

事業戦略ビジョン

実施プロジェクト名：Na-Fe系酸化物による革新的CO₂分離回収技術の開発

実施者名：戸田工業株式会社 代表名：代表取締役社長 寶來 茂

（共同実施者：エア・ウォーター株式会社（幹事企業）、国立大学法人埼玉大学）

目次

- 0. コンソーシアム内における各主体の役割分担
- 1. 戸田工業株式会社 事業戦略・事業計画
 - (1) 産業構造変化に対する認識
 - (2) 市場のセグメント・ターゲット
 - (3) 提供価値・ビジネスモデル
 - (4) 経営資源・ポジショニング
 - (5) 事業計画の全体像
 - (6) 研究開発・設備投資・マーケティング計画
 - (7) 資金計画
- 2. 研究開発計画
 - (1) 研究開発目標
 - (2) 研究開発内容
 - (3) 実施スケジュール
 - (4) 研究開発体制
 - (5) 技術的優位性
- 3-1. 戸田工業株式会社 イノベーション推進体制
 - (1) 組織内の事業推進体制
 - (2) マネジメントチェック項目① 経営者等の事業への関与
 - (3) マネジメントチェック項目② 経営戦略における事業の位置づけ
 - (4) マネジメントチェック項目③ 事業推進体制の確保
- 4. その他
 - (1) 想定されるリスク要因と対処方針

0. コンソーシアム内における各主体の役割分担

地球の恵みを、社会の望みに。



エア・ウォーター(株) (代表事業者)

実施する研究開発の内容

- Na-Fe系酸化物を用いたCO₂分離回収プロセスの開発
- 実証機製作、性能評価



社会実装に向けた取組内容

- CO₂回収設備生産体制構築
- 保守整備体制構築
- ボイラメーカーとの協議などを担当



戸田工業(株) (共同実施者)

実施する研究開発の内容

- Na-Fe系酸化物（CO₂固体吸収材）の開発、性能評価、製造
- 実証サイト提供（大竹事業所）
- 回収したCO₂から作製した化合物の有用性評価



社会実装に向けた取組内容

- 鉄原材料の安価調達
- 安定した品質のNa-Fe系酸化物の提供
- 使用済み「Na-Fe系酸化物」のリサイクルなどを担当



埼玉大学 (共同実施者)

実施する研究開発の内容

- 室温でのCO₂吸収性能向上のための高性能Na-Fe系酸化物の開発
- Na-Fe系酸化物の低温再生機構、および低エネルギーCO₂回収機構の解明



社会実装に向けた取組内容

- Na-Fe系酸化物が有する化学的安定性（安全）と経済性（安価）を損なわない開発などを担当

CO₂分離回収コスト2,000円台/ton-CO₂の早期実現

1. 戸田工業株式会社 事業戦略・事業計画



1. 事業戦略・事業計画／（1）産業構造変化に対する認識

地球温暖化による人々の価値観の変化によりカーボンニュートラル産業が急拡大すると予想

カーボンニュートラルを踏まえたマクロトレンド認識

（社会面）

- ・ パリ協定採択、120以上の国と地域が「2050年カーボンニュートラル」宣言
- ・ 2020年10月、日本も「2050年カーボンニュートラル」を宣言
- ・ 日本は2030年に温室効果ガスを2013年度比46%削減する事を目指し、さらに50%に向けた挑戦と新たな方針

（経済面）

- ・ ソーシャルボンドなど、ファイナンスシステムの整備が推進
- ・ 金融機関による融資先支援と官民連携の推進
- ・ 投資にもESGの視点を組み入れる傾向

（政策面）

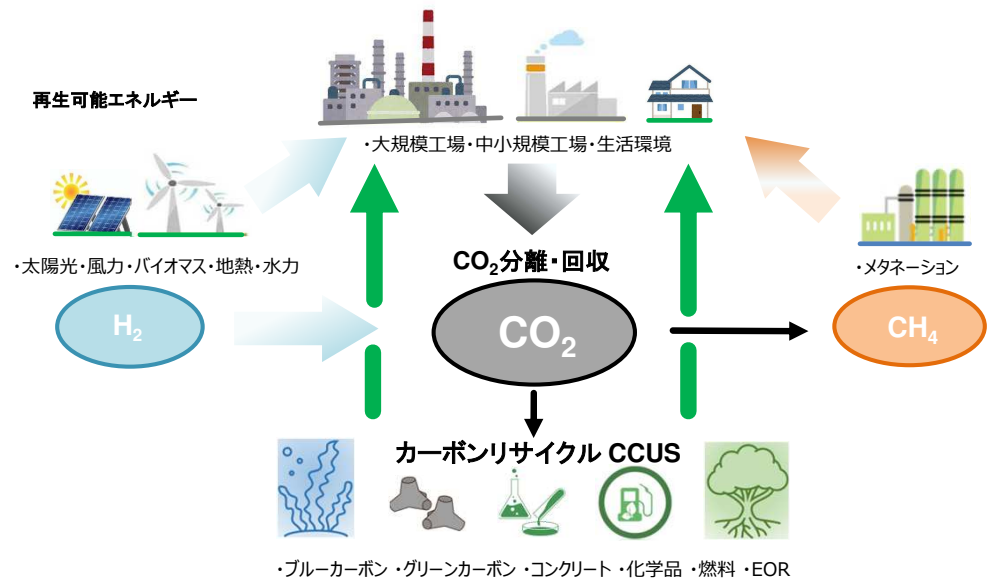
- ・ 成長が期待される14の重要分野について「グリーン成長戦略」を策定
- ・ 投資促進税制により、脱炭素関連設備導入に対し最大10%の税額控除又は50%の特別償却が受けられる

（技術面）

- ・ ネガティブエミッションとカーボンリサイクル技術の開発が推進されている（化学品、バイオ燃料、鉱物、etc…）
- ・ 世界でEOR法向けのCO₂分離回収技術は既に実用化され、国内では石炭火力発電所排ガスからのCO₂回収や利用に成功しているが、低圧/低濃度CO₂排ガスからのCO₂回収や利用に課題が残っている

カーボンニュートラル社会における産業アーキテクチャ

全国に存在する工場をターゲットとしCO₂を回収、地域に合わせたCO₂ユーザーへ供給する



- 市場機会：水素やアンモニア、CO₂リサイクル、再生可能エネルギー、蓄電池など、カーボンニュートラル推進に伴い、市場拡大が期待される分野が多数存在し、国内でのエネルギー設備・システム規模は2050年度には約4兆円と予測^{*1}されている。また、CO₂分離回収技術の市場は、2050年には日本だけでも4,000億円/年とされている^{*2}。
- 社会・顧客・国民等に与えるインパクト：環境保護、企業のイメージアップと信頼性の向上

*1 富士経済予測（2022年7月）

*2 GI基金研究開発・社会実装計画

- 当該変化に対する経営ビジョン：戸田工業グループは「気候変動イニシアティブ (Japan Climate Initiative)の宣言“脱炭素化をめざす世界の最前線に日本から参加する”に賛同表明するとともに（2021年4月）、2024年度以降のビジョンとして策定した「Go Beyond 200」において、環境負荷低減等に寄与する材料の開発を通じて、持続可能な社会の実現、カーボンニュートラルの達成への貢献と事業成長を目指すことを明言した。

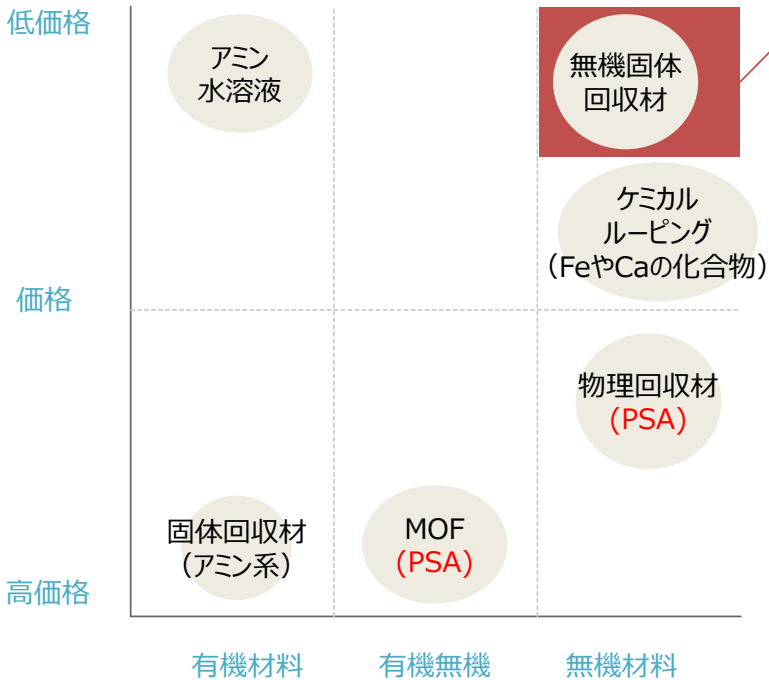
1. 事業戦略・事業計画／（2）市場のセグメント・ターゲット

CCU市場のうち無機固体回収材をターゲットとして想定

セグメント分析

安全性が高く、低価格で、中小規模施設に容易に設置可能なため、汎用性の高い、無機固体回収材に注力

(CCU市場のセグメンテーション)



ターゲットの概要

市場概要と目標とするシェア・時期

- 工場排ガス、燃焼排ガスからのCO₂分離回収（CO₂固体回収材）
- CO₂排出、吸収部材への実装（粉体）
- 環境からのCO₂直接回収（DAC）

以下、自社マーケティング活動による具体的な取り組み状況を記載

需要家	主なプレーヤー	消費量（/年）	課題	想定ニーズ
ガスメーカー、一般工場など	ガスメーカー ボイラメーカー 廃棄物処理	10t~500t	CO ₂ 回収エネルギー↓ 連続耐久性↑	化学品 燃料 鉱物
壁紙 道路など	建設会社 道路会社	100t~1000t	CO ₂ 削減効果 生産体制	建材への実装 道路材への実装
食品など	食品メーカー 酒造メーカー	1t~100t	低濃度からの回収 CO ₂ 回収エネルギー↓	作業環境保護 農業

1. 事業戦略・事業計画／（3）提供価値・ビジネスモデル

CO₂分離回収技術を用いて低環境負荷型製品・サービスを提供する事業を創出/拡大

◆社会・顧客に対する提供価値

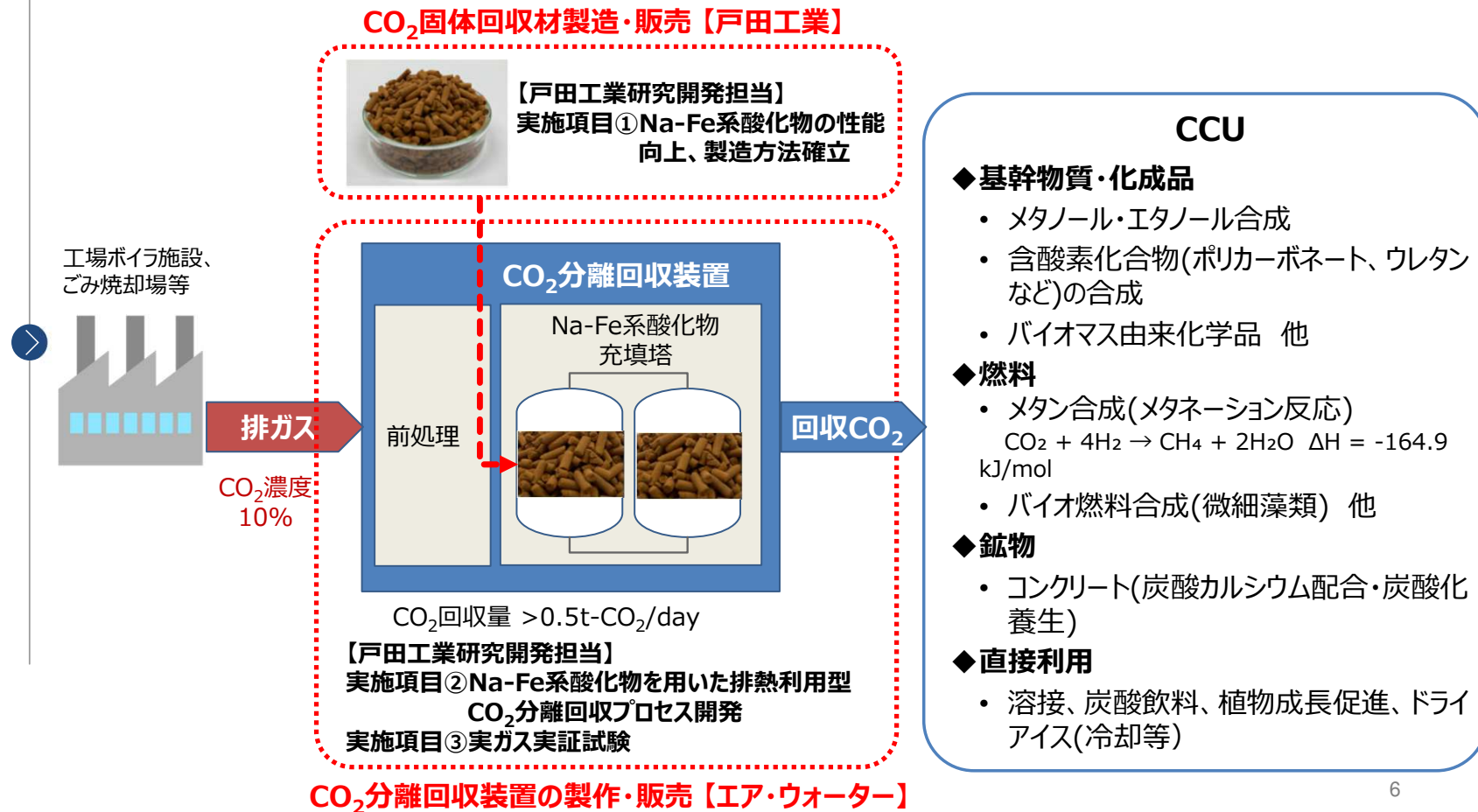
➤高効率かつ低コストCO₂分離回収装置

- CO₂分離回収能力：
0.5t/day以上
- CO₂分離回収コスト：
2,000円台/t-CO₂以下

➤高効率CO₂固体回収材 (Na-Fe系酸化物)

- 製造コスト：
5,000円/kg以下
- CO₂回収量：
固体吸収材重量に対して
10wt%以上
- CO₂回収エネルギー：
1GJ/t-CO₂以下

◆ビジネスモデルの概要（製品、サービス、価値提供・収益化の方法）と研究開発計画の関係性



1. 事業戦略・事業計画／（3）提供価値・ビジネスモデル（標準化の取組等）

市場導入（事業化）しシェアを獲得するために、ルール形成（標準化等）を検討・実施

事業化戦略の前提となる市場導入に向けての取組方針。考え方

➤ 無機材料によるCO₂固体回収材の性能確立と秘匿化

- ・ Na-Fe系酸化物の粉体特性確立→秘匿化
⇒ 分析方法、閾値の設定
- ・ Na-Fe系酸化物の製造方法確立→秘匿化
⇒ 使用原料、製造方法の確立

➤ CO₂回収方法の確立と秘匿化

- ・ CO₂回収評価用装置を考案→秘匿化
- ・ CO₂回収評価条件の最適化→秘匿化

➤ ターゲットガスの確立と標準仕様への編入

- ・ CO₂含有ガスの最適組成の特定→標準仕様への編入
⇒ CO₂濃度・温度、含有不純物などを規定

本事業期間におけるオープン戦略（標準化等）またはクローズ戦略（知財等）の具体的な取組内容

➤ 標準化戦略

- ・ ユーザーと面談を実施し、幅広く情報を収集中
⇒ サンプルを評価頂き、性能向上に繋げる
- ・ 産官学連携で学術、産業、社会基盤に広める活動を実施中
- ・ 協議会参画で自分らの立ち位置を把握、本仕様を標準化仕様へ編入。

国内外の動向・自社のルール形成の取組状況

➤ アミン水溶液によるCO₂回収方法が主流

- ⇒ 火力発電所、製鉄所などのCO₂分圧が低く、大量に発生する事業所などではアミン水溶液が社会実装されている（スケールメリットあり）

➤ CO₂分圧の高い石炭ガス化発電などでは、膜分離が優勢

➤ ボイラなどの中小規模で活躍できるCO₂回収装置を開発する

・ CO₂固体回収材標準化の考え方

- ⇒ 素材（粉体特性、性能など）、分析方法、回収評方法の特定
- ⇒ これまで培った酸化鉄製造技術を応用展開

➤ 知財戦略

- ・ 網羅的な特許出願を実施済み
⇒ 特許出願20件（海外3件、国内17件）
- ・ 性能面での出願は、積極的に行う。
- ・ 製造方法、運用上のノウハウは秘匿とする。

1. 事業戦略・事業計画／（4）経営資源・ポジショニング

酸化鉄製造技術の強みを活かして、社会・顧客に対してCO₂分離回収という価値を提供

自社の強み、弱み（経営資源）

ターゲットに対する提供価値

- 高い吸着能を有したCO₂固体回収材（Na-Fe系酸化物）の提供
- 排ガス中のCO₂を高純度で回収（CO₂排出量低減）



自社の強み

- 鉄原料確保のためのネットワークを保有
- 深化した酸化鉄製造技術（湿式反応、熱処理、粉碎処理など）
- 高度な粉体分析評価技術
- Na-Fe系酸化物の特許を保有

