

NEDO脱炭素技術分野成果報告会2025

プログラムNo.1

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/
マイクロ波によるCO₂吸収焼結体の研究開発
(CO₂-TriCOM)

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 内田 裕二

*団体名（企業・大学名など） 中国電力（株）、（国）広島大学、中国高圧コンクリート工業（株）

問い合わせ先 中国電力（株） E-mail:272008@pnet.energia.co.jp TEL:080-9958-0040

背 景

石炭火力発電は、安定した電力供給を支える一方で、CO₂排出量が多く、環境負荷の低減が課題となっている。また、発電や建設に伴い発生する石炭灰（フライアッシュ）や廃コンクリート粉といった産業副産物の有効活用も求められている。こうした中、CO₂を資源として再利用する「カーボンリサイクル技術」への関心が高まっており、特に石炭灰製品へのCO₂固定化は、吸収ポテンシャルや生成物の安定性から、早期の社会実装が期待されている。

本事業は、CO₂、石炭灰、廃コンクリート粉を原料とし、マイクロ波加熱によってCO₂を吸収・固定化する焼結体を開発することを目的とする。これにより、石炭火力発電由来の副産物を有効活用しつつ、製造時のエネルギー効率向上とCO₂排出削減を図り、カーボンリサイクル技術の実用化と普及を目指す。

事業の目的

本事業は、石炭火力発電事業で発生するCO₂、石炭灰（フライアッシュ）、および廃コンクリート粉を有効活用し、マイクロ波加熱によってCO₂を吸収・固定化する焼結体を開発することを目的とする。開発した焼結体は、大量消費が見込める土木材料への活用を念頭に置いている。これにより、産業副産物の再資源化とCO₂排出削減を同時に実現し、カーボンリサイクル技術の社会実装と普及に貢献することを目指す。

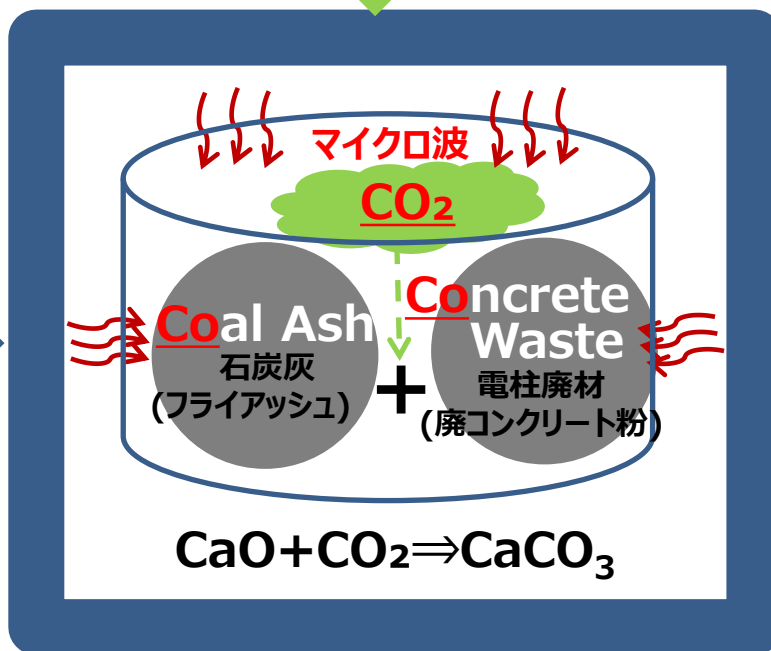
トリプルCリサイクル技術

石炭火力発電で
発生する石炭灰
フライアッシュ(FA)

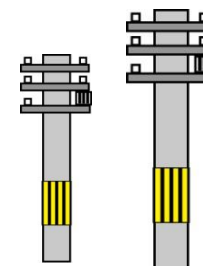


火力発電所から排出するCO₂

二酸化炭素
CO₂



電柱廃材の解体時に発
生するコンクリート粉
(廃コン) (CaO)



