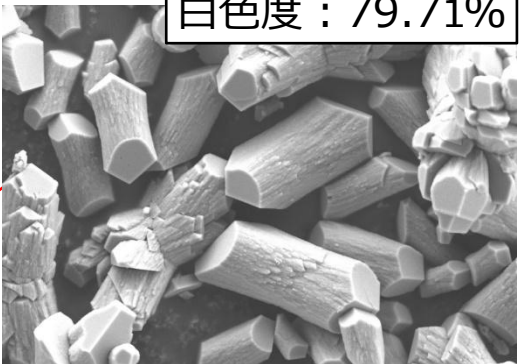
白色度：54.88%



白色度：78.16%



白色度：79.71%



白色度：81.32%

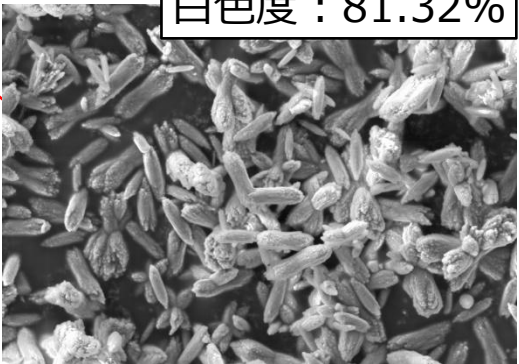


図. pHと得られた炭酸カルシウム粒径の関係

①-3「溶媒循環技術の開発」事業成果

＜溶媒回収＞

- 抽出後スラグ層に洗浄液を通液する事で**グリセリン回収率95-99%**を確認
- 炭酸カルシウムの固液分離工程においても同様にケーキ洗浄を行う事で**グリセリン回収率97%以上**を確認