自社の弱み及び対応

- Na-Fe系酸化物を活かせるシステム構築に目途が立っていなかった
- ⇒ エア・ウォーターのエンジニアリング技術で最適なCO₂分離回収装置を考案する

他社に対する比較優位性

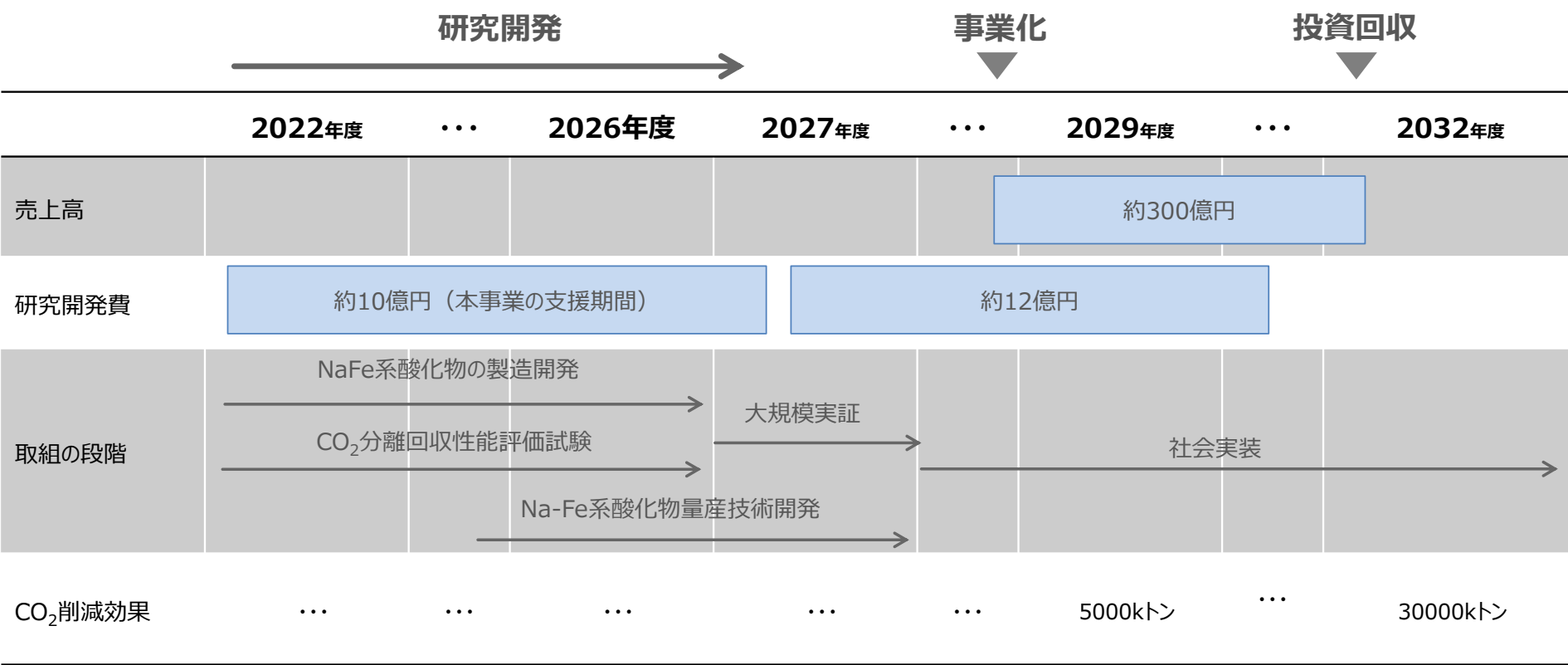
	技術	顧客基盤	サプライチェーン	その他経営資源
自社	• Na-Fe系酸化物がCO₂分離回収に有用であることをラボレベルで確認 	• 酸化鉄販売ネットワークからNa-Fe系酸化物の引き合いを多数頂いている 		• 多様な鉄原料、酸化鉄原料を保有 • 製造・分析技術も保有している 
	• 組成や製造条件を最適化することで、CO₂回収量の増加、回収温度の低下、回収エネルギー低減を図る	• システムとしての引き合いがほとんどであり、お応えできていない ⇒ CO₂分離回収装置を提供し、CO₂排出低減へ貢献する		• 酸化鉄を活かした新しいビジネスの構築
	Na-Fe系酸化物は「安価、非危険物、ハンドリングしやすい」面で優位性がある			
競合A社	• アミン吸収液（性能は高いが危険物であり、毒性もある）	• 発電所や製鉄所などの大規模施設向け	• CO₂分離回収技術・素材の提供	• 大規模回収装置設置が可能
競合B社	• MOF（非常に高価で、サイクル性が低い）	• 発電所や製鉄所などの大規模施設向け	• CO₂高速度分離回収技術の提供	• 大規模回収装置設置が可能

1. 事業戦略・事業計画／（5）事業計画の全体像

3年間の研究開発の後、2029年頃の事業化、2032年頃の投資回収を想定

投資計画

- ✓ 本事業終了後も3年程度研究開発を継続し、NaFe系酸化物について2029年頃の事業化を目指す。
⇒ 量産設備投資は2025年、2030年に実施する予定
- ✓ A.W.と共同開発するCO₂分離回収装置への搭載により、2032年頃に投資回収できる見込み



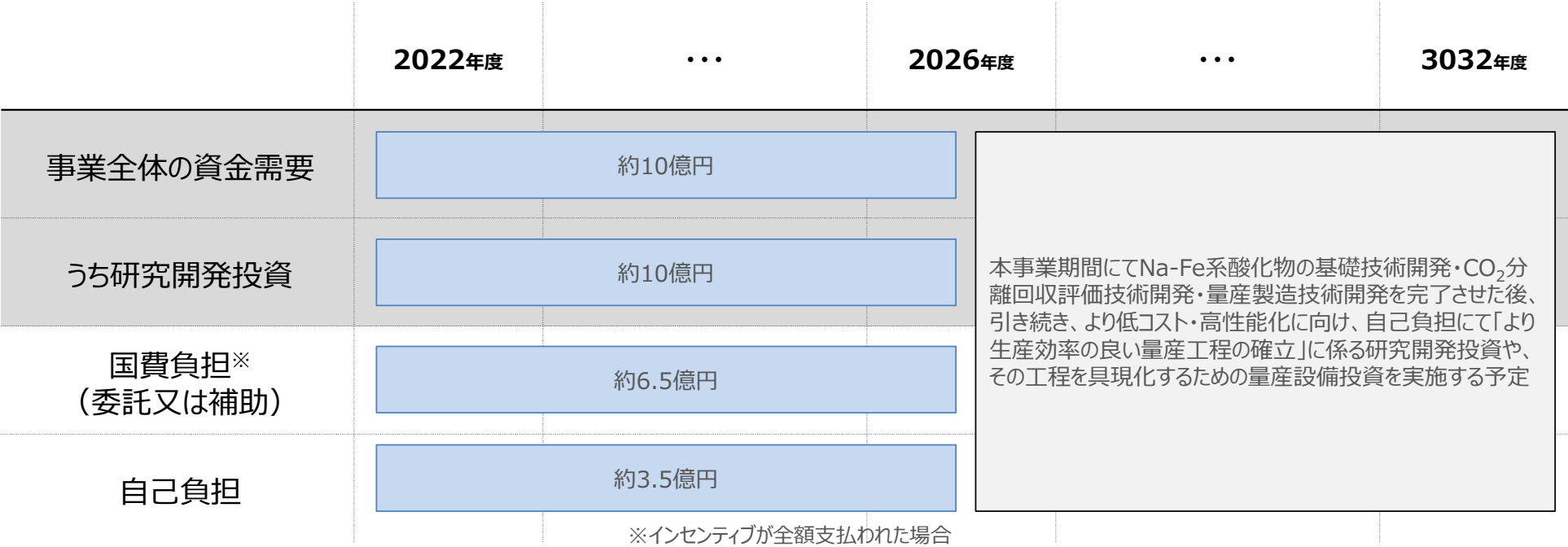
1. 事業戦略・事業計画／（6）研究開発・設備投資・マーケティング計画

研究開発段階から将来の社会実装（設備投資・マーケティング）を見据えた計画を推進

	研究開発・実証	設備投資	マーケティング
取組方針	- 研究開発：Na-Fe系酸化物（CO₂固体吸収材）の回収性能向上、製造方法の確立を行う。 - 知財・標準化戦略：網羅的に知財は有しており、新規出願のペースは出来ている - 実証：実運用に耐えうる成形体技術を確立し、LPGボイラ排ガスを用いて実証試験を実施する - PoCによる顧客ニーズ：戸田工業・小野田事業所では液化CO₂を用いて無機化合物を製造販売している。この一部をボイラ排ガスに代替し、製造される無機化合物の性能を評価する - Na-Fe系酸化物を構成するセラミック、造孔材の探索により、CO₂回収能力の向上を確認。	- Na-Fe系酸化物における製造工程を新設する（粉体製造・成形体製造） - Na-Fe系酸化物の性能評価のための分析設備一式を揃える - 大竹事業所、小野田事業所、岡山事業所から排出されるCO₂を回収するためのCO₂分離回収装置設置を検討する。 - Na-Fe系酸化物・粉体製造設備を選定、23年4月から中量試作を行える設備を発注。 - 性能評価分析設備については、世界的な部品供給不足により、23年下期に検収予定。	- 成形体としては、エア・ウォーター殿と共同で大型ボイラー市場への展開を図る まずは戸田工業社内のCO₂回収を実施するが、酸化鉄販売ネットワーク上には、酸化鉄の使用方法から、潜在ユーザが多数存在する - Na-Fe系酸化物はアスファルトやコンクリートでも性能を発揮できることを確認しているため、その分野へも積極的にアプローチを行う。 - 石油産業大手、土木大手など多数の引き合いを頂いており、効率的なマーケティングを行う。
進捗状況	▼	▼	▼
国際競争上の優位性	- 日本は家庭用・産業用共に世界でもトップクラスの電気料金であり、米国と比較しても凡そ2倍である。この状況下で2,000円台/ton-CO₂以下を達成することは大きな意味がある - 酸化鉄材料は世界中で製造されているが、Na-Fe系酸化物を開発しているメーカは戸田工業だけであり、発見者の埼玉大学とより高みを目指す	- 戸田工業は米国・中国・韓国・台湾に製造拠点に無機化合物の製造・販売拠点を有しているため、海外への展開も可能 - 酸化鉄の販売ネットワークは全世界中にある	海外拠点が抱える顧客の多くは熱処理技術を有しており、CO₂固体回収材のユーザになり得る。特に中国では近年環境規制が強くなっており、実際、オファーもあり

1. 事業戦略・事業計画／（7）資金計画

国の支援に加えて、3.5億円以上の自己負担を予定



2. 研究開発計画

地球の恵みを、社会の望みに。



2. 研究開発計画／（1）研究開発目標

2,000円台/ton-CO₂というアウトプット目標を達成するために必要な複数のKPIを設定

研究開発項目		アウトプット目標	
1. Na-Fe系酸化物による革新的CO ₂ 分離回収技術の開発		CO ₂ 回収コスト2,000円台/ton-CO ₂ が達成可能なCO ₂ 分離回収装置の開発	
研究開発内容	KPI	KPI設定の考え方	
① Na-Fe系酸化物のCO ₂ 回収性能向上、製造方法確立	CO ₂ 回収量(回収材対比) 10wt%達成 回収温度：90℃達成 回収エネルギー(E)：1.0GJ/ton-CO ₂ 達成	CO ₂ 回収量：25℃吸収⇔120℃再生で(回収材対比) 20wt%（粉体での理論値） 成形体で10wt%を達成 現状の回収E：1.3GJ/ton-CO ₂ 更に2割削減	
② Na-Fe系酸化物を用いた排熱利用型CO ₂ 分離回収プロセス開発	電力原単位0.1kWh/kg-CO ₂ 達成 ラボ試験での回収CO ₂ 純度99%達成	CO ₂ 回収コストへの影響度が大きい消費電力を低減する必要がある 回収CO ₂ 純度は多様な用途への適用を目指し99%以上とする	
③ 実ガス実証	CO ₂ 回収量 3ton-CO ₂ /day達成	>0.5ton-CO ₂ /day	
④ システム適用検討	商用機設計完了 システム評価によるCO ₂ 回収コスト2,000円台/CO ₂ -tonの達成	NEDO殿CO ₂ 回収コスト目標：2,000円台/ton-CO ₂	

2. 研究開発計画／（2）研究開発内容

各KPIの目標達成に必要な解決方法を実施

	KPI	現状	達成レベル	解決方法	実現可能性 (成功確率)
1 Na-Fe系酸化物のCO ₂ 回収性能向上、製造方法確立	CO ₂ 収量(回収材対比) 10wt% 90℃再生 1.0GJ/ton-CO ₂	4.3wt% →7wt% 110℃再生 1.3GJ/ton-CO ₂ (提案時TRL4現状TRL4)	ラボでのKPI数値達成(TRL5)	- Na-Fe系酸化物の粉体、成形体開発 - Na-Fe系酸化物の室温でのCO₂吸収性能の向上 - Na-Fe系酸化物の低温再生機構の解明	回収量↑と回収E↓は相反するため、バランスの取れたところを探る必要(70%)
2 Na-Fe系酸化物を用いた排熱利用型CO ₂ 分離回収プロセス開発	0.1kWh/kg-CO ₂ 回収CO ₂ 純度99%	机上での排熱活用案(TRL4)	プロセス確立実証機設計のためのデータ取得完了(TRL5)	- 排熱を活用したプロセスの設計 - ラボ試験によるプロセスの評価 - 実証規模を想定した機器の選定	プロセスの素案はあり、①との連携により達成できる可能性は十分にある(80%)
3 実証実験	CO ₂ 収量 3ton-CO ₂ /day	既存材の模擬ガスを用いた評価段階	CO ₂ 回収量目標達成(TRL6)	- 戸田工業所有ボイラ排ガスからのCO₂回収(LPG焚き) - CO₂を3ton-CO₂/day回収	①と②が達成できれば実現可能性高(80%)
4 システム適用検討	商用機設計完了 CO ₂ 回収コスト 2,000円台/CO ₂ -ton	従来技術ではKPI達成が困難	商用機設計完了(TRL7)	- 商用機設計 - ライフサイクルアセスメント(LCA)	③の達成により実現可能性高(90%)

2. 研究開発計画／（２）研究開発内容（これまでの取組）

各KPIの目標達成に向けた個別の研究開発の進捗度

	直近のマイルストーン	これまでの開発進捗	進捗度
1-1 Na-Fe系酸化物の粉体制御、セラミック組成の確立	CO ₂ 回収量(回収材対比) 4.3→5.2wt% 回収E 1.3→1.2 GJ/t-CO ₂ 110→105℃再生	・セラミック担体のスクリーニングにより、耐久性、耐水性のあるNa-Fe酸化物組成を見出した。また、造孔材の添加により、CO ₂ 吸脱着の耐久性向上と、CO ₂ 回収量の増大(4.3→7.0wt%)を達成した。	○△（理由）耐久性、耐水性のあるセラミック担体見出し、耐久性の向上と回収量アップを達成した。連続吸脱着性能の向上と最終目標の10wt%を目指す。回収E、回収温度は今後精査する。
1-2 Na-Fe系酸化物成形体形状制御	Na-Fe系参加物の形状、サイズを最適化することにより、気孔率40%を目指す。	・ セラミック担体の選定により、気孔率の向上を確認 ・ さらに、造孔材の添加により、気孔率の向上を確認	○（理由）セラミック担体の選定により、CO ₂ 吸脱着時の膨張収縮による変形を緩和できた。また、造孔材の添加により、気孔率が上がり、回収量増。
1-3 Na-Fe系酸化物の粉体製造工程設計開発	CO ₂ 回収量、CO ₂ 回収エネルギーを具現化できるNa-Fe系酸化物製造工程を考案する。	・ 戸田工業独自の球形マグネタイト、水酸化ナトリウムを用いた過熱水蒸気による低温固相反応により、α-ナトリウムフェライトを収率100%で、廃棄物フリーで合成する方法を見出し、23年度4月から、0.5t/Mで製造する装置を発注した。	○△（理由）反応方法の開発、は完全であったが、部品供給不足により、混合機選定が完全にはおこなえていない。

2. 研究開発計画／（2）研究開発内容（これまでの取組）

各KPIの目標達成に向けた個別の研究開発の進捗度

	直近のマイルストーン	これまでの開発進捗	進捗度
1-4 Na-Fe系酸化物の成形体製造工程設計開発	Na-Fe系酸化物成形体工程を立案し、装置の選定を行う。	2023年度から着手する。	—
1-5 低温再生機構の解明	Na-Fe系酸化物の低温再生機構および低エネルギー回収機構の解明	水蒸気存在下での10%濃度CO ₂ 吸収において、NaHCO ₃ とNa _{1-x} H _x FeO ₂ 相が生成することを確認し、これらの生成挙動をAl置換型固溶体を用いて調査。Al置換型固溶体NaFe _{1-x} Al _x O ₂ から生成したNaHCO ₃ は、Al置換率の増加によって低温で分解する傾向を示し、かつCO ₂ が脱離することを確認した。	○（理由）水蒸気下のCO ₂ 吸収で生成するNa _{1-x} H _x FeO ₂ が、Na-Fe系酸化物に特有の生成物であること、及びAl固溶体が低温回収に有益な化学組成であることを見出した。
1-6 CO ₂ 吸収性能の向上指針	微粒子化によるCO ₂ 吸収性能の向上およびNa-Fe系酸化物の組成制御によるCO ₂ 吸収性能の向上	これまでの微粒子化法（機械的粉碎法や合成温度の低温化）とは異なる手法として、液相を活用した合成時における分散剤添加法が、Na-Fe系酸化物の高比表面積化に有効であることを見出した。	○（理由）簡便で、安価な分散剤の活用が、Na-Fe系酸化物の吸収性能の向上に有効であることを発見した。

2. 研究開発計画／（2）研究開発内容（これまでの取組）

各KPIの目標達成に向けた個別の研究開発の進捗度

2

Na-Fe系酸化物を用いた排熱利用型CO₂分離回収プロセス開発（エア・ウォーター、戸田工業）

直近のマイルストーン

小規模試験の実施、各種データの取得。
ラボ試験機の製作を完了する。



これまでの開発進捗

材サンプルを受領し、小規模試験を開始しデータ取得中。
ラボ試験機の基本設計、主要機器の手配を完了した。

進捗度

△（理由）
ラボ試験機について設計は予定通り完了したが、電気部品等の納品遅れ製作完了は23年度5月となる見込み。

2. 研究開発計画／（2）研究開発内容（今後の取組）

個別の研究開発における技術課題と解決の見通し

	直近のマイルストーン	残された技術課題	解決の見通し
1-1 Na-Fe系酸化物の粉体制御、セラミック組成の確立	(2023年度) CO ₂ 回収量5.2→6.2wt% CO ₂ 回収E 1.2→1.1GJ (2024年度) CO ₂ 回収量6.2→10wt% CO ₂ 回収E 1.1→ 1.0GJ/t-CO ₂ を達成する。	・Na-Fe酸化物粉体制御、セラミック担体の更なるスクリーニング、造孔材の選定を行うことにより、CO ₂ 回収量、回収Eの最小化を検討する。組成がある程度決定した後は、成形体形状制御による回収量、回収Eの最小化に重点をシフトする。	組成の改良でできることを見極め、形状制御にて、さらなる改良の方向性を見出す。
1-2 Na-Fe系酸化物成形体形状制御	(2023年度) 成形体の形状、サイズ NOX, SOXの影響評価 (2024年度) CO ₂ 回収量→10wt% CO ₂ 回収E 1.0GJ/t-CO ₂ を達成する。	・これまでの研究で決定した組成を用いて、ペレット化、多孔質化、ハニカムフィルター化、ハニカムペレット化などの形状制御を検討し、回収量、回収Eの最小化を検討する。	組成の改良と形状の改良を組み合わせることにより、相乗効果を見出す。
1-3 Na-Fe系酸化物の粉体製造工程設計開発	(2023年度) Na-Fe系酸化物を50t/M以上製造できる工程を立案、装置の選定を行う。 (2024年度) 経済性についてAWとコスト2000円台協議、工程設計。	・2022年度に導入した中量製造機で中量を製造し、課題を抽出しながら、50t/M以上製造できる工程を立案、装置の選定を行う。また、経済性を顧慮した設計すること。	スケールアップによる課題を抽出しながら、コストダウンを検討する。

