

「二酸化炭素回収技術高度化事業 (二酸化炭素固体吸収材等研究開発事業)」 の概要

平成27年12月10日

産業技術環境局環境調和産業・技術室

目 次

1. 事業の概要
2. 事業アウトカム
3. 事業アウトプット
4. 当省(国)が実施することの必要性
5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ
6. 研究開発の実施・マネジメント体制等
7. 費用対効果

1. 事業の概要

(1) 事業の目的・内容

本事業は、地球温暖化対策の重要なオプションとして国内外に認識されている二酸化炭素回収・貯留(CCS)において、大規模発生源である石炭火力発電所を対象に、低エネルギー・低コスト型のCO₂分離回収技術の開発を目的とする。

CCS技術開発の現状を勘案し、CO₂分離回収技術の高度化を目的に、化学吸収液をベースにした固体吸収材の開発及びプロセスシミュレーション技術の高度化を実施する。

(2) 実施形態等

- ・実施形態： 委託
- ・期間： 平成22年度～平成26年度(5年間)
- ・総事業費： 8.39億円
- ・実施者： 公益財団法人地球環境産業技術研究機構

1. 事業の概要

概 要

CCSは地球温暖化対策の重要なオプションとして国内外に認識されているが、実用化に当たっては実施に要するコストの大部分を占めるCO₂の分離回収に係るコストの低減が課題となっている。本事業では、CO₂の分離回収エネルギー・コストを大幅に削減するため、米国国立研究所と共同して、二酸化炭素固体吸収材等に関する基礎研究を行い、低エネルギー・低コスト型の革新的なCO₂分離回収技術の開発を行う。

実施期間

平成 22 年度～平成 26 年度 （5年間）

予算総額

8.39億円(委託)

(平成22年度:1.74億円 平成23年度:0.98億円 平成24年度:1.35億円
平成25年度:1.3億円、平成26年度:3.02億円)

実 施 者

公益財団法人地球環境産業技術研究機構

プロジェクト リーダー

公益財団法人地球環境産業技術研究機構
中尾 真一(化学研究グループリーダー)

2. 事業アウトカム

事業アウトカム(目標値)	達成状況	原因分析(未達成の場合)
(事業開始時) ・吸収液に替わる新規CO ₂ 分離回収技術の技術開発分野の確立	「達成」 NETLと研究体制を構築し、高性能な固体吸収材を開発。	—
(中間評価時) ・実用化への展開イメージ策定	「達成」 事業目標達成までのロードマップを策定	—
(事業終了時) ・実用化への展開イメージの具現化	「達成」 事業の中で、実用化に向け、民間企業との連携を開始した。	—
(事業目的達成時) ・実用化研究への移行	「達成」 平成27年度から実用化研究を開始した。	—

3. 事業アウトプット

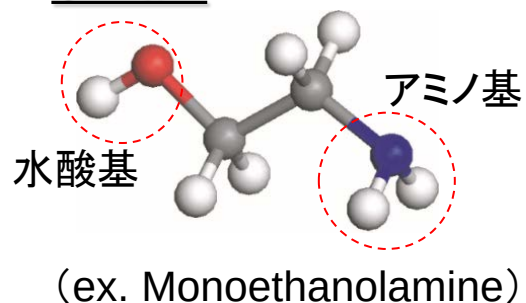
事業アウトプット(目標値)	達成状況	原因分析(未達成の場合)
(事業開始時) ・NETLとの研究協力構築	「達成」 平成22年3月にNDA、平成24年3月にCRADAを締結し、NETLと協力体制を構築した。	—
(中間評価時) ・CO ₂ 吸脱着量差: 2.9mol/kg以上 ・分離回収エネルギー: 2.5GJ/t _{CO2} 以下	「達成」 CO ₂ 吸脱着量差4.7mol/kg、分離回収エネルギー2.1GJ/t _{CO2} と目標以上の成果を得た。	—
(事業終了時) ・分離回収エネルギー: 1.5GJ/t _{CO2} 以下 ・回収コスト: 2,000円台/t _{CO2} 以下	「達成」 分離回収エネルギーおよび回収コストの両指標ともに目標を達成した。	—

目標・指標及び成果・達成度

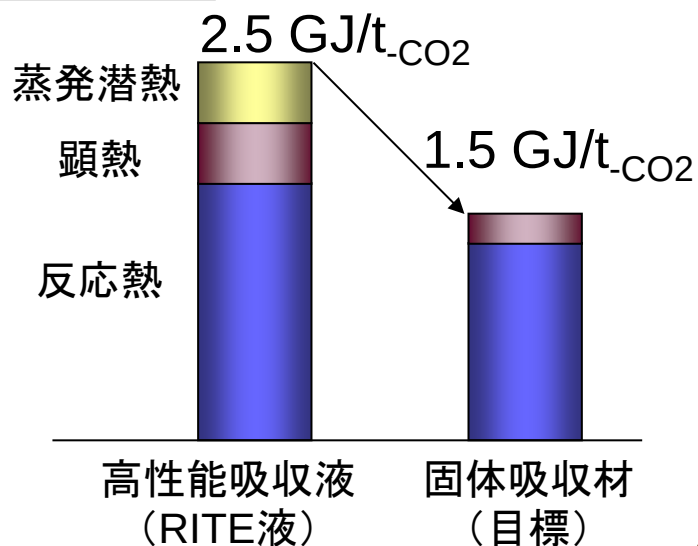
要素技術	目標・指標 (事後評価時の目標)	成果	達成度
(1) 新規固体吸収材の開発			
新規固体吸収材の材料開発	CO ₂ 吸脱着量差 > 2.9 mol/kgの固体吸収材を開発する。	吸着量 (6 mol/kg) の材料を開発。低温再生に優れた固体吸収材を開発した。CO ₂ 吸 脱 着 量 差 (working capacity) 3.5 mol/kgを達成した。世界トップレベル	達成
新規固体吸収材のプロセス検討	分離回収エネルギー 1.5 GJ/t _{CO2} 達成の目処をつける。	シミュレーションにより、世界トップレベルの分離回収エネルギー1.5 GJ/t _{CO2} に見通しを得た。	達成
(2) プロセスシミュレーション技術の高度化			
CO ₂ 分離回収プロセスのプロセスシミュレータ構築	先進的なアミン吸収剤を用いたCO ₂ 回収技術のプロセスシミュレータを構築する。	高性能な化学吸収液や新規固体吸収材を評価し得るプロセスシミュレーション手法を構築した。	達成
アミン吸収剤特性の発電システムへの影響検討	新規固体吸収材によるCO ₂ 分離回収技術の評価し、回収コスト低減の可能性を示す。	従来コストを大幅に低減し、CO ₂ 回収コスト2,000円台/t _{CO2} の可能性を示した。	達成