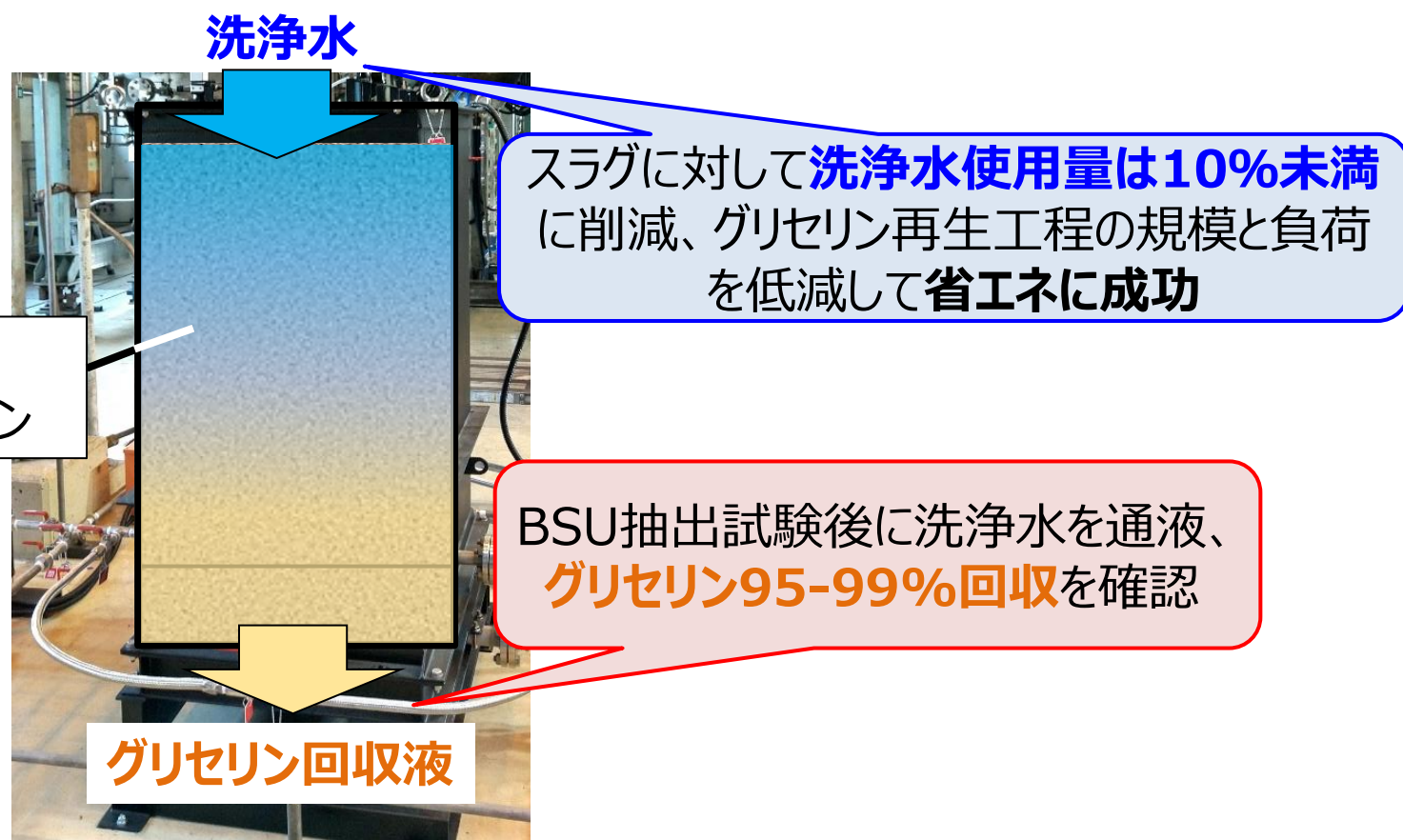


図 BSU抽出試験装置

①-4「全体プロセスの検討」事業成果

- ＜プロセス主要機器の検討＞
- 研究開発項目①-1～3の成果を基に、主要機器の仕様を策定すると共に、物質収支を提示して**CO₂吸収／固定化量とプロセス発生量のバランス**を試算できる状態にした。