2. 研究開発計画／（２）研究開発内容（今後の取組）

個別の研究開発における技術課題と解決の見通し

	直近のマイルストーン	残された技術課題	解決の見通し
1-4 Na-Fe系酸化物の成形体製造工程設計開発	(2023年度)Na-Fe酸化物成形体の性能を具現化できる成形体製造工程を考案。 (2024年) FSを行い、経済系を確認。成形体を50t/Mで製造できる製造方法を考案。成形コスト低減。外注による成形処理も検討	・Na-Fe系酸化物成形体の性能を具現化できる成形体の製造工程を考案する。混合、成形、乾燥、熱処理の必要スペックを定め、装置選定を実施する。 ・FSを行い、経済性を確認。建屋、装置配置、配管設計などの向上レイアウトを手配。Na-Fe系酸化物成形体の品質評価体制・品質規格項目の整備を実施する。成形コスト低減を視野に入れ、外注での成形処理も検討する。	スケールアップによる課題を抽出しながら、コストダウンを検討する。
1-5 低温再生機構の解明	Na-Fe系酸化物の低温再生機構および低エネルギー回収機構の解明	・Na _{1-x} H _x FeO ₂ の再生機構における役割の調査 ・Na _{1-x} H _x FeO ₂ の結晶化学的な調査 ・第一原理計算による低温再生組成の最適化 ・低温再生に適したNa-Fe系酸化物の提案 ・再生によるCO ₂ およびH ₂ Oの定量分析 ・高温XRDや加熱FTIRによる再生機構の調査	調査に適した研究装置の準備が、2022年度にほぼ整うことため、2023年度から着実に進められる。
1-6 CO ₂ 吸収性能の向上指針	微粒子化によるCO ₂ 吸収性能の向上およびNa-Fe系酸化物の組成制御によるCO ₂ 吸収性能の向上	・水蒸気吸着特性や比表面積の評価の実施によって、CO ₂ 吸収に優れるNa-Fe系酸化物の化学組成を明らかにする。	2023年度前半には、評価装置がほぼ整うため、効率のよい性能向上が図れる。

2. 研究開発計画／（２）研究開発内容（今後の取組）

個別の研究開発における技術課題と解決の見通し

	直近のマイルストーン	残された技術課題	解決の見通し
2 Na-Fe系酸化物を用いた排熱利用型CO ₂ 分離回収プロセス開発（エア・ウォーター、戸田工業）	2023年度 ・ラボ試験機、試験開始 ・模擬ガスによるCO ₂ 濃縮確認（95%）	・小規模試験からスケールアップしたラボ試験でプロセス確立を行う。 ・実証機（スケールアップ）の設計を行う。	・小規模試験と並行して、ラボ試験を通じて、プロセス検討を進める。

-参考資料-

① 【研究開発計画項目】 Na-Fe系酸化物のCO₂回収性能向上、製造方法確立(2022～2024年度)

1. Na-Fe系酸化物の粉体、成形体開発（戸田工業）

1-1. Na-Fe系酸化物成形体組成確立

- ・耐水性の獲得
- ・CO₂回収エネルギーの最小化
- ・耐久強度の獲得
- ・不純物（SO_x, NO_x等）の影響測定

1-2. Na-Fe系酸化物成形体形状制御（ペレット、ハニカムなど）

- ・形状制御によるCO₂回収性能の向上

1-3. Na-Fe系酸化物粉体、成形体の製造プロセスの設計とコスト計算

2. Na-Fe系酸化物の室温でのCO₂吸収性能の向上（埼玉大学）

2-1. 微粒子化

- ・酸化鉄原料の粒径縮小等（+戸田工業）

2-2. 組成制御

- ・Na量の増加したNaFeO₂以外のNa-Fe系酸化物の開発等

3. Na-Fe系酸化物の低温再生機構の解明（埼玉大学）

3-1. 層状構造の視点からの解明

- ・類似構造をもつ化合物との比較研究による再生低温化をもたらす結晶学的特長の明確化

3-2. Na炭酸塩の視点からの解明（+戸田工業）

- ・造粒成形体中でのNa炭酸塩の低温熱分解および低エネルギーCO₂脱離の仕組みの解明

-参考資料-

① 【目標】 Na-Fe系酸化物成形体による高CO₂回収量と低CO₂回収エネルギー

目標①：NaFeO₂の粉体、および成形体を改良して、1.0GJ/ton-CO₂を数値目標とする。
(現行品で回収エネルギーとして1.3GJ/ton-CO₂を達成済み。次頁に詳細記載)

目標②：CO₂回収量は、粉体での理論値20wt%の5割、10wt%を数値目標とする。

CO ₂ 回収材の形態	Na-Fe系酸化物成形体	
項目	現行	目標
吸収温度	25	25
CO ₂ 回収量 wt%	4.3	10
回収温度 ℃	110	90
回収エネルギー GJ/ton-CO ₂	1.3	1.0



成形体

Na-Fe系酸化物と粘土
成分からなる複合材料



粉体

Na-Fe系酸化物のみ
からなる粉末

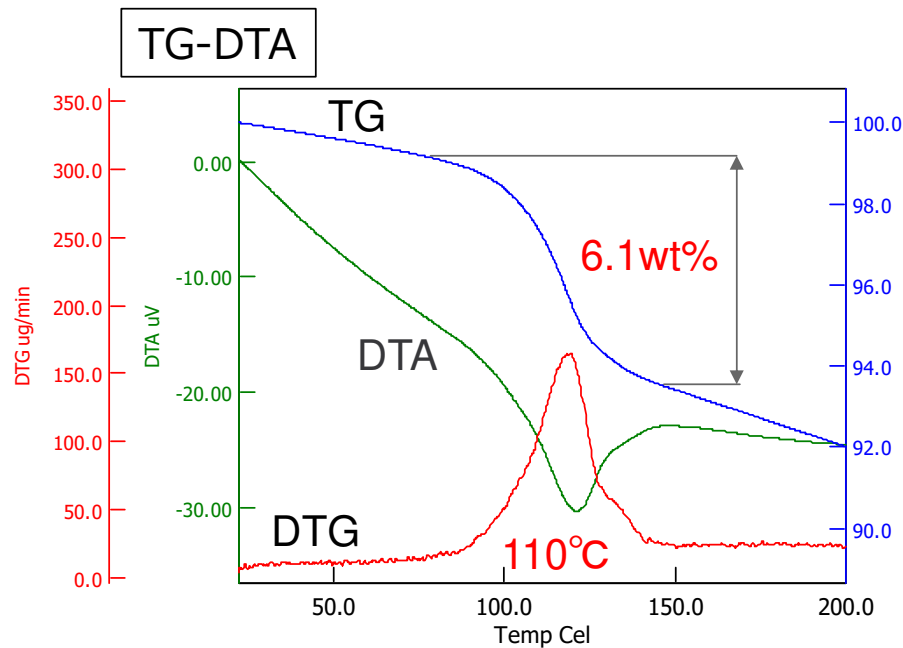
-参考資料-

1 【目標の参考データ】 Na-Fe系酸化物成形体のCO₂回収エネルギー調査



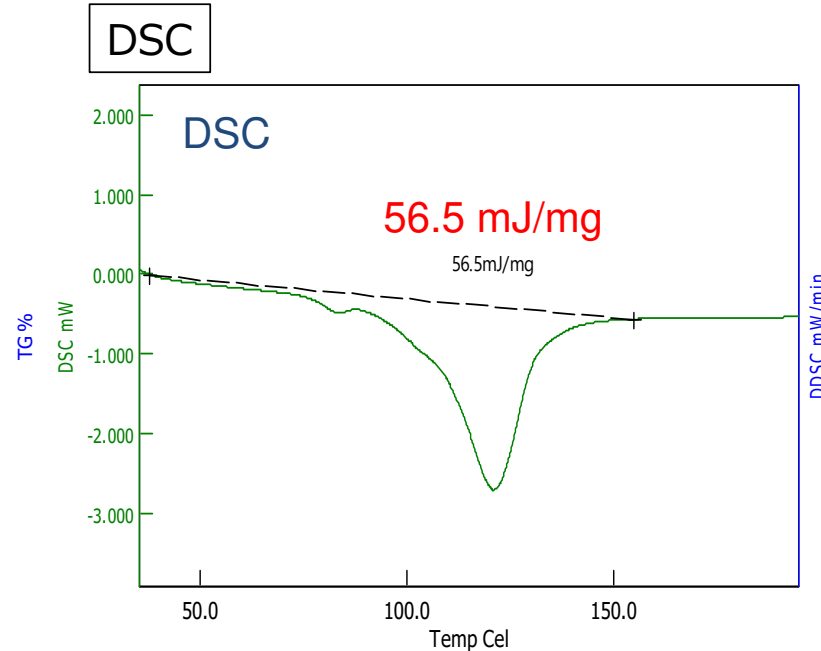
成形体

【吸着条件】 成形体 (Na-Fe系酸化物 含有率50wt%) 1.0 g, CO₂濃度10%, 0.5 L/min (RH 70%), 反応時間 2hr



【回収温度】 110°C

【回収量】 6.1wt% (CO₂正味 4.3wt%)



【回収エネルギー】 1.3 GJ/ton-CO₂

56.5 mJ/1mg (成形体)

$= 56.5 \times 10^{-3} / (1 \times 10^{-3} \times 0.043)$

$= 1.3 \text{ kJ/g-CO}_2$

$= 1.3 \text{ GJ/ton-CO}_2$

CO₂を吸収させた1mmペレットをTGにて昇温すると110°Cで6.1wt%の減量がある。この中にはCO₂とH₂Oが当量含まれるため、正味のCO₂は $6.1 \times (44 / (44 + 18)) = 4.3\text{wt\%}$ になる。

また、同CO₂吸収ペレットをDSCで昇温すると、110°Cをピークとして、56.5mJ/mgの解離エネルギーが検出される。これを、TGで求めたCO₂正味の量4.3%で割り戻すと本成形体のCO₂回収エネルギーは1.3GJ/ton-CO₂になる。

-参考資料-

① 【研究開発計画1-1】 Na-Fe系酸化物成形体調製の必要性について (1)

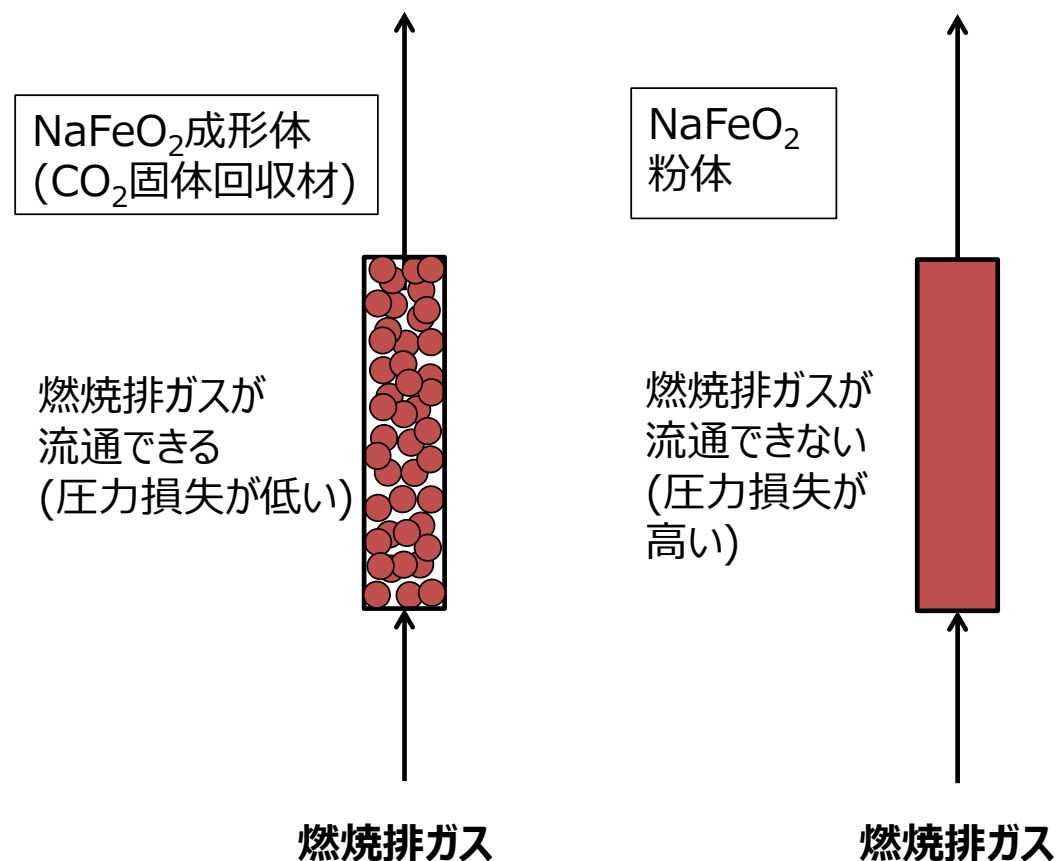
(1) 固気接触

粉体のままで吸着塔に充填
→圧損が生じて燃焼排ガスが流通できない。

成形体（ペレット化）→燃焼排ガスが流通できる。



Na-Fe系酸化物成形体
(セラミックペレット)



-参考資料-

① 【研究開発計画1-1】 Na-Fe系酸化物成形体調製の必要性について (2)

(2) 耐水性の獲得

NaFeO₂のNa成分は容易に水に溶出
触媒担体となるセラミックと混合して焼成することにより、
Naがセラミック中に不溶化し、機能を保持したまま耐水性を獲得。

(3) CO₂回収エネルギーの最小化

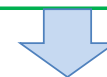
NaFeO₂自体、セラミックスであり、触媒担体となるセラミックスと混合
して焼成することで、NaFeO₂の一部に担体のセラミックス成分がドー
ピングされて、CO₂回収エネルギーが大幅に下がると推測。

(4) 高耐久性セラミックCO₂回収材

NaFeO₂は、触媒担体のセラミックと相性が良く、
均一に系内に拡散されることで、CO₂高吸脱着性能と高強度確保。
本固体回収材は、数百度で焼成されて調製されるため、
におい成分は極めて少ない。また、酸化物なので、これ以上空気酸
化されることはすくない。→高耐久

【新規NaFeO₂成形体の開発方針】

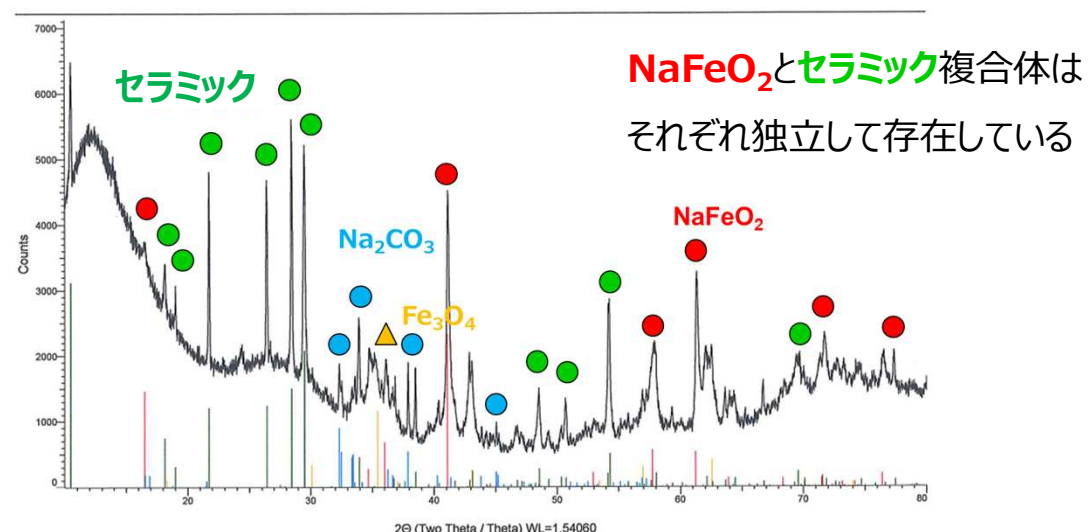
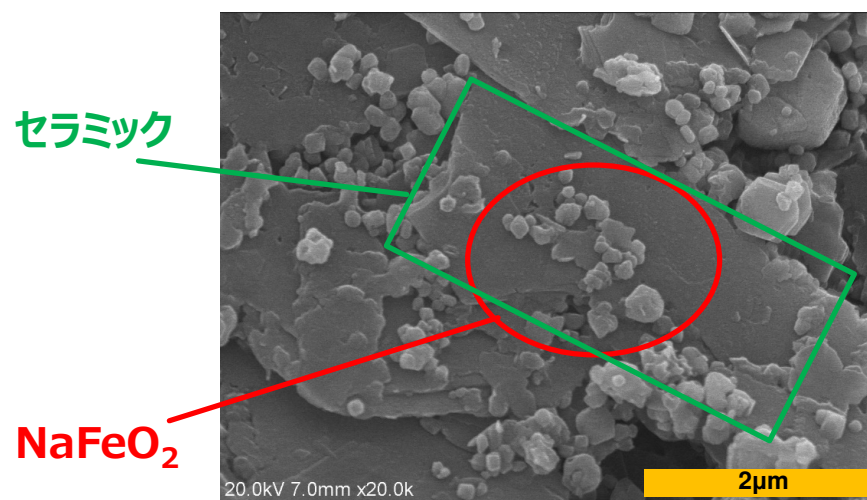
- ・NaFeO₂粉体の改良
- ・成形体形状制御