固体吸収材の開発

アミン



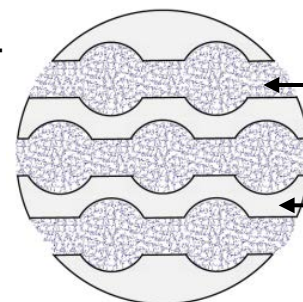
期待効果



研究開発

新規材料開発

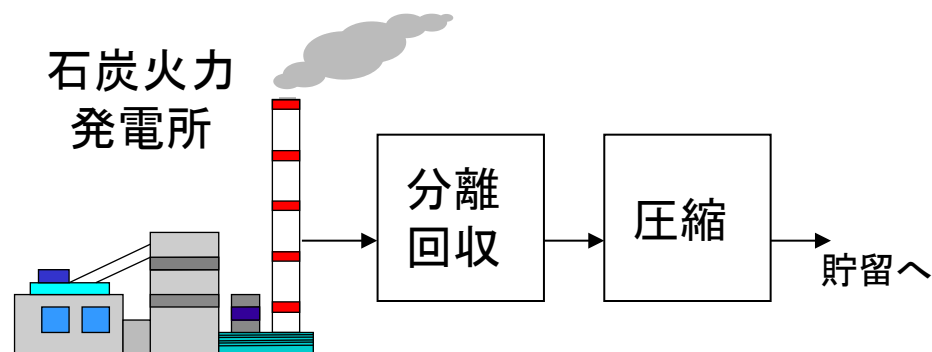
固体吸収材



アミン吸収剤

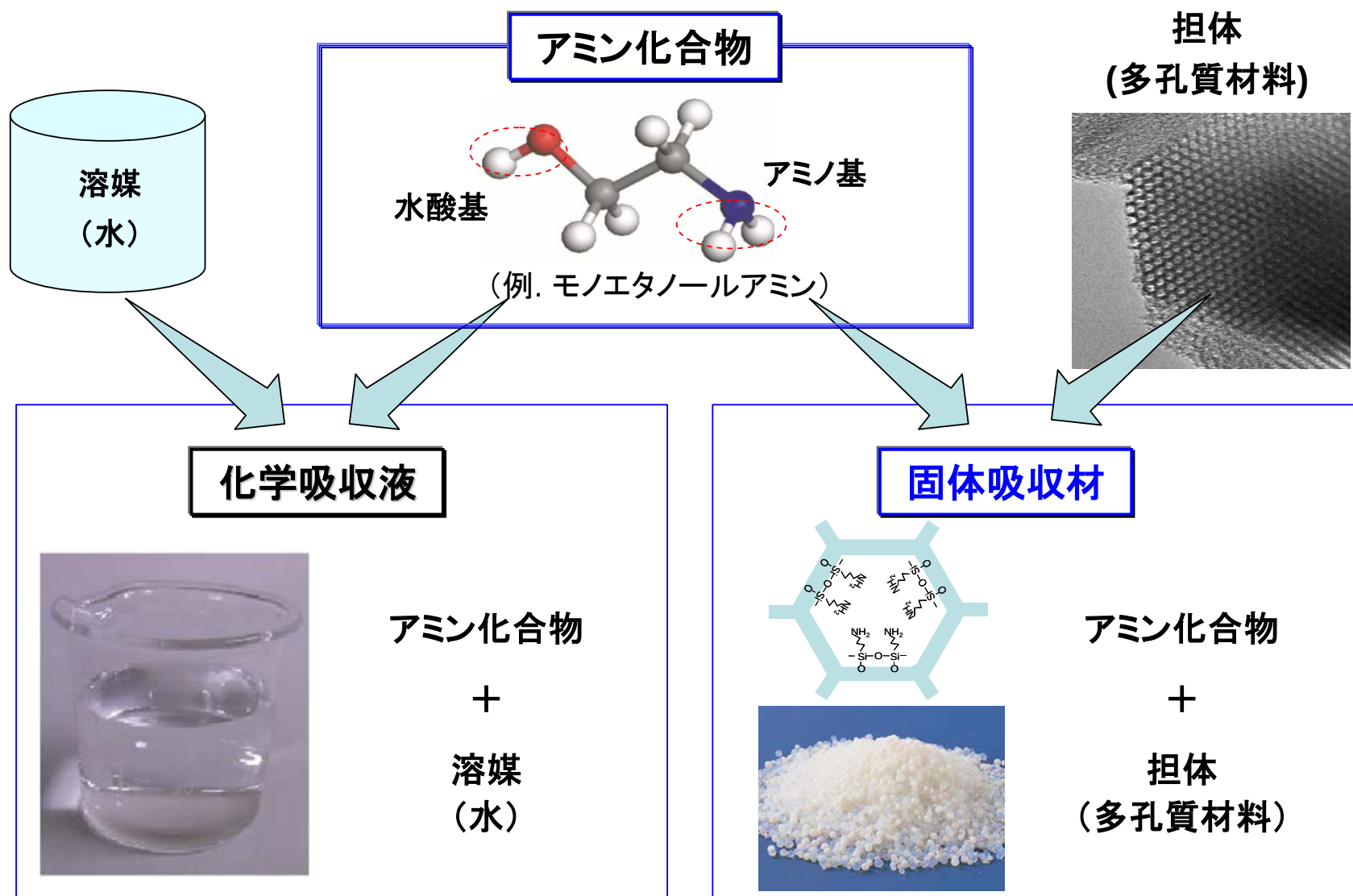
多孔質担体

システムレベルの性能評価手法開発



目標： 石炭火力発電所の燃焼排ガスに対して CO_2 分離回収エネルギー： $< 1.5 \text{ GJ/t-CO}_2$

固体吸収材とは



再生時に比熱の大きい水を加熱する必要が無いいため、エネルギーの低減が可能

新規アミンの設計・合成

配座解析



密度汎関数法



振動解析

298 K



G



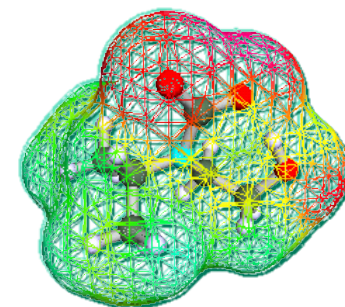
H

半経験的分子軌道法 (PM6)

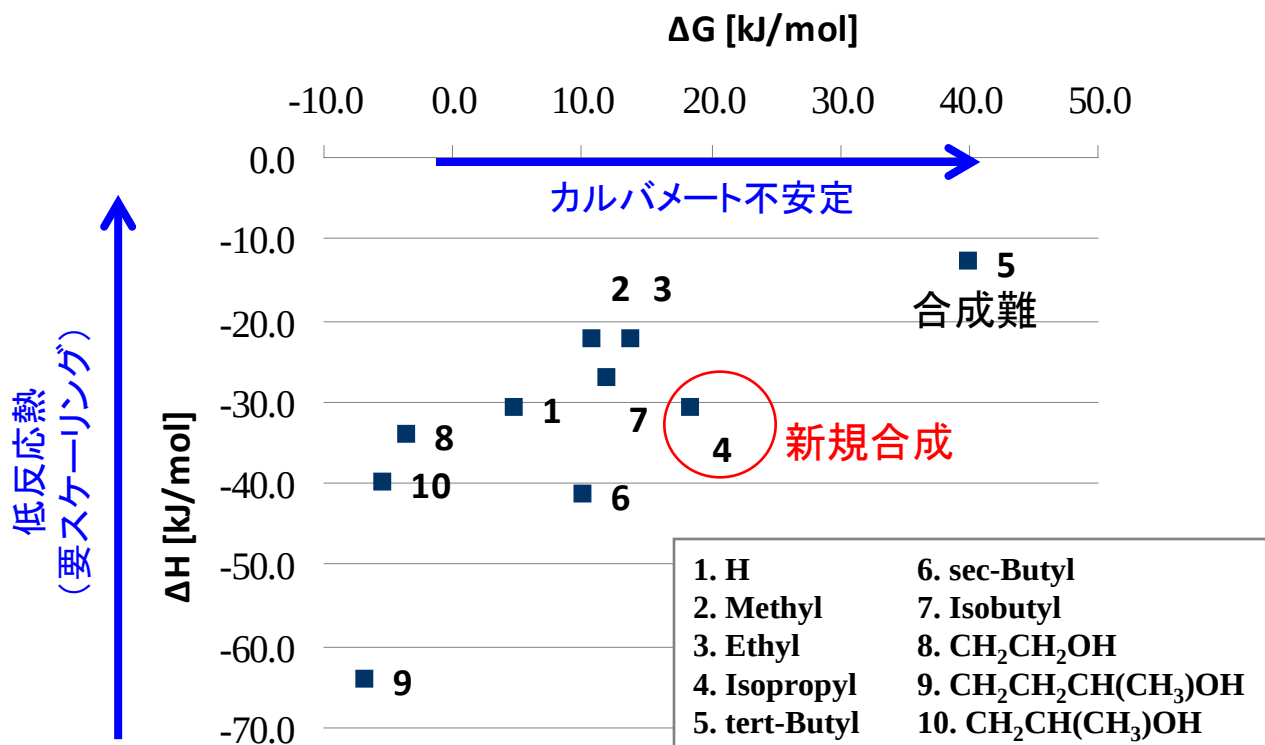
構造最適化 (水和モデル)

最安定配座探索 (孤立分子)

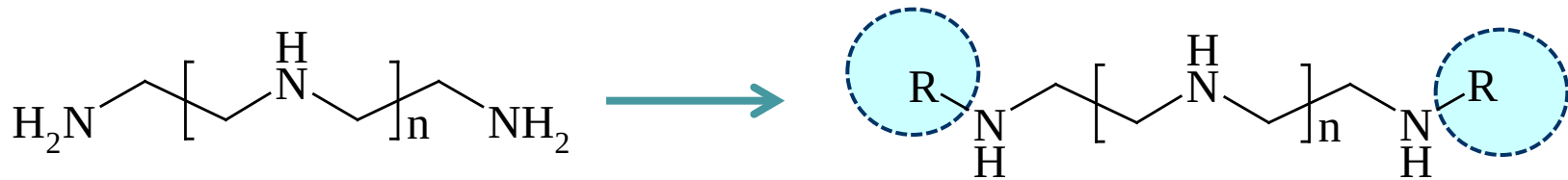
SMD/B3LYP/6-31G(d)