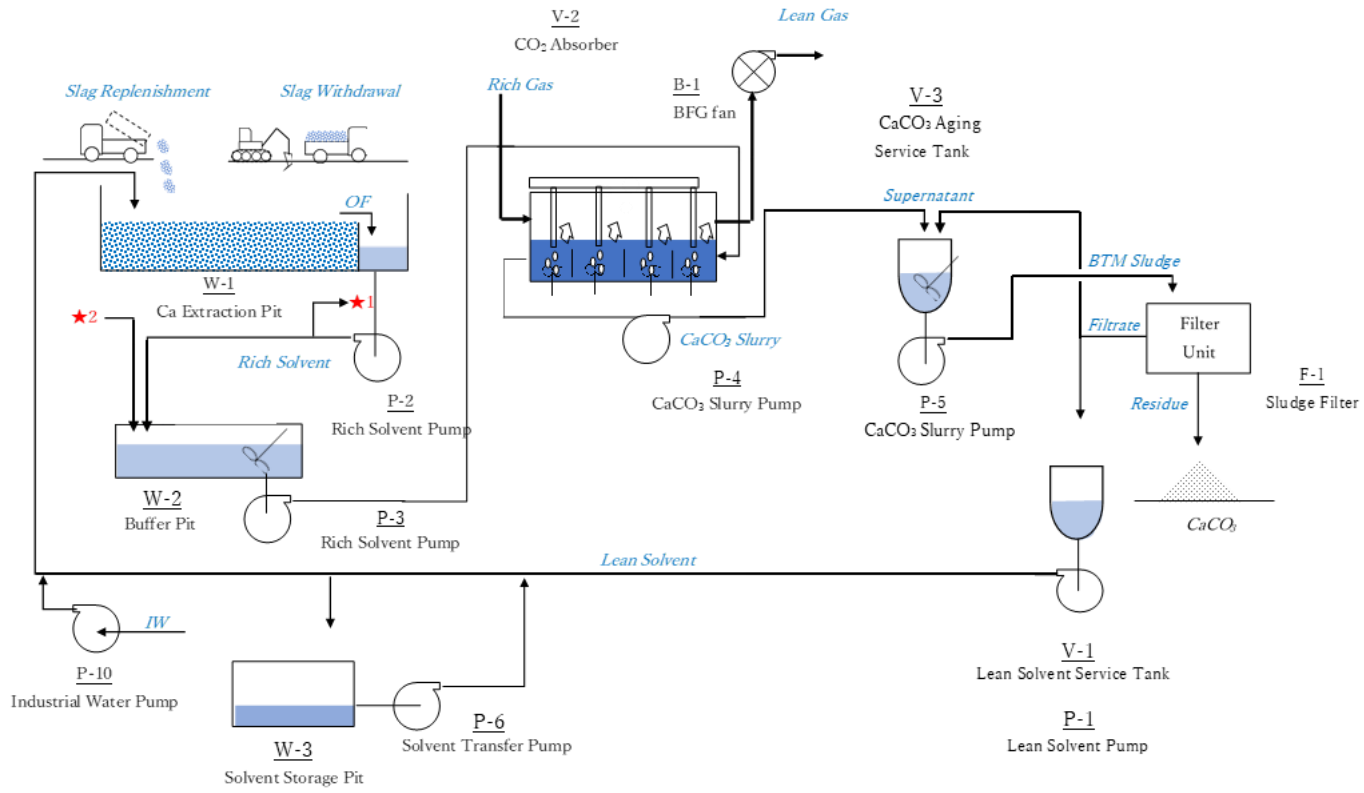


図 製鋼スラグを活用したCO₂固定化プロセス最終案

②-1「Ca抽出済スラグ有効利用方法の開発」事業成果

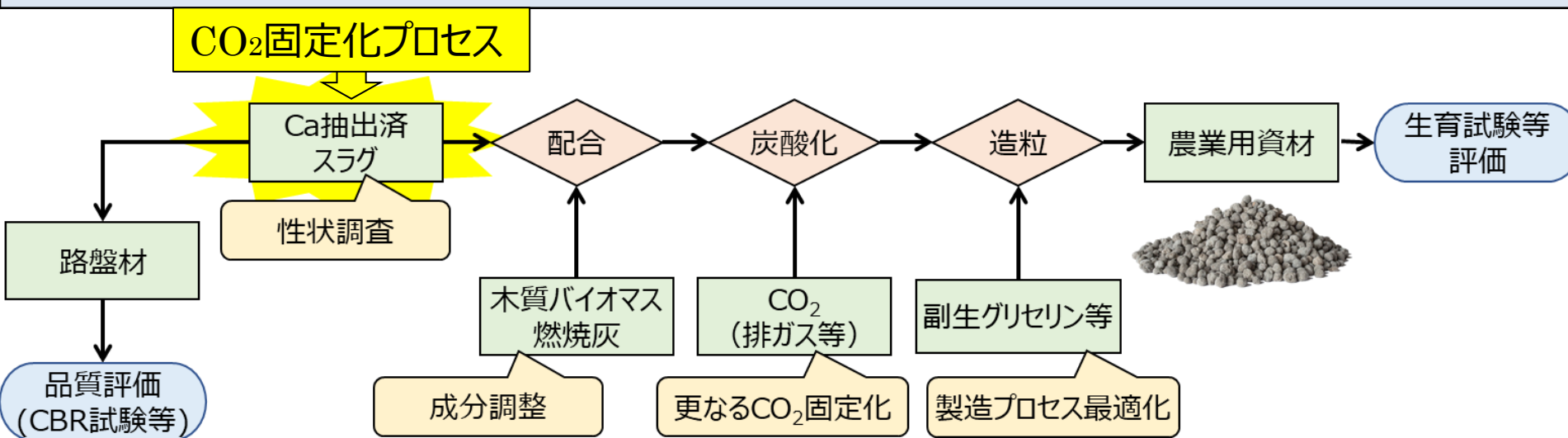
研究成果まとめ

神鋼環境ソリューション・東京農業大学（再委託）

【Ca抽出済スラグ利用方法の開発】

以下の検討を通じてCa抽出済みスラグの有効利用への道筋を立てた。

- ・ <1mmまで破碎しCa抽出済みスラグへのCO2固定量を把握できた。
- ・ Ca抽出済みスラグの農業用資材の検討として肥料並びに排水改良剤としての評価を実施した。肥料利用に必要な保証成分や有害成分の評価、植生試験を通じて肥料利用への目途を立てた。また、機械散布するための造粒条件を見出し、実用化への可能性をつなげた。
- ・ Ca抽出済みスラグと木質バイオマス灰との配合等による、更なる適用先・用途の拡大について検討した。混合のメリットは得られなかったが、木質バイオマス灰に含まれるカリウム成分がカリウム肥料であるKClを代替できることを確認した。
- ・ Ca抽出済みスラグ配合した鉄鋼スラグ路盤材製品は路盤材としての品質項目を全て満足していることを確認した。



