

知の拠点あいち重点プロジェクト4期

プロジェクトSDGs-S2

「インフォマティクスによる革新的炭素循環システムの開発」

研究リーダー 二宮善彦(中部大学工学部応用化学科教授)

事業化リーダー 高橋 陽(伊藤忠セラテック株式会社)

参画機関:北村マテリアルリサーチ・山本匣鉢製造株式会社・株式会社 ナガエモールド
産業技術センター

‘24.3.6 公開セミナー

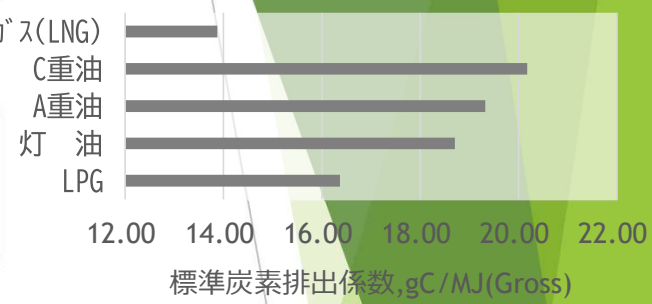
研究テーマの概要

研究テーマの目的と背景



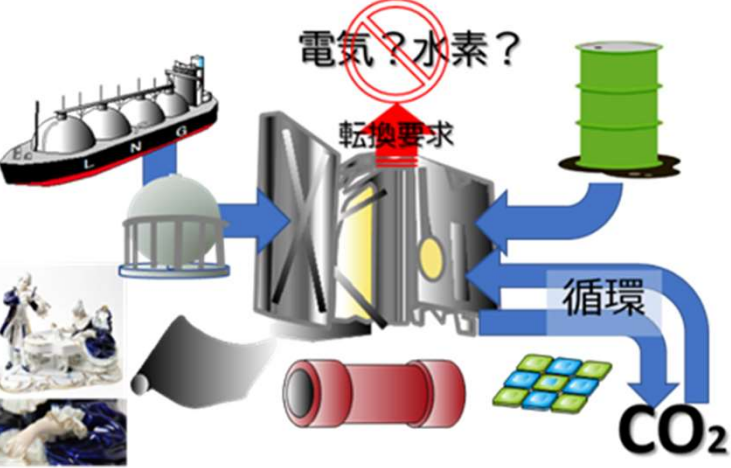
LPG使用キルン

燃料種によるCO2排出量



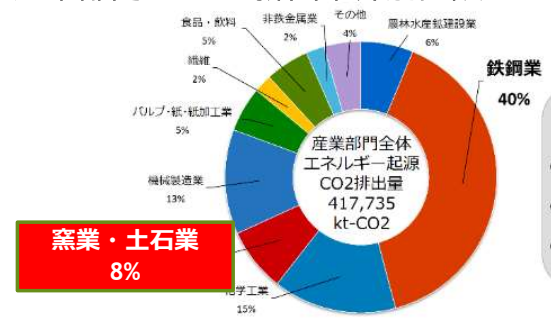
高温炉ほど、高二酸化炭素排出量な燃料を使用

セラミックス業界の脱CO2問題



熱源が重油・灯油・ガス等を用いる高CO2排出型産業

産業部門のCO2排出業界別内訳



GHG(CO2)排出量 (kt-CO2)

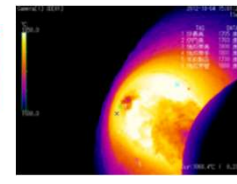
- 国全体: 1,306,670
- 産業部門: 417,735
- 鉄鋼業: 165,741

(出典) 国立研究開発法人国立環境研究所「日本の温室効果ガス排出量データ(2016)」

CO2フリー加熱炉への転換は新たな焼成技術開発・投資が必要



化石燃料によるバーナー加熱



輝度のある火炎

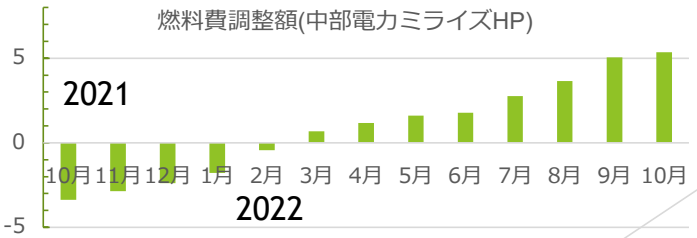


電気炉 (発熱体による加熱)