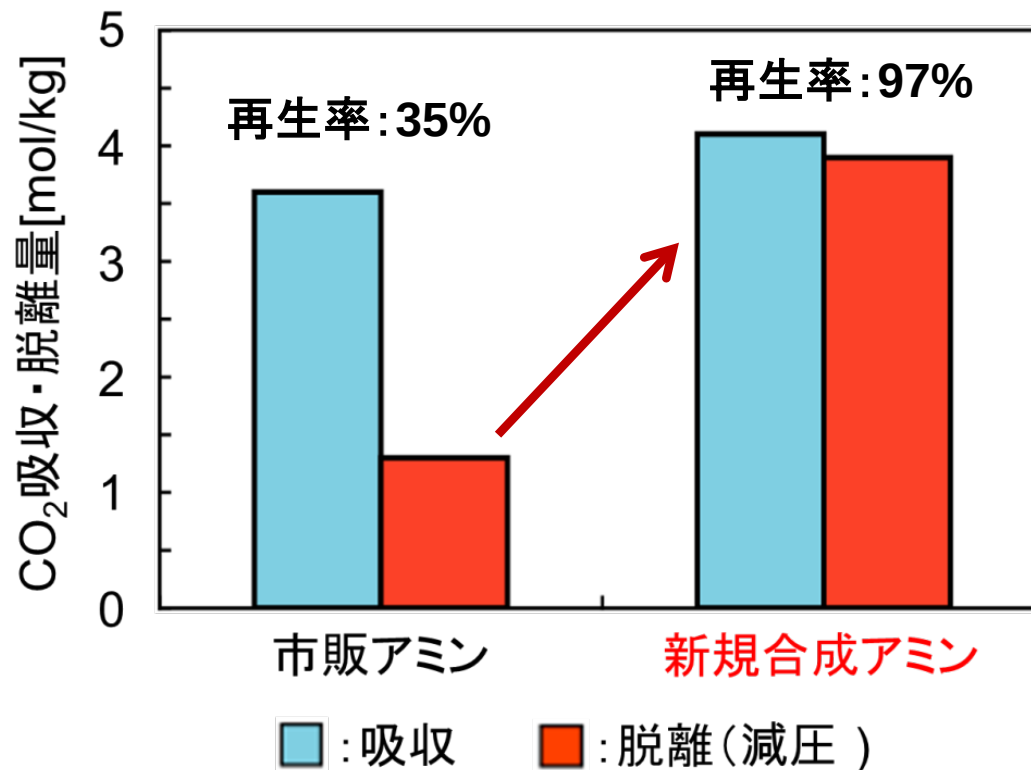
モデル反応



新規アミンによる性能向上



置換基導入



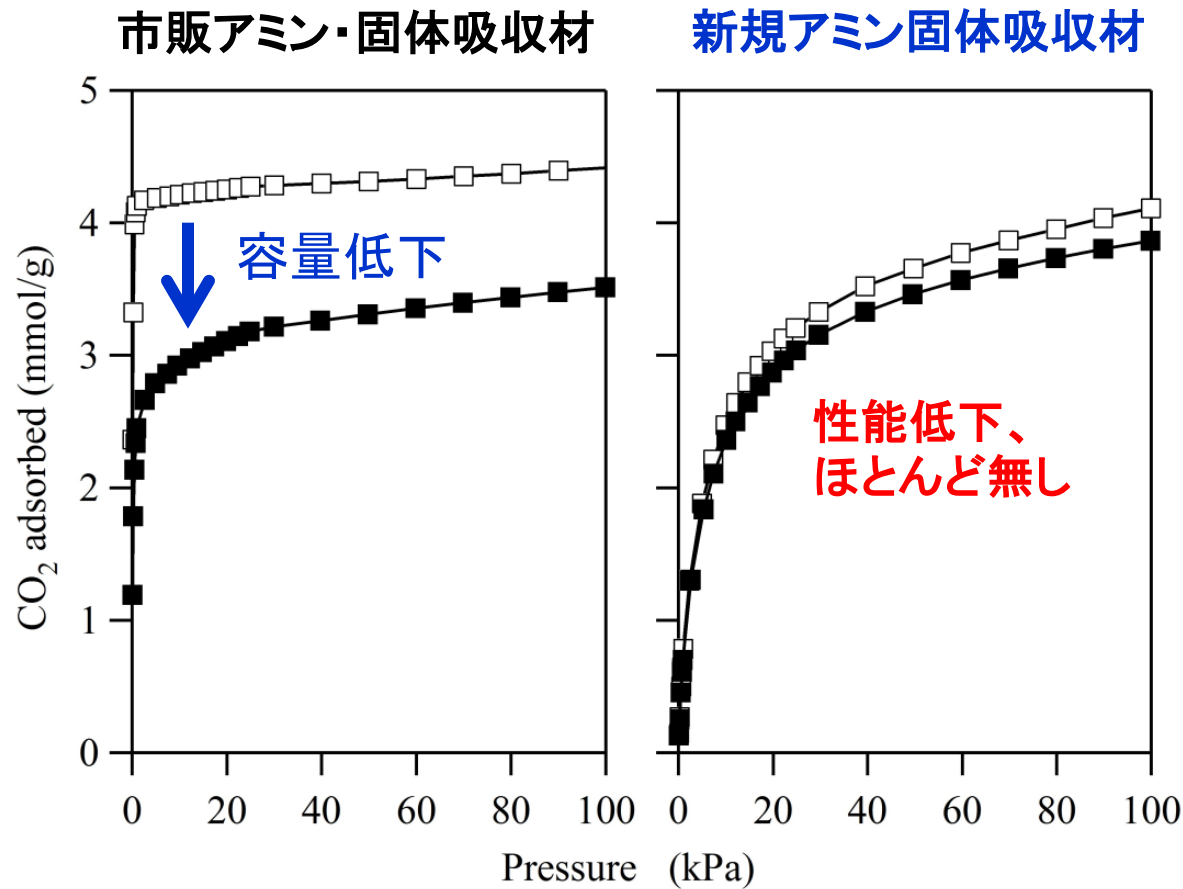
回収容量を飛躍的に向上
(国際特許出願済)

アミンの耐化劣化性向上

耐酸化劣化試験

空気: 30 mL/min, 16 h

温度: 80°C



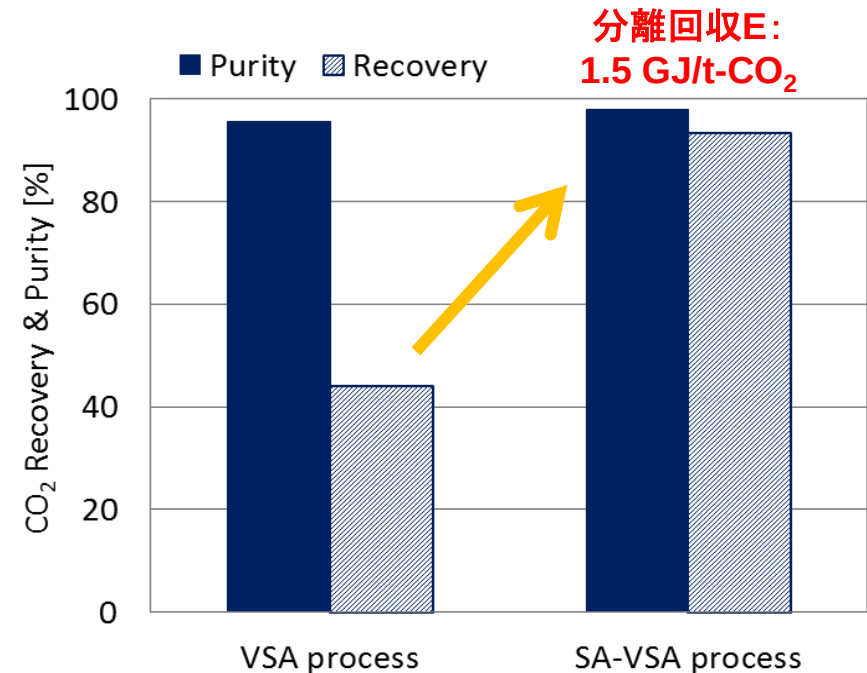
新規合成アミンによって、
耐酸化劣化性も向上
→ コスト低下に期待

CO₂連続回収試験

プロセス・操作条件の最適化



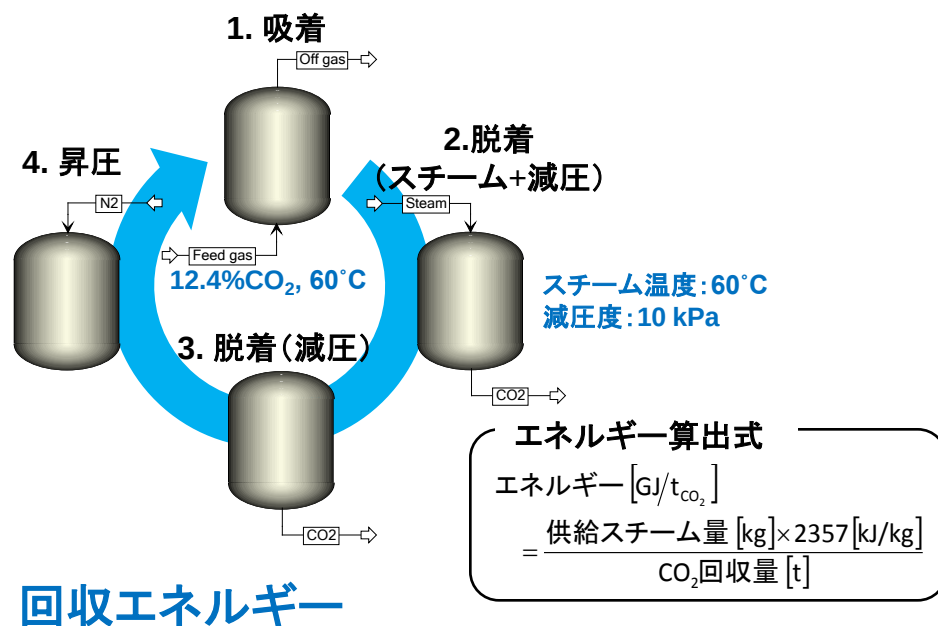
新規固体吸収材のCO₂回収性能(実測値)