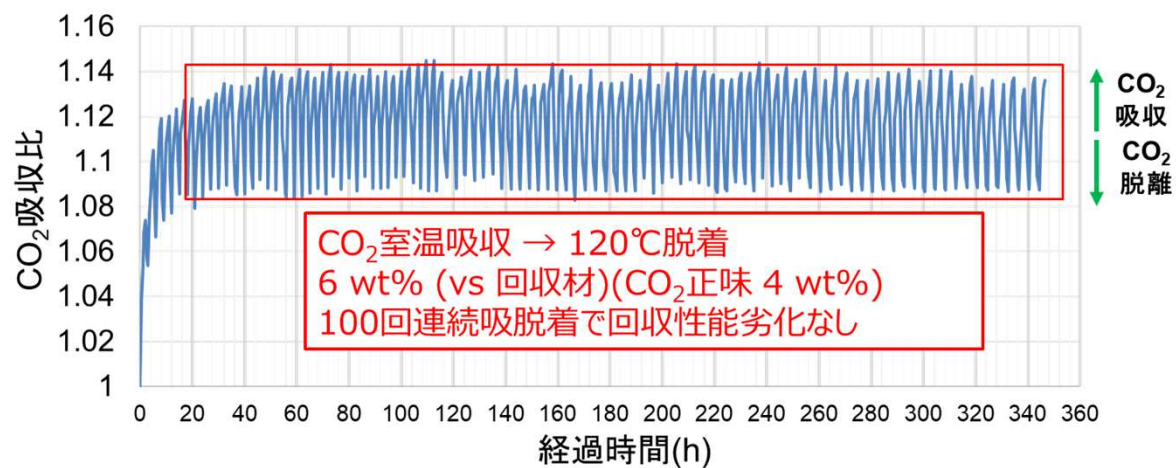
- ・水の蒸発エネルギーの少ない固体回収材
(高通気性材料による、余剰水の低温気化)
⇒ CO₂回収エネルギーの低減と耐水性の向上
- ・ハニカム構造化
⇒ 回収材の耐久性の向上

-参考資料-

①【研究開発計画1-2】 Na-Fe系酸化物成形体を用いた繰り返し性能試験



【条件】ペレット充填 Φ20x30 12g,
CO₂ 10%, RH 80%



-参考資料-

① 【研究開発計画1-2】 Na-Fe系酸化物成形体回収率の向上

	CO ₂ 回収量 (wt%)	圧壊強度 (N)	耐水性	繰返し特性
NaFeO ₂ 単独ペレット	8.0	10	×(Na溶出)	膨張収縮で破壊
NaFeO ₂ /セラミック 50:50複合ペレット	4.3	100	○	100回劣化無し

- セラミックと複合化することで耐久性・耐水性の向上
- 単独ペレットと比較して**CO₂回収能力が半減**

原因

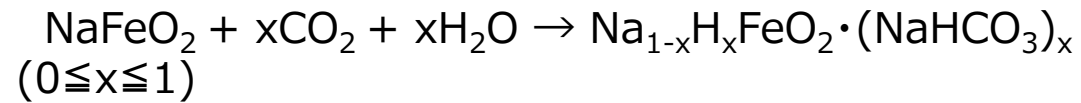
- NaFeO₂量が少ない
- 内部までCO₂ガスが浸透しない
- セラミックとの相性の追求不足
(粒径などの制御)



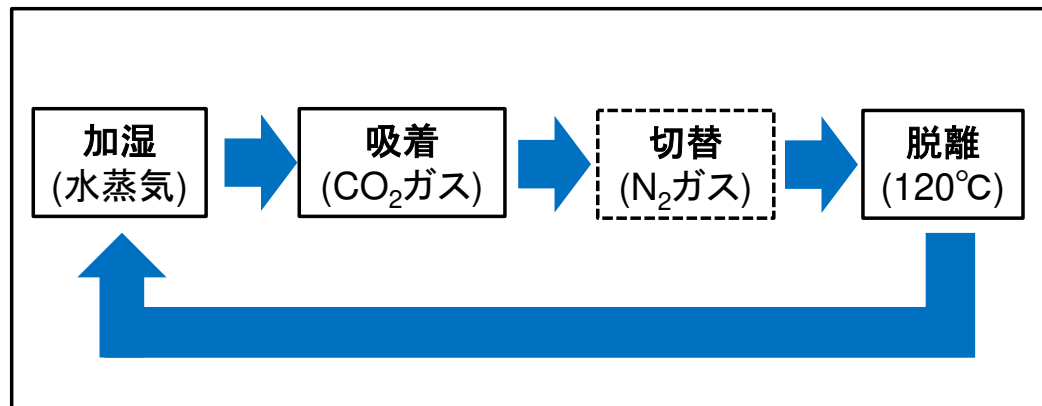
対策

- NaFeO₂比率の向上
- 気孔率の向上
- 最適なセラミック材料との成形

【研究開発計画1-2】 Na-Fe系酸化物成形体回収率の向上（水分の付与）



現行のサイクル評価



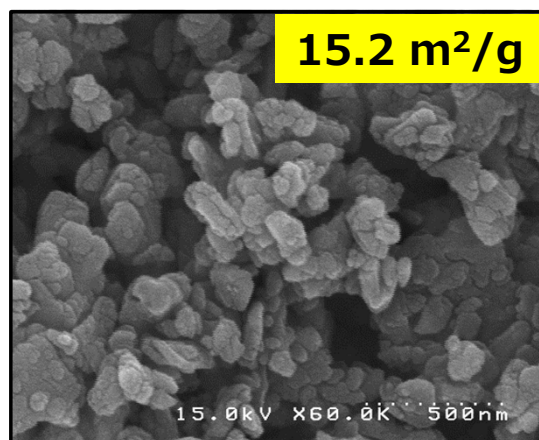
狙い

- ・最初に十分水分を吸着させ、NaFeO₂を活性化させてから吸着操作を行う。
- ・**回収サイクルの向上**
- ・吸着速度等の観察

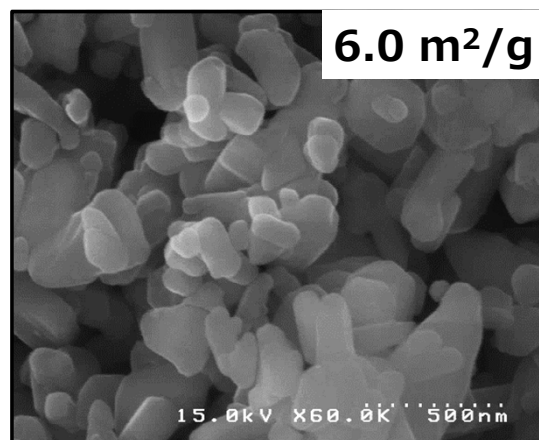
-参考資料-

① 【研究開発計画2-1】 微粒子化によるCO₂吸収性能の向上

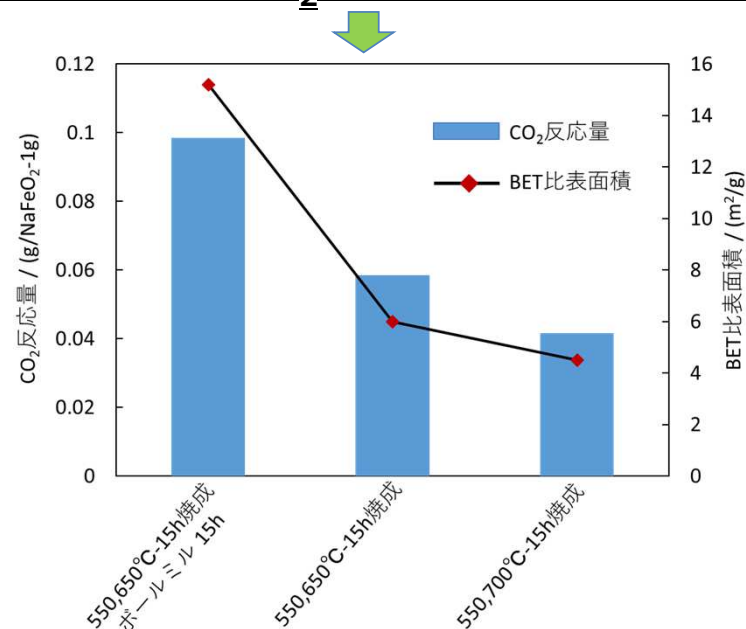
・原料粉砕法による合成



・原料を粉砕しない従来法による合成



高比表面積化によってCO₂吸収容量が増大することを確認済



解決 手段

酸化鉄等の原料粒径の縮小や合成法の改良によって、高比表面積化と高CO₂吸収容量化を図る。

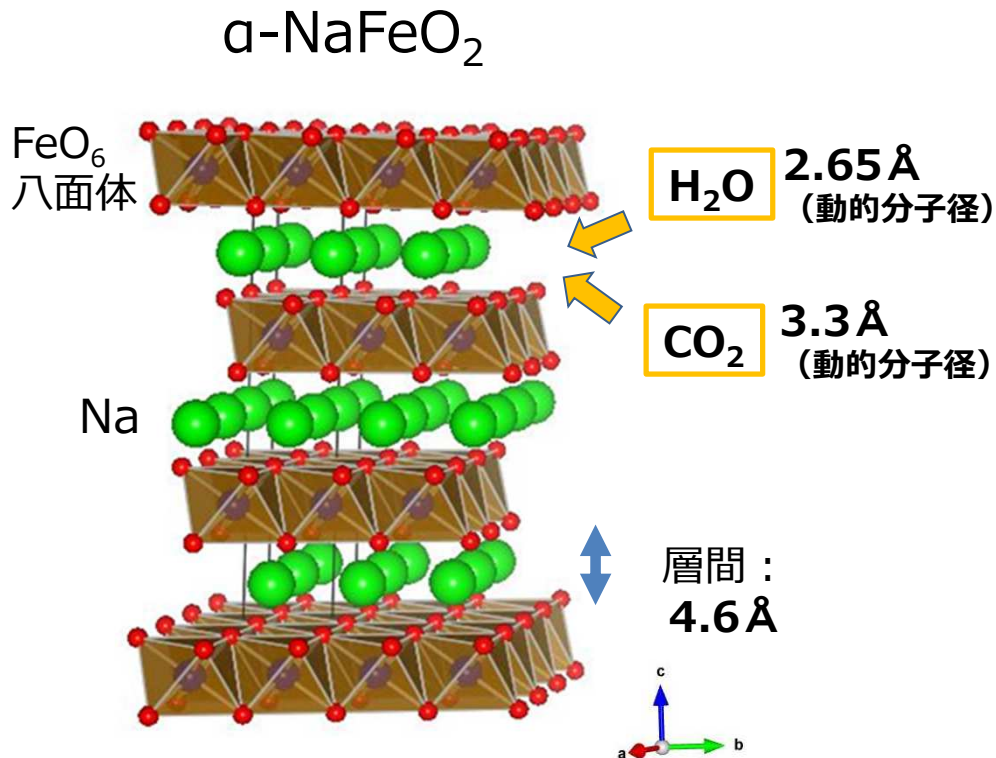
相乗 効果

成形体中のNaFeO₂と粘土成分との接触面積の増大にも繋がる。

➡ 粘土成分の触媒作用の促進によるCO₂回収エネルギーの低減が期待される。

-参考資料-

① 【研究開発計画2-2】 Na-Fe系酸化物の組成制御によるCO₂吸収性能の向上



解決
手段①

FeO₆八面体中のFe³⁺の一部をイオンサイズの大きいカチオンで置換して層間を広げる。



CO₂およびH₂Oとの接触を容易にして, CO₂吸収性能の向上を目指す。(次頁参照)