県主要産業の窯業では石油使用窯を用いて焼成を行っているが、脱CO2機運の中、サプライチェーンからCO2フリー焼成への移行要請を受けている。

電気炉等への焼成方法転換は従来技術の転用ハードルが高く、昨今の国際情勢による電気料金高騰も伴い電気炉への転換も厳しく非常に厳しい状況。

電気料金は国際情勢などにより高騰

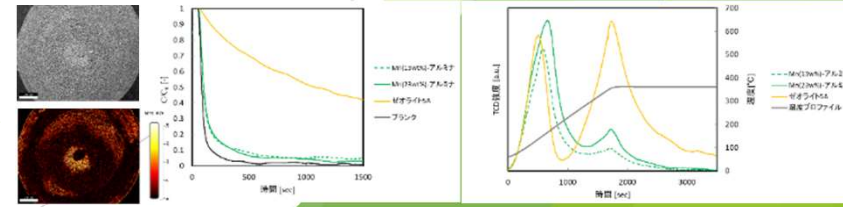
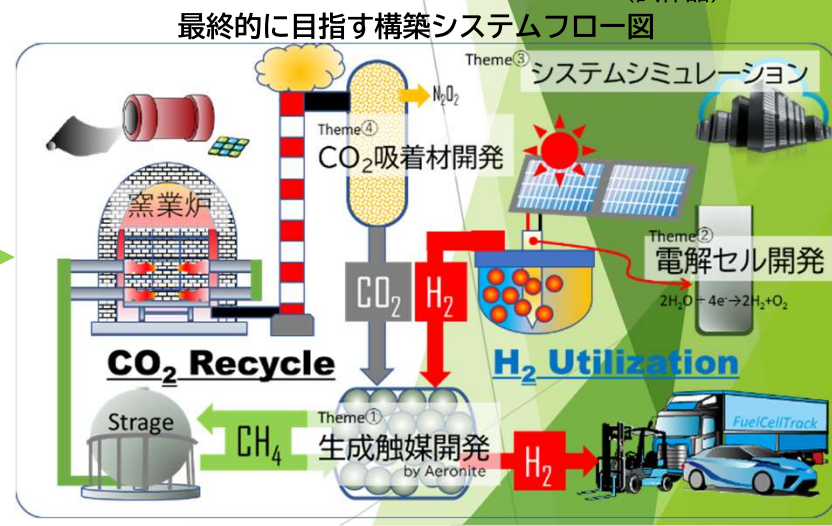
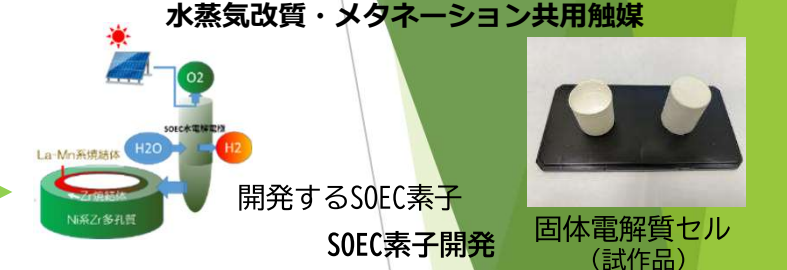


再生可能エネルギーによる電気炉焼成は、CO2フリーの一つの解決策であるが、現時点の電力の大半は化石燃料由来であり、根本的な解決になりにくい上、国際情勢によるエネルギー価格高騰の影響をもちに受ける