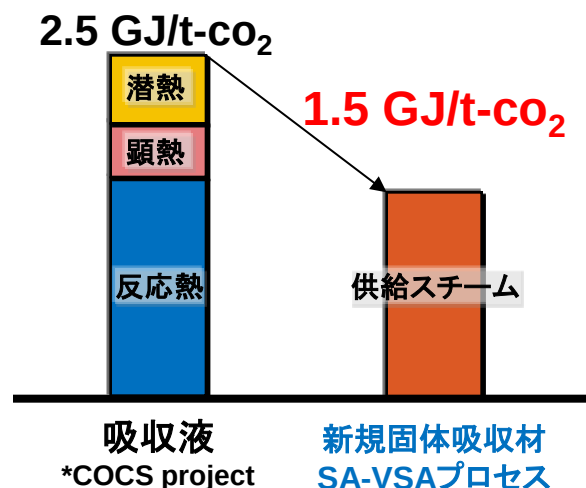
- ▶ 脱着工程でスチームを供給するSA-VSA (Steam-aided vacuum swing adsorption) プロセスの適用により、回収率が飛躍的に向上
- ▶ 約3ヶ月の試験において、性能低下は確認されなかった
- ▶ 回収純度98.1%、回収率93.4%で湿潤ガス(11-12%CO₂)からCO₂を回収
→RITE固体吸収材が優れたCO₂分離回収性能を有することを実証

プロセスシミュレータによる分離回収エネルギー評価

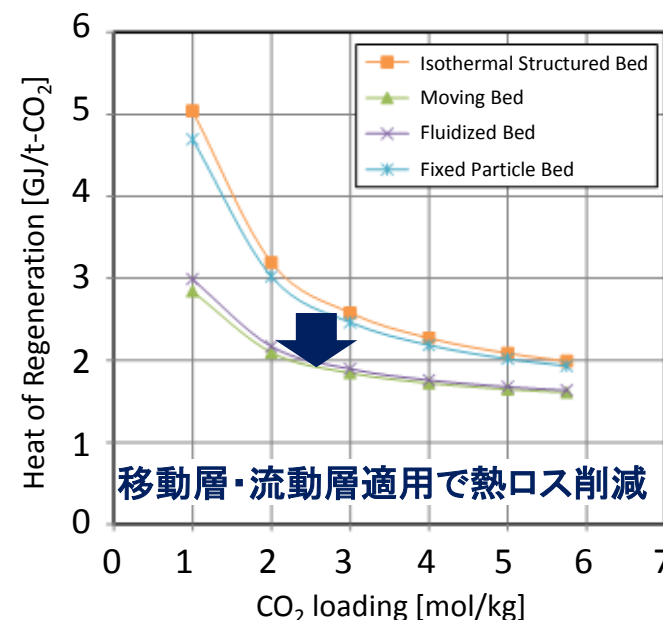
吸着シミュレーション(Aspen Adsorption)



回収エネルギー



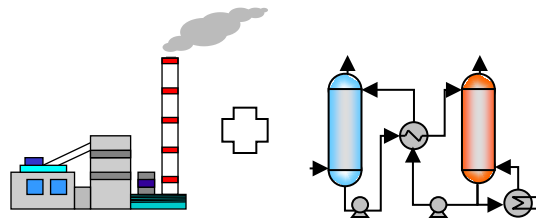
NETLの試算結果*



- ▶ 回収エネルギー1.5 GJ/t-CO₂を達成可能 (回収率>90%)
- ▶ 低温(60°C)蒸気・廃熱の利用が可能(吸収液、NETLアミン系固体吸収材は100~120°C)
- ▶ 移動層・流動層プロセスへの適用で、更なるエネルギー低減の可能性

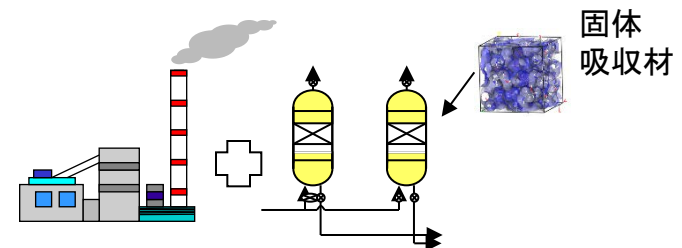
プロセスシミュレーション技術の高度化

①システムレベルの 性能評価技術開発



アミン吸収剤評価の指針となる
技術情報を提示し、実用化促進を図る

②石炭火力発電所を対象とする 新規固体吸収技術の開発



回収コスト2,000円台/t-CO₂を目標とする

① CO₂分離回収プロセスのプロセスシミュレータ構築

- ・ CO₂分離回収プロセスの試験データの蓄積
- ・ アミン吸収剤の物性及び反応のモデル化とプロセスシミュレータ構築

② 石炭火力発電所を対象とする新規固体吸収材のプロセス評価

- ・ 固体吸収材を用いたCO₂回収技術の
発電システムにおけるのエネルギー性能および回収コスト評価

プロセス試験データの蓄積

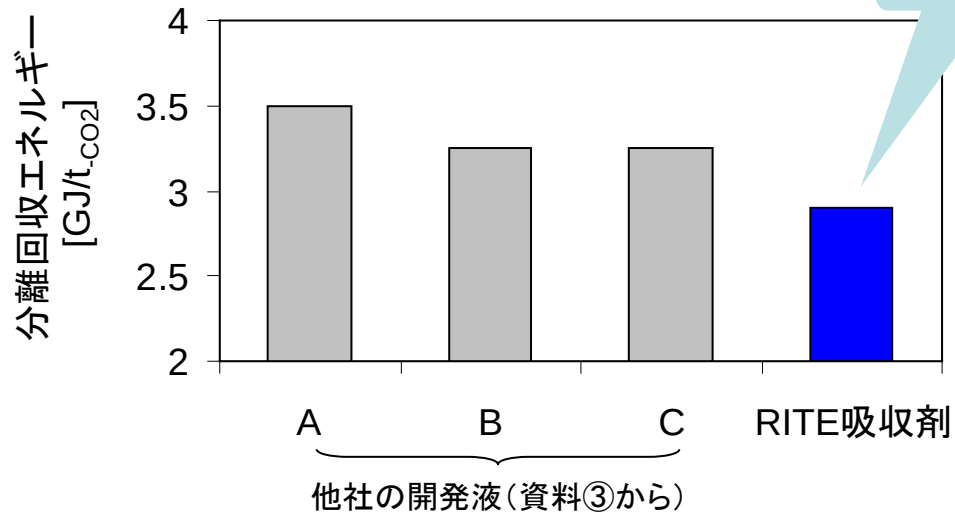
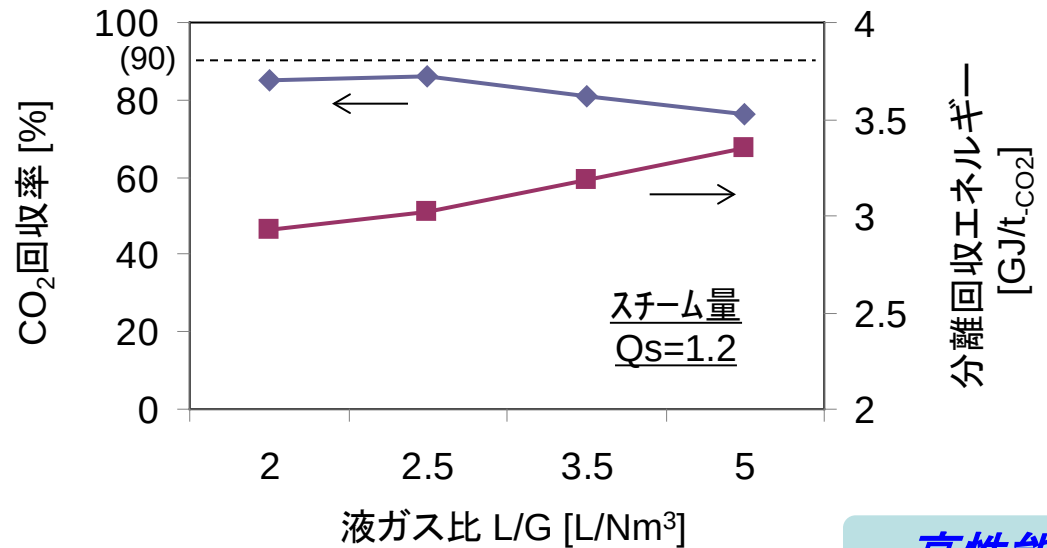
液ガス比・スチーム量を変更した試験操業を実施



10 t/d規模パイロットプラント
(委託:株東芝)

- ・石炭焼きボイラ排ガス
- ・2100 Nm³/h
- ・約12%_{-CO2}

(資料①②から)



ref.) ①北村ら、東芝レビュー、65 (2010) 31-34, ②東芝、http://www.toshiba.co.jp/about/press/2009_09_j2901.htm
③1st IPACC, May 2011, Abu Dhabi