生成



CO₂-TriCOM

CO₂吸収焼結体

CO₂を取り込む焼結体

小型プラントで
焼結試験実施中



事業の目標

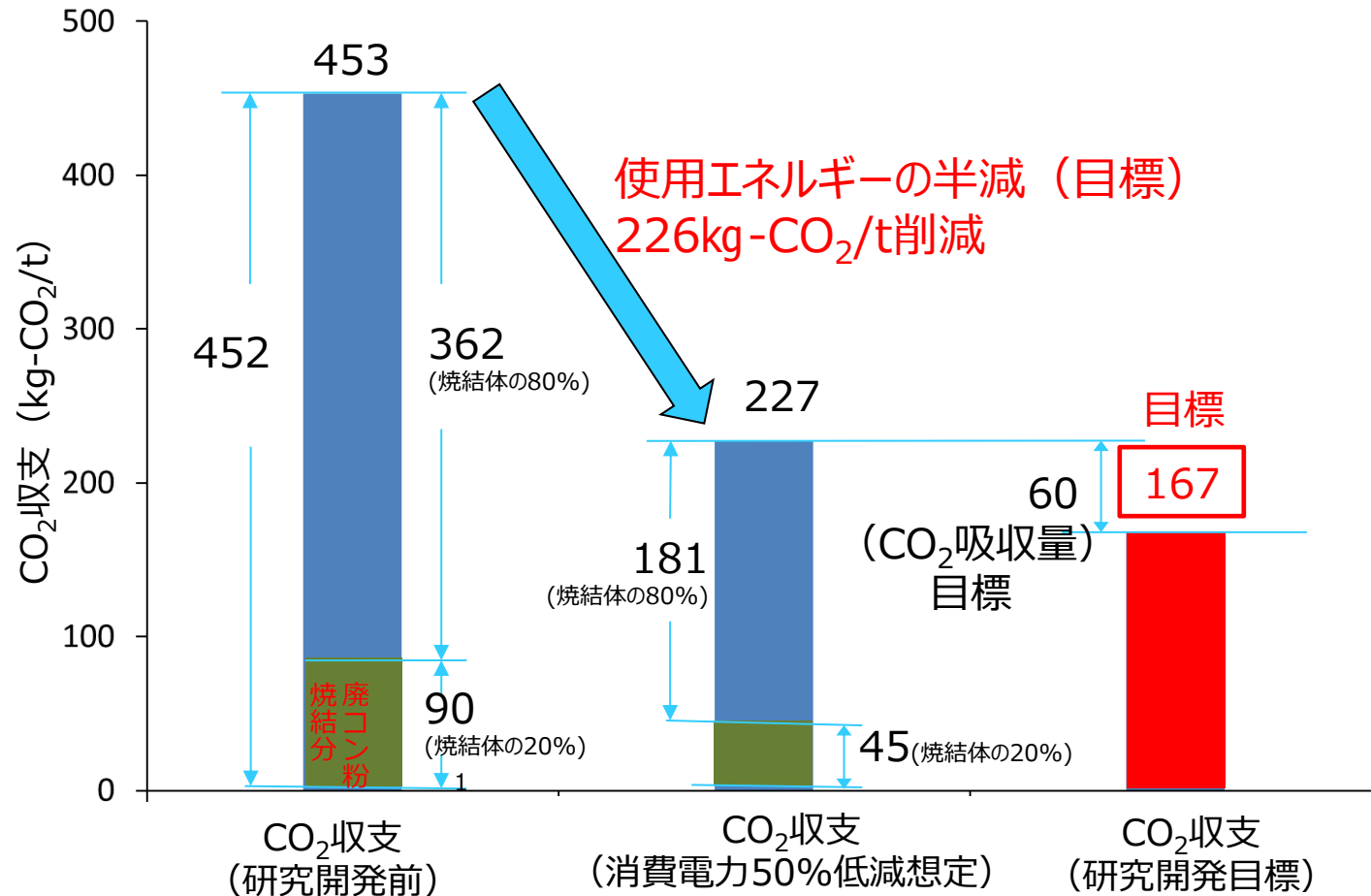
ベンチスケール(最大6kW級)での焼結体試作では、廃コン比率20%でCO₂吸収量が約60kg-CO₂/tとなる見通しを得ているが、実用化に向けては、300kW級の大規模装置へのスケールアップと、製造時の電力消費削減が課題である。本事業では、パイロットスケール(最大30kW級)での焼結体によるCO₂吸収に加え、製造システムの最適化により、CO₂収支167kg-CO₂/tの達成を目標とする。

これにより、環境負荷とコストの両面で優れたCO₂吸収焼結体の実用化を目指す。

CO₂-TriCOMのCO₂収支の目標

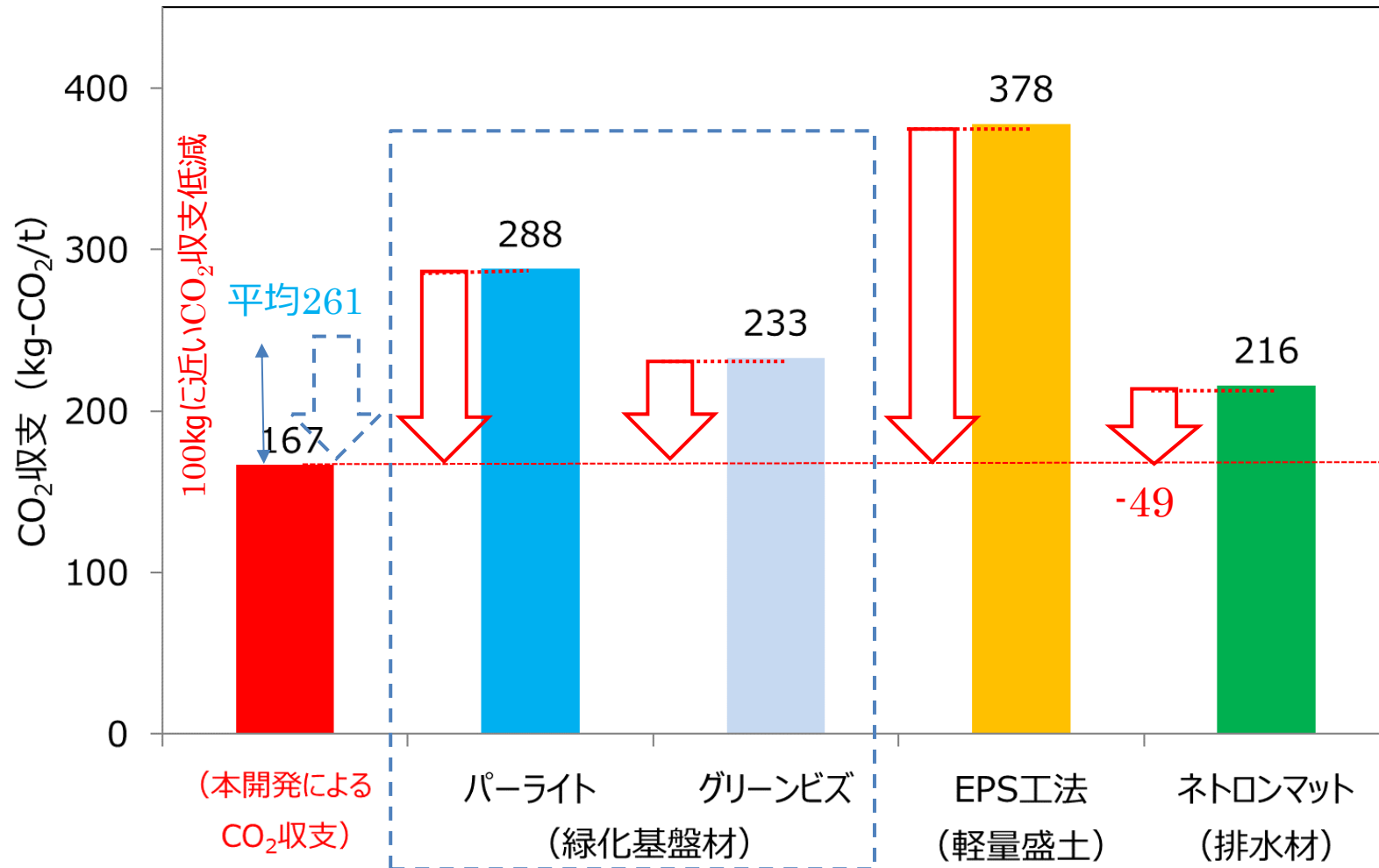
6

ターゲットとするのは焼結体製造時のCO₂収支



CO₂-TriCOMと競合材料のCO₂収支比較

CO₂収支に優れた土工材として活用を目指す。



開発項目・実施内容・研究成果 (1/4)

