

二酸化炭素回収技術実用化研究事業 (先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発事業) 研究開発プロジェクトの概要

平成29年10月4日

産業技術環境局環境政策課地球環境連携室
公益財団法人地球環境産業技術研究機構

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
8. 事前評価結果

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、**二酸化炭素固体吸収材に関する実用化研究を行い、石炭火力発電所等に適用可能な低エネルギー・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27年度～平成31年度（5年間）

実施形態

国からの直執行（二酸化炭素回収技術実用化研究開発事業）

予算総額

年度	H27	H28	H29	H30	H31
予算額(億円)	総額 31.5				
執行額(億円)	2.2	3.15	3.3		

実施者

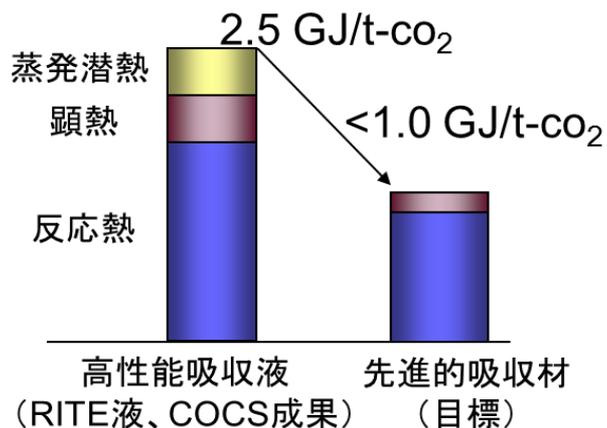
公益財団法人地球環境産業技術研究機構

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）

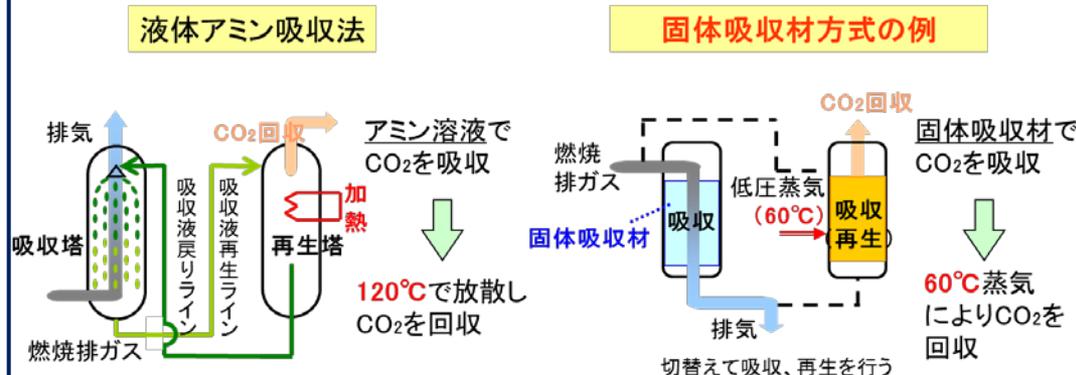
1. 1 事業イメージ

本事業の開発目標・インパクト



固体吸収材: 化学吸収剤であるアミンを多孔質支持体に担持させた先進的吸収材
 → 従来の吸収材である高性能アミン吸収液と類似のCO₂吸収特性を有しながら、再生工程で顕熱や蒸発潜熱に消費されるエネルギーの大幅低減が期待できる

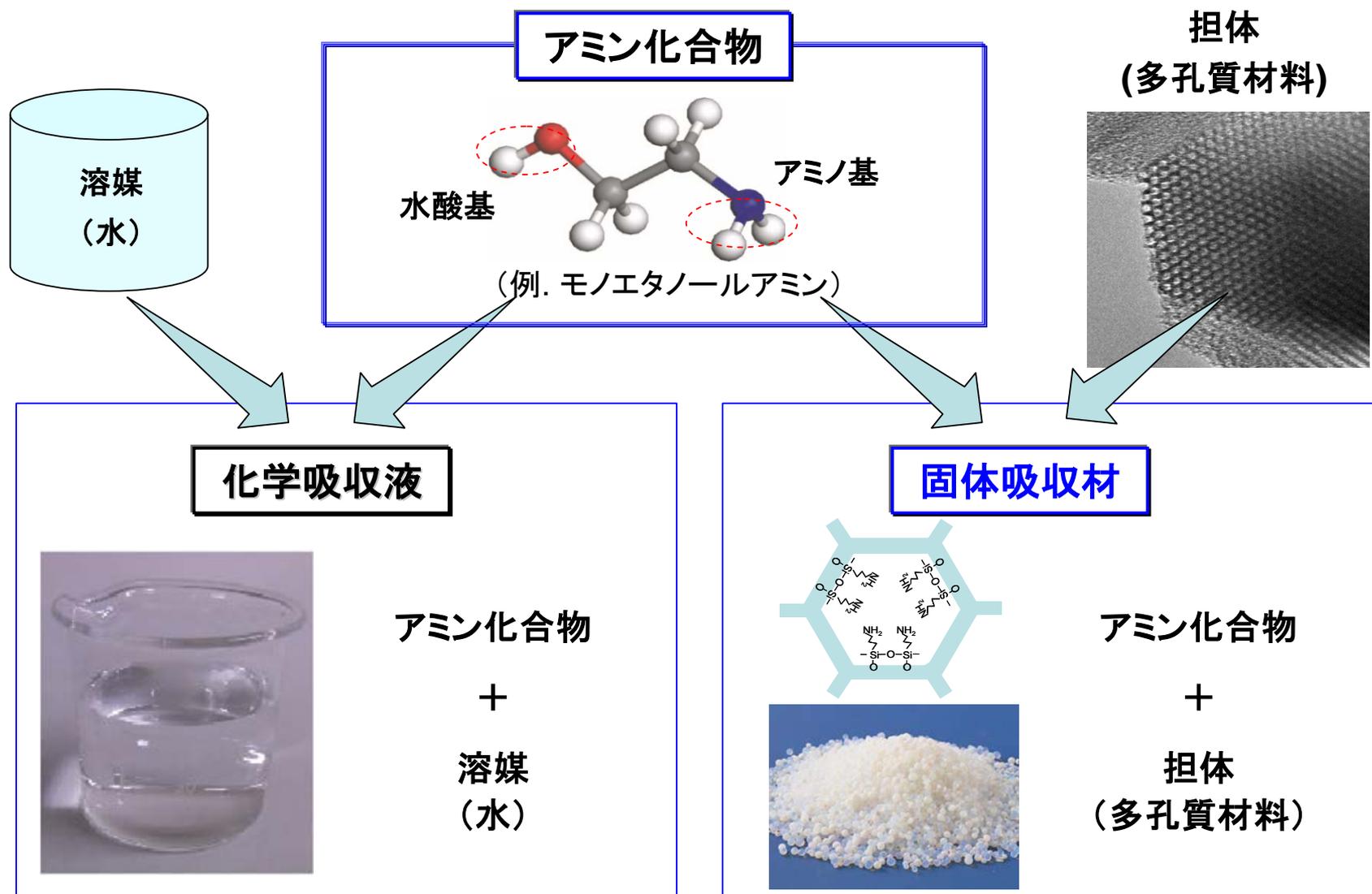
本事業の固体吸収材方式の利点



再生回収に必要な排熱温度が60°C以上と低い → **・CO₂分離エネルギー少**
・未利用の低温排熱利用

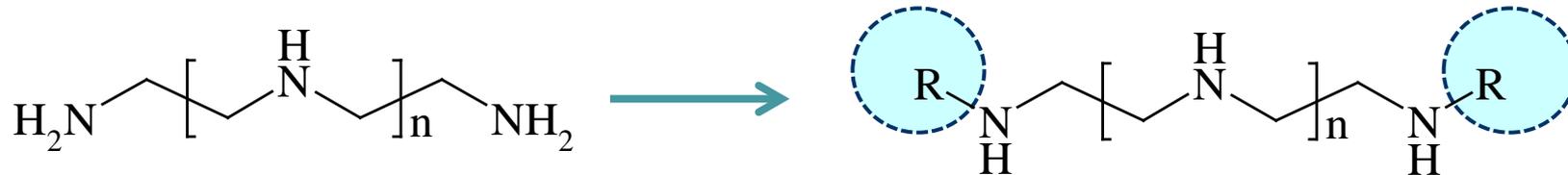
- ・現状のアミン液法が120°Cに対し、60°C程度の廃熱を利用可能
- ・再生時に水の蒸発がない、排水が出ない
- ・設備コストが安い、大型化でコストメリット大
- ・アミン液(腐食性)のステンレスに対し、一般鋼材でプラントを構成
- ・装置・敷地面積が吸収液法と比較してコンパクト

1. 2 固体吸収材とは



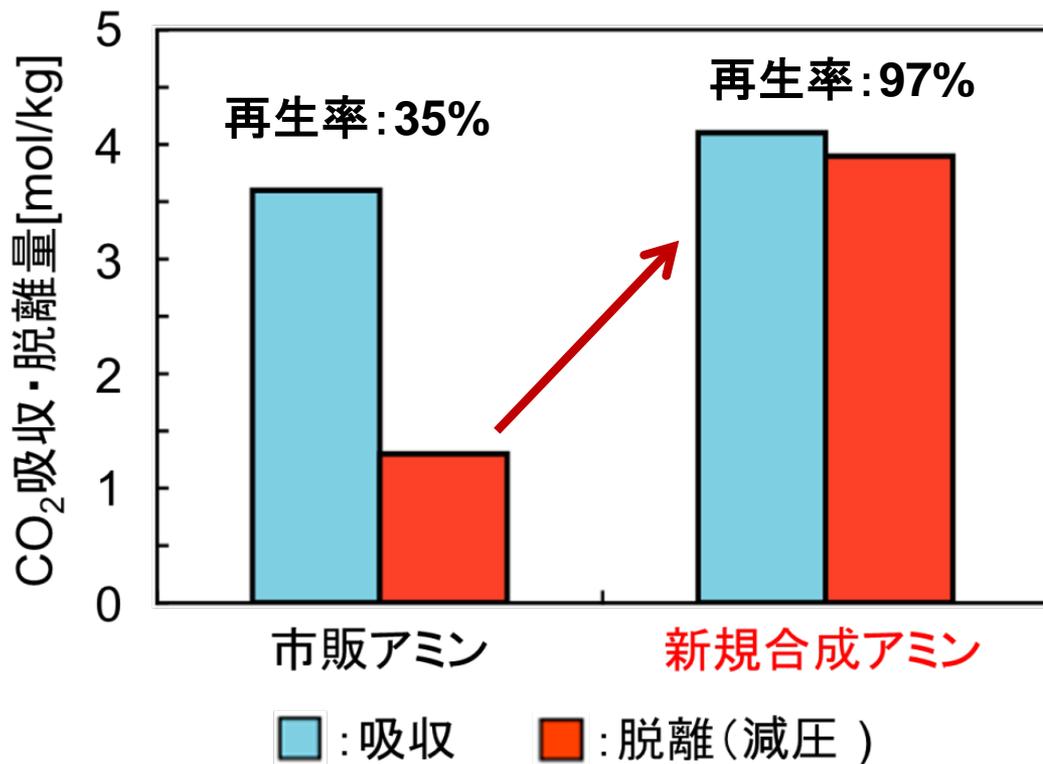
再生時に比熱の大きい水を加熱する必要が無いため、エネルギーの低減が可能

1. 3 本事業の固体吸収材の特徴



計算化学に
基づくアミン
分子設計

置換基Rとして嵩高いアルキル基を採用
→ CO₂の吸収・脱離性能が向上



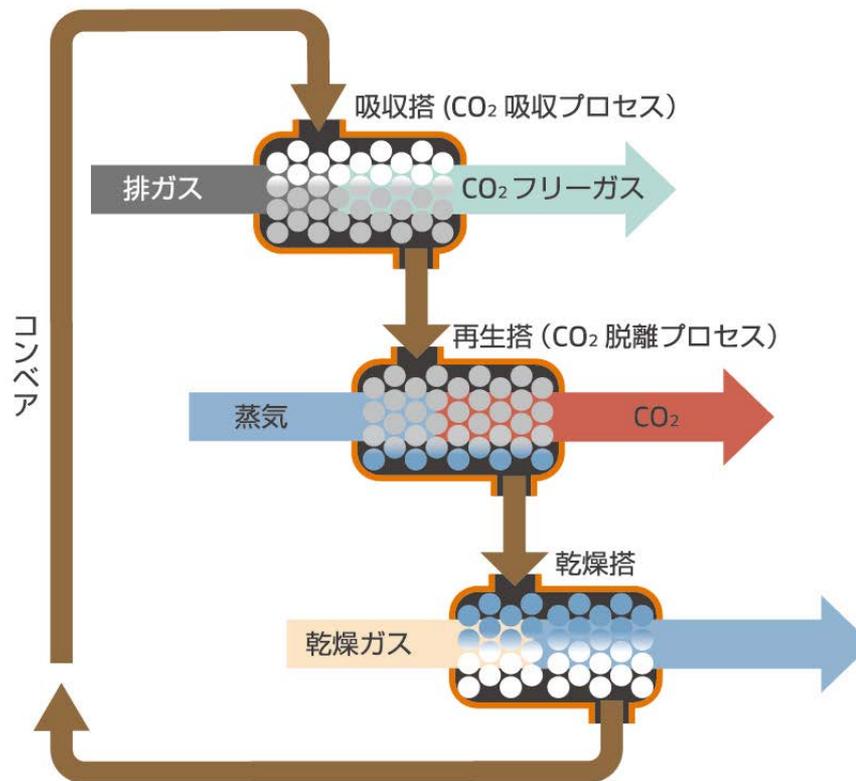
基盤技術研究 (~H26)