分離回収エネルギーのシミュレーション評価

(1) 物性および反応のモデル化

一般的なアミン吸収剤
(MEA, MDEA等)

先進的なアミン吸収剤
(企業等の開発液相当)

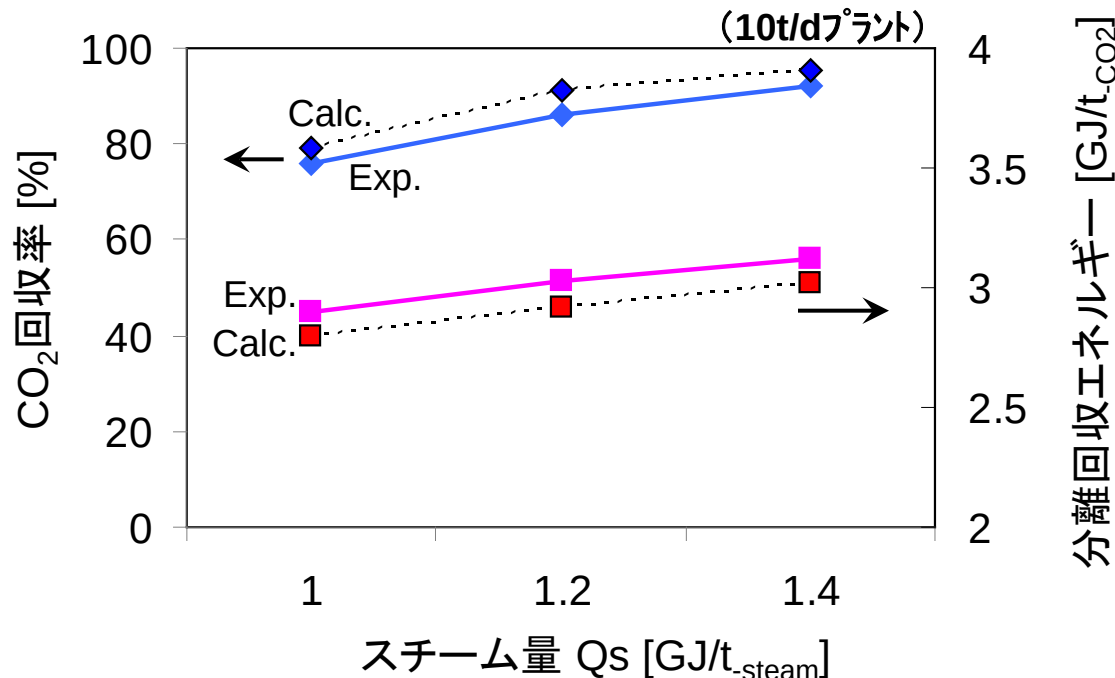
(物性および反応)

- ・電解質反応
- ・物性値
密度、
粘度、
反応熱、等

先進的なアミンのCO₂吸収反応

- (1) $IPAE^+ + H_2O \leftrightarrow IPAE + H_3O^+$
- (2) $CO_2 + 2 H_2O \leftrightarrow HCO_3^- + H_3O^+$
- (3) $HCO_3^- + H_2O \leftrightarrow CO_3^{2-} + H_3O^+$
- (4) $IPAE COO^- + H_2O \leftrightarrow IPAE + HCO_3^-$
- (5) $2 H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + OH^-$

(2) プラント試験のシミュレーション結果

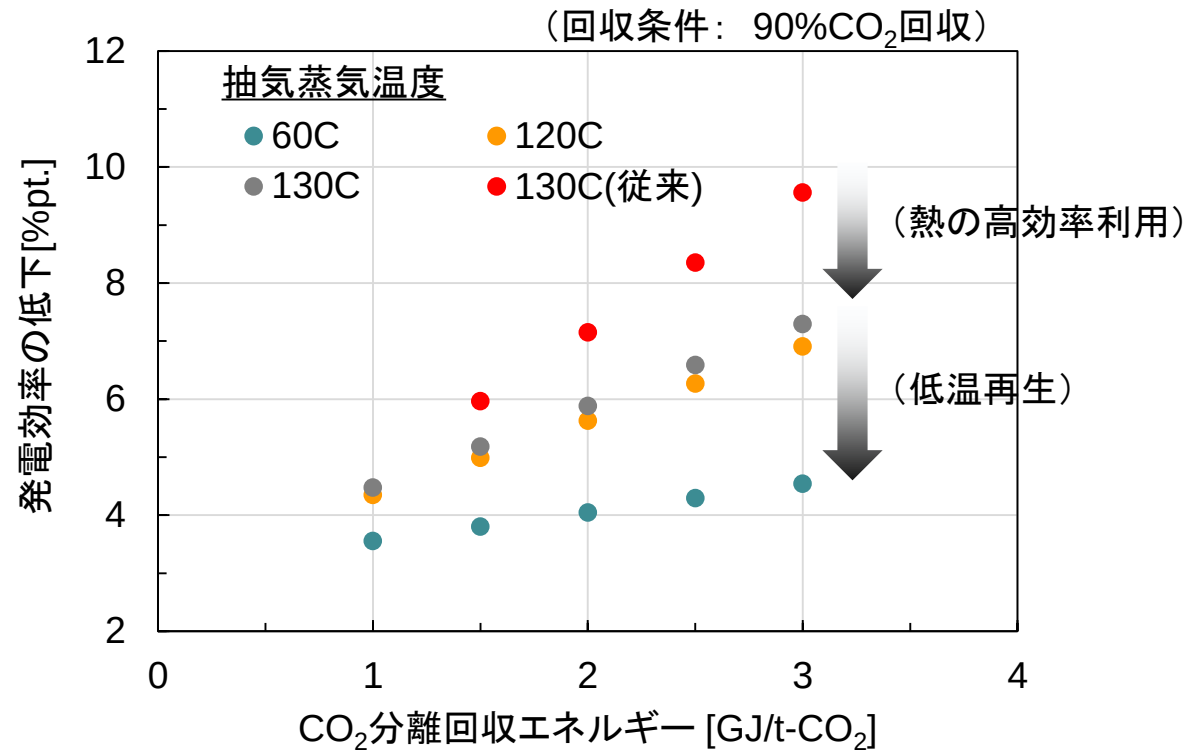
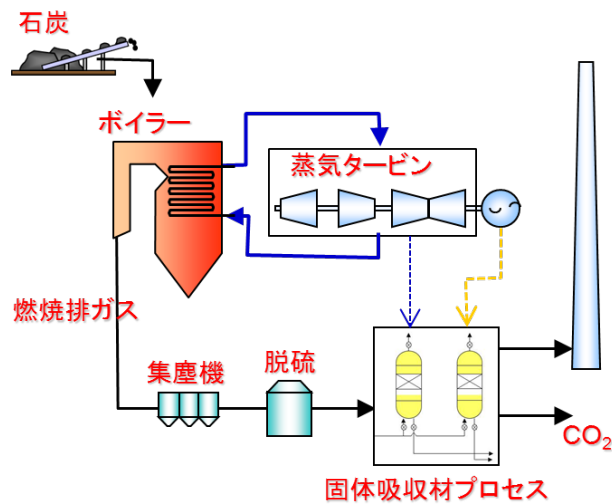


実験値との
誤差5%以下

先進的なアミン
吸収剤のモデル
化が可能

分離回収プロセスの発電効率への影響

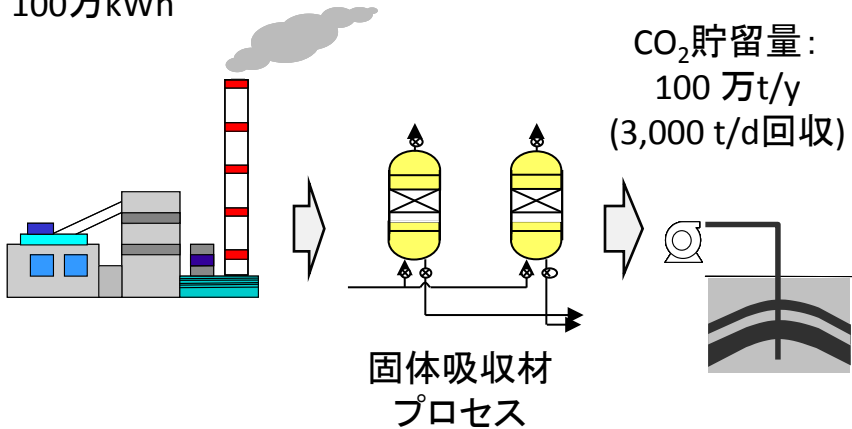
CO₂回収技術の発電効率への影響(90%回収)



- ・ CO₂分離回収エネルギーの低減により、発電効率の低下を抑制出来る。
- ・ 抽気温度を低くすることにより、更に発電効率の低下が小さくなる。
- ・ 回収コスト¥2,000台/t-CO₂達成見込みを得た。