研究テーマの概要

研究開発各要素の概要

No	開発ターゲットの名称	最終目標 (性能、仕様等)	設定の根拠	ターゲットを実現するシーズ
①	水蒸気改質・メタネーション共用触媒開発	水蒸気改質効率 95%以上 メタン転換率 60%以上	1) 従来改質触媒稼働条件 貴金属系：600℃以上 ニッケル系：800℃以上 S/C：3 (メタン) 転換率：90%程度 2) メタネーション触媒 250~400℃(NEDO資料) 転換率：50%程度	1) 2) 触媒複合化により開発促進。 1) 既存水蒸気改質触媒技術 ICC商用化触媒「エアロナイトNi」改良により 反応温度の低温化 を実現。 2) 既存メタネーション触媒技術 ICC商用化触媒「エアロナイトNi-Pd」改良により メタン選択性向上 を実現。
②	SOEC素子開発	作動温度 950℃ 0.45A/cm ² 2 電解電圧 1.4V	作動温度：800℃ 作動電圧：1.3V以上 作動電流：1A/cm ² 以上 (電中研報告書)	ICCの新しい'21開発の 固体電解質セルの触媒物質担持 と ナガエモールド社 によるスラリー成形技術で実現。 ・触媒物質適性/組合をMI解析実施、ITCによる試作検証を実施。
③	運用適用条件の確定	1m ³ 窯 ~ 10m ³ 窯程度の実運用条件確定	県内窯業実炉規模	中部大学 の持つ プラントシミュレーター により 山本匣鉢製造社 キルン運用条件を基に①②④の開発製品組み込みバーチャルプラントを作成、運用。 小型プラント実証 を実施。
④	CO ₂ 吸着分離装置開発	CO ₂ 吸着 10%以上	同等コスト領域として膜分離型吸着分離装置の性能から設定。	産技センター 共同開発の窯業炉排ガス中二酸化炭素を選択的分離可能な金属-セラミクス吸着材をベースに 北村マテリアルリサーチ デバイスにより高性能化。



2 年次ロードマップ

達成状況 ◎:上回る達成 ○:達成(進捗中含む) ×:未達成

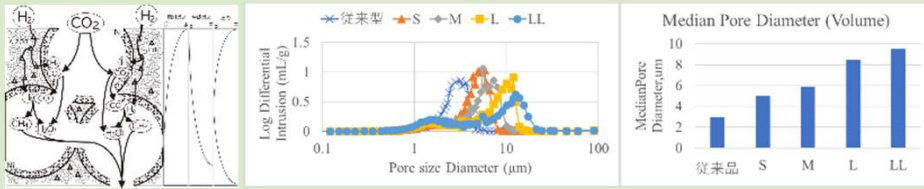
研究項目 実施機関	中間目標	令和5年度	令和6年 3月時点目標	達成状況	令和6年度
全体	試作品作成・実証試験	試作品作成・実証試験	要素開発	○	テストプラント検証
①メタネーション・水蒸気改質共用触媒開発 担当:伊藤忠セ	1)メタネーション400°Cで転換率60%以上 2)水蒸気改質800°C95%以上	目標 連続運転時の劣化状況の把握と対策方法 知の拠点研究室の評価装置による長期テスト実施	触媒完成	◎ 1)転換率90%@350°C (開発品性能) 2)800°C反応率95%以上 (初期性能)	実証検証完了
②固体電解質電極開発 担当:伊藤忠セ・カ I E-ル	水電解可能なセルの完成・抵抗値等の計測実施	目標 セル完成、実測値計測方法 石膏型を根本改良し薄肉化	セル完成・抵抗値等の実測値取得	○ (厚み1mm以下セルの試作)	実用可能電解槽完成
③設計システムと実稼働状態の検証 「実証検証設備設計」 担当:中部大二宮研 宇佐美研究室 山本匣鉢製造	山本匣鉢社シャトルキルンをモデルに20パターン of バーチャルプラント作成	目標 実炉バーチャルプラントシステム構築方法 オンデマンドデータによるシステム構築	バーチャルプラントによる検証	○ 実炉データ採取システムを構築。AspenPlus上でバーチャルシステムを構築し、各種条件でシミュレーション実施。実機でのシミュレーション対応データ採取中。	12パターンのバーチャルプラントデータと実証設備データの比較プログラム作成
④吸着材開発 産業技術総合センター化学材料室 北村マテリアルリサーチ・伊藤忠セ	目標 中間試作品完成(10品)	目標 実証プラント向け形状試作方法 球状・棒状等への形状試作	検証用資材調達	◎ 実排ガス中70%回収可能。	CO2吸着率10%以上品の完成