新規合成アミン (RITEアミン) を用いて、低温 (~60°C) で極めて再生率に優れるに固体吸収材を開発した。

国際特許出願済

1.4 移動層システムの概要

<移動層システム>

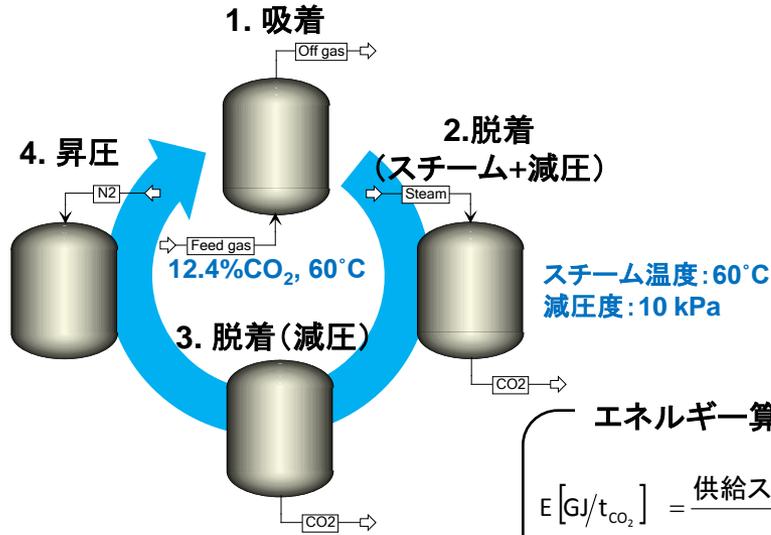


吸収材を移動させるメリット

- ・装置がコンパクトでCO₂負荷変動に追従可能
- ・吸収材の補充/交換・メンテナンスが容易(稼働中も可能)

1.5 シミュレーションによる事前評価(回収エネルギー)

吸着シミュレーション(Aspen Adsorption)

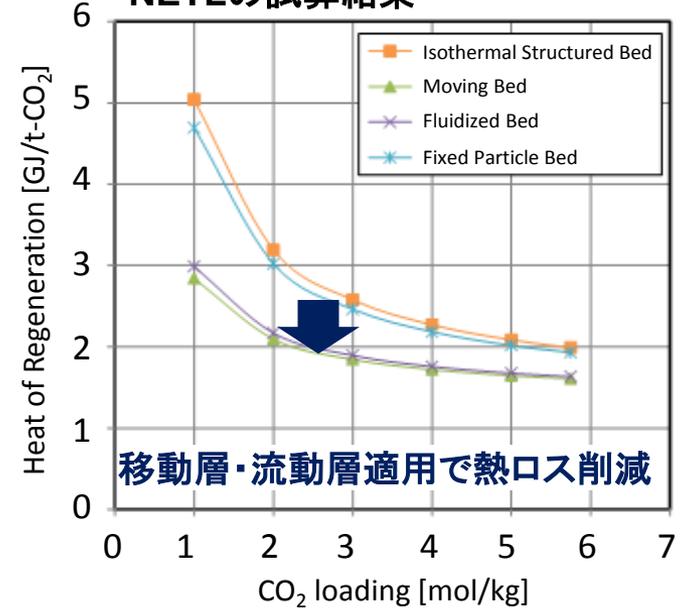


エネルギー算出式

$$E \text{ [GJ/t}_{CO_2}\text{]} = \frac{\text{供給スチーム量 [kg]} \times Q \text{ [kJ/kg]}}{CO_2 \text{ 回収量 [t]}}$$

Q: スチーム熱量

NETLの試算結果*

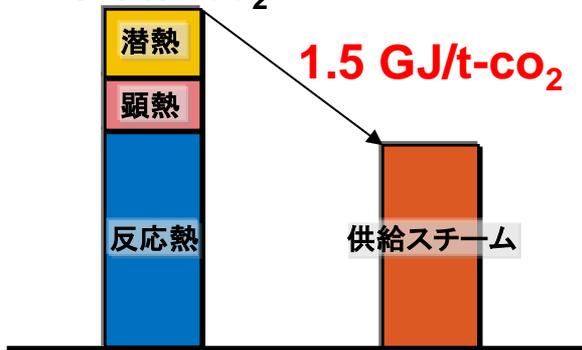


移動層・流動層適用で熱ロス削減

*J.S. Hoffman et al., Proc. the 33rd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, June 1-5 (2008), Clearwater, Florida, USA.

再生エネルギー

2.5 GJ/t-co₂



吸収液
*COCS project

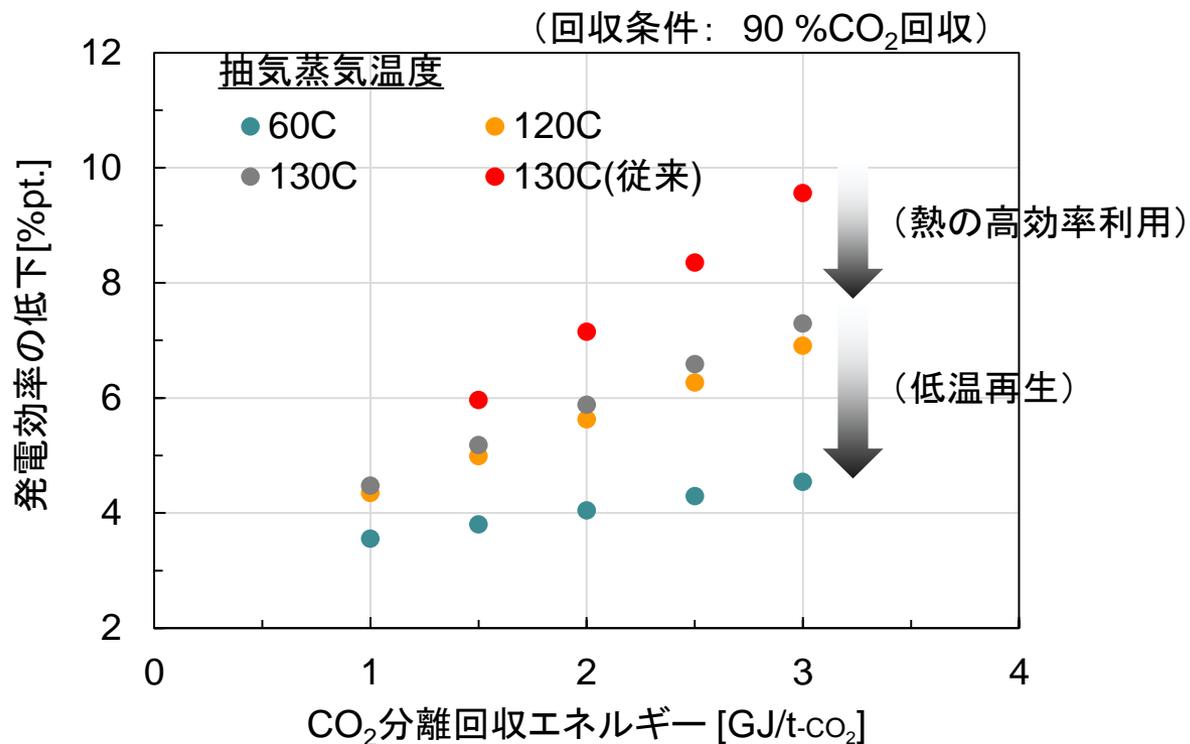
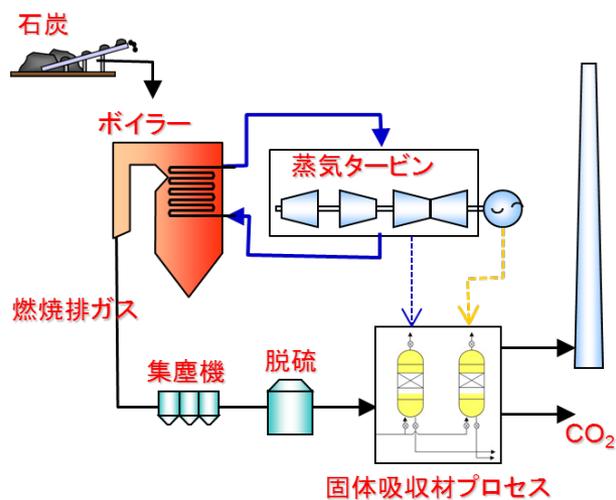
新規固体吸収材
蒸気再生プロセス

- ・ 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

※NETL: 米国国立エネルギー技術研究所

1.5 シミュレーションによる事前評価(発電効率)

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。

1. 6 海外での開発状況と本技術の優位性

RTI's Solid Sorbent

(米国エネルギー省事業)

- ・PEI(市販アミン)／シリカ
- ・米国(石炭火力発電所)、ノルウェー(セメント)でベンチ試験を実施(～2016)
- ・吸収: 50-90°C／再生: >110°C
- ・再生E(ベンチ): 約2.5 GJ/t-co₂

RITE's Solid Sorbent

(本事業)

- ・新規合成アミン／シリカ
- ・国内発電所でパイロット試験する計画
- ・吸収: 40-60°C／再生: 60-80°C
- ・再生E(ラボ): 1.5 GJ/t-co₂

本事業の固体吸収材は低温再生プロセスに適用可能→ 再生エネルギー低減・コスト削減が期待できる

KEPCO's Dry Solid Sorbent

(韓国産業通商資源部事業)

- ・K₂CO₃／担体
- ・石炭火力発電所で200 t-co₂/dスケールのパイロット試験を実施中(～2018)
- ・吸収: 40-80°C／再生: 140-120°C
- ・再生E(パイロット): 約5 GJ/t-co₂

Energy Procedia 63 2261 (2014)

Energy Procedia 114 2506 (2017)



固体吸収材用パイロット試験装置(韓国)

2. 事業アウトカム

事業アウトカム指標 (妥当性・設定理由・根拠等)	目標値(計画)	達成状況 (実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
<p>本技術を発電所等の大規模発生源からのCO₂分離に適用することで、CO₂の分離に要するコストを2,000円/t-CO₂*までに削減することである。</p>	<p>(事業開始時) CO₂分離回収コスト 2,000円台(<3,000円)/t_{CO2}に目途</p>	<p>CO₂分離回収コスト 2,000円/t_{CO2}台を達成し得る固体吸収材を開発した**</p>	<p>-----</p>
<p>現時点では炭素取引価格は以前と比較してかなり安価に推移しており、仮に今後制度的仕組みの導入や、排出規制が導入されたとしても、CO₂回収コストが炭素取引価格よりも高価であれば、民間企業がCCSに取り組むことはないため、CO₂の回収コストをCCSの導入が促進されるレベルにまで低減する必要がある。</p>	<p>(中間評価時) CO₂分離回収コスト 2,000円台(<3,000円)/t_{CO2}を達成 固体吸収材システムの確立</p>	<p>CO₂分離回収コストは達成済/システム確立は本年度後半のベンチスケール試験の実施により達成の見込み</p>	<p>-----</p>
<p>CO₂分離回収コストを2,000円/t_{CO2}にまで下げることができれば、実用化が進むものと推定される。</p>	<p>(事業終了時) CO₂分離回収コスト 2,000円/t_{CO2}達成に目途 実機スケールでの実証可能な技術の完成</p>	<p>-----</p>	<p>本事業を実施することで達成する見込み</p>
<p>平成25年9月に総合科学技術会議で決定された「環境エネルギー技術革新計画」においても、二酸化炭素回収技術については、2020年までに分離コストを「2,000円台/t_{CO2}」、「さらに分離膜の実用化で1,500円台/t_{CO2}に」することとされている。</p>	<p>(事業目的達成時) CO₂分離回収コスト 2,000円/t_{CO2}の固体吸収材システムの実用化</p>	<p>-----</p>	<p>本事業を実施することで達成する見込み</p>

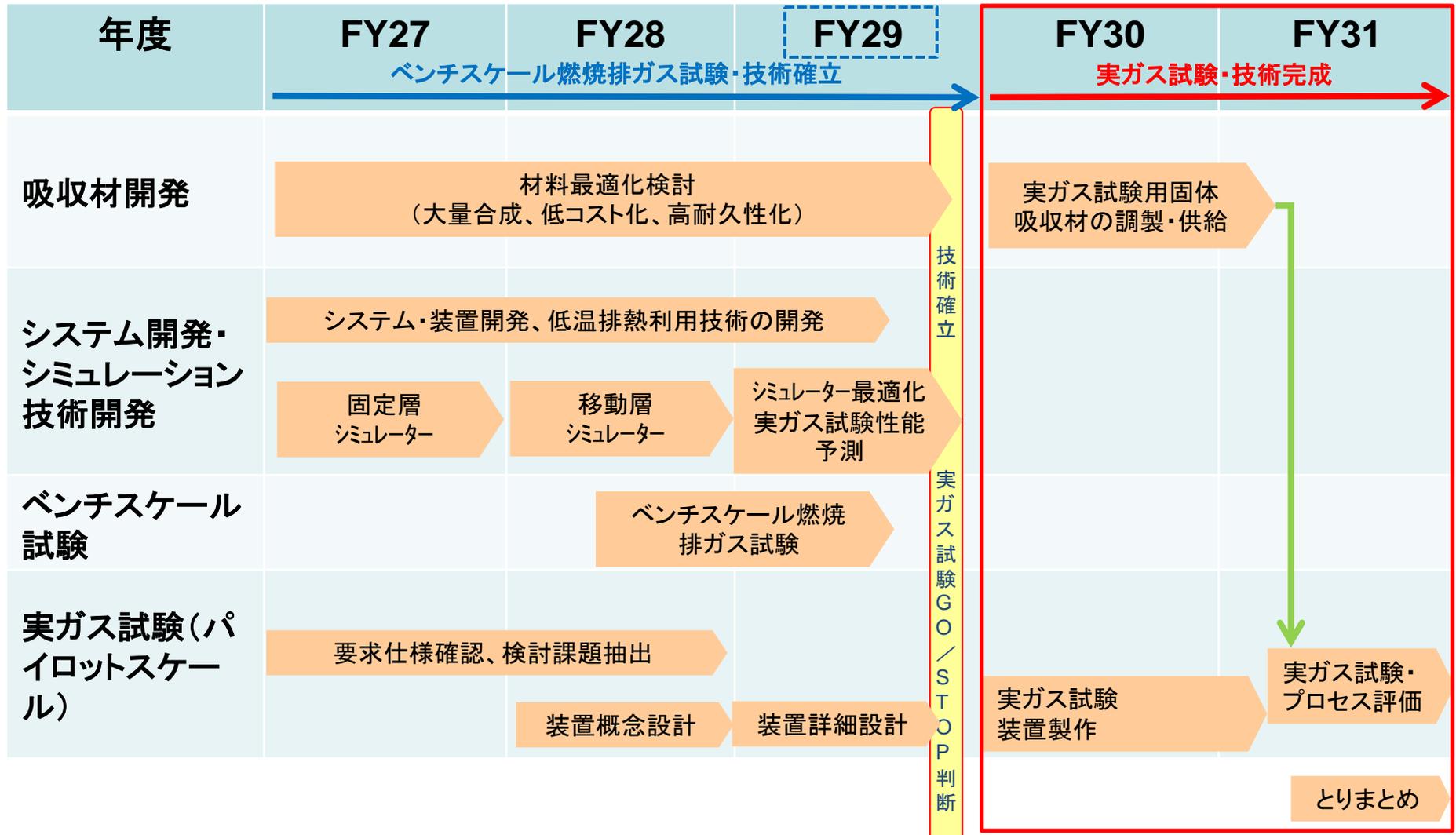
*これまでに高炉ガスからのCO₂回収で2,000円/t-CO₂を達成したとの報告があるが、CO₂濃度が22%と高く、石炭火力の12%にそのまま適用すると高コストである。