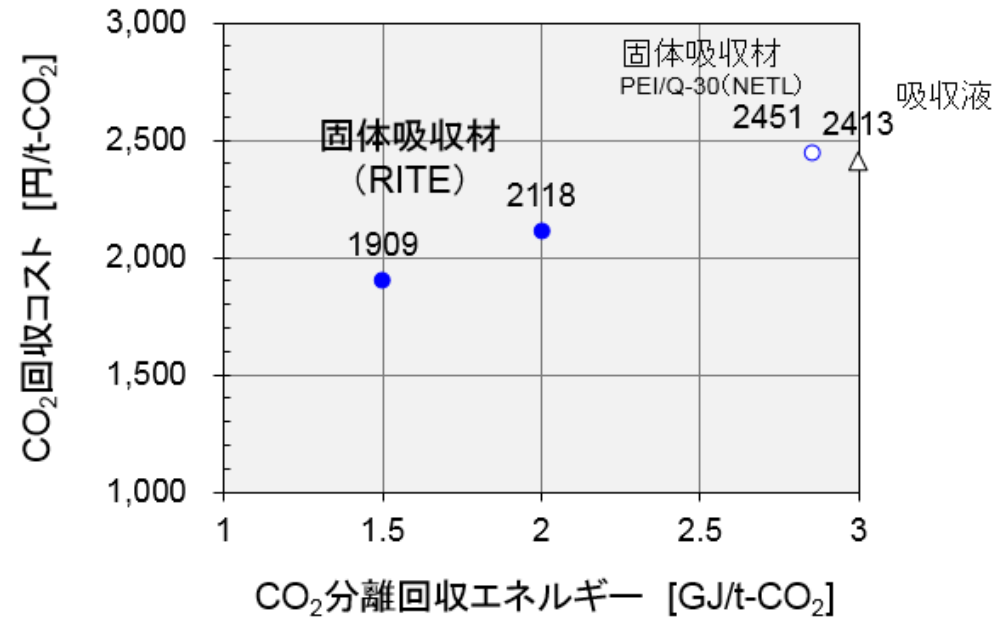
分離回収コストの評価

石炭火力発電所
100万kWh



$$\text{CO}_2\text{回収コスト} \quad (\text{¥/t-CO}_2) = \frac{\text{固定費} + \text{変動費}}{\text{CO}_2\text{回収量}}$$

(固定費) ・回収設備費 ・修繕費
・固体吸収材費 ・メーカーアップ費
(変動費) ・再生用蒸気 機器動力



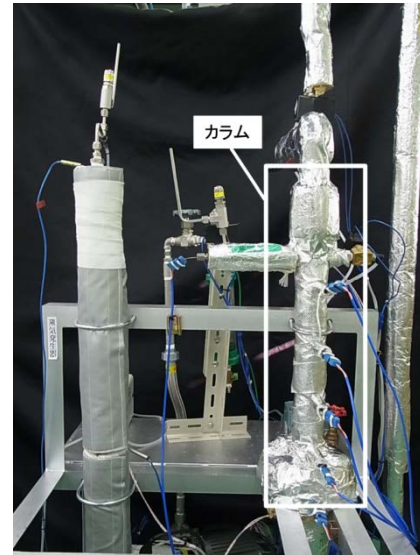
新規固体吸収材は、
低CO₂分離回収エネルギー(1.5GJ/t-CO₂)、
低CO₂回収コストを達成している。

民間企業による評価

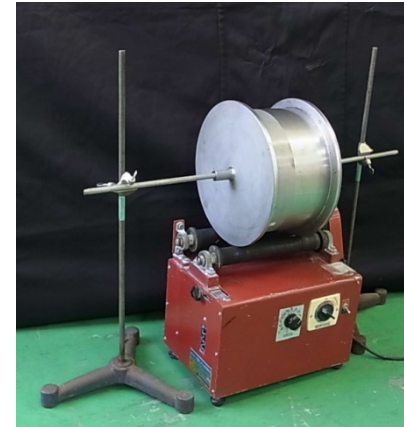
「RITE固体吸収材の実用化に向けての試験評価」
平成27年2月27日 川崎重工業(株)



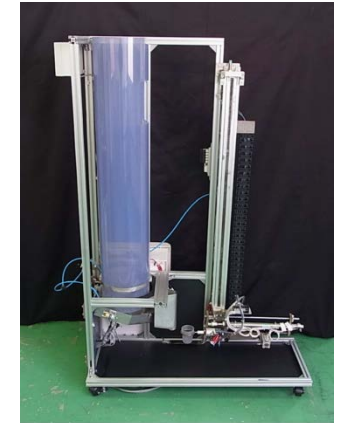
CO₂吸収試験



蒸気再生試験



摩耗試験



落下試験

・新規アミン固体吸収材は優れたCO₂吸収性能および再生性能を持つ

・担体の選択が強度に影響する

→ 実用化に向けて、今後、長時間運転時の性能低下の有無とその要因を把握する必要がある



圧壊強度確認試験

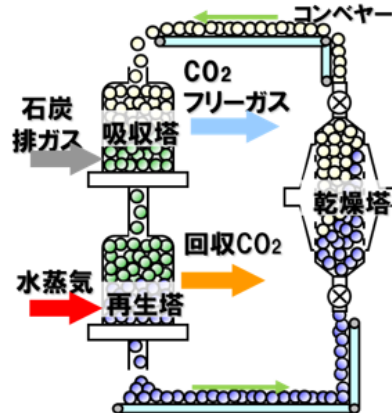
実用化に向けた準備検討

本事業の成果

- ・低温脱離性能に優れた材料の開発(特許出願)
- ・分離回収E < 2GJ/t- CO_2 を達成, 1.5GJ/t- CO_2 、2,000円台/t- CO_2 の見通しを得た
- ・実用化研究にむけて民間企業との連携体制を構築

実用化研究フェーズ

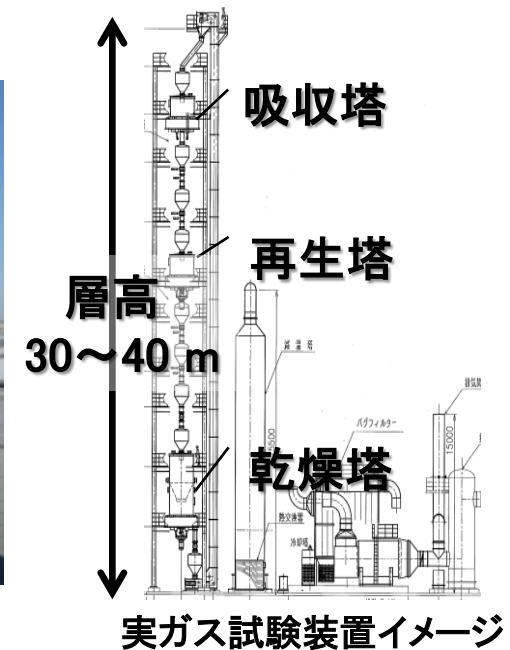
川崎重工業(株)移動層への適用、実用化検討



移動層システム



KCC移動層ベンチ試験装置

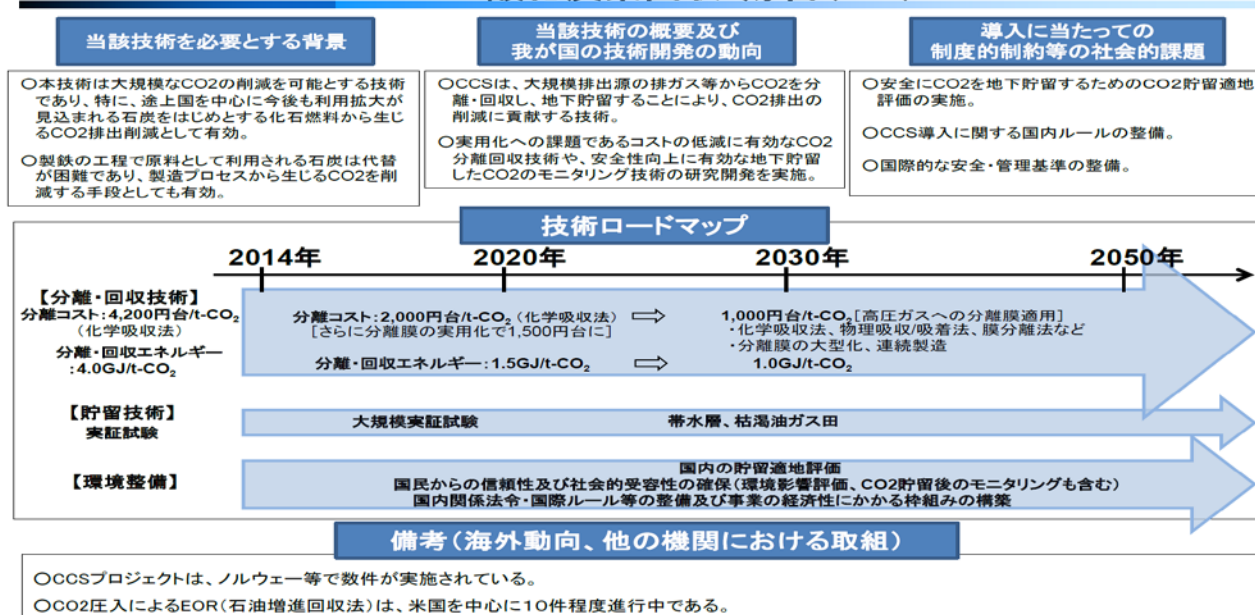


- 1) 移動層システムによる革新的なCO₂分離回収技術の開発
- 2) H27年度以降、民間企業と共同で実用化

4. 当省(国)が実施することの必要性

エネルギー関係技術開発ロードマップ（平成26年12月）

1.1. 二酸化炭素回収・貯留（CCS）



国の関与の必要性

CCSは、追加的エネルギーコストをかけてCO₂を削減するといった点において省エネルギーや再生可能エネルギーとは異なるタイプの技術である。このため、CCSの導入は経済的インセンティブが働かない温暖化対策に特化した方策であるなど、CCSの実用化に当たっては、解決すべき課題が多い。