3. 研究開発の実施状況

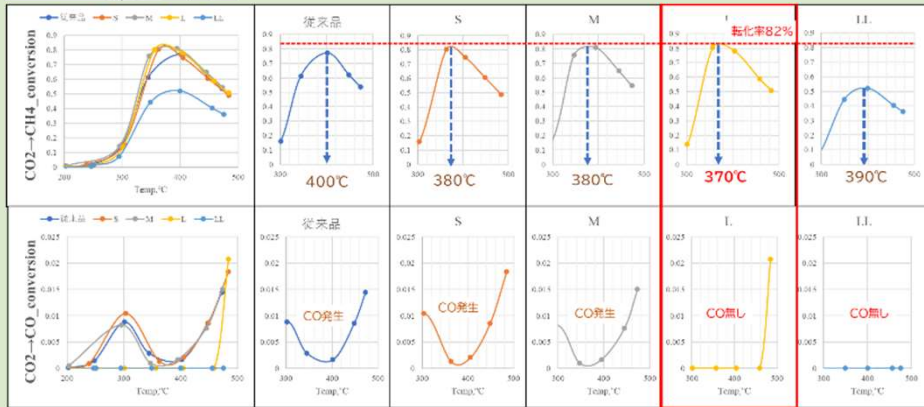
① 水蒸気改質・メタネーション共用触媒開発

担体の適正化(気孔径調整)による性能向上(反応温度低温化)

拡散考慮し
気孔径制御



メタネーション評価



従来品よりも30°C低温化(370°C)。

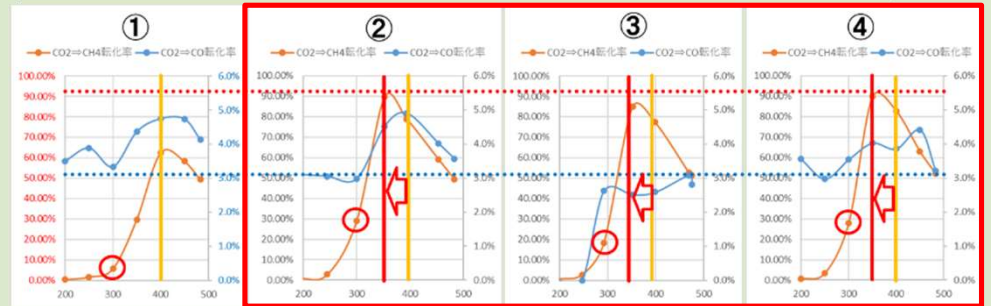
反応温度-50°Cを達成。これにより未利用熱の利用可能。平衡転化率上限に到達。

MIによる第三担持金属性能向上(反応温度低温化)

MIにより抽出された元素により第三元素を添加

MI抽出	考えられる作用
①	Ru同等の活性化エネルギー値により水素・CO ₂ 吸着量増大
②	CO ₂ 吸着量増大
③	CO ₂ 吸着量増大
④	Ru同等の活性化エネルギー値により水素・CO ₂ 吸着量増大
⑤	Ru同等の活性化エネルギー値により水素・CO ₂ 吸着量増大

メタネーション評価

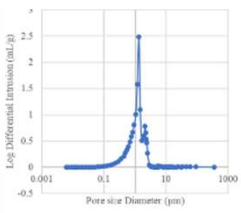


従来改質温度よりも50°C低温化(350°C)。

② SOEC素子開発 小気孔径のモールドによる改良試作し、セル抵抗値等の計測実施中。

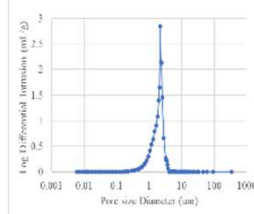
モールドの違いによる厚み

ナガエモールド品



Total Intrusion Volume =	0.6516	mL/g
Total Pore Area =	2.921	m ² /g
Median Pore Diameter (Volume) =	1.2718	μm
Median Pore Diameter (Area) =	0.8201	μm
Average Pore Diameter (4V/A) =	0.8924	μm
Bulk Density at 0.51 psia =	0.8377	g/mL
Apparent (skeletal) Density =	1.8445	g/mL
Porosity =	54.5852	%

従来品



Total Intrusion Volume =	0.6024	mL/g
Total Pore Area =	1.502	m ² /g
Median Pore Diameter (Volume) =	2.1111	μm
Median Pore Diameter (Area) =	1.6129	μm
Average Pore Diameter (4V/A) =	1.6046	μm
Bulk Density at 0.51 psia =	0.9136	g/mL
Apparent (skeletal) Density =	2.0316	g/mL
Porosity =	55.0312	%