研究開発項目	事業最終目標	成 果
研究開発項目1 「CO ₂ 吸収焼結体の配合最適化検討(CO ₂ 吸収量の向上)		
(a)石炭灰及び廃コンクリート粉等の混合割合とCO ₂ 吸収量との関係性把握	パイロットスケール試験で、以下のフライアッシュを用いたCO ₂ 吸収焼結体のCO ₂ 吸収量(60kg-CO ₂ /t)の評価 ・複数炭種 ・バイオマス混焼灰	石炭灰の種類に関係なく、廃コンクリートの比率が20%で目標とするCO ₂ 吸収量(60kg-CO ₂ /t)を達成可能である見通しを得た。また、密度等の材料品質面、事業性等からも総合的に判断した結果、この配合を最適配合として決定した。
(b)CO ₂ 吸収焼結体の物理・化学特性の把握(強度面、安全性(重金属の溶出))	パイロットスケール試験で、以下のフライアッシュ用いたCO ₂ 吸収焼結体の性能(重金属溶出試験等)評価 ・複数炭種 ・バイオマス混焼灰	石炭灰の種類に関係なく、一定の条件(焼結温度、焼結時間等)で焼結することで、強度面および環境安全性の面でライトサンド相当の品質を確保可能なことを確認した。

開発項目・実施内容・研究成果 (2/4)

研究開発項目	事業最終目標	成果
研究開発項目2 「CO ₂ 吸収焼結体の製造システムの最適化検討(CO ₂ 収支の向上)」		
(a)発電所排ガス等の熱利用等による使用エネルギー量削減の検討	パイロットスケール試験で、CO ₂ 排出削減量(136kg-CO ₂ /t以上)の評価	発電所排ガス等の熱利用により、約38%のCO ₂ 削減が可能であることを確認した。
(b)鉄化合物等の添加によるマイクロ波の吸収効率向上に伴う使用エネルギー量削減の検討	パイロットスケール試験で、CO ₂ 排出削減量(45kg-CO ₂ /t以上)の評価	ベンチスケール試験により、鉄化合物等の添加により、焼結エネルギー量を削減可能なことを定性的に確認した。パイロットスケール試験では、添加量によっては、プラズマ発生が見られる等の新たな課題が確認された。
(c)Ca等の添加による融点降下に伴う使用エネルギー量削減の検討	パイロットスケール試験で、CO ₂ 排出削減量(45kg-CO ₂ /t以上)の評価	Naの添加により、焼結エネルギー量を削減可能なことを確認した(約20%の添加で10%のエネルギー(CO ₂ 発生量換算で36kg-CO ₂ /t)を削減可能なことを確認した。

開発項目・実施内容・研究成果 (3/4)

研究開発項目	事業最終目標	成 果
研究開発項目3 「小型プラント(パイロットスケール)での焼結体試作・評価」		
(a)プラズマ発生抑制に関する検討	プラズマ発生を抑制した導波管の配置等設計	上部から下部にマイクロ波を照射する方向に5本の導波管を設置することで、プラズマの発生を抑制、均質焼結が可能な構造とした。
(b)マイクロ波照射設計に関する検討	加熱エネルギーの最適化	単位質量(試料)当たりの出力が大きい程、マイクロ波の吸収効率が良いことを確認した。 マイクロ波の吸収効率は、試料の形状・寸法にも影響を受けることを確認した。
(c)CO ₂ 収支(排出量-吸収量)及び品質の評価	CO ₂ 収支(167kg-CO ₂ /t以下)、CO ₂ 吸収焼結体の品質確認	計算上CO ₂ 収支167kg-CO ₂ /t以下となる見通しを得た。石炭灰の種類に関係なく、一定の条件(加熱温度、加熱時間等)で焼結することで、強度面および環境安全性の面でライトサンド相当の品質を確保できる見通しを得た。

開発項目・実施内容・研究成果 (4/4)

研究開発項目	事業最終目標	成 果
研究開発項目4 「実用化(デモンストレーションスケール)に向けた課題の整理・検討」		
(a)デモンストレーションスケールに向けた調査	加熱エネルギー最適化のデモンストレーションスケール(300kW級)への検討	導波管を上部より5本導入する形としたパイロットスケール試験装置を複数台連結することにより、パイロットスケールで蓄積した知見を活用した大型化が可能である見通しを得たと判断した。30kW級の装置を複数台組み合わせることにより、実用化(デモンストレーションスケール)が可能である見通しを得た。
(b)ベンチスケールにおける課題整理		
(c)パイロットスケールにおける課題整理		
(d)機械装置の構成検討		
(e)デモンストレーションスケールへの課題整理		
(f)価格面、効率面で優れたマイクロ波発振器の適用性評価	価格面、効率面で優れたマイクロ波発振器の適用性評価	中国製のマイクロ波発生装置の性能確認を行い、制御面での課題は残るが、日本製と比較して、加熱能力等に遜色がないことを確認した。価格については、日本製の3分の1程度である(聞取り)。

研究開発項目①詳細

「CO₂吸収焼結体の配合最適化検討」
(CO₂吸収量の向上)