**平成26年度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)成果報告書、RITE

3. 事業アウトプット

事業アウトプット指標 (妥当性・設定理由・根拠等)	目標値(計画)	達成状況 (実績値・達成度)
<p>CO₂分離回収コスト2,000円/t-CO₂の固体吸収材システムの実用化を目標とし、本事業終了時には、2,000円/t_{CO2}に目途を得て、実機スケールで実証可能な技術を完成する。</p> <p>そのために、</p> <p>① 分離回収エネルギー低減のための低温再生技術を確立、</p> <p>② 高性能かつ実用スケールで調達可能な材料の合成技術を確立、</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>③ これらの技術を用いて、現行の化学吸収法のCO₂分離回収エネルギーを大幅に低減可能であることを実証する。</p>	<p>(事業開始時)</p> <p>CO₂分離回収エネルギー1.5 GJ/t_{CO2}に目途</p>	<p>(達成) 開発した固体吸収材に対するプロセスシミュレーションでCO₂分離回収エネルギー1.5 GJ/t_{CO2}を達成した</p>
	<p>(中間評価時)</p> <p>①固体ハンドリング技術の確立・最適システム(再生方式)の確立</p> <p>②スケールアップ試験用材料合成技術の確立(10 m³)</p> <p>③ベンチスケール試験の実施・評価、CO₂分離回収エネルギー 1.5 GJ/t_{CO2}の達成に目途</p>	<p>①(達成) 固体ハンドリング技術(材料供給方法、ガス導入方法)を確立し、低温蒸気で1.5 GJ/t_{CO2}達成可能な再生方式を確立した</p> <p>②(達成) 10m³規模での安定的な材料合成技術を確立した</p> <p>③(ほぼ達成) ラボレベルの小型連続回収試験装置で1.5 GJ/t_{CO2}を達成、今年度後半のベンチ試験の実施により達成見込み</p>
	<p>(事業終了時)</p> <p>①熱交換技術、低温排熱利用技術の確立</p> <p>②2,000円/t_{CO2}を達成可能な低コスト材料合成技術の確立</p> <p>③実ガス試験(数十トン/dayレベル)の実施・評価、CO₂分離回収エネルギー 1.0 GJ/t_{CO2}の達成に目途</p>	<p>(本事業を実施することで達成する見込み)</p>
	<p>(事業目的達成時)</p> <p>固体吸収材システムの確立</p>	<p>(2030年頃までに事業化を目指す)</p>

3.1 事業の年次展開予定

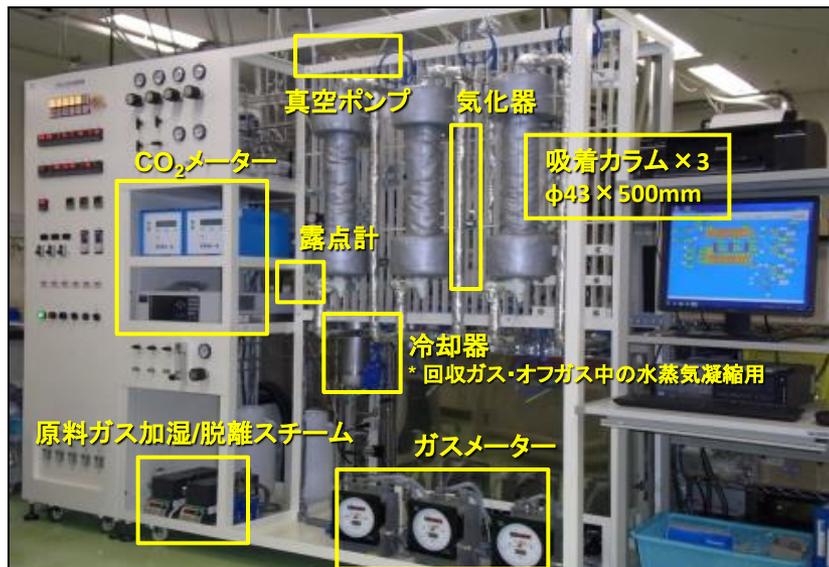


▼中間評価
1.5 GJ/t_{CO2}達成目途

▼最終評価
目標達成

3. 2 (1) 実用プロセス開発 最適システム(再生方式)の確立

- ◎ スケールアップ合成用(ベンチ試験用)に開発した固体吸収材を用いて低温再生プロセスを最適化
 ⇒ ラボスケール連続試験装置(固定層3塔切替仕様)で
 目標性能(1.5 GJ/t-co₂以下)の達成を確認



Step	操作			時間 [sec]
	カラム1	カラム2	カラム3	
1	前処理(80 °C)N ₂ フロー			10800
2	冷却(60~80 °C)			10800
3	(昇圧)	脱着	洗浄	10
4	吸着		(待機)	0~30
5	洗浄	(昇圧)	脱着	140~170
6		(待機)		10
7	(待機)	吸着	脱着	0~30
8	脱着	洗浄	(昇圧)	140~170
9			吸着	10
10	(待機)	脱着	0~30	
11	(待機)	吸着	140~170	

1サイクル 9分

100サイクル (Step 3 - 11) 後終了

	吸収材	洗浄時間	再生温度・消費エネルギー	回収率	回収純度 ²⁾
~H27 ¹⁾	RITEアミン/メソポーラスシリカ	40 sec	60 °C・1.47 GJ/t-co ₂	93.4 %	98.1 % ³⁾
H28 ベンチ試験用	市販アミン(ブレンド) /スケールアップ合成用担体A	10 sec	80 °C・1.47 GJ/t-co ₂	92.8 %	85.5 %
H29 ベンチ試験用	RITEアミン /スケールアップ合成用担体A	40 sec	60 °C・1.52 GJ/t-co ₂	86.5 %	99.0 % ³⁾
		30 sec	60 °C・1.41 GJ/t-co₂	94.7 %	97.1 %³⁾
		20 sec	60 °C・1.33 GJ/t-co ₂	99.9 %	94.4 %

1) ~H27の材料はRITEアミン(新規アミン)を用いて基盤研究フェーズで開発

2) 回収純度はwetベースで比較 3) dryベースで99%以上の回収純度を確認

3.2 (1) 実用プロセス開発

最適システム(再生方式)の確立

(H28ベンチ試験材ラボスケール連続回収試験)

◎ ラボ試験結果から物質収支や熱収支を解析

⇒ 低エネルギー低温再生を可能とする

高効率システムを立証

⇒ ベンチスケールプラントの

設計改善や運転プロセス最適化に反映

H28ベンチ試験材(市販アミン/担体A)物質収支の例

	吸収	洗浄	再生	物質収支	
	g/cycle	g/cycle	g/cycle	g/cycle	%
CO ₂	-4.90	-1.17	6.67	0.59	108.4
H ₂ O	-1.10	0.07	0.96	-0.07	99.1

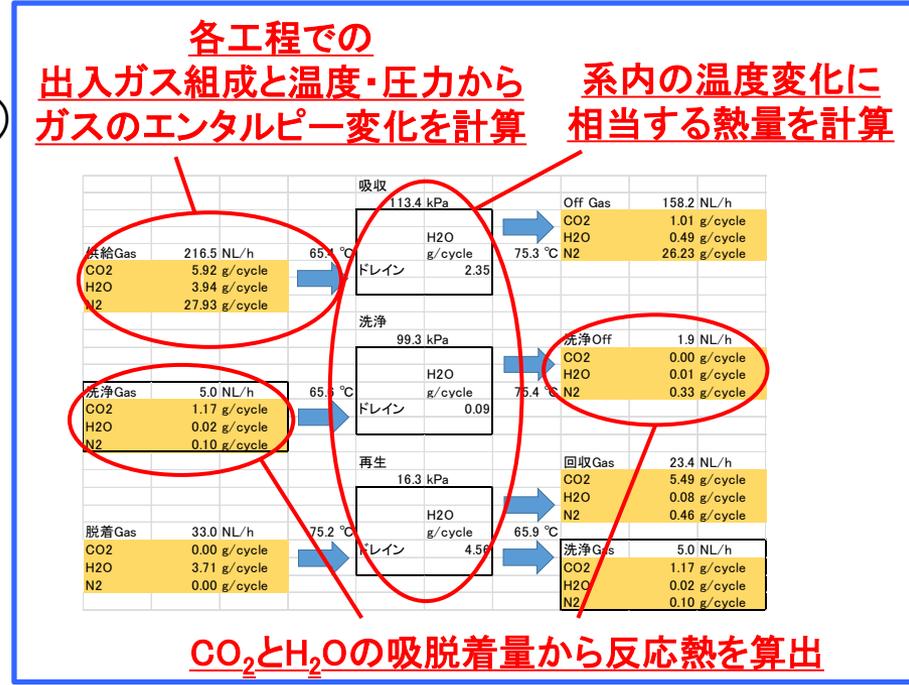
◎ CO₂、H₂O、共に±10%以内での物質収支を確認

H28ベンチ試験材(市販アミン/担体A)熱収支の例

	系への加熱 [W]				系の温度変化熱量 [W]	熱収支(放熱) [W]
		ガスΔH	反応熱			
			CO ₂	H ₂ O		
吸収	29.74	3.93	15.97	9.84	22.48	7.3
洗浄	3.41	0.24	3.82	-0.65	2.93	0.5
再生	-33.47	-3.17	-21.72	-8.57	-33.07	-0.4

◎ 再生工程における熱収支-0.4 Wは0.04 GJ/t-co₂の入熱を示唆

⇒ 入熱分を考慮しても消費エネルギーは1.5 GJ/t-co₂



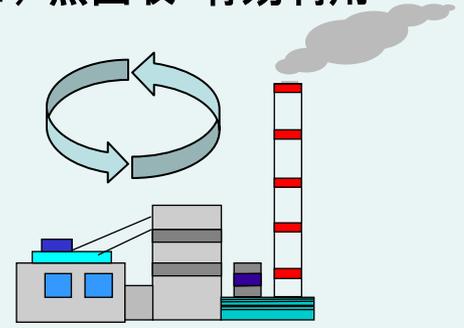
熱収支計算のイメージ図

3. 2 (1) 実用プロセス開発

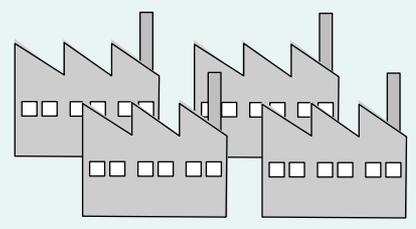
最適システム(再生方式)の確立

排熱利用技術調査 ・システム評価

1) 熱回収・有効利用

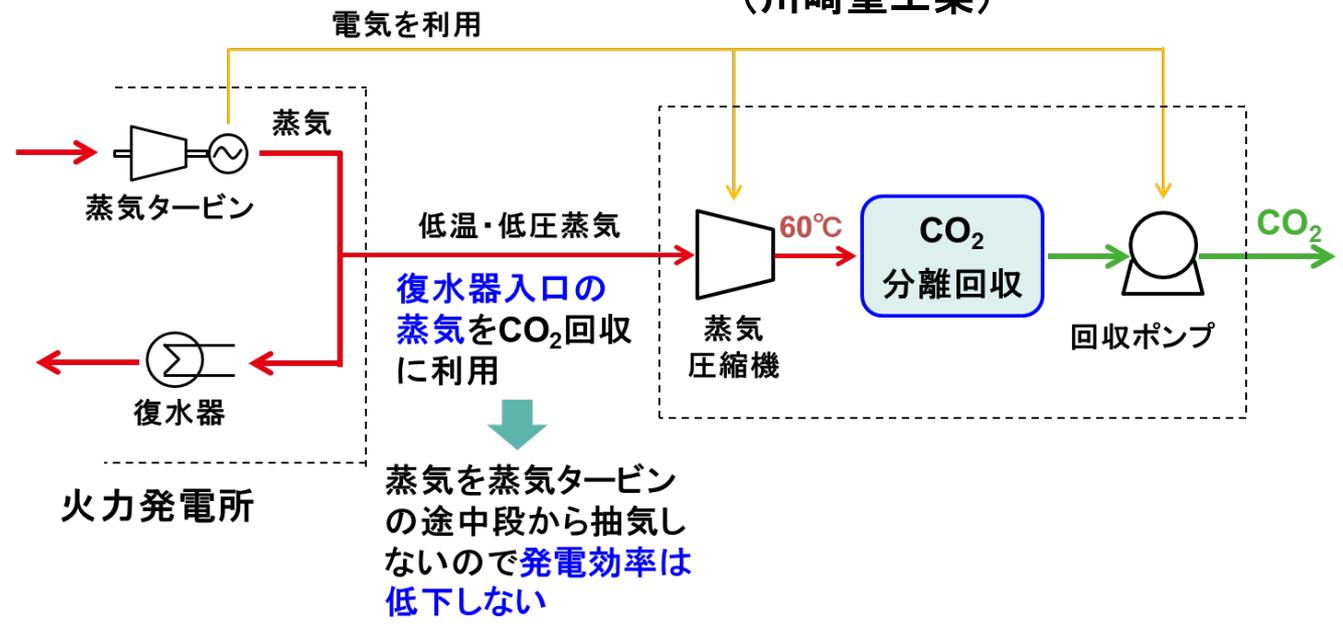


2) 排熱利用



低温・低圧のタービン排蒸気を
CO₂回収に利用する省エネシ
ステムを検討

特許 2011-122535「二酸化炭
素回収方法および装置」
(川崎重工業)