技術開発によるコストダウンや高効率化のほか、法制度の整備、環境対応、社会的受容性の構築といった課題を解決する必要があり、国が実施する必要がある。

5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ

二酸化炭素固体吸収材等研究開発事業

プロジェクトの成果目標

CO₂回収エネルギーの少ない固体吸収材の開発

アミン吸収剤のプロセス評価手法構築

CO₂分離回収コストの大幅低減

目的達成までのシナリオ

直接アウトカム（直接カスタマー）

パイロット規模での実用化試験



カスタマー

火力発電所

製鉄所

ボイラー使用者等

間接アウトカム・インパクト

CO₂分離回収技術コスト半減(2015年)
(2,000円台/t_{CO2})



火力発電所等の大規模排出源における
CCSの実適用(2020年頃)

波及効果

・ 先進的なCO₂吸収液の実用化促進 ・ 閉鎖空間等でのCO₂除去への応用 ・ 水蒸気存在下でのCO₂分離への応用

5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ(発電)

“石炭火力発電所からの二酸化炭素分離回収”

基盤技術研究 フェーズ

(本事業)
(学術研究成果)

2010~2014



ラボ試験
(数kg/day)

RITE
CO₂連続回収
試験装置

実用化研究 フェーズ

(先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発事業)
(学術研究成果を踏まえた民間企業との事業化研究)

2015

2016

2017

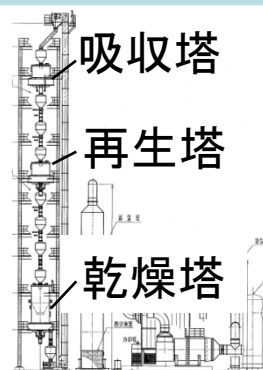
2018

2019



ベンチ試験
(数t/day)

川崎重工業(株)
KCC移動層
ベンチ試験装置



吸収塔
再生塔
乾燥塔
燃焼排ガス実ガス試験
(数十t/day)

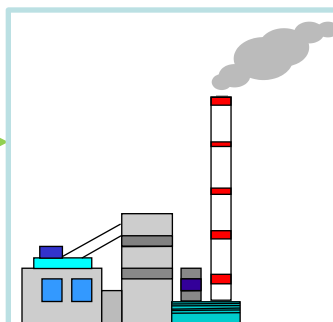
実証・商用化 フェーズ (補助事業)

2020~

大規模
CCS

石炭火力プラント

+ 制度的仕組みの導入



石炭ボイラ
排ガスへ適用
(3000t/day)

波及効果

【本プロジェクトの成果】

低CO₂回収エネルギー・低コスト型の新規固体吸収材

CO₂吸収材に係わる技術の蓄積

- ・アミン化合物／担体の選定
- ・製造方法
- ・固体吸収材プロセス最適化技術

【新規適用先】

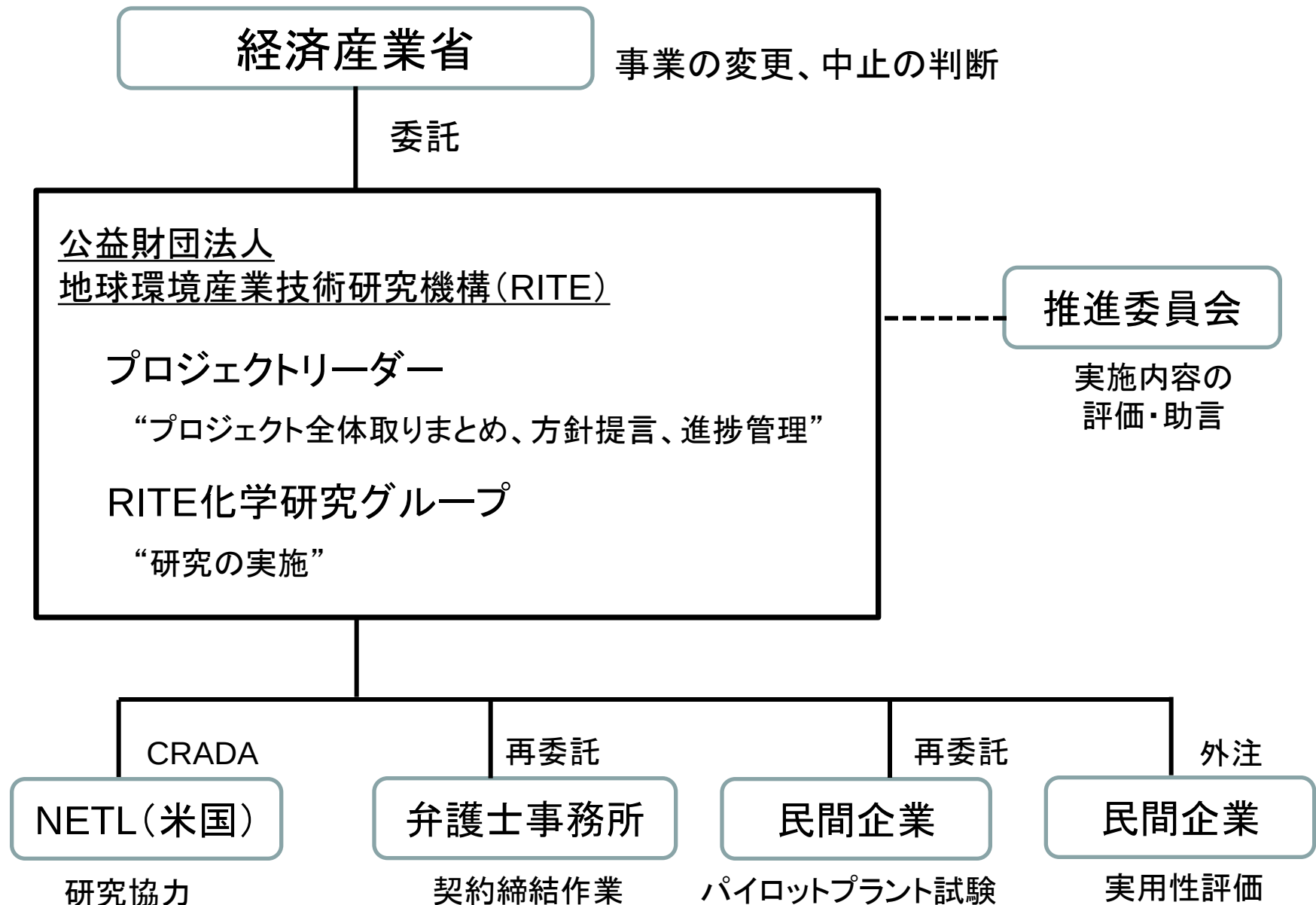
低濃度CO₂除去システムへの応用

事業ターゲットである燃焼排ガス(10-15% CO₂)のみならず、CO₂濃度がより低く技術的ハードルの高い適応先への展開も期待される:
室内、閉鎖空間、大気等からのCO₂回収(約400～10000 ppm)

○ 有人宇宙探査機の環境制御

7000ppm以下の低濃度CO₂回収 → JAXA-RITE共同で研究中

6. 研究開発の実施・マネジメント体制等(1)



6. 研究開発の実施・マネジメント体制等(2)

- ・経済産業省から民間企業・研究機関等への委託研究。
- ・プロジェクトリーダーを選任して、プロジェクト全体のとりまとめを行うとともに、方針の提言、研究開発の進捗管理を行った。
- ・学識経験者等から構成される有識者委員会を設置し、研究実施内容について評価・助言を行った。
- ・米国NETLとの契約に際し、契約、知財戦略に関して弁護士事務所の支援を得た。
- ・材料技術開発、実用プロセス開発、実ガス試験については、技術的知見を有する研究開発機関、民間企業が研究開発を実施した。
- ・委託元である経済産業省においては、研究開発成果等を踏まえ、事業の変更、中止の判断を行う。
- ・以上の実施体制を戦略的に構築することにより、有効かつ効率的な研究開発を実施することとした。