①-(a)石炭灰及び廃コンクリート粉等の混合割合とCO₂吸収量の関係性把握

石炭灰の種類に関係なく、廃コンクリートの比率が20%で目標とするCO₂吸収量（60kg-CO₂/t）を達成可能である見通しを得た。

また、密度等の材料品質面、事業性等からも総合的に判断した結果、この配合を最適配合として決定した。

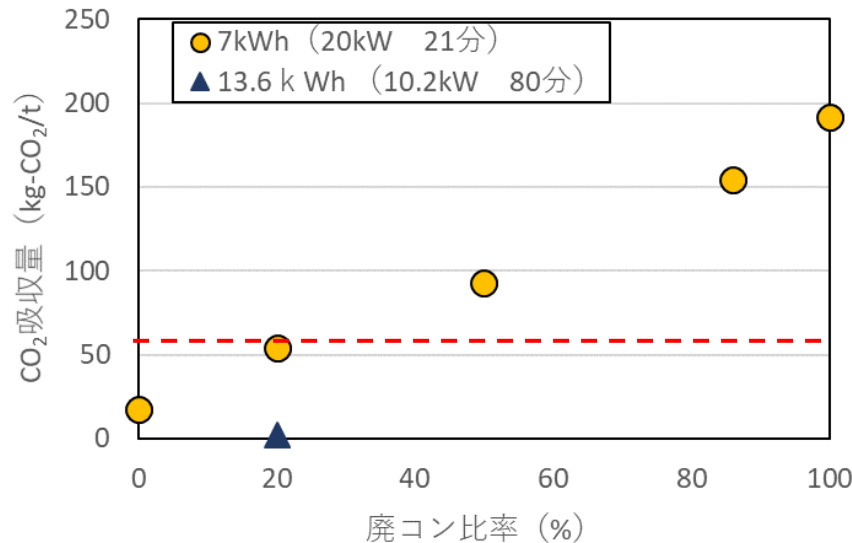


図 CO₂吸収量評価
(試料量10kg)

TG-DTAによりCO₂吸収量を評価

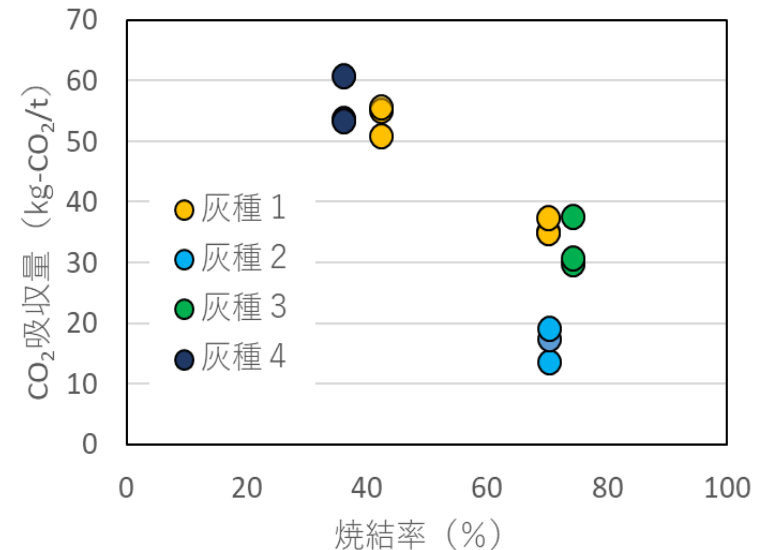


図 焼結率とCO₂吸収量
(廃コン比率20%)

①-(b)CO₂焼結体の物理・化学特性の把握 強度面・安全面（重金属の溶出）等

(1/3)

14

石炭灰の種類に関係なく、一定の条件（焼結温度、焼結時間等）で焼結することで、強度面および環境安全性の面でライトサンド相当の品質を確保可能なことを確認した。

表 溶出試験の結果（廃コン比率20%で評価）

灰 種		1				2			
		フライアッシュ		焼結体		フライアッシュ		焼結体	
分析項目	基準値	分析値	評価	分析値	評価	分析値	評価	分析値	評価
六価クロム (mg/L)	0.05	0.06	×	検出 されず	○	0.34	×	検出 されず	○
ヒ素 (mg/L)	0.01	0.075	×	検出 されず	○	0.099	×	検出 されず	○
セレン (mg/L)	0.01	0.079	×	0.007	○	0.061	×	0.007	○
フッ素 (mg/L)	0.8	1.9	×	0.17	○	1.5	×	0.2	○
ホウ素 (mg/L)	1	3.7	×	0.22	○	6.3	×	0.47	○
焼結率（%）		—		85.5				79.3	
焼結エネルギー （kWh/t）		—		1,360				805	

①-(b)CO₂焼結体の物理・化学特性の把握 強度面・安全面（重金属の溶出）等

(2/3)

15

石炭灰の種類に関係なく、一定の条件（焼結温度、焼結時間等）で焼結することで、強度面および環境安全性の面でライトサンド相当の品質を確保可能なことを確認した。

表 溶出試験の結果（廃コン比率20%で評価）

灰 種		3				4			
		フライアッシュ		焼結体		フライアッシュ		焼結体	
分析項目	基準値	分析値	評価	分析値	評価	分析値	評価	分析値	評価
六価クロム (mg/L)	0.05	0.05	×	検出 されず	○	検出 されず	×	検出 されず	○
ヒ素 (mg/L)	0.01	0.057	×	0.034	×	検出 されず	×	0.006	○
セレン (mg/L)	0.01	0.085	×	0.041	×	0.012	×	0.005	○
フッ素 (mg/L)	0.8	1.5	×	0.32	○	1.5	×	0.19	○
ホウ素 (mg/L)	1	1.4	×	0.84	○	1.4	×	0.60	○
焼結率（％）		—		74.2		—		85.1	
焼結エネルギー (k Wh/t)		—		691		—		955	

①-(b)CO₂焼結体の物理・化学特性の把握 強度面・安全面（重金属の溶出）等

(3/3)

16

石炭灰の種類に関係なく、一定の条件（焼結温度、焼結時間等）で焼結することで、強度面および環境安全性の面でライトサンド相当の品質を確保可能なことを確認した。

表 土質試験の結果
(廃コン比率20%で評価)