	ナガエモールド品	従来品
厚さ	1-2mm	3-5mm

抵抗率を低減する為、セルの薄肉化に成功。

3. 研究開発の実施状況

③運用適用条件の確定

実開発品を基にしたシミュレーションプラン

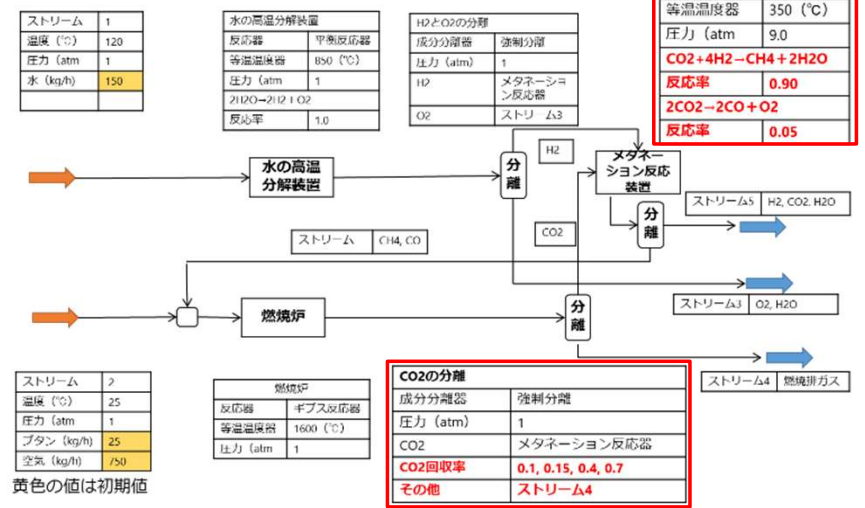
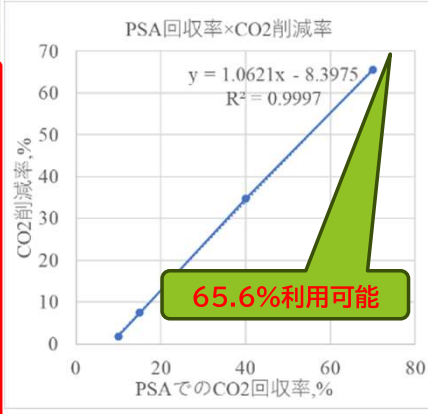


表.AspenPlusによるシミュレーション結果

ブタン単独供給量[kg/h]	231.4			
ブタン単独燃焼[CO2-kg]	699.1			
PSAでのCO2回収率 [%]	10	15	40	70
ブタン供給量[kg/h]	227.0	214.0	151.0	80.0
水供給量[kg/h]	126.6	188.9	491.2	840.3
燃焼時のCO2発生量[CO2-kg]	682.0	640.8	441.0	215.5
メタネーション反応器からの未反応CO2放出量[CO2-kg]	3.8	5.7	14.7	25.1
プロセスからのCO2放出量[CO2-kg]	685.8	646.5	455.7	240.7
CO2削減量[CO2-kg]	13.3	52.7	243.4	458.4
CO2削減率 (%)	1.9	7.5	34.8	65.6
副生成H2量[kmol/h]	0.8	1.2	3.2	5.5
副生成O2量[kmol/h]	3.5	5.2	13.6	23.3



中部大学 二宮研 ASPENPLUS シミュレーション

イーサネット対応データロガ

周辺気温

新設TC

インラインガス流量計

TC

アフターバーナー

LPG

ストリーム5 H2, CO2, H2O

ストリーム3 O2, H2O

ストリーム4 燃焼排ガス

実炉データでのシミュレーション(開発品使用想定)

中部大学 宇佐美研 python

実炉データ基準テストデータによるデータマイニング

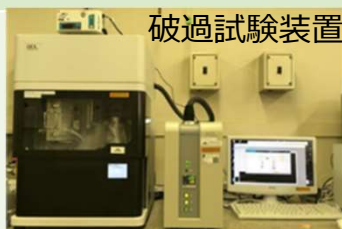
触媒(転化率90%)・吸着剤(回収率70%)の性能を基にバーチャルプラント上でのシミュレーションを実施。