本システムを用いれば、固体吸収材再生に必要な蒸気をボイラ等で生成する場合と比べて、消費エネルギーが半分程度となる。

3.2 (1) 実用プロセス開発

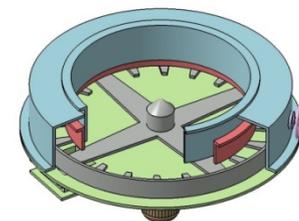
固体ハンドリング技術の確立

◎吸収材供給方法の検討

吸収塔、再生塔、乾燥塔から**吸収材を排出する供給機**の**要求仕様を整理し、商用規模**での供給機候補を選定。

<供給機各候補の性能比較>

	供給機A	供給機B	供給機C	供給機D
原理	・底部羽根の回転により連続的に排出	・羽根により放射状の流れを作り、底部ディスクの回転で排出	・ロールの回転により連続的に排出し、上部のゲートで流量を調整	・底部ディスクの回転により連続的に排出 ・羽根なし
①定量供給性	◎	◎	◎	◎
②均等な降下	◎	◎	×	×
③非破砕	○	○	○	◎
総合	○	○	×	×



供給機候補概略図

◎:適用可能 ○:課題を解決することで適用可能
×:構造上適用不可

◎ガス導入方法に係る解析検討

ガスと吸収材を効率良く接触させるため、**散気管方式**をガス導入方法を選定し、流れ解析で評価して**設計に必要なデータ**を取得。

<ガス流れが均一となる散気管からの距離>

分布内速度差が大きく、**ガス流れが不均一**

速度分布		
散気管からの距離	m	0.30 0.60 0.76
分布内速度差	m/s	0.85 0.20 0.10

分布内速度差が小さく、**ガス流れが均一**



流れ解析モデル

3. 2 (2) 実用化のための材料最適化

スケールアップ試験用材料合成技術の確立

	アミン	担体
H27	<u>RITEアミンの大量合成手法を確立</u> 基盤研究フェーズで開発した高性能アミンについて、 商用スケールで実施可能な合成法を確立した。 (アルキル化法 → シッフベース法)	<u>担体の強度・耐摩耗性を向上</u> 基盤研究フェーズで活用したメソポーラスシリカから、 耐久性の要求仕様を満たす担体Aに変更した。
H28	<u>ベンチ試験用RITEアミンを合成(0.5t)</u> (ベンチ試験用に市販アミン3tとブレンド)	担体A
H29	<u>ベンチ試験用RITEアミンを合成(3.5t)</u> (RITEアミンのみを使用してベンチ試験材を作製)	担体A

	固体吸収材合成
H27	<u>担持条件を最適化</u> アミン組成、担体を実用化に向けて改良し、 尚且つ、 固体吸収材のCO ₂ 分離回収性能を担保／向上 し得るように担持量等を最適化した。
H28	<u>ベンチ試験用固体吸収材を合成(14 m³)</u> 担持に有機溶媒を使用 処理量に課題(バッチあたり10 ⁻³ ~10 ⁻² m ³)
H29	<u>ベンチ試験用固体吸収材を合成(14 m³)</u> 水を溶媒として使用 処理量を大幅増大(バッチあたり~10m ³)



ベンチ試験用アミン合成設備



ベンチ試験用固体吸収材

◎ 中間目標
「10m³規模の合成
技術確立」を達成
した。

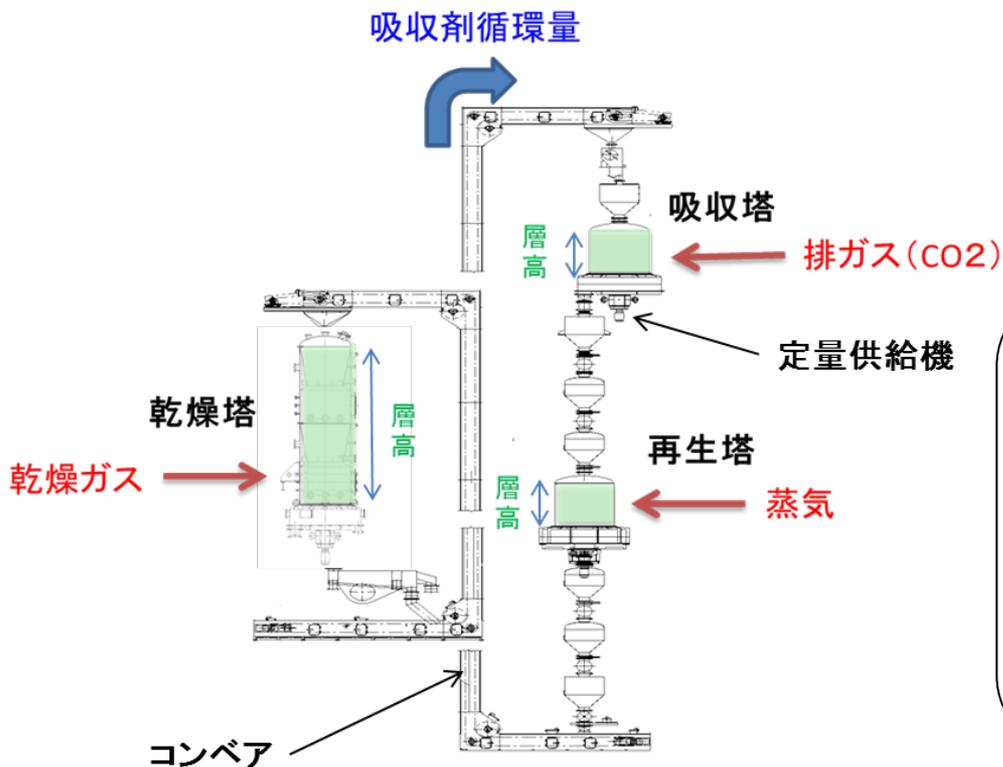
3. 2 (3) 燃焼排ガス試験・経済性評価

ベンチスケール燃焼排ガス試験の実施・評価

ベンチスケール燃焼排ガス試験

<試験目的>

- ・吸収材の移動特性及びCO₂回収性能の把握
- ・要素機器改善による回収CO₂純度の向上
- ・ガス中水分の計測機器選定
- ・実ガス試験に向けたベンチスケール燃焼排ガス試験での課題抽出



設備仕様

吸収材循環量 4~12 m³/h

吸収塔: 層高 0.4~1.8 m

再生塔: 層高 0.4~1.8 m

蒸気量 ~500 kg/h

乾燥塔: 乾燥ガス量 ~3,400 Nm³/h

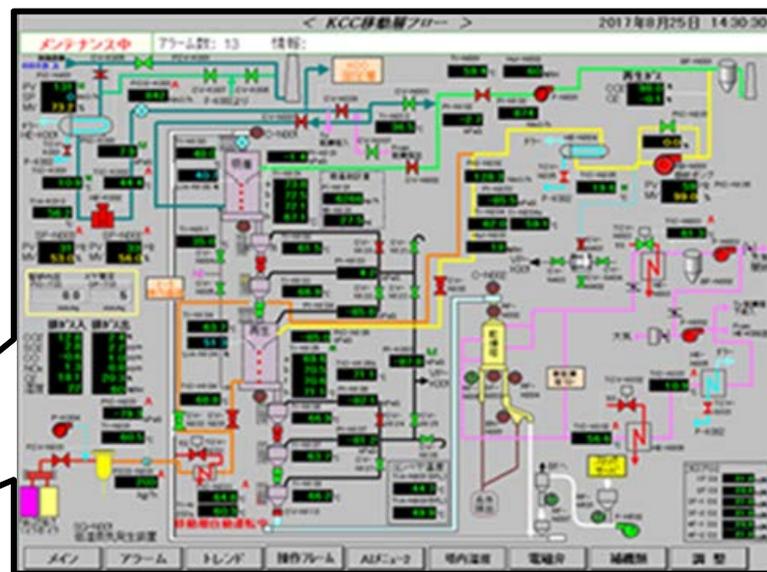
3. 2 (3) 燃焼排ガス試験・経済性評価

ベンチスケール燃焼排ガス試験の実施・評価

＜ベンチ試験装置(川崎重工業 明石工場内に設置)の概観＞



＜モニター画面＞



＜制御室における試験の様子＞



- 温度、圧力等のプロセス値をモニター画面でリアルタイムに監視。
- 吸収材層高はセンサとビデオ画面の両方で常時確認し、完全自動制御へ向けてデータ取得。

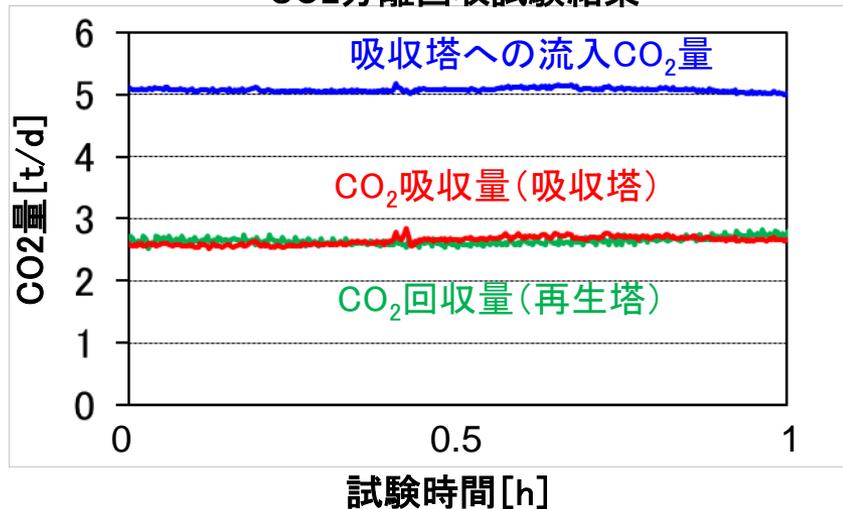
3. 2 (3) 燃焼排ガス試験・経済性評価

ベンチスケール燃焼排ガス試験の実施・評価

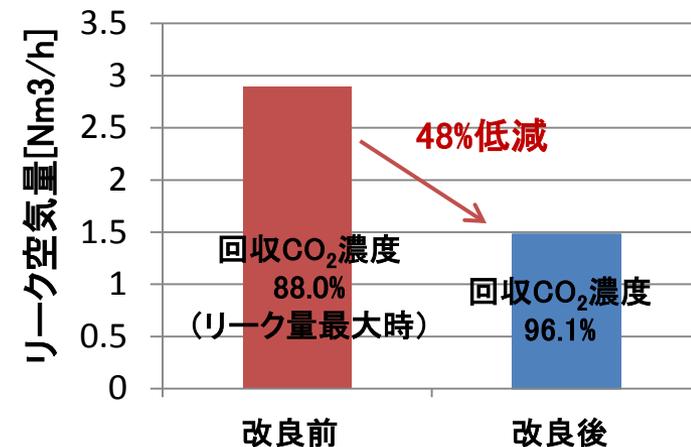
<成果>

- ・石炭燃焼排ガスを用いてCO₂分離回収試験を実施し、**2.6 ton/dのCO₂を分離回収した。**
- ・再生塔中間ホッパのバルブ改良により、リーク空気量を48%低減でき、**CO₂回収純度が96.1%に増加した。**
- ・乾燥水分量を常時監視できる、**耐久性の高いガス中水分計を選定/検証できた。**

CO₂分離回収試験結果



再生塔へのリーク空気量比較



<課題と対策>

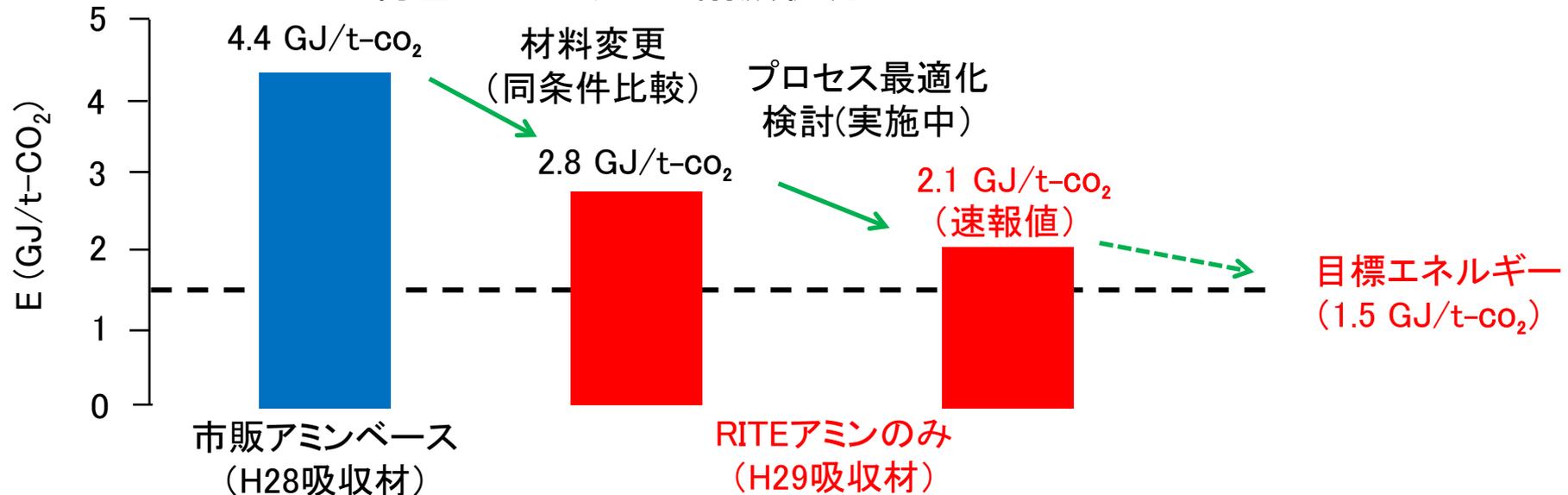
- ・吸収材中に水分が多く含まれると、コンベアスリップやホッパ内ブリッジが発生し、安定運転ができないだけでなく、CO₂吸収/脱離速度が低下するために、スケールアップに必要なデータを取得できなかった。