灰 種		1		2		3		4	
分析項目	基準値	分析値	評価	分析値	評価	分析値	評価	分析値	評価
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.5程度	2.527	○	2.534	○	2.443	○	2.489	○
粒度 (0.075mm未満)	15以下	1.9	○	39.1	×	40	×	1.3	○
透水係数 (m/s)	1.0E-05 以上	2.88E-03	○	7.82E-07	×	1.07E-06	×	2.60E-03	○
CBR (%)	20以上	62.1	○	8.2	×	40.5	○	—	—
内部摩擦角 (CD法) (°)	35以上	35.1	○	36.2	○	36.4	○	—	—
焼結率 (%)		85.5		79.3		74.2		85.1	
焼結エネルギー (kWh/t)		1,360		805		691		955	

研究開発項目②詳細

「CO₂吸収焼結体の製造システムの最適化検討」(CO₂収支の向上)

② 「CO₂吸収焼結体の製造システムの最適化検討(CO₂収支の向上)」 18

発電所排ガス等の熱利用、鉄化合物等の添加により、CO₂収支を向上。

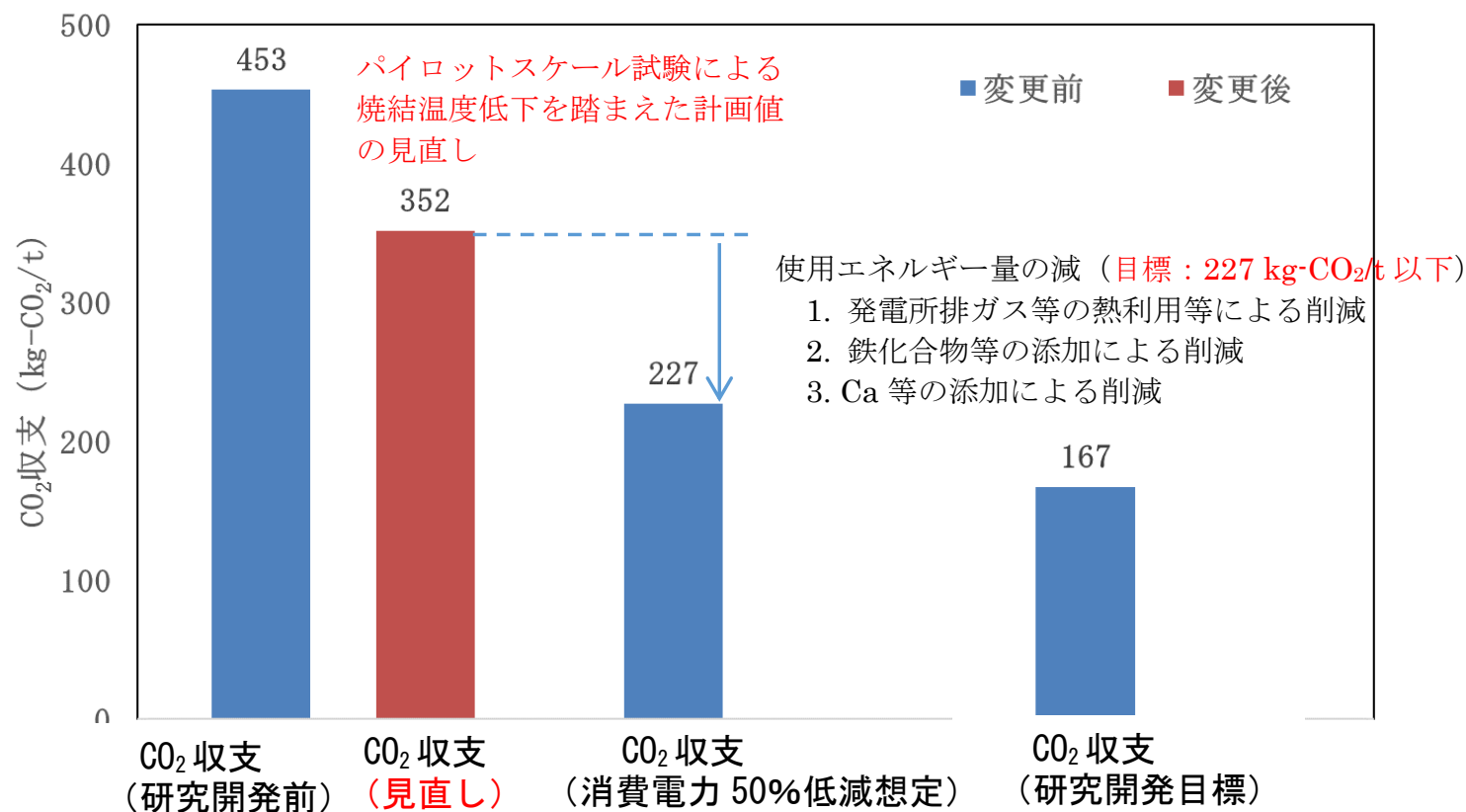


図 CO₂収支改善の目標(変更後)

研究開発項目③詳細

「小型プラント(パイロットスケール)での
焼結体試作・評価」

③-(a)プラズマ発生抑制に関する検討

(1/2)