解決
手段②

NaやFe組成を変えたNa-Fe系酸化物を合成することで、CO₂吸収容量を高める。



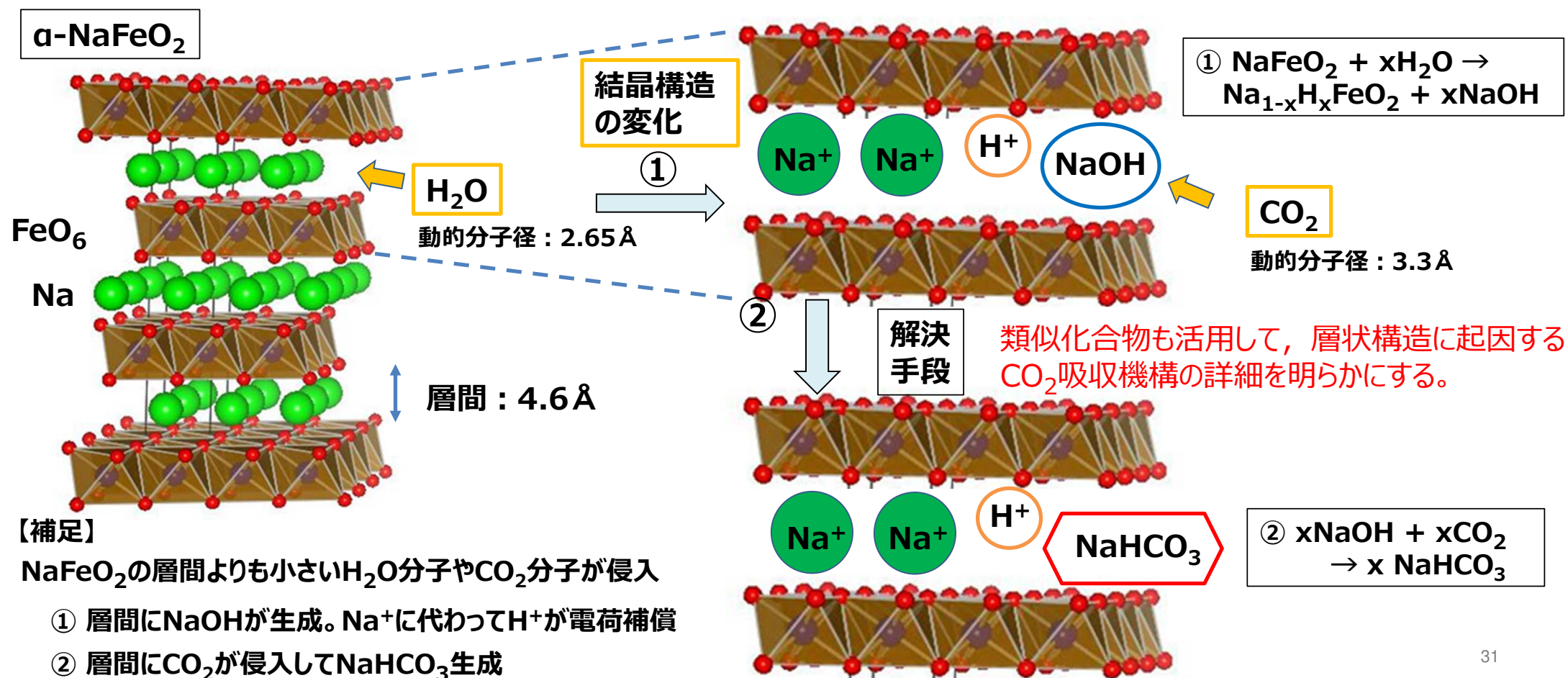
相乗
効果

Na-Fe系酸化物の高CO₂吸収容量化によって、本実施技術の汎用性の向上に寄与する。

-参考資料-

① 【研究開発計画3-1】 層状構造が作り出すCO₂吸収機構の解明

【水蒸気利用したNaFeO₂のCO₂吸収機構】



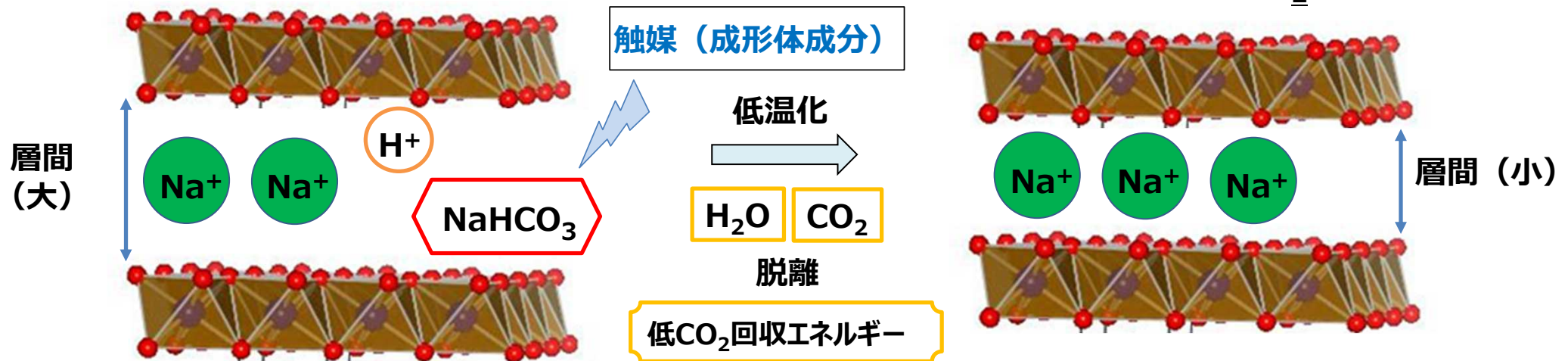
-参考資料-

① 【研究開発計画3-2】 Na炭酸塩の低温分解とCO₂回収エネルギーの低減

NaFeO₂の低温再生機構



CO₂吸収体 $\text{Na}_{1-x}\text{H}_x\text{FeO}_2 \cdot (\text{NaHCO}_3)_x$



解決
手段

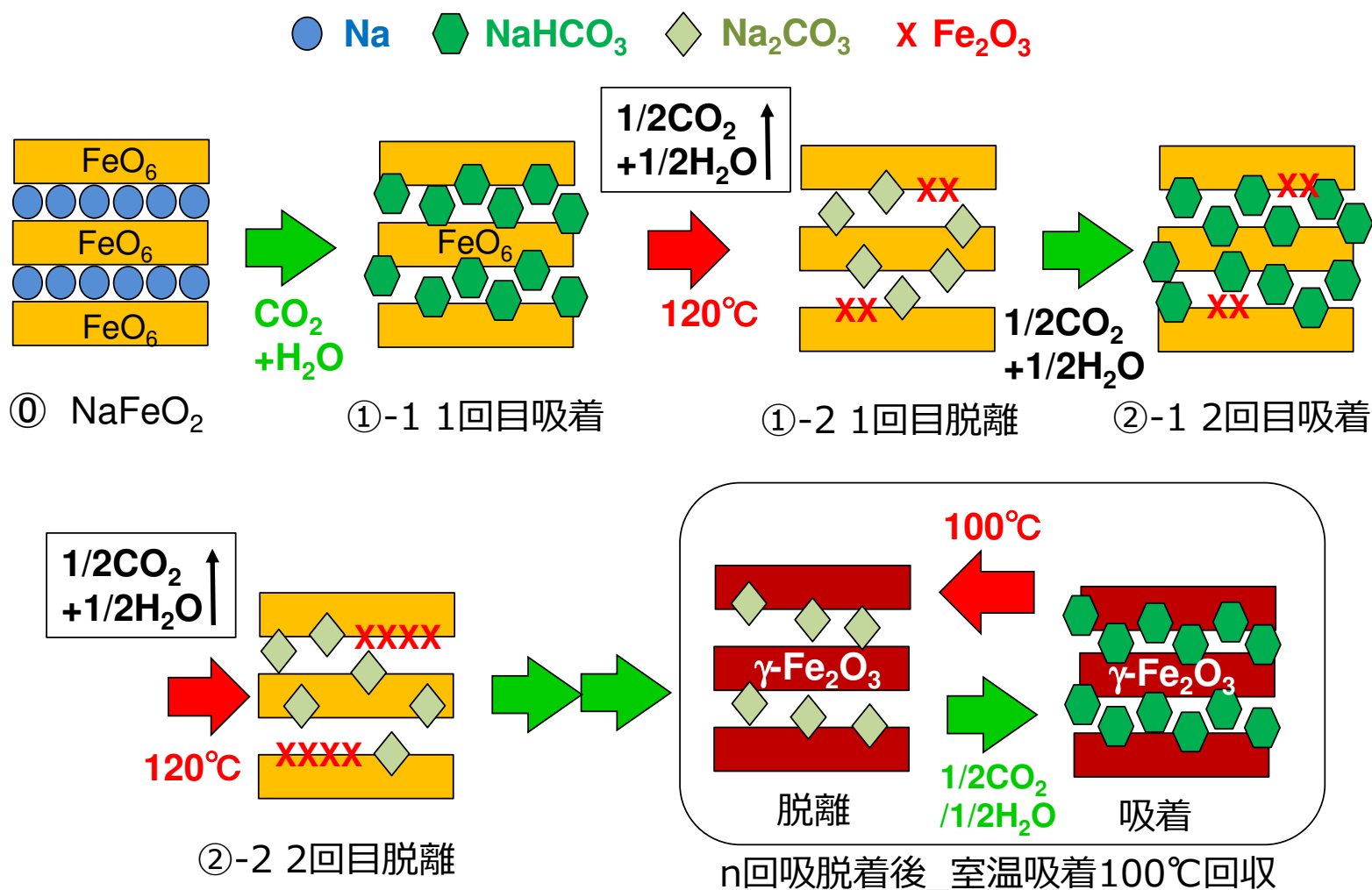
戸田工業製の成形体試料中に含まれる粘土成分による触媒機構を明らかにし、触媒作用を促進することで、Na炭酸塩の熱分解の低温化とCO₂回収エネルギーの低減を図る。

【補足】

- (1) 上記のNaHCO₃を層間に含むCO₂吸収体 ($\text{Na}_{1-x}\text{H}_x\text{FeO}_2 \cdot \text{NaHCO}_3$) が加熱によって熱分解される。
- (2) (1) の際、H⁺が、生成するH₂Oに組み込まれ、Na⁺が層間に戻る[電荷補償]。
- (3) (1)と(2)の結果、CO₂とH₂Oが脱離し、NaFeO₂が再生される。

-参考資料-

① 【研究開発計画3-2】 Na-Fe系酸化物によるCO₂の室温吸収・【低温】脱着イメージ



① NaFeO₂を模式的に示すと、FeO₆層間にNaが二次元的に配列した構造となっている。

①-1; CO₂を接触させるとCO₂をNaHCO₃として、取り込みます。

①-2; 120℃加熱をすると、1/2CO₂と1/2H₂Oを放出して、NaHCO₃はNa₂CO₃になる。また、層内の一部がFe₂O₃に変化する。

②-1; さらにCO₂を接触すると、CO₂とH₂Oを吸収して、NaHCO₃が生成する。

②-2; 120℃加熱をすると、同様に1/2CO₂と1/2H₂Oを放出してNa₂CO₃になり、Fe₂O₃成分が増える。

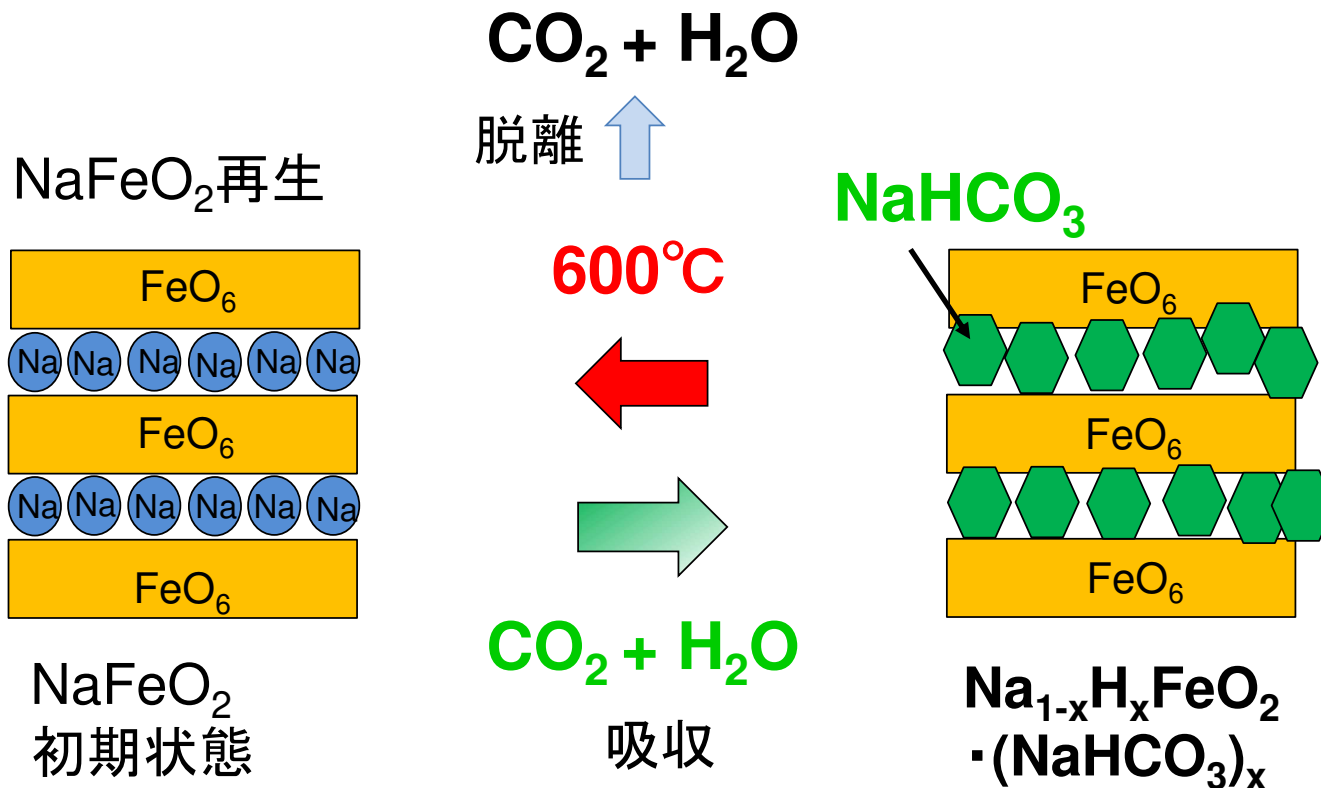
(n回後には、層上のFeO₂は全て、Fe₂O₃に変化し、連続的にCO₂を吸脱着する。この形態になることで、回収量が15wt%程度に増え、回収温度が100℃に下がり、より効率的にCO₂を吸脱着できる。)

-参考資料-

1

【研究開発計画3-2】

Na-Fe系酸化物のCO₂の室温吸収・【高温】脱離イメージ (NaFeO₂完全再生)



①まず、NaFeO₂を模式的に示すと、FeO₆八面体を作る層間にNaが二次元的に配列した構造となっている。(図中左)

②これに、CO₂と1/2H₂Oが接触すると、NaがNaHCO₃となり、系内にCO₂が取り込まれ、CO₂が固定化される。(図中右)

③さらに、600℃の熱をかけると、取り込んでいたCO₂と1/2H₂Oを放出して、NaFeO₂に戻る。

-参考資料-

① 【研究開発計画3-2】 Na-Fe系酸化物の低温再生機構の解明

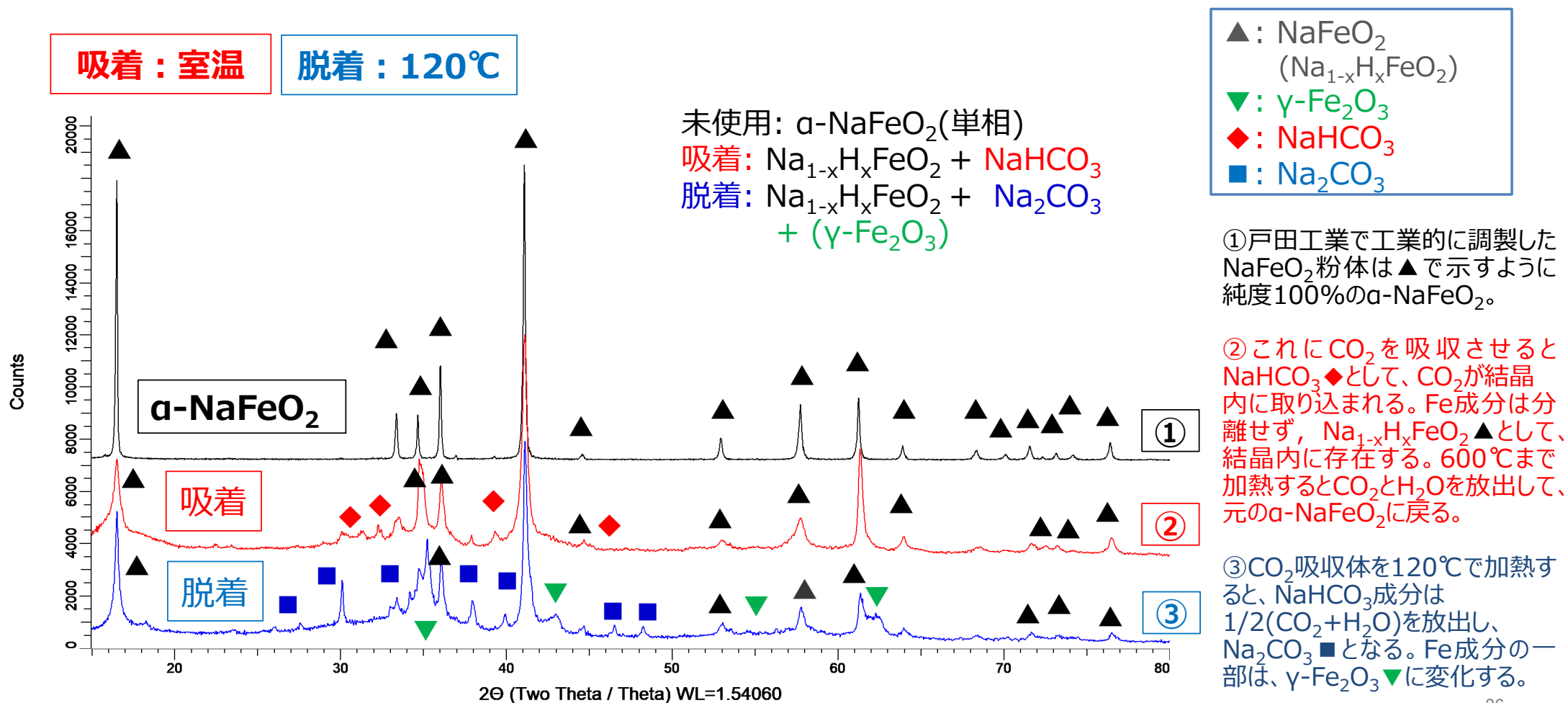
2022年度進捗

Na-Fe系酸化物の低温再生機構および低エネルギーCO₂回収機構の解明をはかるため、類似の結晶構造をもつ化合物の比較検討を行いながら、Na-Fe系酸化物に対して、様々な条件のもとでCO₂とH₂Oを吸収・脱離させ、それらの定量分析、脱離に伴う吸熱エネルギー、脱離・再生に伴う結晶相変化を調査した。

その結果、低温域ではNa-Fe系酸化物からCO₂とH₂Oが脱離すること、およびそれらの量が吸収条件によって変化することを確認した。また、結晶構造を変えずに組成制御したNa-Fe系酸化物は、従来と同様の結晶相変化を伴ってCO₂吸収を示したが、従来よりも低温域でのCO₂回収に有効であることを見出した。

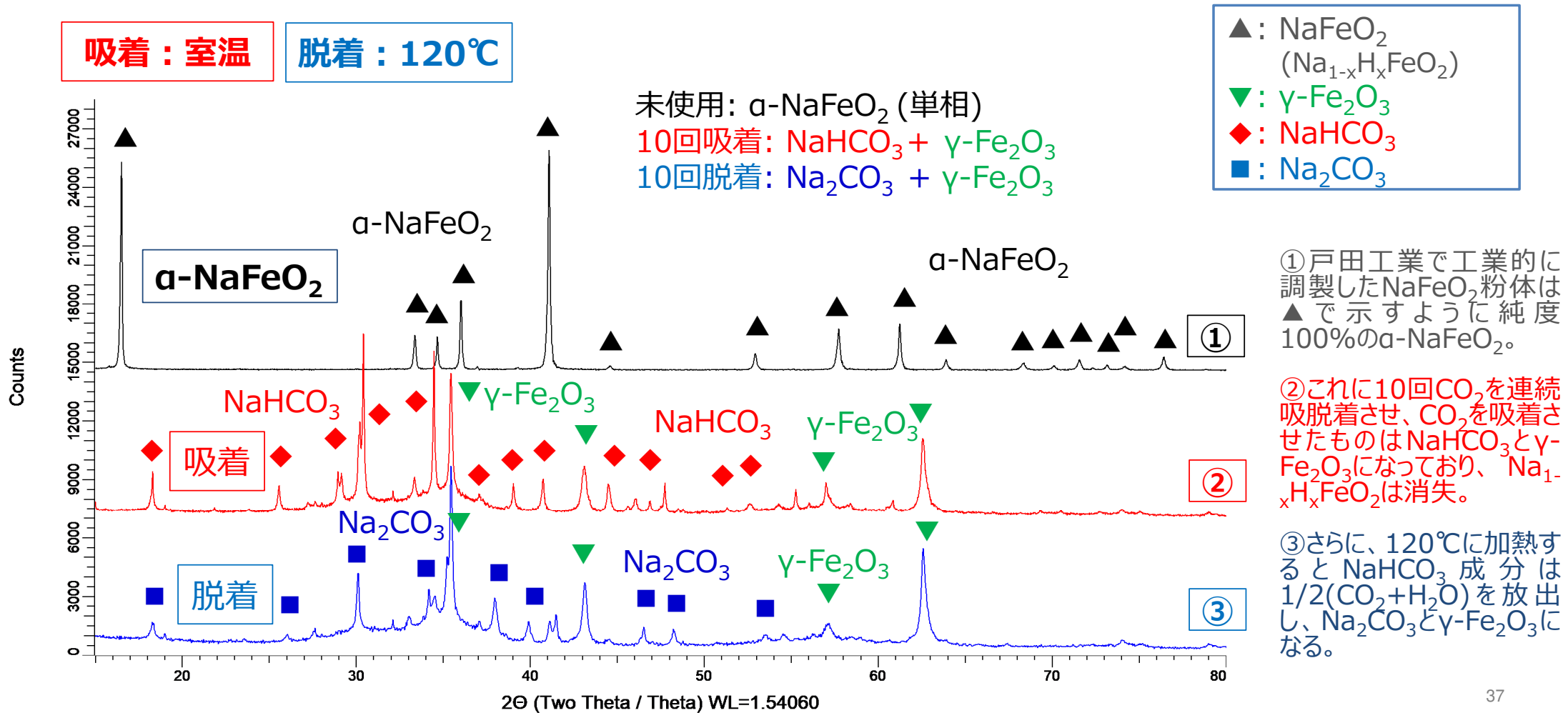
-参考資料-

① 【研究開発計画3-2】 CO₂吸脱着前後のNa-Fe系酸化物XRD試験（1回目）



-参考資料-

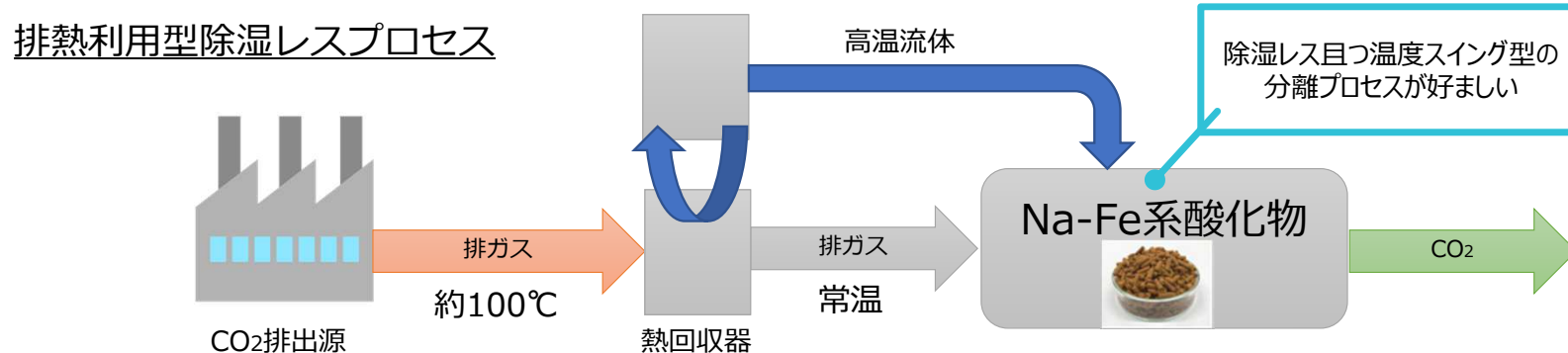
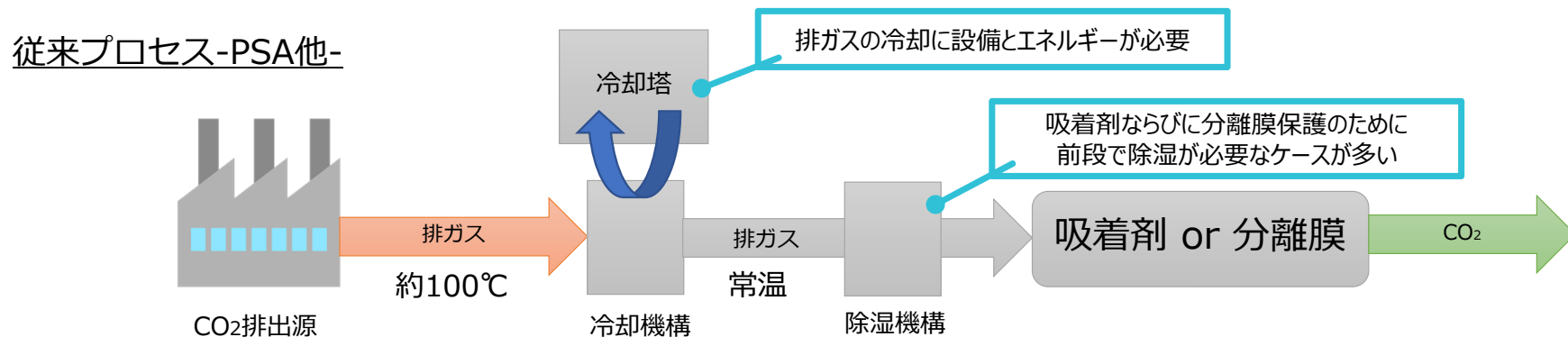
① 【研究開発計画3-2】 CO₂吸脱着前後のNa-Fe系酸化物XRD試験（10回目）