⇒アミンの種類/量を最適化した吸収材を新規製作し、水分脱離速度を向上させ、更に装置側でも安定運転ができるようにコンベア等を改良する。

3. 2 (3) 燃焼排ガス試験・経済性評価

ベンチスケール燃焼排ガス試験の実施・評価

＜再生エネルギーの削減状況＞



下記対応を取込むことによりCO₂分離回収エネルギー1.5 GJ/t-CO₂達成を目指す

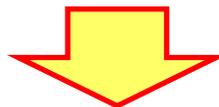
項目	狙い
担持アミン種/量の最適化	水分付着抑制、吸収速度向上
蒸気流量の調整	再生蒸気流量最適化によるエネルギー低減
蒸気条件の変更	過熱蒸気/低圧力蒸気による脱離促進
塔/コンベアからの放熱低減	吸収材温度低下の抑制
乾燥工程の削除	システム簡易化 (RITEプロセスと同様)

3. 2 (3) 燃焼排ガス試験・経済性評価

実ガス試験(パイロットスケール)での要求仕様確認・検討課題抽出

移動層方式での開発・検証項目

分類	開発・検証項目	具体的な内容	試験項目	
			ベンチスケールでも検証可能	実ガス試験が必須
基本特性	基本性能	各塔の基本性能の把握	○	
	回収CO ₂ 性状	高濃度CO ₂ の回収検証、回収CO ₂ 中の微量成分の把握	○	
	スケールアップ設計手法の検証	シミュレーション精度向上	○	
吸収材	耐久性(性能劣化及び粉化対応)	実ガスによる性能劣化対応 粉化対応	○	○
機器単体	大型化(吸収材循環量増加、機器大型化)	循環量増加対応(供給機性能の検証) 機器大型化対応(径方向流量均一化)		○ ○
	気密性	機器間の気密性確保	○	
システム全体	プラント運転 連続操作/制御 応答性	連続操作の達成 制御応答性の把握 起動及び停止方法、異常時対応の明確化	○	○ ○ ○
	機器動力低減、蒸気有効利用	機器動力低減の達成 再生蒸気ロスの低減検証	○	○
	メンテナンス性	メンテナンス項目・期間・頻度の把握	○	
	経済性	経済性データの取得	○	
				○



＜実ガス試験(パイロットスケール)の次ステップ試験への要求項目＞

- ・吸収材の性能劣化対応や、大型プラントの成立性を検証するには、**スケールアップした実ガス試験が必須**
- ・商用化へのステップを考えれば、**ベンチスケール燃焼排ガス試験の10倍程度の規模が妥当**

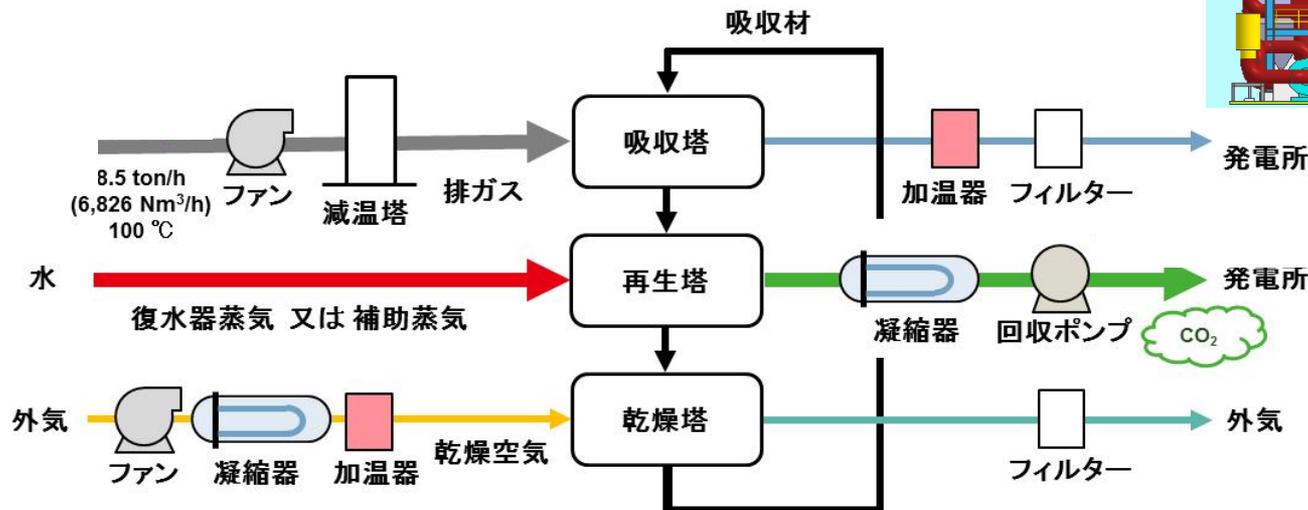
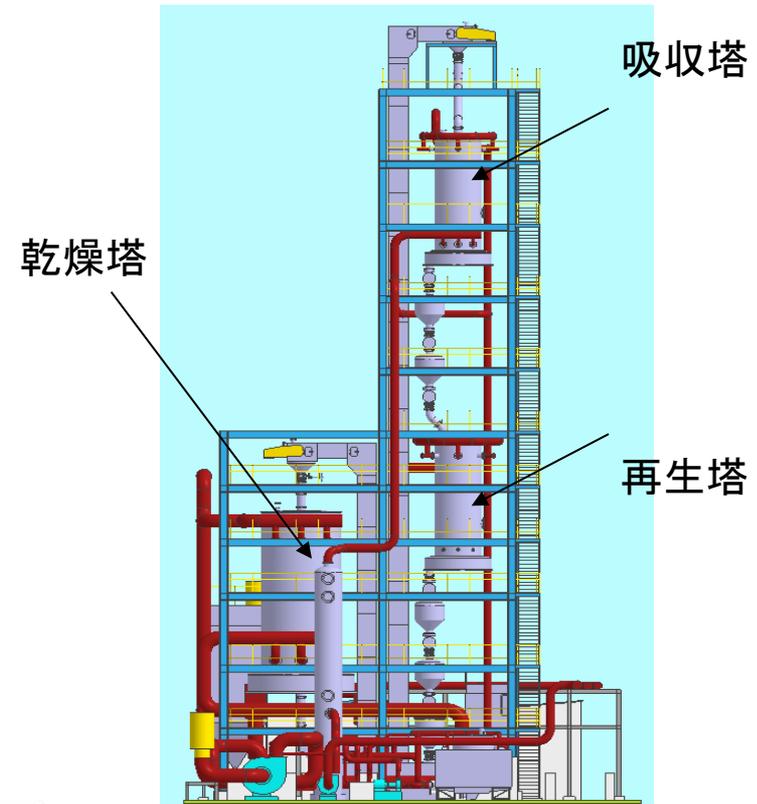
3. 2 (3) 燃焼排ガス試験・経済性評価

実ガス試験(パイロットスケール)装置 設計

実際の火力発電所を対象として、40 ton- CO_2/d
実ガス試験装置の設計を実施

検討条件

装置規模	40ton- CO_2/d
燃焼排ガス温度	100 $^{\circ}\text{C}$
燃焼排ガス流量	6,826Nm ³ /h



全体敷地面積:
L53m × W23m
本体形状:
L14.5m × W7.5m ×
H39.5m

3. 2 (3) 燃焼排ガス試験・経済性評価

CO₂分離回収コスト2,000円台(<3,000円)/t_{CO2}の達成

基礎技術研究フェーズでは、
固定層方式で2,000円台/t_{CO2}の
達成に目途(シミュレーション)

大型の商用プラントでは、移動層方式のほうが有利

移動層方式でどの程度のCO₂分離回収コ
ストを達成できるか？

下記対応を取込むことにより、**移動層方式を採用すれば、
大型の商用プラントで、2,000円台/t_{CO2}達成**

対象	コスト低減方策	今後の対応
吸収材	吸収材性能・耐久性の向上	●
	再生蒸気供給量の最適化	●
システム・機器構成	各塔前後の処理設備の簡素化	●
	吸収材供給量(単位ユニット)の増加	○
	機器合体(吸収塔-乾燥塔の合体)	○

●: 実ガス試験、○: 設計検討

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

(1) 実用プロセス開発

個別要素技術	アウトプット指標・目標値	達成状況(実績値・達成度)
プロセスシミュレーション技術	【中間】プロセスの最適化検討のためのシミュレーターを構築する。 【最終】商用プラント設計に有用な予測精度(10%)まで向上させる。	本事業で開発する固体吸収材を用いた移動層プロセスのシミュレーターを構築した。(計画通り)
低温再生システム	【中間】低温再生方式の適用可能性を確認する。 【最終】低温再生技術を確立する。	スケールアップ合成した固体吸収材を用いて、ラボスケール連続回収試験で、低温蒸気再生プロセスにおいて、1.5 GJ/t _{-CO2} を達成した。(計画通り)
熱交換技術・排熱利用技術	【中間】熱交換技術・排熱利用技術の導入を検討する。 【最終】低温再生技術を確立する。	熱交換技術・排熱利用技術について調査し、KHI保有技術等が有効に活用できる見通しを得た。(計画通り)
固体ハンドリング	【中間】固体吸収材を移動層へ適用させるハンドリング技術を検討する。 【最終】(中間で完了)	固体吸収材を循環させる供給機候補を選定し、ガス導入の設計データを取得することで移動層設備への適用の目処が得られた。(計画通り)

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

(2) 実用化のための材料最適化

個別要素技術	アウトプット指標・目標値	達成状況(実績値・達成度)
アミンのスケールアップ合成技術	<p>【中間】パイロットスケール(数t～数10t)で実施可能な合成法を確立する。</p> <p>【最終】商用スケールでの生産体制に目途を付ける。</p>	<p>従来のラボでの合成手法(アルキル化法)からシッフベース法に変更し、スケールアップ合成(～10t)を実施するとともに、高品質(変換率>95%)合成スキームを確立した。(計画通り)</p>
材料の高耐久性化技術	<p>【中間】本事業で最適化する移動層システムの要求仕様を満たす担体強度を確保する。</p> <p>【最終】商用スケールでの生産体制に目途を付ける。</p>	<p>分離回収性能を担保し、かつ、摩耗および圧壊強度に優れた担体(最大重荷30～60N)を用いた固体吸収材を開発した。(計画通り)</p>
固体吸収材の合成技術	<p>【中間】ベンチ～実ガス試験の実施に向け、10m³スケールでの合成技術を確立する。</p> <p>【最終】商用スケールでの生産体制に目途を付ける。</p>	<p>アミン担持濃度、担持用溶媒、乾燥工程等の担持条件を検討し、10m³スケールでの合成技術を確立した。ベンチ試験用に14m³の合成を達成した(2回)。(計画通り)</p>

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

(3) 燃焼排ガス試験・経済性評価

個別要素技術	アウトプット指標・目標値	達成状況(実績値・達成度)
耐久性、共存ガス影響の評価	<p>【中間】燃焼排ガス成分の影響について調査し、課題を抽出する。</p> <p>【最終】実ガス試験により、長期間運転時の吸収材性能や装置の耐久性に関するデータを取得する。</p>	<p>酸素、水、酸化硫黄等の排ガス成分の影響について、調査およびラボ検討を行い、実ガス試験に向けての課題を抽出した。(計画通り)</p>
実ガス試験の実施・評価	<p>【中間】実ガス試験装置での検討課題を抽出する。</p> <p>【最終】実ガス試験を行い、実ガス使用時のCO₂吸収性能や、耐久性を評価する。</p>	<p>(計画通り)</p>
実ガス試験装置の設計	<p>【中間】実ガス試験装置の設計を完了する。</p> <p>【最終】(中間で完了)</p>	<p>有力な実施先を対象として、40 t_{CO2}/d規模の試験装置の設計を完了した。(計画通り)</p>
CO ₂ 分離回収エネルギー評価	<p>【中間】ベンチスケール試験を実施し、CO₂分離回収エネルギー1.5 GJ/t_{CO2}を達成する。</p> <p>【最終】実ガス試験結果をもとに、CO₂分離回収エネルギー1.0 GJ/t_{CO2}の見通しを明らかにする。</p>	<p>昨年度の試運転結果をもとに吸収材の設計見直しを完了。本年度後半に、ベンチスケール試験を実施の予定。蒸気供給量の最適化などの対応を実施すれば、1.5 GJ/t_{CO2}を達成の見通し。(計画通り)</p>
CO ₂ 分離回収コスト評価	<p>【中間】吸収材開発を含めた要素技術開発結果をもとに、CO₂分離回収コスト2,000円台/t_{CO2}を達成する。</p> <p>【最終】実ガス試験結果をもとに、CO₂分離回収コスト2,000円/t_{CO2}達成に目途を付ける。</p>	<p>吸収材の性能・耐久性の向上、再生蒸気供給量の最適化、吸収材供給量の増加などの対応を取込むことにより、2,000円台/t_{CO2}を達成。(計画通り)</p>

4. 当省(国)が実施することの必要性(1)

・以下の①、②を満たし、当省(国)において、当該事業を実施することが必要である

①多額の研究開発費、長期にわたる研究開発期間、高い技術的難度等から、民間企業のみでは十分な研究開発が実施されない場合

②環境問題への先進的対応等、民間企業では市場原理に基づく研究開発実施インセンティブが期待できない場合

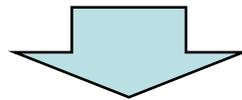
- 地球温暖化(=公害のような外部不経済)対策に特化した技術であるCCSは市場原理だけでは、その導入を図ることは不可能。制度的仕組みが必要。仕組みがなければ、民間で取り組むことは不可能。