上部から下部にマイクロ波を照射する方向に5本の導波管を設置することで、プラズマの発生を抑制、均質焼結が可能な構造とした。

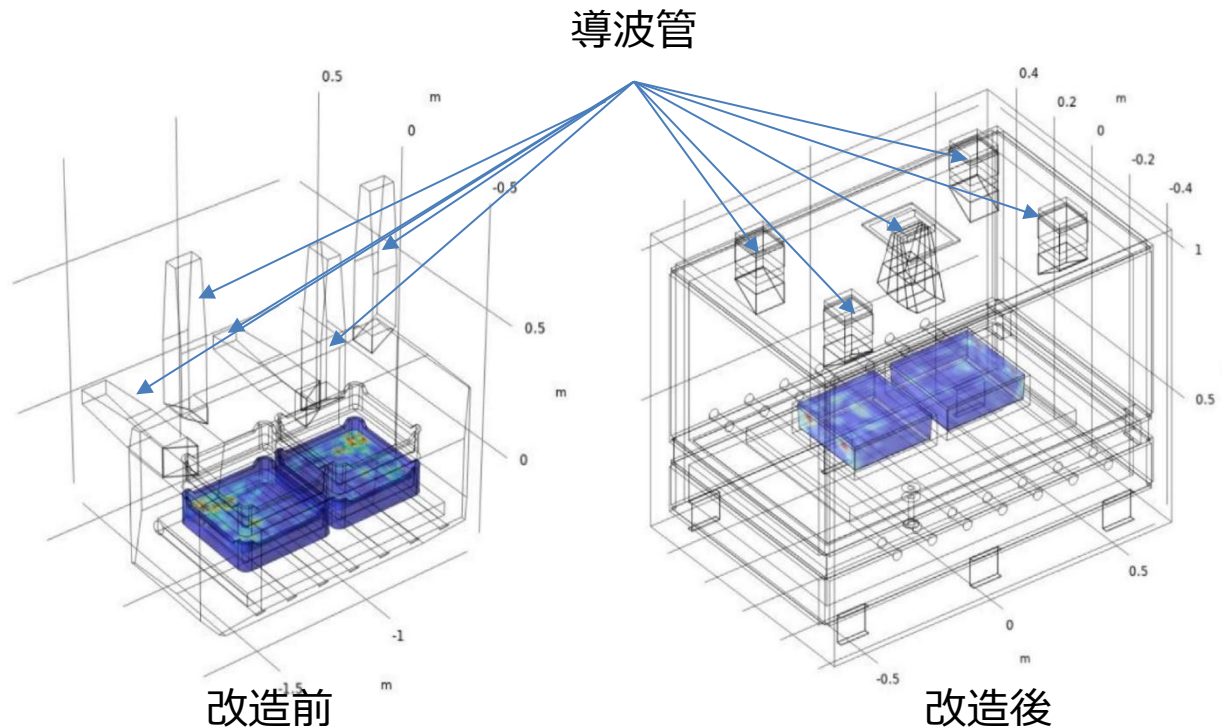
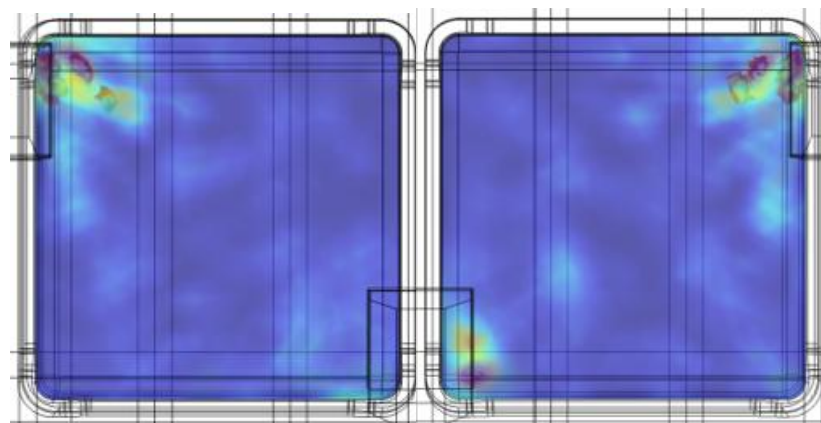


図 導波管の配置変更およびその解析

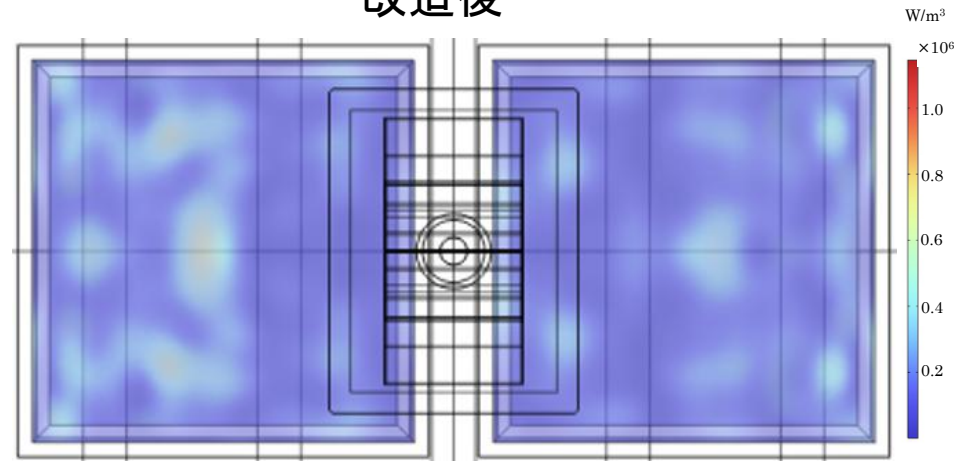
改造前は試料の局所的な加熱が見られたが、改造後は改造前と比べて均質に加熱できている。