7. 費用対効果

ケース1: CCS技術の費用対効果

【 IEA Energy Technology Perspectives 2012(抜粋) 】

CCSは、産業部門(鉄鋼、セメント、天然ガス利用プロセスなど)による大幅なCO₂排出量削減目標の達成を可能にする現時点で唯一の技術である。CO₂削減オプションとしてのCCSを放棄すれば、2DSの実現コストは大幅に増加する。CCSなしでは、2DSを達成するために必要とされる電力分野の追加投資額は40%増加し、今後40年間で総額2兆ドルに達する。 CCSなしでは、他のCO₂排出量削減オプションに対する圧力も増すことになる。

CCS技術がない場合、
気温2度上昇シナリオを達成するためには、発電分野だけで240兆円/40年間の追加対策費が必要
(ETP2012)

技術オプション価値(影響回避期待値)

6兆円/年・世界

ケース2: 分離回収技術の費用対効果

分離回収コスト
現状より▲1,500円/t-CO₂と仮定
(4,200円/t-CO₂ → 2千円台/t-CO₂)

例: 100万kW石炭火力からの回収の場合
(CO₂を年間500万t回収と想定)

1基当たり75億円/年のコスト削減

8. 中間評価(H24)結果（総合評価）

CO₂削減効果の高いCCSを実用化するためには、今後、更なる低コスト化・高度化が必要であり、特に全コストの6割以上を占めるCO₂の分離・回収の技術は重要である。固体吸収材料の科学的・技術的な新規性、独創性は高く評価できる。目標を上回る世界最高レベルの吸脱着量を実現する優れた成果を上げており、今後、計画通り進めば事業化に期待が持てる。

一方、実用化に当たっては、低コスト化が課題であり、今後は、プロセスとコストを意識した研究開発とする必要がある。また、目標値とコストの整合性を図り、オーバースペックになることを回避して貰いたい。

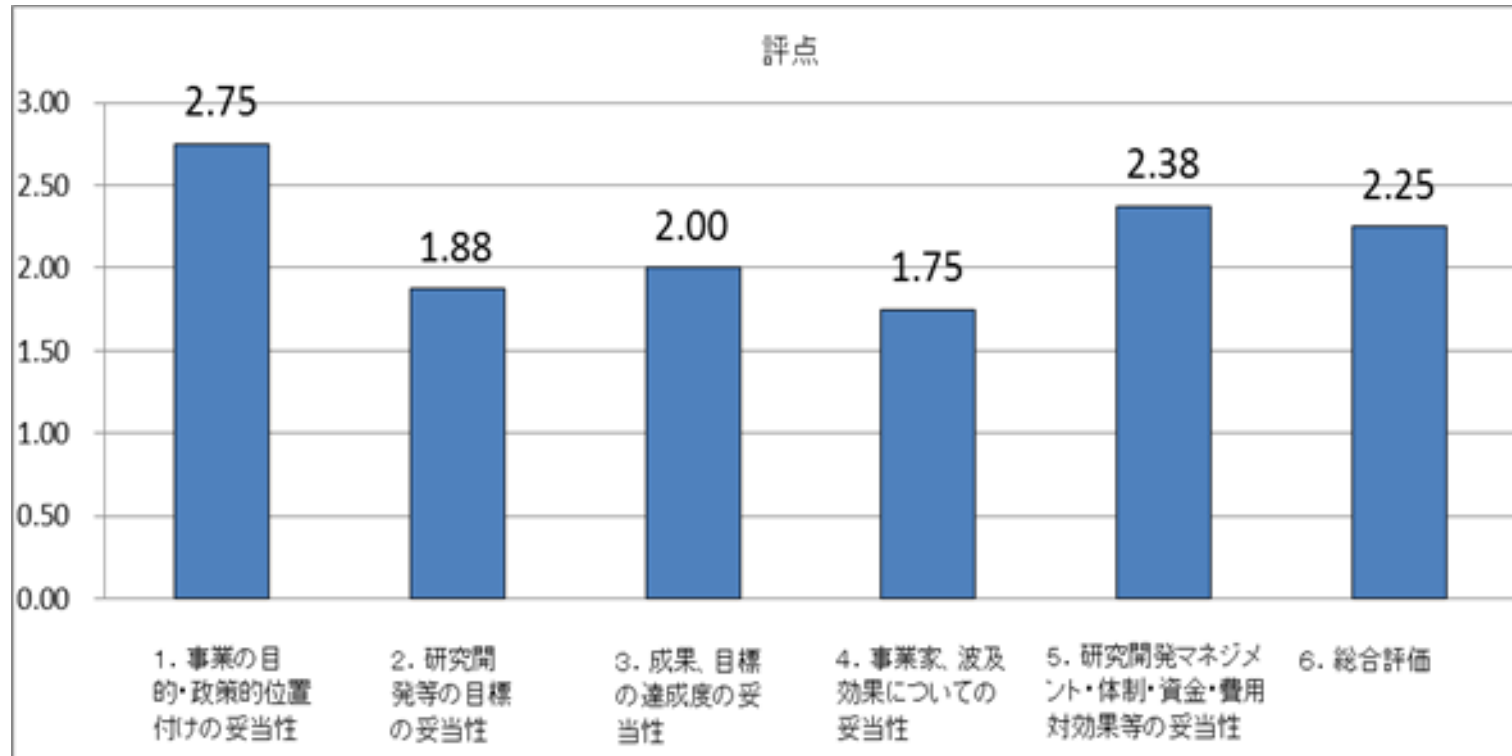
評価が適切にできるよう、目玉となる技術内容の開示を工夫して貰いたい。

回収エネルギーがシミュレーション値であることを考えると、実験による確認が必要である。

実用化には大規模実証試験を通じて技術的な課題を抽出することも必要であることから、今後、実用化にあたっては、大規模実証試験での実証が望まれる。

また、知的所有権等の様々な課題は存在すると思われるが、今後の事業化を考えると、知財を念頭に他の研究機関や企業等との交流を積極的に推進することが望まれる。

8. 中間評価(H24)結果（評点結果）



【評価項目の判定基準】

評価項目1.～5.

3点:非常に重要又は非常によい

2点:重要又はよい

1点:概ね妥当

0点:妥当でない

6. 総合評価

3点:実施された事業は、優れていた。

2点:実施された事業は、良かった。

1点:実施された事業は、成果等が今一步のところがあった。

0点:実施された事業は、成果等が極めて不十分であった。

8. 中間評価(H24)結果 (提言及び提言に対する対応状況)

今後の研究開発の方向性等に関する提言

- 今後は、プロセスとコストを意識した研究開発を進めることが必要である。
- アメリカの特許が如何に包括的なかが懸念されるので、アミン及び担体からなる固体吸収材を生かした物質ならびに応用について、早期に価値のある知財を確立することが望まれる。

提言に対する対応状況

- 本事業は、従来のCO₂回収コスト 4,200円/t-CO₂（吸収液法で3 GJ/t-CO₂に相当）に対して、CO₂分離回収エネルギーを1.5GJ/t-CO₂ へと半減することを目標とし、その結果プロセス全体として回収コストが2,000円台/t-CO₂までに低減することを目指している。この目標を達成するため、平成25年度にCO₂小型回収試験装置を導入し、分離プロセスおよびコストの評価を実施することとしている。
- これまでに新規のアミン化合物を合成し、固体吸収材としての優れた低温再生性能を確認している。今後は、これをもとに基盤となる特許を取得して参りたい。

8. 中間評価(H24)結果 (提言及び提言に対する対応状況)

今後の研究開発の方向性等に関する提言

- アメリカの特許が如何に包括的なのが懸念されるので、アミン及び担体からなる固体吸収材を生かした物質ならびに応用について、早期に価値のある知財を確立することが望まれる。
- 中間評価の現時点ですでに良好な研究成果がでてきているので、さらに現在の目標値を大きく上回る高い値を目指し研究開発を加速して貰いたい。また、国際研究開発の良い事例となるよう、国際的な交流等を積極的に推進することが望まれる。

提言に対する対応状況

- これまでに新規のアミン化合物を合成し、固体吸収材としての優れた低温再生性能を確認している。今後は、これをもとに基盤となる特許を取得して参りたい。
- ご指摘を踏まえ、今後新規開発材料に適した再生プロセスの検討等、より高い研究開発成果を目指した研究開発も視野に入れて参りたい。
また、国際交流については、米国NETLと共同研究契約を締結しており、今後とも積極的に情報交換等を進めて参りたい。

8. 中間評価(H24)結果 (提言及び提言に対する対応状況)

今後の研究開発の方向性等に関する提言

- 実用化は国内に限定するのではなく、EORなどで期待の大きい海外にも展開していくことが、地球全体のCO₂を削減するうえで重要である。今後、実用化にあたっては、海外プロジェクトへ参加し、収入を期待したい。
- CCS以外の分野への応用も検討して貰いたい。

提言に対する対応状況

- 今後実用化に当たっては、本事業の成果をもとに民間企業と連携し、海外プロジェクトへの参加についても検討して参りたい。
- これまでに開発した固体吸収材の低温低圧域での良好な吸脱着性能を生かした有人宇宙活動用CO₂除去等CCS以外の分野への応用について検討しているところである。