- 現状CCSは高コスト

- ・ 財政支援、税制優遇→多額の政策的経費が必要

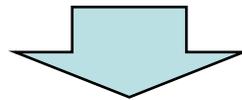
- ・ 規制→民間企業に過度の負担を強いる

我が国産業競争力の低下、海外移転による産業の空洞化などを惹起する恐れ



- CCSコスト低減が不可欠

- ・ CCS導入のインセンティブがない中で、民間企業に、コスト低減のための研究開発の実施を期待することは不可能



国が主導して技術開発を実施、コスト低減の見通しを示す必要がある。

(各要素技術に対する信頼性、諸所の基礎的なエンジニアリングデータなしに企業が新技術を導入するか否かの判断をするにはリスクを伴うため、良い技術であっても採用されない可能性がある。国が主導して実ガス試験レベルまでの技術開発を行い、次の段階での民間企業の補助事業へとつながる技術移転をスムーズに行う必要がある。)

4. 当省(国)が実施することの必要性(2)

CO₂分離技術開発を継続実施する必要性

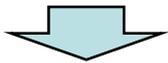
- ・CCSは分離回収、輸送、貯留により構成される一貫したシステムである。
 - 構成技術をそれぞれに民間企業が研究開発するのでは成り立たない
 - 貯留まで含めたCCSのフルチェーンをつなげる必要がある。

長期にわたる研究開発期間、多額の研究開発費等から、民間企業では実施が難しく、また、最先端技術の開発力を維持できない可能性がある。

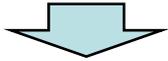
石炭火力+CCS: 我が国が強みを持ち、世界に勝てる技術分野

我が国は石炭火力発電の効率において、世界トップの実力

CO₂分離回収技術においても、卓越性・先導性を有する技術を開発



- ・今後も石炭をエネルギー源として活用していく観点でもCO₂回収技術開発は重要
- ・最近米国環境保護庁(EPA)が新設発電所のCO₂排出量規制も打ち出している。



CO₂分離回収技術のコストをさらに低減

- ・我が国の高効率の石炭火力発電を海外に展開する際にCCS技術を付加することにより、一層の国際競争力を獲得することが可能。
- ・逆に、他国によるCO₂回収技術開発の先行を許せば、これまで有してきた我が国の本分野における優位性が失墜する可能性が極めて高い。

5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ

先進的二氧化碳素固体吸収材実用化研究開発事業

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

アミン吸収剤の低温再生技術・プロセスの開発

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

技術完成・信頼性の確立

カスタマー

石炭火力発電所、製鉄所、セメント工場、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(2020年)
(2,000円/t_{CO2})

+制度的仕組みの導入

火力発電所等の大規模排出源における
CCSの本格導入(2030年頃)

波及効果

- 炭酸ガス有効利用分野での実用化促進
- 閉鎖空間等でのCO₂除去への応用

プロジェクトの目的

- 地球温暖化対策への貢献
- エネルギー安定供給への貢献
- 持続可能な社会、経済の開発
- 我が国の国際競争力の強化

5. 1 石炭火力プラントでの実用化に至るロードマップ

“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
(学術研究成果)

実用化研究フェーズ(本事業)
(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)

実証・商用化
フェーズ

2010~2014

2015

2016

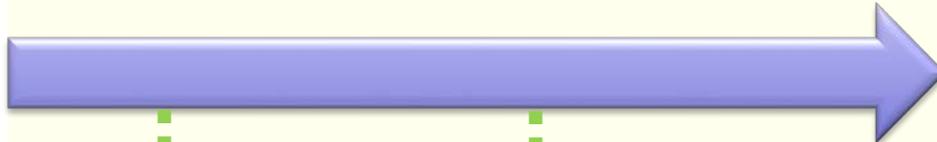
2017

2018

2019

2020~

2030年頃



大規模
CCS

石炭火力プラント

+ 制度的仕組みの導入



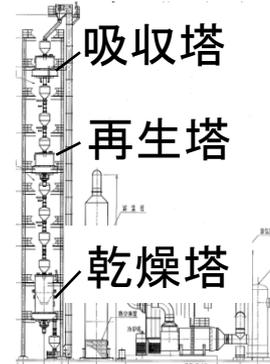
ラボ試験
(数 kg/day)

RITE
CO₂連続回収
試験装置



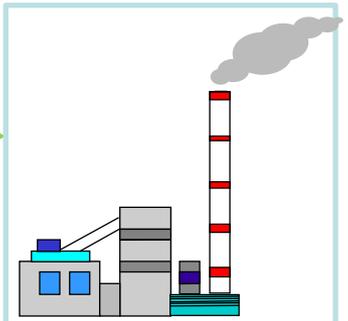
ベンチ試験
(数 t/day)

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)



石炭ボイラ
排ガスへ適用
(3,000 t/day)

5.2 実ガス試験(スケールアップ試験)サイトの決定

省エネルギー型二酸化炭素分離・回収システムの実用化試験を関西電力舞鶴発電所で実施

- ・ RITE
- ・ 川崎重工業株式会社
- ・ 関西電力株式会社

3者同時プレスリリース
(平成29年9月19日)

同時資料配布先：
経済産業記者会
学研都市記者クラブ

2017年9月19日

公益財団法人地球環境産業技術研究機構
川崎重工業株式会社
関西電力株式会社

省エネルギー型二酸化炭素分離・回収システムの
実用化試験を関西電力舞鶴発電所で実施

公益財団法人地球環境産業技術研究機構(本部：京都府木津川市、理事長 茅陽一、以下、RITE)、川崎重工業株式会社(本社：神戸市中央区、代表取締役社長 金花芳則、以下、川崎重工)、関西電力株式会社(本社：大阪市北区、取締役社長 岩根茂樹、以下、関西電力)は、このたび、経済産業省の「CO₂分離回収技術の研究開発事業」に参画し、省エネルギー型二酸化炭素分離・回収システムの実用化試験を関西電力舞鶴発電所内で実施します。

火力発電所などから排出される排ガス中の二酸化炭素の分離・回収は、これからの低炭素社会を実現する上で非常に重要な技術であると期待されていますが、分離・回収時のエネルギー消費量低減が課題となっています。

RITEおよび川崎重工はこの課題を解決するために、これまで「省エネルギー型二酸化炭素分離・回収システム」の研究開発に取り組んでおり^{※1}、CO₂用固体吸収材やKCC(Kawasaki CO₂ Capture)移動層システムを新たに開発しました。これにより、未利用エネルギーである低温排熱を用いたCO₂の分離回収が可能になったことで、従来の方式と比べて、大幅な省エネルギー化を実現しました。

関西電力は平成28年度から本事業へ参画し、試験地点の検討を行ってまいりましたが、このたび、関西電力舞鶴発電所内に、国内初となる固体吸収材を用いた40トンCO₂/日規模の実用化試験設備を設置することとなり、平成31年度以降に実用化試験を実施する予定です。

本事業を通じて確立される二酸化炭素の分離・回収技術は、地球温暖化防止に関するパリ協定^{※2}が目指す温室効果ガスの削減を、従来活用していた技術よりも省エネルギーで実現できるため、CO₂削減に係るエネルギー負担およびCO₂分離・回収コストの低減^{※3}に繋がります。経済性と環境保全の両立に寄与するものです。

RITE、川崎重工および関西電力は、「省エネルギー型二酸化炭素分離・回収システム」の技術開発を通じて、温室効果ガス排出削減による低炭素社会の実現に貢献してまいります。

※1：経済産業省の「二酸化炭素回収技術実用化研究事業」(平成27～28年度)の採択を受け実施。

※2：パリ協定の長期目標(平成28年11月発効)

- ・世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力を追求
- ・出来る限り早期に世界の温室効果ガスの排出量をピークアウトし、今世紀後半に人為的な温室効果ガスの排出と吸収源による除去の均衡を達成。

出典：「地球環境政策について」(平成29年8月 経済産業省)

http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/sangyougiyutsu/pd/006_03_01.pdf

※3：次世代火力発電に係る技術ロードマップ等を踏まえ、2,000円/トンCO₂を目指す。

出典：「次世代火力発電に係る技術ロードマップ技術参考資料集」(平成28年6月 経済産業省)

<http://www.meti.go.jp/press/2016/06/20160630003/20160630003-2.pdf>

別紙：実用化試験の概要

お問合せ先・報道担当：

広報

(公財)地球環境産業技術研究機構 企画調査グループ 中村

電話番号 0774-75-2301

実用化試験の概要

[実用化試験の概要]

- ・事業名称：経済産業省「CO₂分離・回収技術の研究開発事業」
- ・事業期間：平成27年度～(実証試験は平成31年以降)
- ・実施者：RITE(固体吸収材の開発担当)

川崎重工(分離・回収システムの開発担当)
関西電力(分離・回収システムの評価担当)

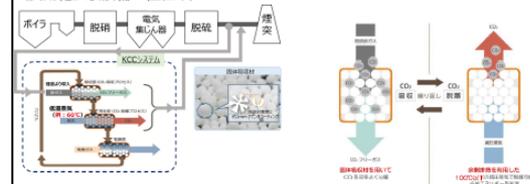
- ・装置構成：発電所の煙道から排出ガスを抜き取り、川崎重工が開発したKCC移動層システム^{※1}によりCO₂を分離・回収^{※2}する。KCC移動層システムにはRITEが開発したCO₂用固体吸収材^{※3}を活用する。

※1：固体吸収材を移動させることにより、吸収効率を向上させることが可能となるため、大置化に適したシステム。

※2：今回の試験では、回収したCO₂は再度煙道へ戻す。

※3：従来の高性能アミン吸収液と類似のCO₂吸収特性を有しながら、再生工程で熱や蒸発潜熱に消費されるエネルギーの大幅低減が期待できる。

(実用化試験設備の仕組み)



(実用化試験設備(40トンCO₂/日プラント)のイメージ)



(大きさ：縦約23m×横約53m×高さ約40m)

(舞鶴発電所概要)

ユニット	営業運転開始	出力	発電方式	使用燃料
1号機	平成16年8月	90万kW	火力発電	石炭
2号機	平成22年8月	90万kW	火力発電	石炭

住所：京都府舞鶴市宇千歳560番地5

http://www.kepcoco.jp/energy_supply/energy/thermal_power/plant/maizuru.html

5. 実用化までのシナリオ

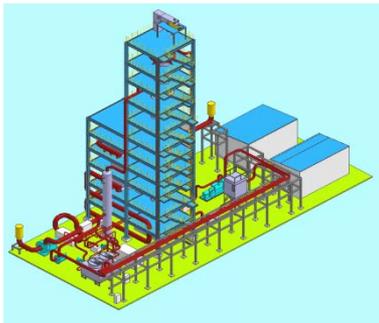
基本方針

実証と実事業の両輪で、2030年以降の実用化につなげる

- ・**実証試験**: 合理化に有効な新たな要素技術を検証を含めて、数100t_{CO2}/d規模の実証試験を実施。(プラントエンジニアリングの知見に基づき、試験規模の10倍程度の商用化は可能)
- ・**実事業**: CO₂有効利用で、40t_{CO2}/d規模の実績を積み上げる。

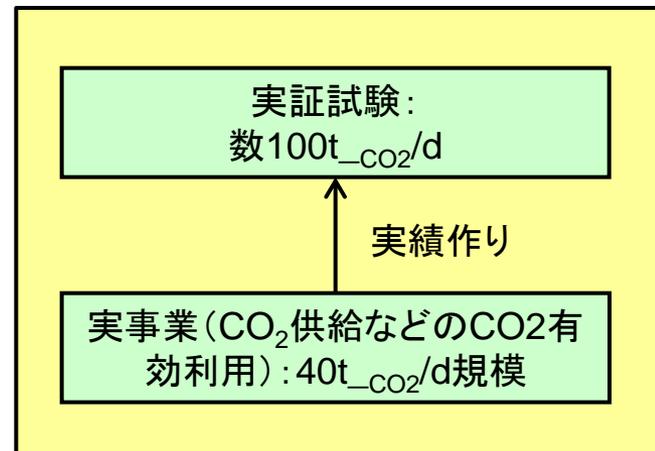
～2019(平成31年)

本事業



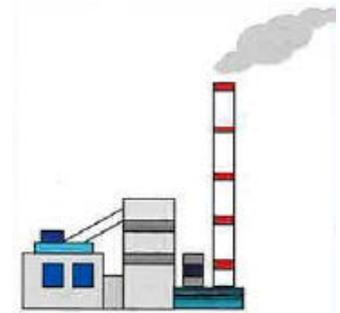
実ガス試験装置
(40t_{CO2}/d)

2020(平成32年)～2029



2030～

大規模CCS



石炭火力プラント
(3,000～t_{CO2}/d)