-参考資料-

2 Na-Fe系酸化物を用いた新規CO₂回収プロセスの開発

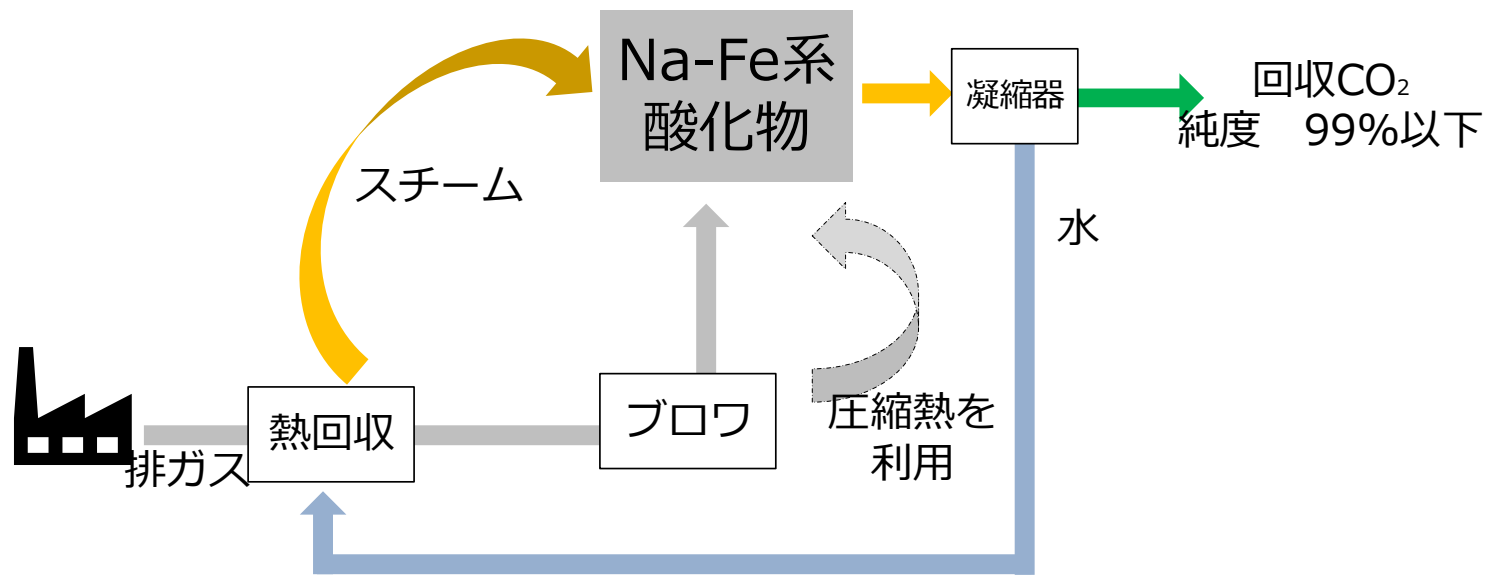
- エア・ウォーターでは既存技術を活用し、圧カスイング吸着分離法(PSA)のCO₂分離回収装置の製作実績あり
※環境省「清掃工場から回収した二酸化炭素の資源化による炭素循環モデルの構築実証事業」向け装置他
- 排ガスの冷却機構ならびに除湿機構が必要となり、エネルギー消費が多いという課題がある



-参考資料-

② Na-Fe系酸化物を用いた新規CO₂回収プロセスの開発

- 回収コスト2,000円台/ton-CO₂以下を達成するため以下3つをコンセプトにプロセス開発を行う
 - i. 排ガス排熱、プロセス内熱の最大利用
 - ii. CO₂回収率最大化
 - iii. 回収CO₂純度最大化

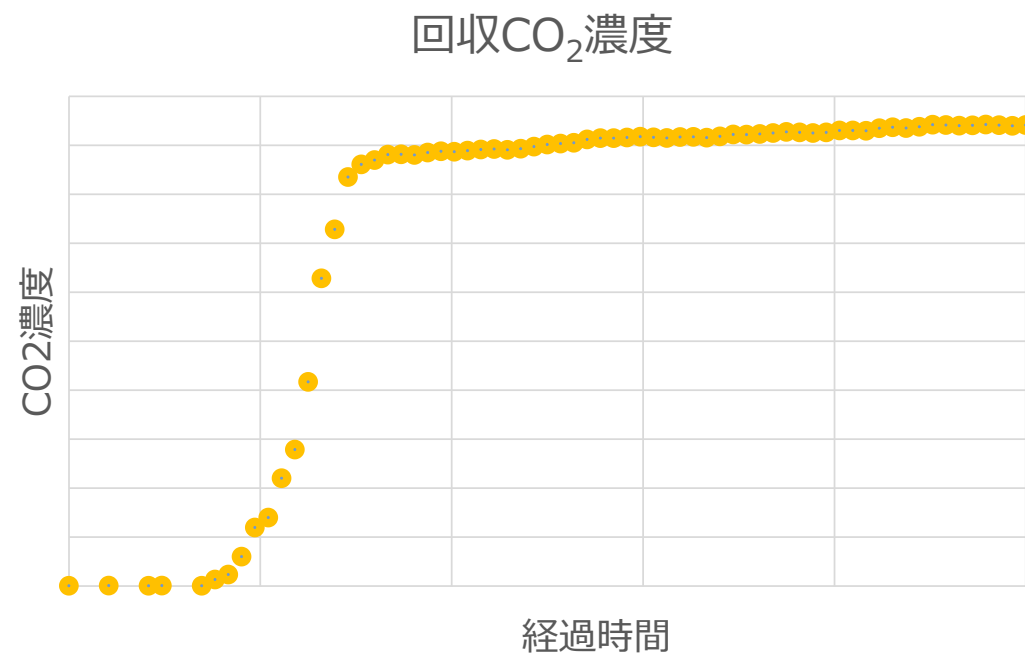


- ◆ 戸田工業(株)の大竹事業所での実証
 - LPG焚きのボイラを使用中。
 - 煙突より排ガスを引き込み、CO₂を回収（回収CO₂量3ton/day）する。

-参考資料-

② Na-Fe系酸化物を用いた新規CO₂回収プロセスの開発

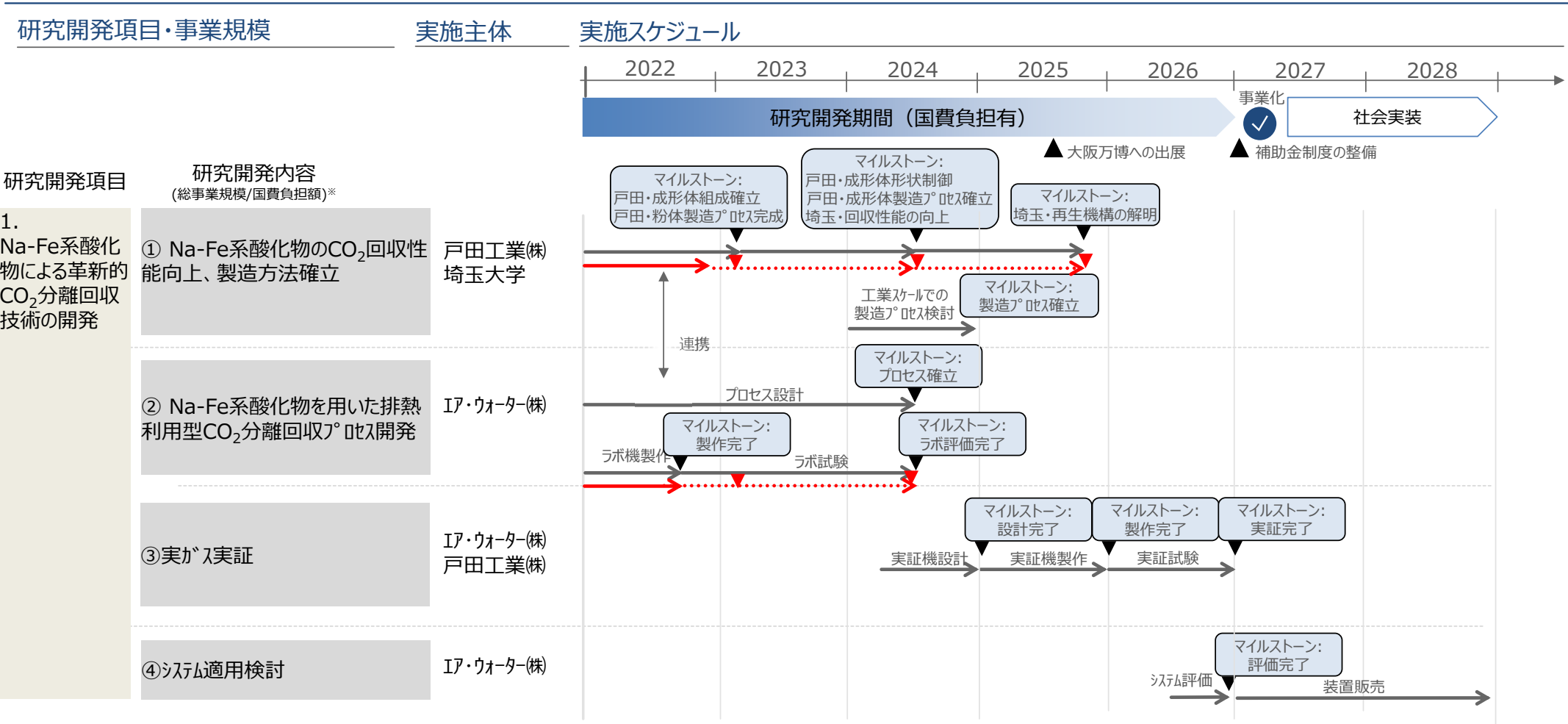
2022年度進捗 小規模試験によるCO₂濃縮の確認



- スチームによるCO₂回収、濃縮を確認した。
- 各種パラメーター調整中。

2. 研究開発計画／（3）実施スケジュール

複数の研究開発を効率的に連携させるためのスケジュールを計画



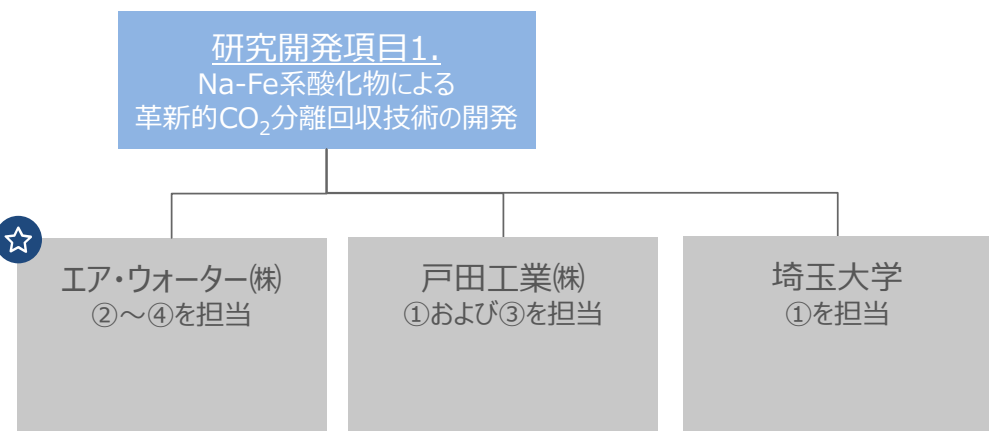
※総事業規模は、実施者の自己負担も含めた総投資額、国費負担額はNEDOからの補助金の額

2. 研究開発計画／（４）研究開発体制

各主体の特長を活かせる研究開発実施体制と役割分担を構築

実施体制図

※金額は、総事業費/国費負担額



☆ 幹事企業

- ・ 事業規模：約17.0億円
- ・ 支援規模*：約14.5億円

*インセンティブ額を含む。

今後ステージゲートでの事業進捗などに応じて変更の可能性あり。

- ・ 補助率など：9/10委託→2/3補助（インセンティブ率10%）

各主体の役割と連携方法

各主体の役割

- ・ 研究開発項目1全体の取りまとめは、エア・ウォーター(株)が担う。
- ・ エア・ウォーター(株)は、②Na-Fe系酸化物を用いた排熱利用型CO₂分離回収プロセス開発ならびに、③実ガス実証、④システム適用検討を担当する。
- ・ 戸田工業(株)は、①Na-Fe系酸化物のCO₂回収性能向上、製造方法確立のうち、a)Na-Fe系酸化物の粉体、成形体開発を主担当し、b)Na-Fe系酸化物の室温でのCO₂回収性能の向上、c)Na-Fe系酸化物の低温再生機構の解明は一部担当する。
また、③実ガス実証においては実証場所を提供するとともに、自社で使用するCO₂利活用設備への適用可否を検討する。
- ・ 埼玉大学は、①Na-Fe系酸化物のCO₂回収性能向上、製造方法確立のうち、b)Na-Fe系酸化物の室温でのCO₂回収性能の向上、c)Na-Fe系酸化物の低温再生機構の解明を担当する。

研究開発における連携方法（共同提案者間の連携）

- ・ 事業期間中に毎月定例打合せを開催する。
- ・ 成果物は知財運営委員会を開催し、提案者間で協議する。

共同提案者以外の本プロジェクトにおける他実施者等との連携

- ・ CO₂分離回収の実ガス実証を行うにあたっては、戸田工業に設置されているLPG焚きボイラの排ガスを利用する計画である。

中小・ベンチャー企業の参画

- ・ Na-Fe系酸化物の成形体を作製するにあたって、成形加工の外注先として中小企業の成形加工メーカを予定しており、事業化時には、成形体の製造委託を行いたいと考えている。

2. 研究開発計画／（５）技術的優位性

国際的な競争の中においても技術等における優位性を保有

研究開発項目	研究開発内容	活用可能な技術等	競合他社に対する優位性・リスク
1. Na-Fe系酸化物による革新的CO ₂ 分離回収技術の開発	1 Na-Fe系酸化物のCO ₂ 回収性能向上、製造方法確立	- 微粒子酸化鉄製造技術(補足-1) [戸田工業] - Na-Fe系酸化物製造技術(補足-2) [戸田工業] - 回収材(セラミック)製造技術(補足-3) [戸田工業] - 様々な室温CO₂吸収無機固体の性能向上に関する多くの知見(補足-4)[埼玉大学]	→ 微粒子酸化鉄製造技術 → 新規無機固体回収材 → 安価で安全な回収材 - 製造簡便なため、剽窃を受けやすい →戦略的な特許出願→包括的知財確保
	2 Na-Fe系酸化物を用いた排熱利用型CO ₂ 分離回収プロセス開発	- 吸着分離技術(補足-5,6) [IA・ウォーター:AW] - ガスハンドリング経験、ノウハウ [AW] - 省エネプロセス開発技術(補足-6)[AW]	→ Na-Fe系酸化物を用いた省エネ型CO₂分離回収技術 → プロセス特許の海外出願による保護
	3 実ガス実証	- ガス分離装置のエンジニアリング技術(補足-5) [AW] - ガス分離装置の運転操作経験、ノウハウ(補足-7)[AW]	→ 実ガスを用いた運転経験から得られる知見を装置設計に反映
	4 システム適用検討	- 炭酸ガス事業から得たCO₂ユーザ要求仕様の把握等(補足-8)[AW] - 各種ガスプラントのスケールアップノウハウ[AW] - 装置メンテナンス、遠隔監視等の保守管理ノウハウ(補足-9)[AW] - 海外でのガス関連設備販売経験(補足-10)[AW]	→ ガス分離装置の豊富な運転経験に基づく保守体制の整備 → スケールアップ等の経験にもとづくラインナップ拡充

2. 研究開発計画／（5）技術的優位性

国際的な競争の中においても技術等における優位性を保有

（補足-1）微粒子酸化鉄製造技術[戸田工業]

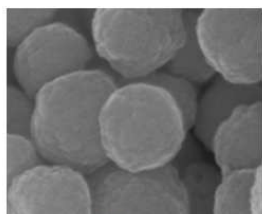
微粒子酸化鉄を顔料、触媒、磁性材料、フェライト原料などに製造・販売中

➡ 粉体設計・粒子設計の重要な特性「組成、形状、寸法、粒度分布、表面性を制御する独自の技術を保有

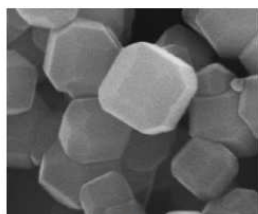
酸化鉄の形状制御技術

粒子設計におけるTSSDSコントロールの中で、「Shape（形状）」のコントロール例を下に示します。

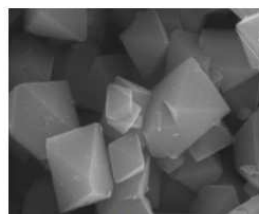
戸田工業では鉄塩水溶液をアルカリで中和することによって種々の酸化鉄を製造しています。このように水溶液中で合成する方法は湿式合成法と呼ばれ、戸田工業のコアコンピタンスのひとつです。求められる機能や特性に合わせて湿式合成の条件を変更することにより、粒子形状を球状、八面体、針状などに制御します。