3. 研究開発の実施状況

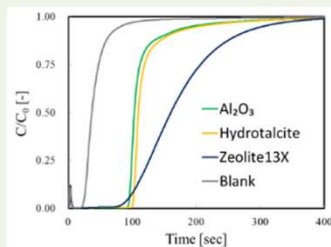
④CO₂吸着分離装置開発

1)吸着材の選定

排ガスからのCO₂回収に適した吸着材を選定するため、活性アルミナ、ハイドロタルサイト、ゼオライトの模擬排ガスを用いた破過試験を実施。



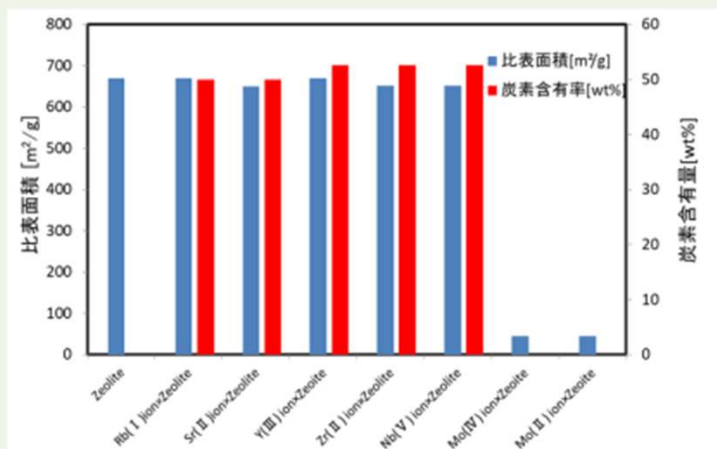
破過試験装置



水分を除去した条件下でのCO₂吸着量はゼオライトが最も多く、本開発のベース材に選定。吸着性能の向上を目指し、吸着促進材として金属酸化物の複合を実施。

2)MIによる物質探索

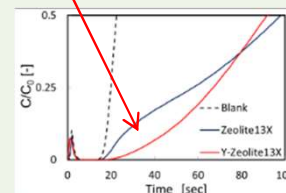
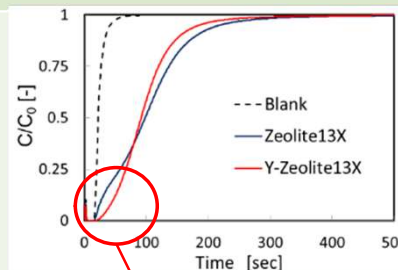
CO₂に対し親和性のある金属酸化物を選定するため、日立ハイテクサイエンス製MIソフトウェア「ケミカルインフォマティクス」による物質探索を実施。



ゼオライトと各種金属種の掛け合わせ空間からCO₂と親和性のある金属元素を予測し、複合する金属酸化物の選定を実施した。

3)改良吸着材の試作と吸着性能評価

2)のMIより選定した金属酸化物と既存有望金属酸化物を複合した改良吸着材を試作。試作した改良吸着材について、破過試験及び知の拠点研究室において試作した簡易PSA(圧力スイング吸着)装置による、吸着性能評価を実施。

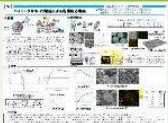








簡易PSA装置

○模擬排ガスを用いた破過試験の結果から、ゼオライトに、Y₂O₃を複合することで、吸着促進剤の複合効果(吸着速度の増加)を確認した。
 ○造粒品への含浸法・担持量の検討を実施し、PSA評価用改良吸着材を試作した。
 ○簡易PSA評価の結果から、一定条件下において改良品は現行品と比較し優れた純度・**回収率(70%)**を示した。