5.4 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】

他の大規模排出源や低濃度CO₂除去システムへの応用

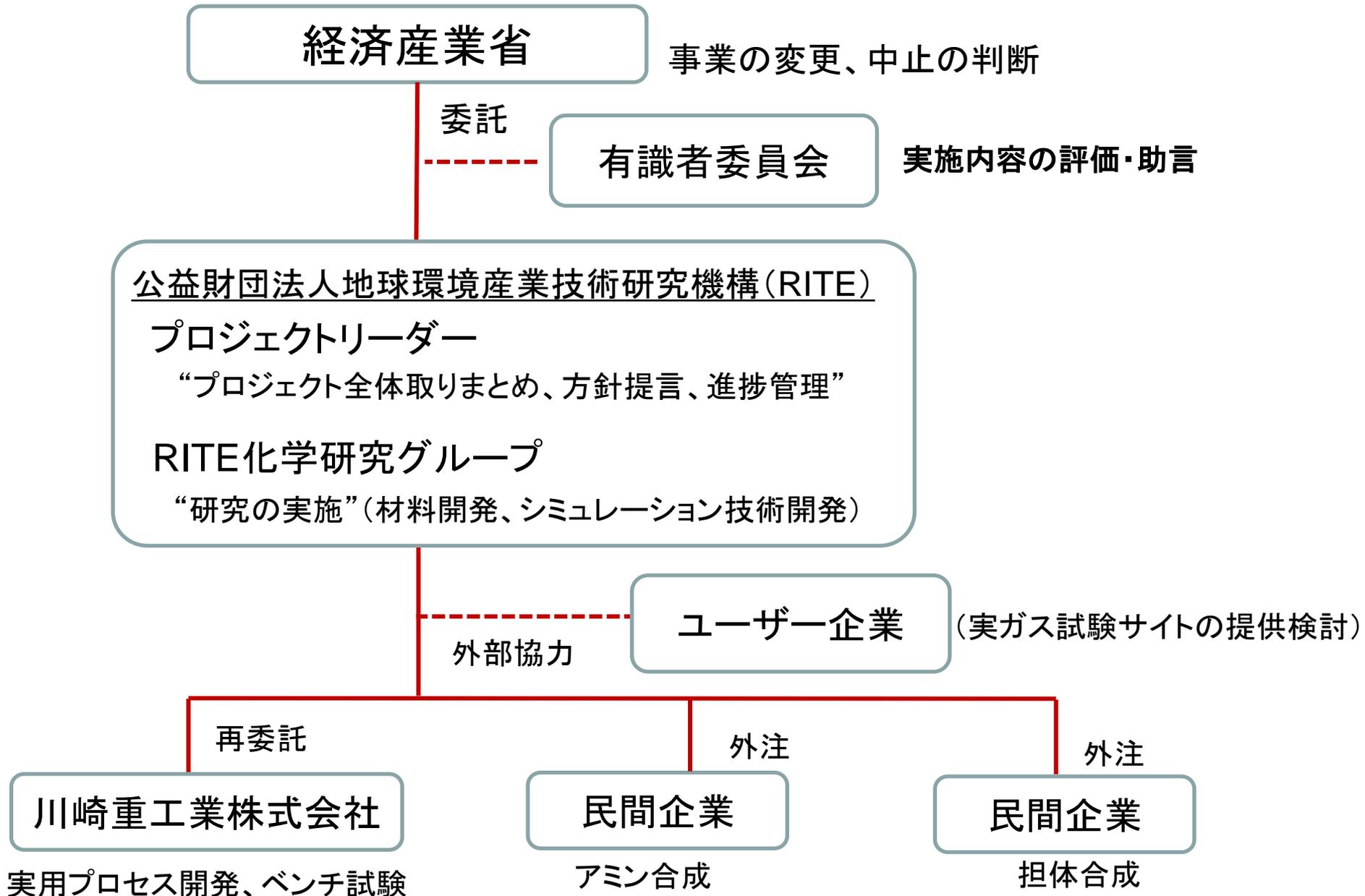
石炭燃焼排ガス(10-15% CO₂)のみならず、製鉄所、セメント工場、ボイラー使用者、あるいはCO₂濃度がより低く技術的ハードルの高い適応先への展開も期待される:

室内、閉鎖空間、大気等からのCO₂回収(約400～数千 ppm)

○ 有人宇宙探査機の環境制御

2,000ppm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)

(1) 研究開発の実施・マネジメント体制

- ・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。
- ・CO₂回収設備のユーザーとなる電力会社からの協力を得ながら研究を進めている。
- ・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。

(2) 技術的成果の管理方法等

知的財産に関する戦略

- ・特許権等の帰属特許法を踏まえ、原則として発明者(研究者)主義としつつ、発明者の所属企業・機関の「職務発明規定」に準拠して機関帰属とする。※
 - ・共同発明に係る権利持分比率を決める場合は、原則として、発明に対する貢献度(寄与率)で特定するものとする。※
 - ・シナジー効果を確保する観点から、当該プロジェクトにおいて発生した知財については、原則としてプロジェクト内は非独占実施とする。※
- ※ただし、製品化、実用化に向けて(a)特許の一括管理(共有化)、(b)クロスライセンス、(c)独占的实施等による方が有効と考えられる場合等、慎重に検討を行ったうえで、決定、採用するものとする。

国際標準／認証に関する戦略

国際標準化に関しては、ISO/TC265において、CCSに関する標準化が進められている。特に、回収に関するWGについては、我が国が、WGコンビーナ(主査)と事務局を務めており、回収技術の国際標準を主導している。本事業を実施することにより得られたデータや記録等の成果については、技術パッケージ及びマニュアルとして整理する。それらをもとに、当該技術のプラクティスマニュアル化を図り、国際標準化の際にはISO/TC265国際規格のシード文書としての活用や、これらを活かした国際規格の積極的な提案が図れるようにするとともに、日本の企業の産業競争力強化に資するよう努める。

性能や安全基準の策定に関する考え方

本事業を実施することにより得られたデータや操業記録等をもとに、技術の性能指標や操業における安全基準を抽出・整理する。これにより、関連業界における安全性基準の策定が進むことを見込んでいる。さらに、これらを国際規格にも反映するよう努める。

規制緩和／導入支援を含む実用化に向けた取組

実証に関しては、本事業終了後補助事業により石炭火力発電所における大規模実証を経て、国の制度的仕組みの導入により、本格導入・実用化が進むものと想定される。

7. 費用対効果

固体吸収材方式のスペック・コスト目標

		本方式	従来型 アミン吸収液方式 (技術戦略マップ参照*)
回収エネルギー	GJ/t-CO ₂	1.0	2.5～4.0
蒸気温度	°C	60	120
回収コスト	円/t-CO ₂	2,000	4,200*

市場への導入目標・実現時期

本事業終了後、発電所における実機スケールでの実証試験(補助事業)を経て、2020年台には環境規制や固定価格買取制度(FIT: Feed in Tariff)のような制度的な仕組みの導入により、本格的にCCSが進むことが期待される。小規模スケールでのCO₂回収(有効利用分野)においては、本事業終了後、大規模適用に先行して実用化することが想定される。

成果とユーザーの段階的イメージ:

実用化研究終了後の主な導入先は大規模CO₂排出源であり、火力発電所のほか、産業利用として、製鉄所、セメント工場、石油化学プラント等があげられる。したがって、ユーザーとしては、電力事業者、鉄鋼産業、セメント産業、設備製作に関してエンジニアリングメーカー等があげられる。

7. 費用対効果

我が国の帯水層へのCO₂貯留可能量は、カテゴリ-Aの基礎試錘データがあるもので約52億トン程度、全体では1,461億トンと見込まれている。特に、カテゴリ-A 帯水層へのCO₂貯留に関しては、他の温暖化対策オプションに比べて経済的に有利であるとのモデル評価結果がある。現状で約4,200円/t-co₂の分離回収技術が2,000円台/t-co₂になれば、トンCO₂あたり1,200～2,200円の便益があり、カテゴリ-A 帯水層可能量52億トンのCO₂貯留に適用した場合に、約6兆2千億円～11兆4千億円程度の便益が得られることになる。

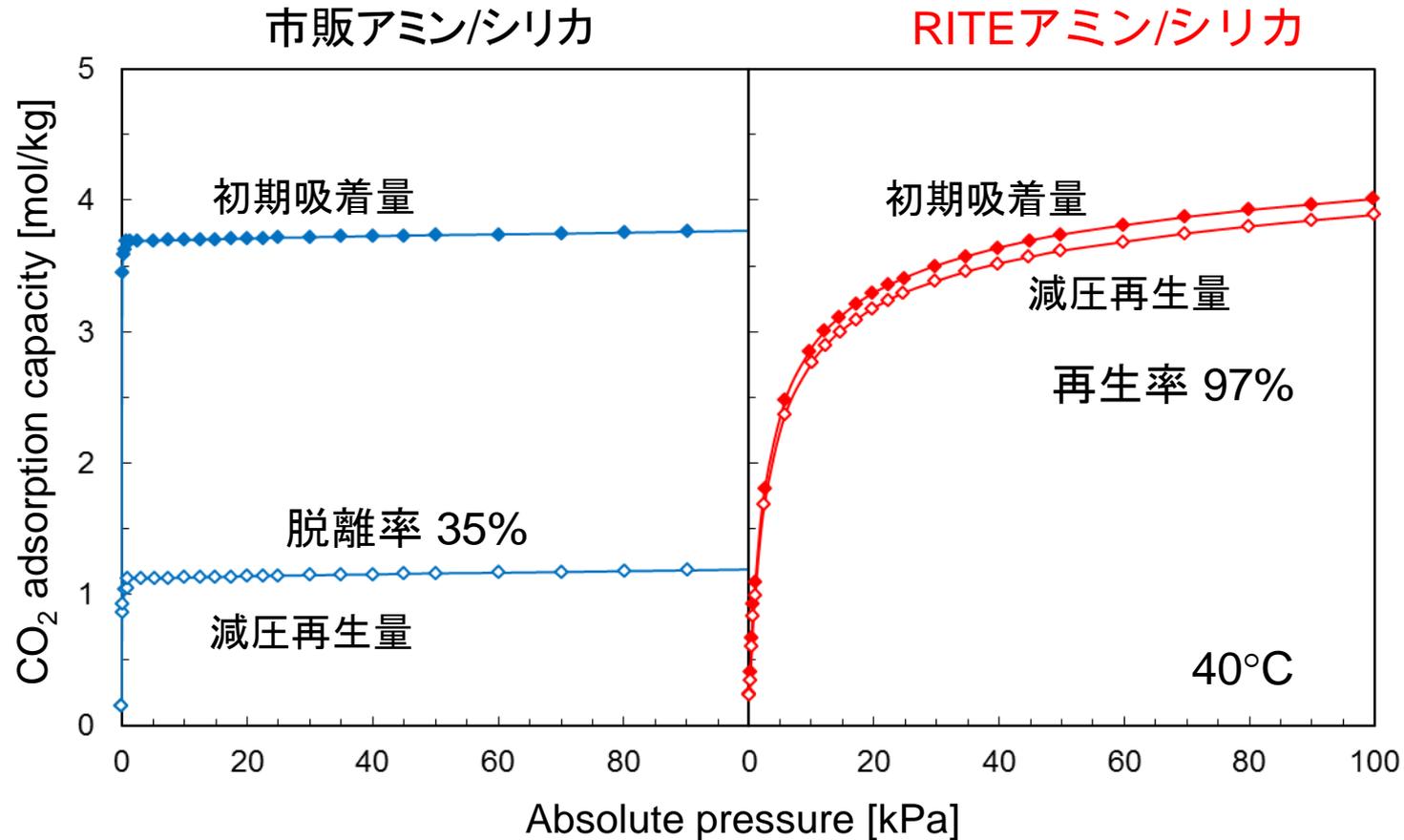
このうち火力発電所の寄与を25%程度と考えると、約1兆6千億円～2兆9千億円程度の便益が得られることになる。

本事業の効果によりCO₂貯留の実現性が増すばかりでなく、カテゴリ-Aに相当するCO₂を処理した場合に限った試算でも、CO₂処理費用を低減する効果は莫大なものであり、本事業は研究開発費を大きく上回る十分な費用対効果を有するものと判断される。

8. 事前評価の結果

	評価WGの評価コメント	対処方針
①	分離膜の開発については開始時に検証可能な基準を設けステージゲート方式等で絞り込みを行うことを検討すること。	ご指摘を踏まえ、中間評価時に係る指標を見直しました。評価時点において当該指標を達成できない場合には、研究計画等を見直すことといたします。
②	CCSの導入戦略について検討を継続すること。	今後、CCS実証事業の結果などを踏まえ、導入戦略の検討を継続してまいります。
③	国際協力の観点および国際標準の枠組みを含む本事業の海外戦略の検討を行うこと。	ご指摘を踏まえ、当該プロジェクトの実施に当たり、海外戦略についても検討して参ります。特に、国際標準化については、既にISOに専門委員会(TC265)が設置されており、本事業における成果も含めた我が国の技術が国際標準化に適切に反映されるよう取り組んでまいります。
④	プロジェクト内を非独占実施とすることは参加企業のインセンティブを損なう恐れがあるため、知的財産管理戦略について再検討すること。	ご指摘を踏まえ、知的財産権の管理・運用を適切に実施してまいります。