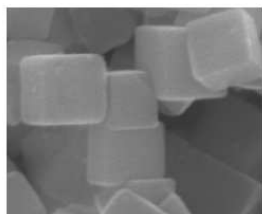
球状(Fe_3O_4)



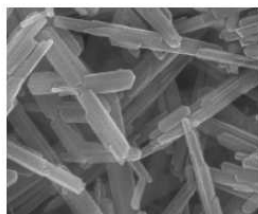
多面体(Fe_3O_4)



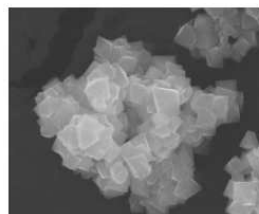
八面体(Fe_3O_4)



六面体(Fe_3O_4)



針状($\alpha\text{-FeOOH}$)

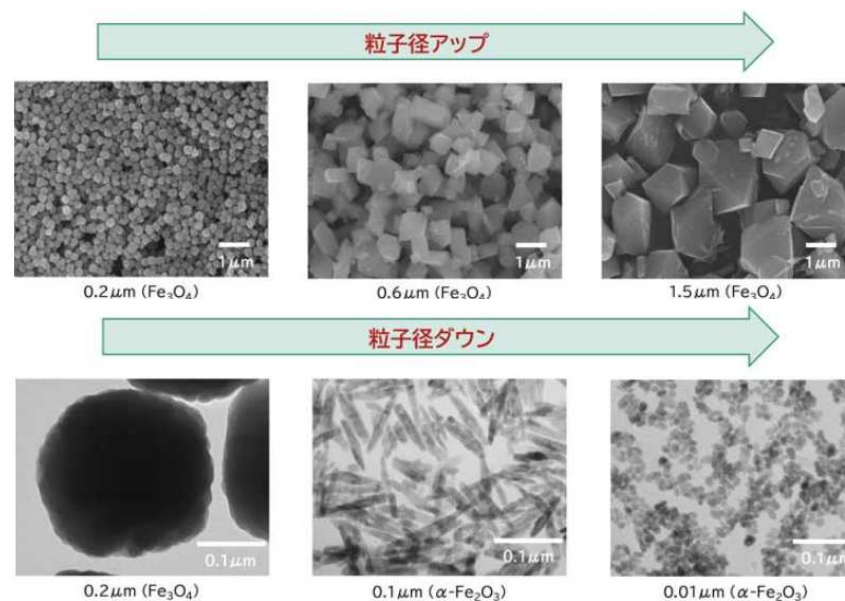


造粒体(Fe_3O_4)

酸化鉄の粒子径制御技術

粒子設計におけるTSSDSコントロールの中で、「Size（寸法）」のコントロール例を下に示します。

コアコンピタンスの湿式合成技術により、粒子径を $0.005\mu\text{m}$ (5nm)~ $1.5\mu\text{m}$ (1500nm)程度の範囲内で制御することが可能です。



2. 研究開発計画／（５）技術的優位性

国際的な競争の中においても技術等における優位性を保有

（補足-2）Na-Fe系酸化物製造技術[戸田工業]

酸化鉄で培った技術を応用し、Na-Fe系酸化物粉末の製造技術を構築、権利化

➡ 公開中：2件、出願中：12件

＜公開特許情報＞

公開番号 (出願日)	発明の名称	特許請求の範囲	出願人（発明者）
WO2021/ 117623 (2020/12/4)	ナトリウムフェライト粒子 粉末及びその製造方法	【請求項1】ケイ素、アルミニウム、チタン、マンガン、コバルト、ニッケル、銅、および、亜鉛からなる金属群より選ばれた少なくとも1種類以上の金属が、酸化物換算として0.05～1重量%含有し、Na/Feのモル比が0.75～1.25であることを特徴とするナトリウムフェライト粒子粉末。 【請求項2】～【請求項4】の内容は省略。	戸田工業株式会社 (坂本宗由, 志茂伸哉, 栗田栄一)
WO2022/ 030338 (2021/7/29)	二酸化炭素固体回収 材及びその製造方法	【請求項1】1～70重量%のナトリウムフェライトと、30～99重量%の多孔質材料とを含む二酸化炭素固体回収材であって、平均粒径が1～10mmであり、比表面積が100～1500m ² /gであり、前記ナトリウムフェライトの一次粒子の平均短軸径に対する平均長軸径の軸比が1～2である二酸化炭素固体回収材。 【請求項2】～【請求項6】の内容は省略。	戸田工業株式会社 (坂本宗由, 志茂伸哉, 栗田栄一)

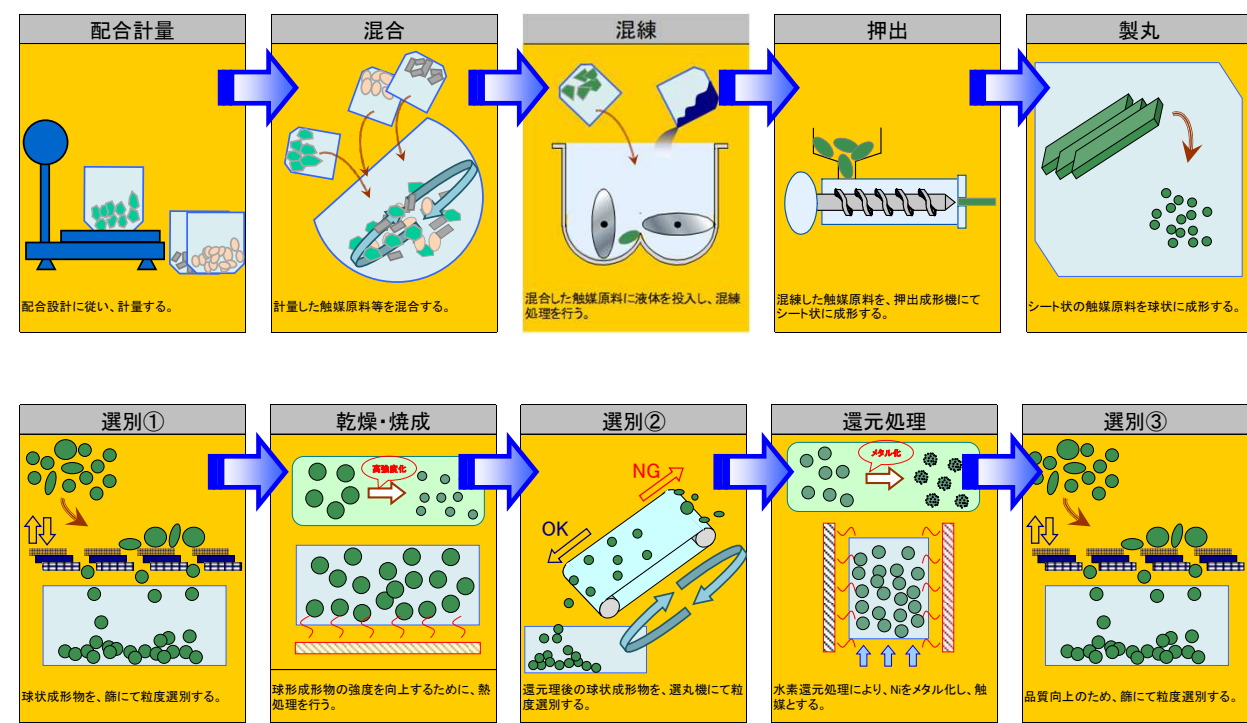
2. 研究開発計画／（5）技術的優位性

補足-3

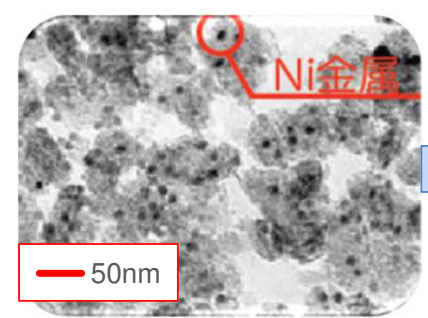
国際的な競争の中においても技術等における優位性を保有

（補足-3）回収材(セラミック)製造技術 [戸田工業]

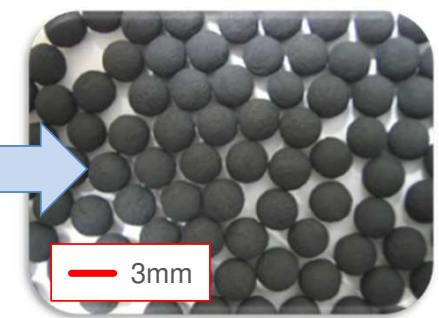
自社の触媒製造技術を応用し、
本事業のベースとなる回収材（セラミック）製造技術を構築



戸田工業製・改質触媒



改質触媒 [粉体]



改質触媒 [成形体]

- ・Niをシングルナノで高分散担持した高性能改質触媒
➡ 自社で最終製品（成形体）まで加工・販売
- ・特許：20件登録済み
- ・文献：
燃料電池用新規ニッケル系改質触媒の開発
高橋真司、他4名 粉体及び粉末冶金58(2)141-143
2011-2-15

2. 研究開発計画／（5）技術的優位性

国際的な競争の中においても技術等における優位性を保有

（補足-4）当該研究開発に関連する最近5年間の成果：論文リスト[埼玉大学]

発行年	主な著者 1	著者 2	著者 3	表題	論文雑誌名	巻 (Vol.)	備考
2021	<u>Ikuo Yanase</u>	Kohei.Hayashizaki	<u>Hiroaki Takeda</u>	Novel application of Tb-substituted layered double hydroxides to capturing and photoluminescence detecting CO ₂ gas at ambient temperature	Inorganic Chemistry Communications	125	水蒸気吸着を利用した、層状化合物のCO ₂ 吸着に関する査読論文
2019	<u>Ikuo Yanase</u>	Satoshi Konno		Photoluminescence of Zn ₅ (CO ₃) ₂ (OH) ₆ nanoparticles synthesized by utilizing CO ₂ and ZnO water slurry	Journal of Luminescence	213	水とCO ₂ を利用した塩基性炭酸塩の生成に関する査読論文
2019	<u>Ikuo Yanase</u>	Takuya Takano		CO ₂ capture and release of Na _{0.7} MnO ₂ 0.05 under water vapor at 25–150 °C	Inorganic Chemistry Communications	104	NaMn層状化合物のCO ₂ 吸収と低温再生に関する査読論文
2019	<u>Ikuo Yanase</u>	Shuhei Onozawa	Yuri Ohashi	CO ₂ capture from ambient air by β-NaFeO ₂ in the presence of water vapor at 25–100 °C	Powder Technology	348	β型NaFeO ₂ のCO ₂ 吸収と再生に関する査読論文
2019	<u>Ikuo Yanase</u>	Kento Sato	Yu Midorikawa	CO ₂ absorption properties of lithium sodium orthosilicate in the presence of water vapor at room temperature	Materials Letters	238	水蒸気を利用したNaLiシリケートのCO ₂ 吸収に関する査読論文
2019	<u>Ikuo Yanase</u>	Yuta Horiuchi	Hidehiko Kobayashi	Photoluminescence changes of Tb-substituted layered double hydroxides caused by capturing carbonate ions in water	Materials Research Bulletin	110	層状構造化合物による水中での、炭酸イオン吸着に関する査読論文
2018	<u>Ikuo Yanase</u>	Satoshi Konno	Hidehiko Kobayashi	Reversible CO ₂ capture by ZnO slurry leading to formation of fine ZnO particles	Advanced Powder Technology	29	水を利用したZnOのCO ₂ 吸収に関する査読論文
2018	<u>Ikuo Yanase</u>	Kento Sato	Toshiyuki Naka	CO ₂ absorption property of Li ₄ SiO ₄ in the presence of water vapor at room temperature	Chemical Engineering Journal	356	pp.81-90 リチウムシリケートの水蒸気中での室温CO ₂ に関する査読論文
2018	<u>Ikuo Yanase</u>	Kensuke Suzuki	Taisei Ueda	Synthesis of W-substituted CeO ₂ powder and its CO ₂ adsorption under a CO ₂ atmosphere	Materials Letters	228	金属酸化物表面へのCO ₂ 吸着に及ぼす水蒸気の影響に関する査読論文
2018	<u>Ikuo Yanase</u>	Shuhei Onozawa	Kohei Ogasawara	A novel application of α- and β-sodium ferrite as a CO ₂ -capturing solid in air with water vapor	Journal of CO ₂ Utilization	24	水蒸気を利用したNaFeO ₂ のCO ₂ 吸収に関する研究の先駆けとなる査読論文

2. 研究開発計画／（5）技術的優位性

国際的な競争の中においても技術等における優位性を保有

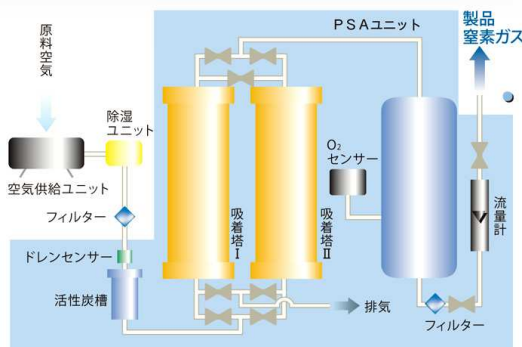
（補足-5）吸着分離技術、ガス分離装置の運転操作経験、パッケージ化ノウハウ[エア・ウォーター]

エア・ウォーターのグループ会社において、吸着分離型N₂発生装置（N₂PSA）や医療用酸素濃縮器など、パッケージ型の吸着分離装置を製造・販売。

■ N₂発生装置(N₂PSA)

- ・空気を原料に高濃度のN₂ガスを発生させる装置
- ・業界シェアNo.1 ※N₂発生量21Nm³/h以上クラス、出典:ガスジオラマ2021
- ・累計出荷台数 約3,800台

自社開発の
特殊吸着剤を搭載



■ 医療用酸素濃縮器

- ・空気を原料に高濃度のO₂ガスを発生させる装置
- ・安全、信頼性が求められる医療用のガス分離装置



5L/min型
医療用酸素濃縮器

<https://www.awbp.co.jp/product/nsp-pro/>

<http://www.ikiken.co.jp/>

2. 研究開発計画／（5）技術的優位性

国際的な競争の中においても技術等における優位性を保有

（補足-6）吸着分離技術、省エネプロセス開発技術[エア・ウォーター]

- ・吸着剤を用いたCO₂分離回収技術に関連する複数件の特許を出願。下記以外にも3件の関連特許を出願済み。

関連特許(抜粋)

出願年	出願番号	登録番号	発明名称
1996年10月	1996-267570	3816594	ガス精製方法およびそれに用いる装置
2001年3月	2001-184326	3571672	燃焼排ガス中の炭酸ガスを濃縮する方法
2002年8月	2002-239800	3830872	混合ガス分離装置
2004年2月	2004-43365	3841792	空気分離装置における前処理方法およびそれに用いる装置
2016年9月	2016-182590	6826850	排ガス処理装置、ゴミ焼却施設および排ガス処理方法
2019年1月	2019-13754	(審査中)	容器内の加熱構造および温度スイング吸着装置
2019年12月	2019-224324	(審査中)	二酸化炭素回収装置および方法

- ・CO₂分離回収に関わる各種セミナーで講演

発表年月	主催者	セミナー名	発表タイトル
2018年4月	Global CCS Institute	第24回勉強会	炭酸ガス製造の現状と室蘭でのCO ₂ 回収事例の紹介
2018年4月	(株)技術情報センター	CO ₂ 分離回収の技術/研究開発と適用動向セミナー	炭酸ガス製造の現状とユーザー側からみた炭酸ガス回収設備
2021年6月	(株)技術情報センター	CO ₂ 分離回収技術と事業・開発・適用動向 ～CCS・CO ₂ -EORを含めた～	炭酸ガス製造の現状とCO ₂ 分離回収に関する取り組み

2. 研究開発計画／（5）技術的優位性

国際的な競争の中においても技術等における優位性を保有

（補足-7）ガス分離技術[エア・ウォーター]

高効率小型液化窒素・窒素製造装置「VSU」を全国20ヶ所に配備し、地産地消型の産業ガスビジネスを展開。
安定供給と環境貢献を同時に実現。

- ・小型のプラントで、高効率なガス生産を実現
- ・需要近郊での生産による安定供給
- ・輸送距離の大幅削減による物流合理化・環境改善効果
- ・災害に強い供給ネットワークの実現

※ビジネスモデルが2009年資源エネルギー庁長官賞を受賞

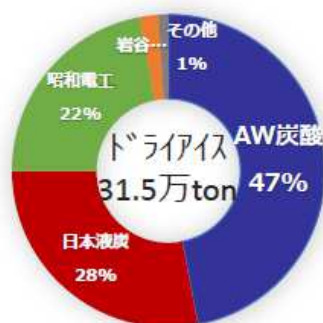


2. 研究開発計画／（5）技術的優位性

国際的な競争の中においても技術等における優位性を保有

（補足-8）国内炭酸ガス事業[エア・ウォーター]

炭酸ガス製造拠点を全国7ヶ所に展開。ドライアイスについては国内シェア 47%。
炭酸ガスユーザを既に保有しており、ユーザの要求仕様などの情報を保有している。



ドライアイス販売シェア
出典：ガスジオラマ2021

エア・ウォーターの炭酸ガス製造拠点



エア・ウォーター炭酸
山陽小野田工場
液300t ドライ90t

エア・ウォーター炭酸
大阪工場
液600t ドライ200t

共同炭酸
ドライ80t

エア・ウォーター
鹿島工場
液130t

近畿炭酸(株)

昭和四日市石油(株)

エア・ウォーター炭酸
大牟田工場
液100t ドライ60t

エア・ウォーター炭酸
川崎工場
液330t ドライ150t

エア・ウォーター炭酸
室蘭工場
液120t

エア・ウォーター炭酸
市原工場
液720t ドライ300t



◎ 自社工場
● 協力工場
● エア・ウォーター炭酸の営業拠点
■ エア・ウォーターの地域事業会社
液00t ドライ00t
液化炭酸ガスとドライアイスの
1日当たりの生産能力

2. 研究開発計画／（５）技術的優位性

国際的な競争の中においても技術等における優位性を保有

（補足-9）遠隔監視・支援システム[エア・ウォーター]

全国各地に設置する約200基以上の産業ガス製造プラントを一元的に集中監視するシステムを2016年に産業ガス製造プラントとして国内初稼働。同年にプレスリリース済み。

当社遠隔監視・支援センターの機能・役割

- ①24時間体制でのガス製造管理の集約化を実現
- ②プラントの運転状況を確認し、計画的メンテナンスを実現
- ③品質保証体制の強化
- ④的確な営業提案を可能とするガス供給量、設備データの蓄積
- ⑤メンテナンス部門における緊急対応力強化



AIR WATER INC.