4. 研究実績

注)強調体:2023年度実績

<p>触媒学会 第130回大会 【C000256】バイモーダルNi-Pd触媒による各種反応考察</p>		<p>'22.9.26 Web開催 伊藤忠セラ バイモーダル型Ni-Pd触媒(メタネーション専用触媒)による水蒸気改質反応検証結果について発表報告。</p>
<p>化学工学会 第54回秋季大会 コアシェル型各種構造担体を用いたメタネーション反応用触媒の特性評価</p>		<p>'23.9.11 於)福岡大学 中部大工院 松林拓未 ポスターセッションにて気孔径相違Co触媒によるメタネーション特性について発表。</p>
<p>メタネーションとグリーン水素の最新動向(関根泰監修)、(株)シーエムシー出版(2023)</p>		<p>'23.10 伊藤忠セラ 産業技術センター 分著にて気孔径相違がメタネーション反応に与える影響について発表。</p>
<p>メッセなごや出展</p>		<p>'22.11.16-18 ポートメッセ名古屋 '23.11.8-10 ポートメッセ名古屋 研究概略の展示模型・研究開発内容紹介動画を展示</p>
<p>あいちモノづくりエキスポ2023</p>		<p>2023.10.5-6 Aichi Sky Expo(愛知県国際展示場) 水蒸気改質・メタネーション触媒を中心に伊藤忠セラ出展。 科学技術交流財団ブースにて成果物展示。</p>
<p>開発会議 (5回)</p>		<p>第1回 '22.11.10 知の拠点あいち 会議室 第2回 '23.2.27 伊藤忠セラテック 山路工場大会議室 第3回 '23.5.19 産業技術センター 会議室 第4回 '23.8.21 中部大学 講義室 第5回 '23.12.22 知の拠点あいち 会議室</p>
<p>特許 (基本特許<担体1件・触媒1件>)</p>		<p>水蒸気改質・メタネーション共用触媒開発に利用する基本特許として担体特許(日欧登録済・米審査中)及びメタネーション触媒特許は取得済。 '24.3.末 三元系メタネーション触媒特許申請予定。</p>

5 事業化の見通し

	研究項目	事業化方針	事業化企業	令和5年度	令和6年度	プロジェクト終了後			
						令和8年度	令和10年度	令和12年度	
事業化の 取組の	実証検証設備設計 設計システムと実稼働状態の検証	システム構成に関する特許は取得せず、幅広く公知化。設備工事ノウハウを横井鉄工所で蓄積し、県内窯業産業普及へ。	ICC 山本匣鉢製造	中間試作 バーチャルプラントによる検証	テストプラント検証	実プラント 検証データ公開	実プラント改良	一般化	
	メタネーション・水蒸気 改質共用触媒開発	中量産設備は既に稼働済。プラントメーカー各社との協業を進めていく。	ICC	触媒採用先検討 触媒特許申請	試作品作成・ 実証試験	プラント メーカーへの試験販売	上市・実機検証	普及期	一般化
			生産設備投資	生産設備投資 (100万)・人員補充	生産設備投資	人員採用 設備投資	設備投資 (100万)	設備投資	
	固体電解質電極開発	電解装置メーカーとの協業によりセル担体での販売による普及を狙う	ICC	開発	組立セルによる稼働テスト	マーケットテスト 電解セル組込	上市 サンプル出荷	製品化	
			生産設備投資	-	-	-	スラリー成型 設備		
吸着材開発	吸脱着装置メーカーとの協業 県内メーカーへのアウトソーシングにより量産化、幅広い事業展開を狙う	北村マテリアルリサーチ ICC	開発	<広報> 学会発表	特許申請	フィールドテスト	上市	普及期	



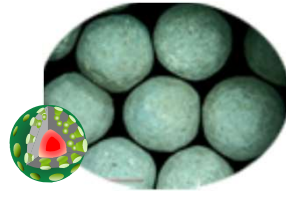
量産造粒設備



触媒化設備



高活性バイモーダル担体



Ni・Pd/Al₂O₃触媒





試作SOEC電極



Mn/Al₂O₃吸着材

5 事業化の見通し

エンドユーザー同行による研究室訪問なども実施。活発に活動中。

テーマ	令和4年度の具体的な取り組み	
メタネーション 水蒸気改質 共用触媒開発 固体電解質電極開発	エンドユーザーを見据えた大口ユーザーとの協議継続実施中 	中部圏・関東圏・関西圏・九州圏の大手プラントメーカー各社(8社)からヒアリングを行い、カーボンニュートラル基調の中での要求特性等についてヒアリング実施。 「原料水素の入手が最も大きな課題」との認識 ⇒Low-Costな水素製造用固体電解質開発急務
吸着材開発	エンドユーザーを見据えた大口ユーザーへのヒアリング 	関東圏・関西圏の大手プラントメーカー各社(2社)からヒアリングを行い、要求特性等についてヒアリング実施。 「本研究におけるベンチマークはCO2-PSA方式」 原料ガス中の水分に対する対策が重要であり、無機系の強みを最大限生かせる検討を継続