図：Ca抽出済スラグ利用方法の想定開発フロー

②-1「Ca抽出済スラグ有効利用方法の開発」事業成果

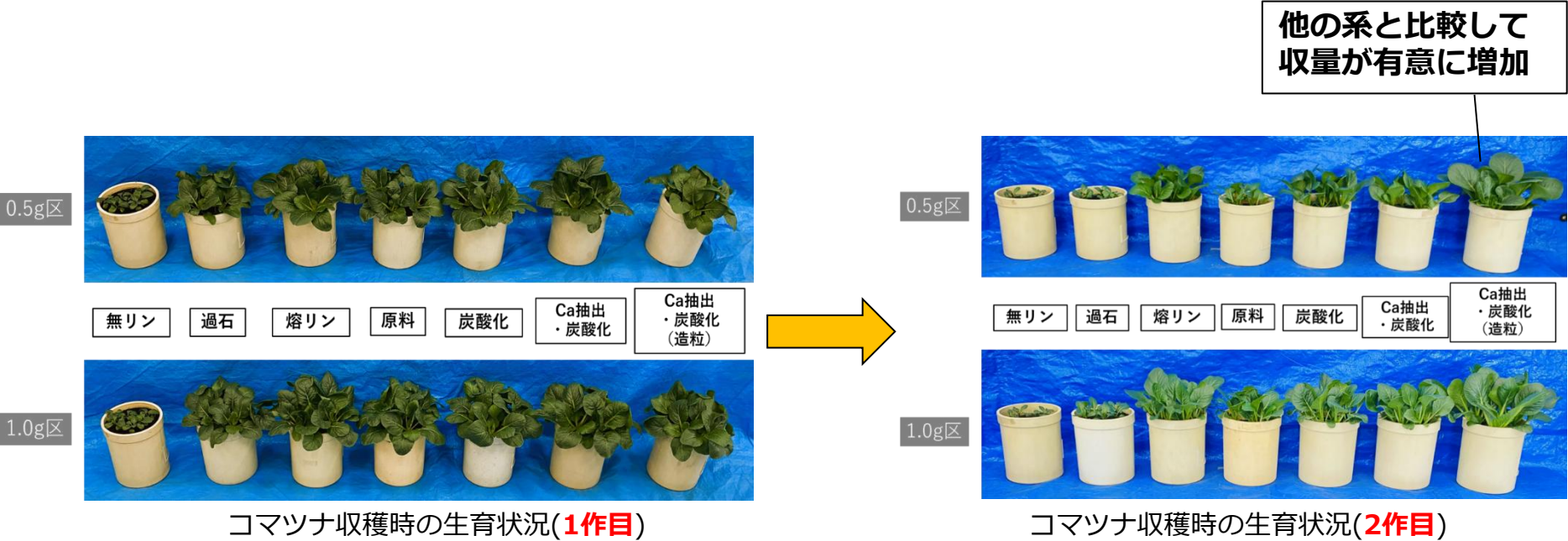
Ca抽出済みスラグの肥効の確認

・試験方法

リン肥料添加なし、化学肥料(過リン酸石灰、熔リン)、スラグ(Ca抽出前、Ca抽出前炭酸化、Ca抽出後炭酸化、Ca抽出後炭酸化(造粒))の系を調製し、コマツナの2連作により肥効を確認した。

・結果

Ca抽出後炭酸化(造粒)の系での収量は二作目において有意に増加した。
原料よりもリン酸の溶出速度が植物の吸収速度に合っていたと考えられ、植物がリン酸成分を有効活用できたと考えられる。



②-2「炭酸塩利用方法の開発」事業成果

神戸製鋼所

本プロセスで合成した炭酸カルシウムの利用方法として、セメント／コンクリート、樹脂のフィラー用途を検討した
↳セメント/コンクリート向けフィラー：品質規格を満足し、更にClやNa、Kも低いため適用できることを確認した。
↳樹脂フィラー向け：既製品（重質炭酸カルシウム）に対し、一部置換(約20%)して適用できた※1。