NEWS RELEASE

2016年3月25日

エア・ウォーター株式会社
(証券コード 4088)
東証一部・札証

国内初となる産業ガス製造プラントの遠隔監視・支援システム稼働について

当社は、全国各地に設置する約230基ある産業ガス製造プラントを一元的に集中監視するシステムを開発し、本年4月より大阪府堺市にて運用を開始いたします。こうした全国規模かつ、24時間体制でのプラントの運転状況や製品品質を一元的に遠隔監視するシステムの導入は、国内初の取り組みとなります。

これにより当社のガス供給は、緊急時においてもより迅速な支援体制が構築され、これまで培ってきたプラントの技術力、ガス供給のバックアップの機動力と相まって、極めて高い水準の安定供給体制が整うこととなりました。

2. 研究開発計画／（5）技術的優位性

国際的な競争の中においても技術等における優位性を保有

（補足-10）海外エンジニアリング体制[エア・ウォーター]

海外に事業拠点を展開しており、その中でも北米を中心にガス関連設備の製造拠点を有している。



【米国】

- ・Air Water America社 : 米国のグループ会社を統括
- ・AW-AMCS社 : 北米エリアにおいて、深冷空気分離装置(ASU)をはじめとする産業ガス関連プラントのEPC事業を展開
- ・TOMCO2 SYSTEMS COMPANY社 : 炭酸ガス関連設備の製造・販売ならびにメンテナンスを提供
- ・Taylor-Wharton America社 : 輸送用低温機器を製造・販売

【マレーシア】

- ・Taylor-Wharton Malaysia Sdn.Bhd社 : 貯槽用の低温容器を製造

<https://www.awi.co.jp/ja/company/base/overseas.html>

<https://www.awi.co.jp/ja/business/other/overseas.html>

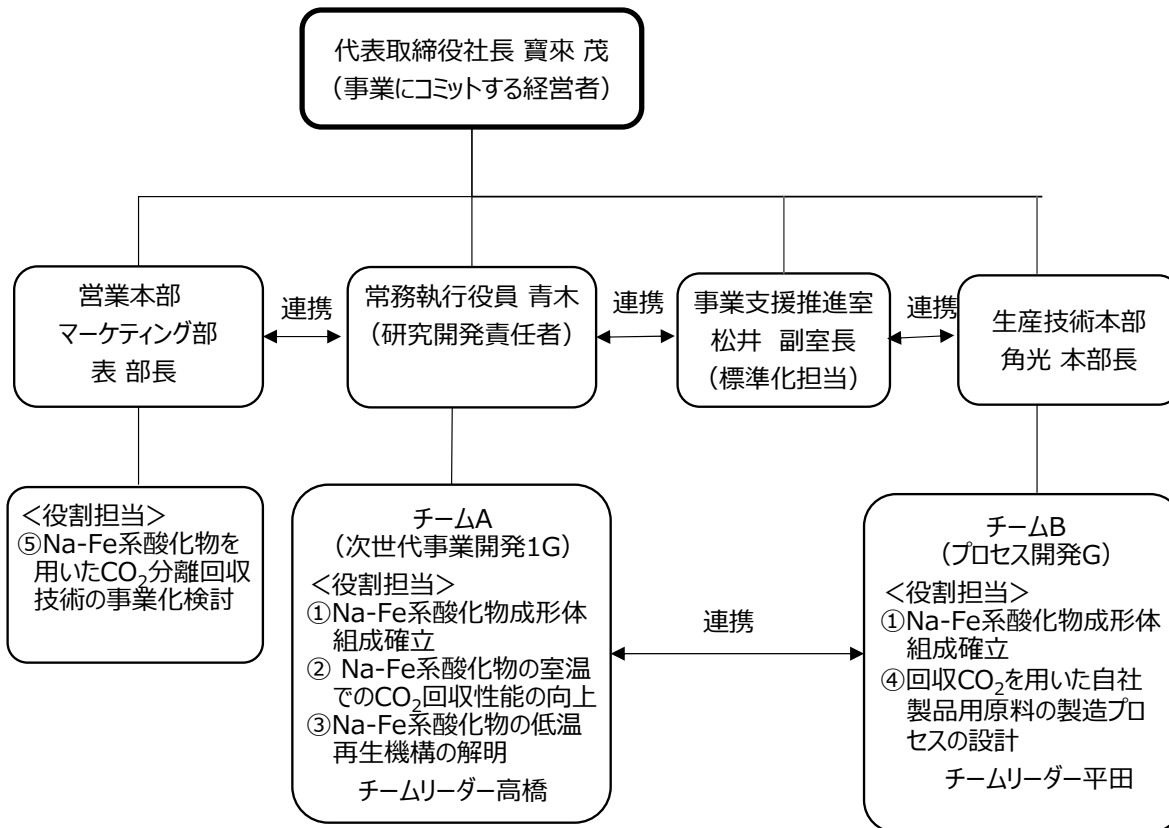
3. 戸田工業株式会社 イノベーション推進体制



3. イノベーション推進体制／（1）組織内の事業推進体制

経営者のコミットメントの下、専門部署に複数チームを設置

◆組織内体制図



◆組織内の役割分担

＜研究開発責任者と担当部署＞

➤ 研究開発責任者

- 青木常務執行役員：高性能Na-Fe系酸化物（CO₂固体回収材）の設計および製造プロセスの確立に関して統括を担当

➤ 担当チーム

- チームA：①Na-Fe系酸化物成形体組成確立、②Na-Fe系酸化物の室温でのCO₂回収性能の向上、③Na-Fe系酸化物の低温再生機構の解明を担当（専任1人、併任2人規模）
- チームB：①Na-Fe系酸化物成形体組成確立、④回収CO₂を用いた自社製品用原料の製造プロセスの設計を担当（併任2人規模）
- マーケティング部 表部長：⑤Na-Fe系酸化物を用いたCO₂分離回収技術の事業化検討を担当（併任1人規模）

➤ チームリーダー

- チームリーダー高橋：数多くの環境関連材料の開発実績を有するとともに、これまで3つの国の研究開発事業（NEDO等）の主要研究者として携わった経験を持っている。また、2件の受賞歴あり。
- チームリーダー平田：これまで数多くの社内製品の製造プロセス設計とプラント穿設に携わってきた実績を有する。
- 標準化担当：松井副室長：これまで数多くの事業の標準化を推進。

＜部門間の連携方法＞

- 3ヵ月に一度、事業会議を開催し、経営層（部門長含む）への報告および協議を行う。
- 定期的（数ヵ月に一度）に部門長レベルで相互の進捗会議を行う⁵⁵。

3. イノベーション推進体制／（2）マネジメントチェック項目① 経営者等の事業への関与

経営者等によるNa-Fe系酸化物を用いたCO₂分離回収事業への関与の方針

◆経営者等による具体的な施策・活動方針

➤ 経営者のリーダーシップ

- CSR Report 2021のトップメッセージにおいて、本事業を含む環境関連材料の事業化の推進を社内外に示しています。

＜CSR Report2021トップメッセージ抜粋＞

2024年度以降は、「Go Beyond 200」として、創業200年を超えてもますます生々発展すべく、環境負荷低減につながる環境関連材料の事業化を計画しています。

- 本事業の重要性や進捗状況に関しては、定期的なIR説明会、プレスリリース、CSR報告書への掲載等を通じて、社内外のステークホルダーへ情報公開を継続してまいります。

➤ 事業のモニタリング・管理

- 本事業は、定期的（3ヵ月ごと）に開催される経営会議体において、経営層（社外取締役含む）に報告し、そこで経営層は進め方や取り組み内容について指示やアドバイスを行います。また、新たに環境戦略会議を発足し、事業面でのフォローも開始しました。
- 本事業の技術内容に関しては、研究開発部門が毎年開催する技術報告会およびポスターセッションで報告され、そこで経営層を含む社内関係者からアドバイス等を受けます
- 本事業に関わる設備投資のうち、重要性の度合いに応じて詳細かつ具体的な付議・報告基準を定め、取締役会、経営会議体の決議または稟議による社長決裁により決定しています。
- また、業務執行責任者及び社内部署長の職務権限、職務分掌等についても、社内規程により明確化し、組織変更等に応じて、常に見直しが行われる仕組みを構築しています。

◆経営者等の評価・報酬への反映

- 本事業の研究開発責任者（執行役員）およびチームリーダー（管理職）は、その成果が業績評価および年俸に反映されます。
- 尚、業務執行を担う社内取締役の報酬については、基本報酬、業績連動報酬および株式報酬から構成され、代表取締役の業績連動報酬については会社業績、またその他の社内取締役については会社業績及び個人業績を総合的に勘案する方式で算定されます。

◆事業の継続性確保の取組

- 当社グループは、環境関連材料を2024年度以降の成長事業とするべく研究開発を加速しています。
- 本事業は、環境関連材料の中でも主要事業として位置付けており、中長期の事業売上計画を策定中です。
- この事業売上計画を達成すべく、今後の本事業の体制（後継者育成を含む）を整備・強化してまいります。

3. イノベーション推進体制／（3）マネジメントチェック項目② 経営戦略における事業の位置づけ

経営戦略の中核にCO₂分離回収事業を位置づけ、企業価値向上とステークホルダーとの対話を推進

◆取締役会等コーポレートガバナンスとの関係

➤ カーボンニュートラルに向けた全社戦略

当社グループは創立200周年となる2023年に向けた3か年計画として、中期事業計画「Vision2023」を策定（2021年8月4日公表）しています。さらに、素材メーカーとして、創業200年を超えてますます発展すべく、2024年度以降のビジョンとして「Go Beyond 200」を掲げて、カーボンニュートラルに繋がる環境関連材料事業の育成に取り組んでいます。

➤ 経営戦略への位置付け

具体的には、2019年に5月に作成した「戸田工業グループ環境ビジョン2033」に基づき、現在、下記の開発活動を実施中です。今回の実施事業も本開発活動の一つとして位置付け取り組みます。

【カーボンニュートラルに向けた取組み①】

- CO₂フリーの高純度水素とカーボンナノチューブを同時に製造できるDMR法の開発に取り組んでおり、エア・ウォーター(株)と事業化に向けた協業を進めています。

【カーボンニュートラルに向けた取組み②】

- EVの世界的な出荷台数の増加に伴い、リチウムイオン電池市場が急拡大しています。資源課題の解決の一助にすべく、リチウムイオン電池の再資源化に向けた開発を進めています。

➤ コーポレートガバナンスとの関連付け

本事業内容に関しては、3か月に一回開催される事業会議（経営層出席）にて報告・協議を行っております。また、本事業の投資に関しては、設備投資審査会（2022/9/6）および経営会議（2022/9/13）で承認を得ております。

◆ステークホルダーとの対話、情報開示

➤ 中長期的な企業価値向上に関する情報開示

- 定期的に機関投資家を対象とした事業報告会を開催しております。説明の内容は、決算の概要・今後の事業見通し・事業ごとのトピックス等です。2020年12月4日開催した事業報告会より当社ウェブサイト上で録画配信を実施しております。また、当社ウェブサイトにてIR資料として決算短信等を掲載しています。
- 本事業に関しては、2022年度CSR Reportにおいて、特集II 価値起点 Innovation 研究開発として紹介しております。
- さらに、本事業が採択された際に、共同実施者との合同プレスリリースを実施しました。（2022/7/7）。

➤ 企業価値向上とステークホルダーとの対話

- 株主の皆様へは、年に1回株主総会後、経営近況報告会を設けて、会社の理解を深めていただけるよう状況報告に努めております。また従業員との良好な関係を構築するために、日々の協議を通じてより良い会社の構築に努めています。また、地域活動にも積極的に参加し、地域との連携を深めています。
- 本事業が採択され、プレスリリースやCSR報告書により説明し、また機関投資家、個人投資家に対してはIR説明会を通じて事業計画等を説明しました。

3. イノベーション推進体制／（4）マネジメントチェック項目③ 事業推進体制の確保

機動的に経営資源を投入し、社会実装、企業価値向上に繋ぐ組織体制を整備

◆経営資源の投入方針

➤ 全社事業ポートフォリオにおける本事業への人材・設備・資金の投入方法

- 当社は従業員402名のうち、研究開発人員が92名を占める研究開発型企業です(2022年11月末時点)。本事業については、2022年度は新たに3名の開発人員を確保いたしました（開発部門内での調整）。本事業で導入する開発検討用装置については、実験棟内を整備し、専用のエリアを確保いたしました。
- 中期事業計画「Vision2023」において3か年で約50億円の設備投資を計画しております。その内、2024年度以降のビジョン「Go Beyond 200」で新規事業化を目指している次世代電子素材材料や環境関連材料等への設備投資として15億円を計画しています。

設備投資内容		Vision2023 投資額（概算）
■増産・増強	電子素材材料の生産能力強化	10億円
■設備更新・改善	既存設備、インフラの維持・更新等	25億円
■新規事業	Go Beyond 200に向けた投資 (次世代電子素材材料、環境関連材料等)	15億円
合計		50億円

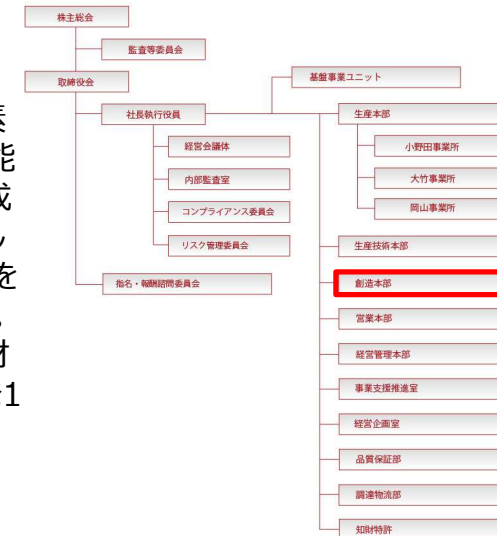
➤ 機動的な経営資源の投入、実施体制の柔軟性の確保

- 当社グループでは、代表取締役社長執行役員を委員長として、執行役員を中心に構成するリスク管理委員会を設置し、当社グループの顕在化しつつあるリスクについて定期的（月一回）に議論しております。リスク管理委員会は、リスク管理活動について取締役会に報告を行い、取締役会は当社グループ全体のリスクを網羅的、継続的に監視する体制の整備を進めております。その管理活動の中で、市場の動向分析に基づく継続的な研究開発体制の見直しや、開発テーマの選択と集中を高めるための組織改革により、事業開発のスピードアップや営業力の拡充を図ります。
- 当社グループで不足している技術・ノウハウや開発人員については、公的機関や民間企業と協業体制を構築することで補強してまいります。

◆専門部署の設置と人材育成

➤ 専門部署の設置

- 当社グループの事業セグメントは、磁石材料、誘電体材料などの「電子素材」と、顔料、環境関連材料の「機能性顔料」の2つ事業セグメントで構成しております。また研究開発部署として、現業事業の総括的に研究開発を担う「創造本部」を設置しております。
- この創造本部の中には、環境関連材料専門の開発部署「基礎技術開発1グループ」を設置しており、そこで本事業の開発を行っております。



➤ 人材の育成（含む標準化戦略人材）

- 当社は以前から大学等との公的研究機関との積極的な交流を行っており、これまで多くの若手研究員が大学派遣の経験や社会人ドクター制度による博士号を取得しています。
- カーボンニュートラルに寄与する製品・技術開発を推進すべく、全従業員に対してCSR等の環境教育を定期的の実施しております。
- 環境関連材料の研究開発人員は、カーボンニュートラル、カーボンリサイクルに関する各種セミナー、講演会への参加を通じて最新の技術情報を入手するとともに、大学、他企業の研究者との人的交流を図っております。社内では技術報告会を通じて、本事業をプレゼンする機会を作っております。⁵⁸

4. その他

4. その他／（１）想定されるリスク要因と対処方針

リスクに対して十分な対策を講じるが、不測のコスト増等の事態に陥った場合には事業中止も検討

研究開発（技術）におけるリスクと対応

- Na-Fe系酸化物の性能未達によるリスク
 - 装置側から設計を見直す
 - 他用途展開の可能性を探索
- 優れた他社製品が現れ、業界を席捲
 - Na-Fe系酸化物の利点を多方面から研究
 - 他用途展開の可能性を探索
- 安定した品質の量産技術を確立できないリスク
 - 外注生産等のアウトソーシング
- 知的財産を確保できないリスク
 - 戦略的な特許出願継続
 - 他社特許が出てきた場合はクロスライセンス

社会実装（経済社会）におけるリスクと対応

- 原料高騰のリスク
 - 多元的な購入先の確保（BCP対策）
- 量産設備部材調達不可のリスク
 - 多元的な購入先の確保（BCP対策）
- 輸送費高騰のリスク
 - 販売価格に転嫁（ユーザーと交渉）
- システムを販売できないリスク
 - ライセンスによる契約事業
- 日本でのカーボンサイクル衰退
 - 海外ユーザーへの展開
- 法制度改定のリスク
 - 事前調査及び確認
- 地域住民からの反対リスク
 - 事前説明会の実施

その他（自然災害等）のリスクと対応

- 台風・大雨などによるリスク
 - 生産拠点をどこでも行えるよう装置、操作の標準化（BCP対策）
- 資金調達リスク
 - 金融機関との連携強化
- 担当者退職のリスク
 - 技術の継承準備
- CO₂分離回収が不要になるリスク
 - 自社消費を検討
- 組合ストライキのリスク
 - アウトソーシングができるよう装置、操作の標準化



● 事業中止の判断基準

- 想定以上の製造原価の高騰や設備投資金額の増大により、事業利益の確保が困難となった。
- 開発、実証段階において、目標とするCO₂分離回収率が得られない、CO₂固体回収材の耐久性が著しく悪い、などの理由により、CO₂分離回収コストが想定以上に高くなった（競合技術に対する優位性がなくなった）。
- 非常に低コストで優れたCO₂分離回収技術は出現して、当方の技術が市場で受入れられないと判断した。
- 会社の経営状況が悪化して、本CO₂分離回収事業に資金投資できない状況となった。