改造前



30kW 30分 (14.38kWh) 試料量20kg

改造後



30kW 38分 (18.35kWh) 試料量20kg

図 改造前後の解析結果及び焼結試験結果

③-(b)マイクロ波照射設計に関する検討

単位質量（試料）当たりの出力が大きい程、マイクロ波の吸収効率は良いことを確認した。

マイクロ波の吸収効率は、試料の形状・寸法にも影響を受けることを確認した。

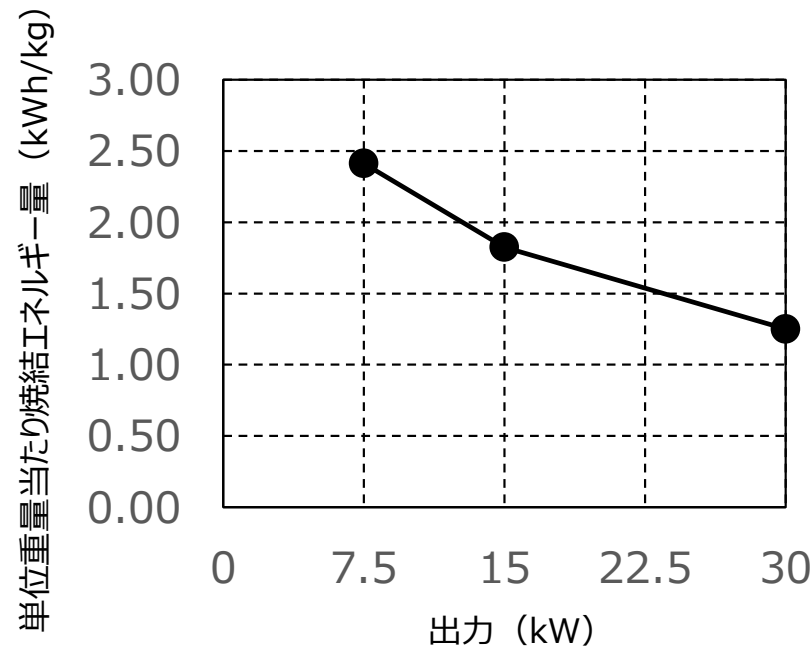
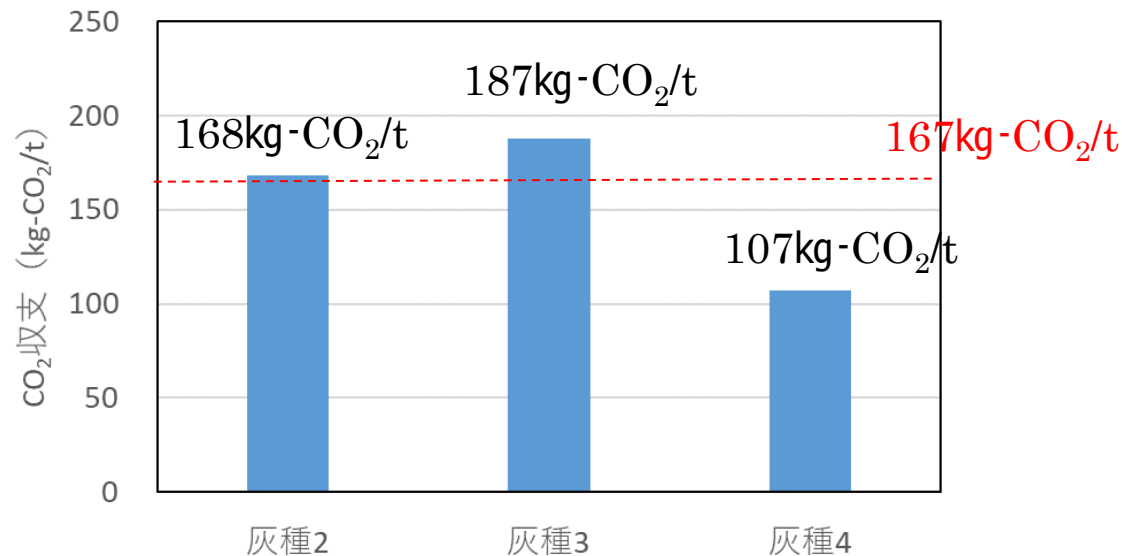


図 出力と焼結エネルギー量の関係

③- (c)小型プラント（パイロットスケール）におけるCO₂収支（排出量-吸収量）及び品質の評価

計算上CO₂収支167kg- CO₂/t以下となる見通しを得た。石炭灰の種類に関係なく、一定の条件（加熱温度、加熱時間等）で焼結することで、強度面および環境安全性の面でライトサンド相当の品質を確保できる見通しを得た。

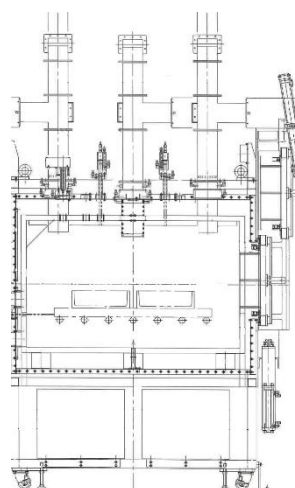


廃コン比率20%でのCO₂収支

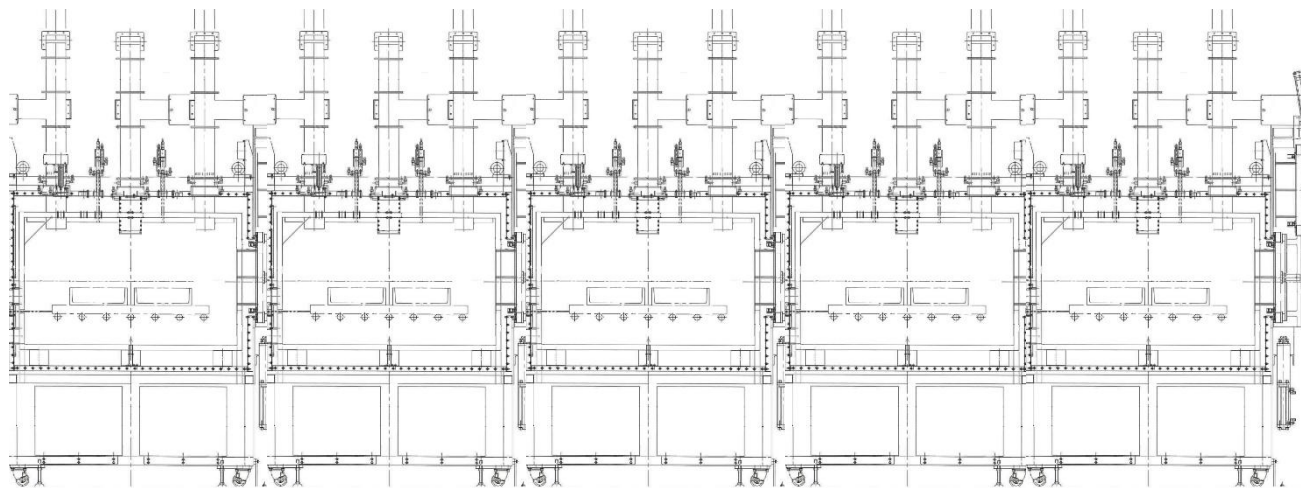
研究開発項目④詳細

「実用化に向けた課題の整理・検討」

大型化については、パイロットスケール（30kW級）の装置を複数台連結した形状を検討した。



大型化



30kW級

30kW級 × 5台連結 × 2系列 = 300kW級

または

30kW級 × 10台連結 = 300kW級

④-実用化に向けた課題の整理・検討

(2/2)