6 県産業への貢献度、人材育成等

○愛知県の中窯業CO₂低減へ貢献

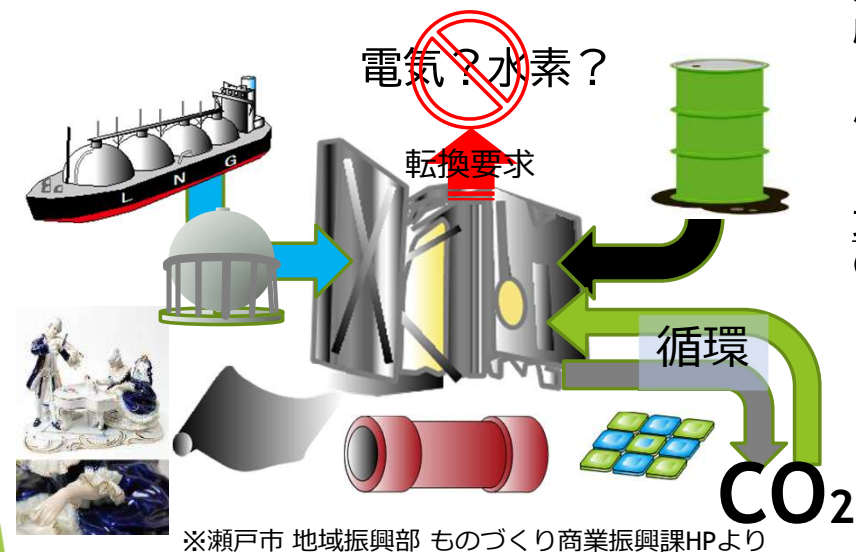
愛知県の窯業産業は2500億円近い主要産業の一つで有り、陶磁器両方を生産しており焼成時に高温を必要とする。エネルギー単位の高い灯油・石油ガス・重油などの化石燃料を主体に焼成を行っている。

廃CO₂を回収利用し再生可能エネルギー由来H₂とメタネーション反応を行いメタンを生成利用すれば、従来窯をそのまま利用が可能で有り、最も低設備投資で運用が可能である。

CO₂のリサイクルによりCO₂排出低減が可能となる。CO₂循環利用システム研究成果は特許取得をせず、幅広く公知の事実として公開をしていく。これにより中小型の窯業事業者でも、CO₂削減設備挑戦のハードルが下がる。

表.県内陶磁器産業生産品と焼成温度

地域	生産品	焼成温度
瀬戸	飲食器・電気用陶磁器・ノベルティ・理化学陶器	仮焼：800℃ 本焼成：1200～1300℃
常滑	茶器・タイル・衛生陶器	焼成：1200℃
碧南 高浜	住宅用陶器瓦	焼成：1100℃



○愛知県伝統製法応用による用途拡大

スラリー成形法はノベルティを始めとした精密形状陶磁器成形法であり、瀬戸地域では優れた技術を持つ石膏型専門業者も多数存在、全国に出荷展開している。しかし陶磁器の生産量は全国的に低下傾向であり、本製法の多用途展開は必須となってきている。

スラリー型による電解セル製造が実現することでコスト低減と合わせ製法応用にも繋がる。また、中核部品であるセルの生産は、精密窯業製品の多用途化にもつながる。**今回試作評価に用いている石膏型はナガエモールド(瀬戸市)により開発されたもの。**



スラリー成形法
(愛知県HPより)



ノベルティー



スラリー成形法によるセル成形試作



※瀬戸市 地域振興部
ものづくり商業振興課HPより

6 県産業への貢献度、人材育成等

○創成実習を通じた先端技術習得



2023年度創成実習の様子

中部大学工学部応用化学科時創成実習（学部3年生）研修テーマとする事を計画中。具体的には、プロセスシュミレーションを通じて、現場に強いケミカルエンジニアを育成し、本学就職先が最も多い、愛知県化学産業での活躍を期待する。昨年度はメタネーションシステムに関してプロセスシミュレーターを使用し、シミュレーションを実施。知の拠点209研究室にて、メタネーション実験も実施。

創成実習実施予定

年次	講義回数
2022年下期	6回
2023年下期	6回
2024年下期	6回(予定)



中部大二宮研・宇佐美研学生による伊藤忠セラテック見学

○共同研究を通じたインターン研修



伊藤忠セラテック社の触媒評価設備



インターン研修の様子

中部大学工学部応用化学科二宮研究室にて修士論文テーマとして本研究テーマを実施中。触媒の基礎評価を始め、伊藤忠セラテックの触媒評価設備でのインターン研修なども実施。