表 コンクリート向けフィラー炭酸カルシウム適用検討※2

項目		試験結果	規定値
密度	(g/cm ³)	2.52	-
比表面積	(cm ² /g)	9,110	≥ 2,500
圧縮強度比(%)	7 日	143	≥ 100
	28 日	131	≥ 100
CaCO ₃	(%)	93.2	≥ 90
MgO	(%)	0.05	≤ 5
T-SO ₃	(%)	0.04	≤ 0.5
Al ₂ O ₃	(%)	0.04	≤ 1.0
湿分	(%)	0.4	≤ 1.0
メチレンブルー吸着量	(mg/g)	0.07	≤ 1.0

表 合成炭酸カルシウムの化学分析(詳細分析)

測定項目		分析結果
ig.loss (%)		44.34
化学成分 (%)	SiO ₂	0.44
	Al ₂ O ₃	0.19
	Fe ₂ O ₃	0.65
	CaO	53.52
	MgO	0.13
	SO ₃	0.13
	Na ₂ O	0.01
	K ₂ O	0.00
	TiO ₂	0.01
	P ₂ O ₅	0.05
	MnO	0.49
	Cl	0.003
	V ₂ O ₅	0.014
	Cr ₂ O ₃	0.004
	NiO	0.002
	CuO	0.000
	ZnO	0.001
	SrO	0.014

本法で合成した炭酸カルシウムは特にセメント／コンクリート向けフィラーとしての利活用が期待できる

※1 中間報告では表面処理法(置換率が10%向上)を検討したが、排水処理などの観点で環境負荷が高いことから、無処理品の値を採用した

※2 評価方法：日本コンクリート工学会のJCI-C44「コンクリート用 石灰石微粉末品質規格（案）」

CO₂吸収／固定化量とプロセス発生量のバランス試算結果

- < CO₂バランス試算結果 >
- 本プロセスで吸収するCO₂量に対し、**発生量はおよそ20%**に相当と試算
⇒80%のCO₂は固定化できる目途、**カーボンネガティブなプロセス**である事を確認