中国製のマイクロ波発生装置の性能確認を行い、制御面での課題は残るが、日本製と比較して、加熱能力等に遜色がないことを確認した。

価格については、日本製の3分の1程度である（聞取り）。

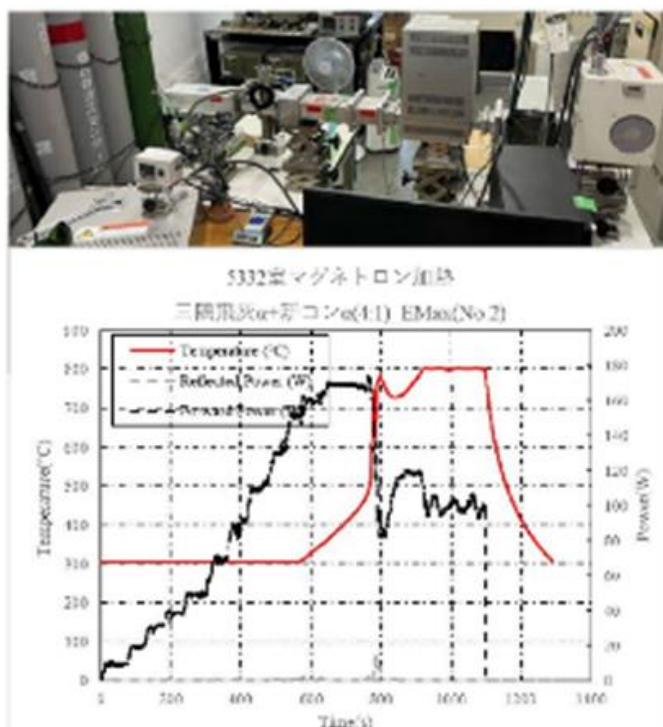


図 日本製

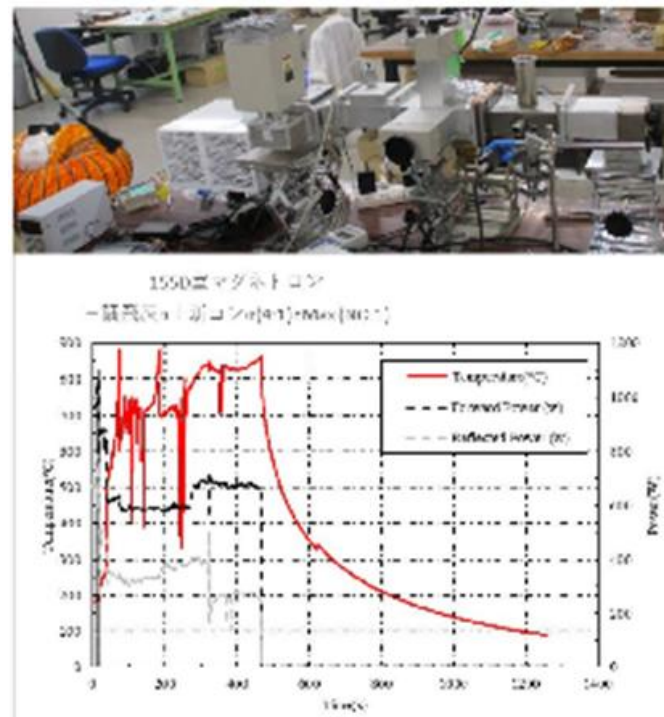


図 中国製

研究スケジュール

	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度
研究開発項目1 CO ₂ 吸収焼結体の配合最適化検討 (CO ₂ 吸収量の向上)		ベンチスケール	パイロットスケール	パイロットスケール (複数炭種の焼結)	パイロットスケール (バイオマス灰の焼結)
研究開発項目2 CO ₂ 吸収焼結体の製造システムの最適化 検討(CO ₂ 収支の向上)		ベンチスケール	パイロットスケール		
研究開発項目3 小型プラント(パイロットスケール)での焼結 体試作・評価		設計 製作・据付け	製品試作	導波管の配置	加熱エネルギーの最適化
研究開発項目4 実用化(デモンストレーションスケール)に向 けた課題の整理・検討		課題整理	機械装置 検討	機械装置 検討 (導波管の 配置反映)	機械装置 検討 (エネルギーの 最適化反映)

1. 均質焼結技術の確立

試料の大型化に伴い、温度分布のバラつきが原因と思われる焼結ムラが見られた。試料形状・配置や加熱炉構造の最適化により、温度の均一化を図る。

2. スケールアップ時のエネルギー評価

製造コストの大半を占める電力コストが事業性に大きく影響することから、均質焼結技術の確立後、1tあたりの電力量を明確化し、ボイラーの排熱活用や焼結体放熱時の熱回収等エネルギー削減策を検討。

3. CO₂吸収の最適化

CO₂吸収量の向上に向け、最適な炭酸化方法の確立が必要である。焼結前の炭酸塩化が有効だが、加熱時に炭酸塩が分解する可能性。炭酸塩の分解を抑える加熱条件(温度・時間)の最適化を進める。

まとめ

- ✓ 本研究開発で製作・運転したパイロットスケール試験装置（30kW級）の複数連結により、実用化（デモンストレーションスケール、300kW級）への展開が可能であり、ハード面では大きな課題はないと考える。
- ✓ 今後、本研究開発で把握した焼結方法（ソフト面）に関する課題を解決することで、社会実装に向けて大きく前進する見通しである。