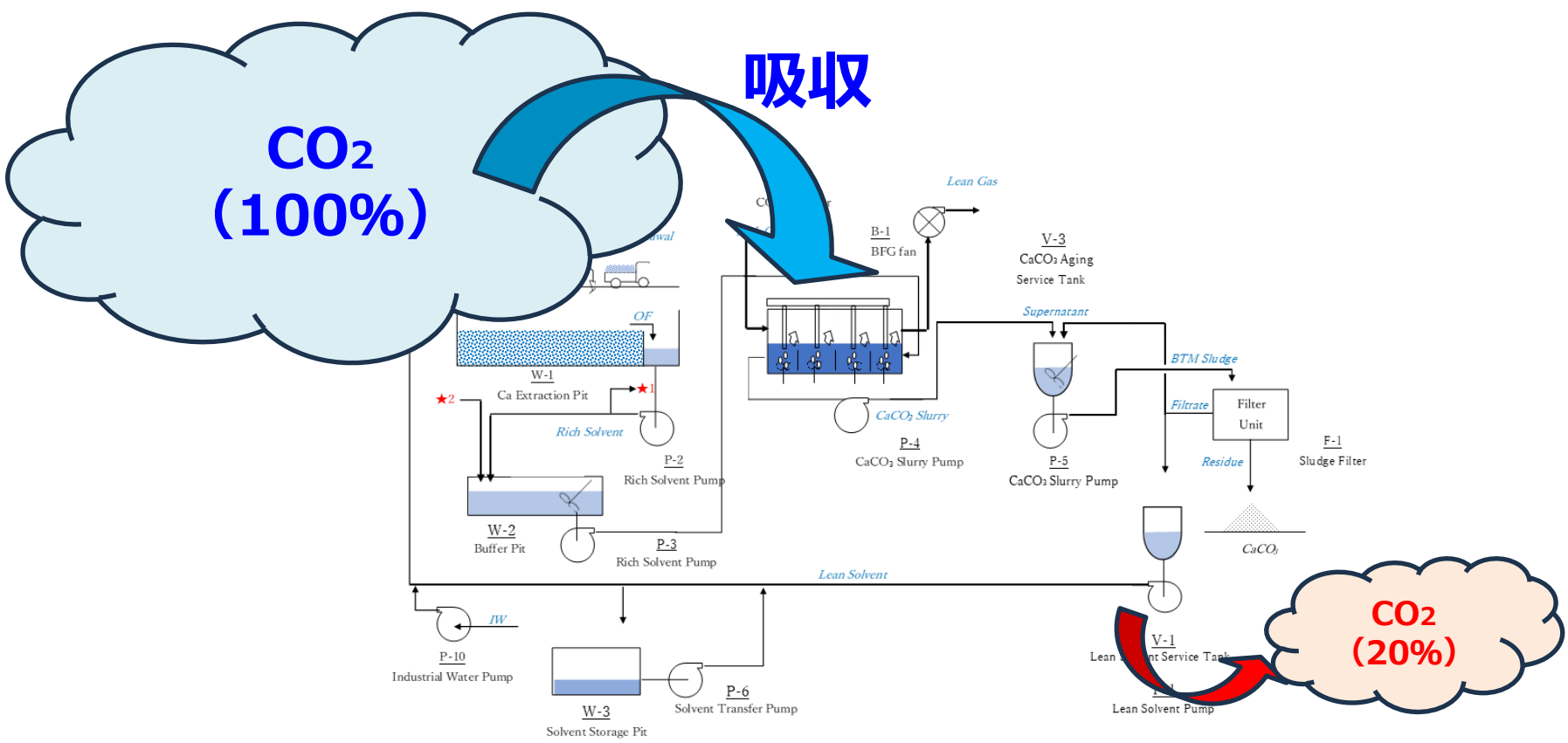


図 製鋼スラグを活用したCO₂固定化プロセス最終案

ビジネスモデルと商用化に向けた技術的課題・対策

◎ビジネスモデル

・加古川製鉄所で発生する製鋼スラグから、他社製品製造プロセスで発生する副生グリセリン水溶液を使って抽出したカルシウムに、二酸化炭素を反応させて炭酸カルシウムを製造する。従来利用されていなかったカルシウムを有効活用して製造したため、CN(カーボンニュートラル、カーボンネガティブ)炭酸カルシウムとして付加価値を付けてセメント/樹脂添加剤として販売する。カルシウムを抽出した後の製鋼スラグは、神鋼環境ソリューションの二酸化炭素付加プロセスを使って炭酸化した後、肥料として販売する。

◎ビジネスモデル実現・商用化にいたる課題

炭酸カルシウムについては、CN炭酸カルシウムの付加価値を認めるユーザの獲得の獲得に向け、ユーザニーズに応える技術開発の継続が課題である。中でも樹脂添加/セメント添加用には炭酸カルシウムの粒径アップ方法の確立が重要課題(後述)である。

肥料用途については、当プロセスで製造する肥料を現行スラグ肥料価格に当てはめると収益が低くなる。収益改善のためにはスラグ中に含まれる「リン」に着目したリン肥料として認知/販売できるかが課題である。一方、認知へのリスクヘッジとしてカルシウム抽出済み製鋼スラグに肥料以外(混和材等)にも新たな価値のある物として販売できる用途を見いだす事も課題である。

今後の技術課題 まとめ

◎ 実用化・事業化に対する課題と今後の取組

鉬物によるCO₂固定化プロセスについてBSU規模のスケールアップ検証を実施し、抽出後スラグと炭酸カルシウムの販売を想定した経済性評価では良好な結果を得た。一方で、本プロセス開発は要素研究が完了した段階であり、実用化に向けてはパイロット規模のスケールアップ実証試験によるプロセスの安定性と装置設計指針の精度向上、プラントコスト及びランニングコストの更なる低減が課題である。また、製品品質の安定化と高付加価値化に向けた検討を大量サンプルで評価する事も用途開発における課題である。今後は更なるプロセス合理化を実現するために各工程の条件及び構成の高効率化検討を実施すると共に、製品の高付加価値化に向けた品質設定とプロセス条件の更新を行い、経済性の改善を検討する。

謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業により得られた研究成果であることを記し、謝意を表します。