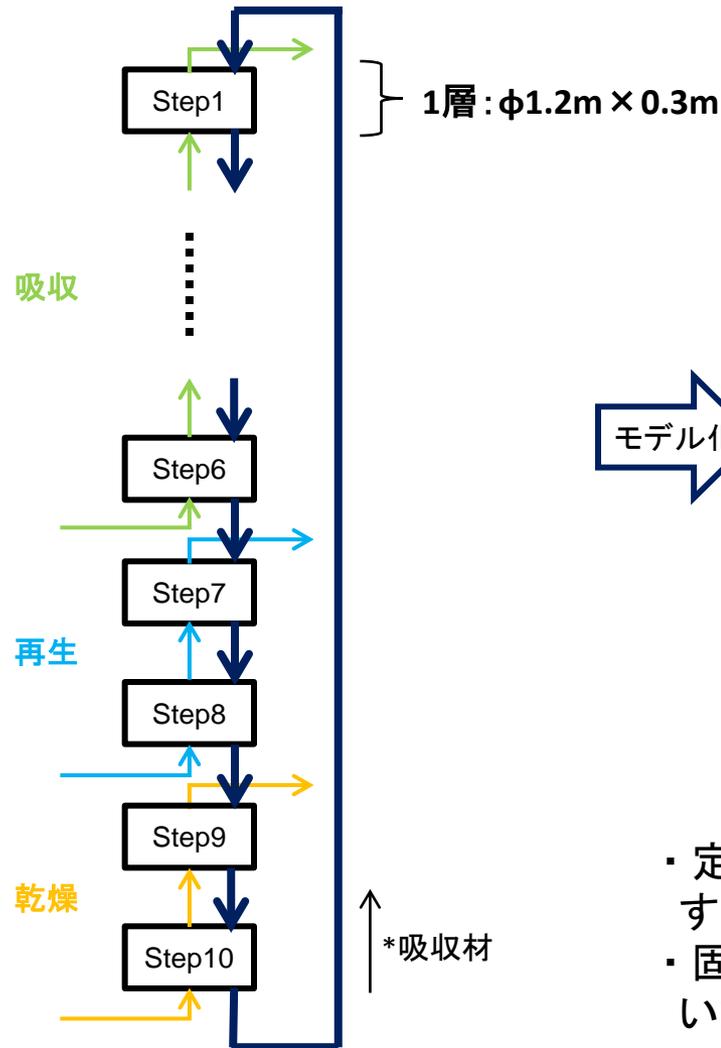
参考：RITEアミン含浸固体吸収材の吸着等温線



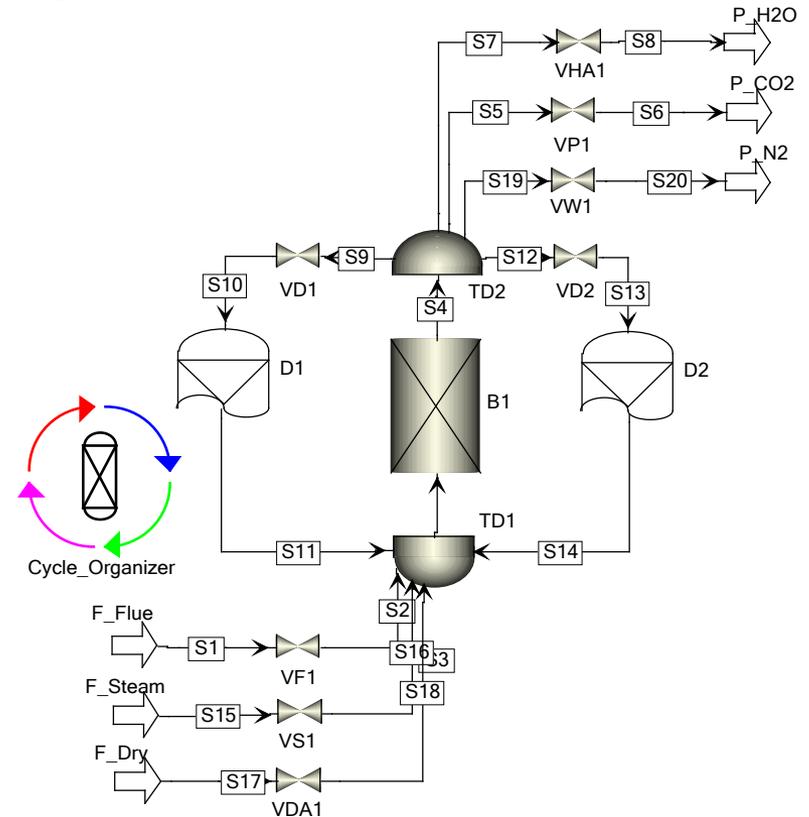
RITEアミンを担持した固体吸収材は市販アミンを用いたもの比べて、極めて優れた再生効率を有する(本試験では40°Cで減圧再生)

参考：移動層プロセスシミュレーターの構築

シミュレーション工程(吸収塔1.8m_再生塔0.6m_乾燥塔0.6m)



モデル化



- ・ 定層高の充填層に対し、時間毎に供給または通過するガスを変えることで、移動層をモデル化した
- ・ 固定層をベースにしているが、移動層システムに近い計算が可能
- ・ H29年度のベンチ試験データで検証予定

*材料循環量はステップ切り替え時間で設定

参考：ラボスケール連続回収試験条件（H28ベンチ試験材）

- ◎ H28ベンチ試験材はCO₂脱着性能に比較的乏しく回収率が低。
再生温度を比較的高く(80℃)設定し、洗浄時間を短くしたことで
低エネルギーで高回収率を実現

試験条件	
Sorbent	ブレンドアミン(市販アミンベース) /スケールアップ合成用担体A
充填量	200 g/塔 × 3塔
試験温度	80 °C
吸着圧力	100 kPa
脱着圧力	15 kPa (成行き)
サイクル時間	9 min (180 sec×3)
サイクル数	100 cycle
供給ガス	3 L/min (12%-CO ₂ = 1 kg/day)
供給蒸気量	0.44 g/min (湿度:50% at 80 °C) ⇒ 供給ガス入口温度65℃では 相対湿度93% に相当
再生蒸気量	0.40 g/min
洗浄時間	10 sec

Step	操作			時間 [sec]
	カラム1	カラム2	カラム3	
1	前処理(80 °C)N ₂ フロー			10800
2				10800
3	(昇圧)	脱着	洗浄	10
4	吸着			(待機)
5	洗浄	(昇圧)	脱着	170
6		(待機)		10
7	(待機)	吸着	脱着	0
8		170		
9	脱着	洗浄	(昇圧)	10
10			0	
11	(待機)	吸着	170	
100サイクル (Step 3 - 11) 後終了				

1 サイクル

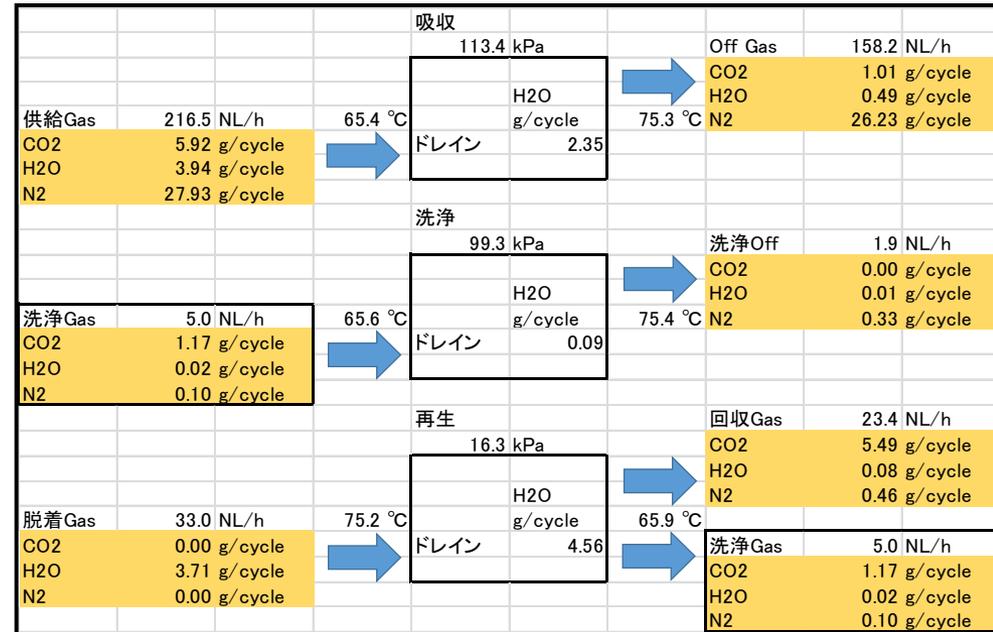
参考：H28ベンチ試験材ラボスケール連続回収試験

- ◎ ラボ試験結果から物質収支や熱収支を解析
 ⇒ **低エネルギー低温再生**を可能とする
高効率システムを立証 ⇒ **ベンチスケール**
プラントの設計改善や**運転プロセス最適化**に反映

H28ベンチ試験材(市販アミン/担体A)物質収支の例

	吸収	洗浄	再生	収支	
	g/cycle	g/cycle	g/cycle	g/cycle	%
CO ₂	-4.90	-1.17	6.67	0.59	108.4
H ₂ O	-1.10	0.07	0.96	-0.07	99.1

- ◎ CO₂、H₂O、共に
 ±10%以内での物質収支を確認



H28ベンチ試験材(市販アミン/担体A)熱収支の例

	系への加熱 [W]				系の 温度変化 熱量 [W]	収支 (放熱) [W]
	ガスΔH	反応熱				
		CO ₂	H ₂ O			
吸収	29.74	3.93	15.97	9.84	22.48	7.3
洗浄	3.41	0.24	3.82	-0.65	2.93	0.5
再生	-33.47	-3.17	-21.72	-8.57	-33.07	-0.4

- ◎ 再生工程における-0.4 Wは0.04 GJ/t-co₂の入熱を示唆
 ⇒ 入熱分を考慮しても**消費エネルギー**は**1.5 GJ/t-co₂**

参考：ラボスケール連続回収試験条件（H29ベンチ試験材）

◎ H29ベンチ試験材はCO₂脱着性能が比較的高いため

再生温度の低減（60℃）が可能。

洗浄時間を長く設定することで低エネルギーで高純度・高回収率を実現。

試験条件	
Sorbent	RITEアミン ／スケールアップ合成用担体A
充填量	200 g/塔 × 3塔
試験温度	60℃
吸着圧力	100 kPa
脱着圧力	15 kPa（成行き）
サイクル時間	9 min（180 sec×3）
サイクル数	100 cycle
供給ガス	3 L/min（12%-CO ₂ = 1 kg/day）
供給蒸気量	0.20 g/min（湿度：50% at 60℃） ⇒ 供給ガス入口温度51℃では 相対湿度78%に相当
再生蒸気量	0.40 g/min
洗浄時間	30 sec

Step	操作			時間 [sec]
	カラム1	カラム2	カラム3	
1	前処理（80℃）N ₂ フロー			10800
2	冷却（60℃）N ₂ フロー			10800
3	（昇圧）	脱着	洗浄	10
4	吸着		（待機）	20
5	洗浄	（昇圧）	脱着	150
6		（待機）		10
7	（待機）	吸着	脱着	20
8		（待機）		150
9	脱着	洗浄	（昇圧）	10
10		（待機）	吸着	20
11	（待機）	（待機）	吸着	150
11				（待機）

1 サイクル

100サイクル (Step 3 - 11) 後終了

参考：H29ベンチ試験材ラボスケール連続回収試験

◎ ラボ試験結果から物質収支や熱収支を解析

⇒ **低エネルギー低温再生**を可能とする

高効率システムを立証

⇒ **ベンチスケールプラントの**

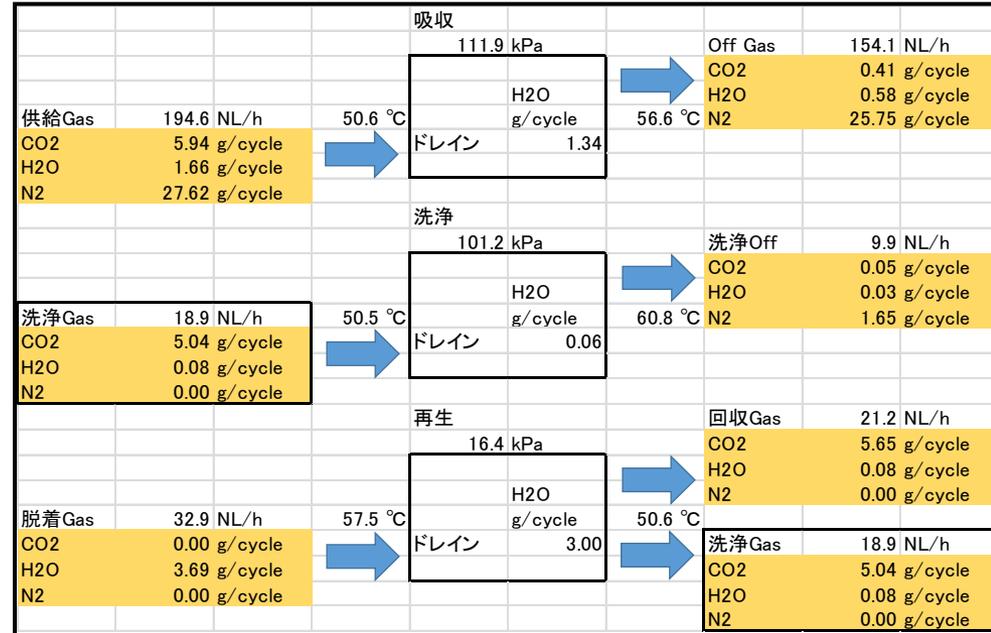
設計改善や運転プロセス最適化に反映

H29ベンチ試験材 (RITEアミン/担体A) 物質収支の例

	吸収	洗浄	再生	収支	
	g/cycle	g/cycle	g/cycle	g/cycle	%
CO ₂	-5.53	-4.99	10.68	0.17	101.5
H ₂ O	0.26	0.02	-0.53	-0.26	95.2

◎ CO₂、H₂O、共に

±5%以内での物質収支を確認



H29ベンチ試験材 (RITEアミン/担体A) 熱収支の例

	系への加熱 [W]				系の温度変化熱量 [W]	収支 (放熱) [W]
	ガスΔH	反応熱				
		CO ₂	H ₂ O			
吸収	17.40	3.23	16.47	-2.30	18.79	-1.4
洗浄	15.64	0.91	14.87	-0.14	10.62	5.0
再生	-29.63	-2.55	-31.84	4.76	-33.15	3.5

◎ 吸収工程における熱収支-1.4 Wは0.13 GJ/t-co₂の入熱を示唆

⇒ 入熱分を考慮しても**消費エネルギーは1.5 GJ/t-co₂**

参考：固体ハンドリング技術（吸収材供給方法の検討）

各塔からの排出に用いる供給機を調査し、要求仕様で比較して供給機候補を選定した。

要求仕様

①定量供給性がある、②沈降に偏りが無い、③吸収材を破碎しない、④商用規模への大型化が可能

名称	供給機A		供給機B		供給機C		供給機D	
原理	・底部羽根の回転により連続的に排出		・羽根により放射状の流れを作り、底部ディスクの回転で連続的に排出		・ロールの回転により連続的に排出 ・上部のゲートで流量を調整		・底部ディスクの回転により連続的に排出 ・羽根なし	
特徴	・定量供給性が高い ・水平面に対し均質に流動する		・外周部での固体の圧縮が少ない ・水平面に対し均質に流動する		・フィードロールによる固体の圧縮が少ない		・羽根が無いいため自重以外の圧縮がない	
実績	芋などの食料品、粒子等		ペレット、ペットフード等		樹脂ペレット、穀粒、崩れやすい造粒品等		ペレット、フレーク、粒状原料など	
評価	定量供給性	◎	定量供給性	◎	定量供給性	◎	定量供給性	◎
	流動の均質性	◎	流動の均質性	◎	流動の均質性	×	流動の均質性	×
	吸収材の破碎	○	吸収材の破碎	○	吸収材の破碎	○	吸収材の破碎	◎
	大型化（～4 m）	◎	大型化（～4 m）	◎	大型化（～4 m）	○	大型化（～4 m）	◎
	総合：○		総合：○		総合：×		総合：×	

◎：適用可能 ○：課題を解決することで適用可能 ×：構造上適用不可

参考：固体ハンドリング技術（吸収材供給方法の検討）

ホッパからの排出に用いる供給機を調査し、要求仕様で比較して全ての供給機を有力な候補とした。

要求仕様

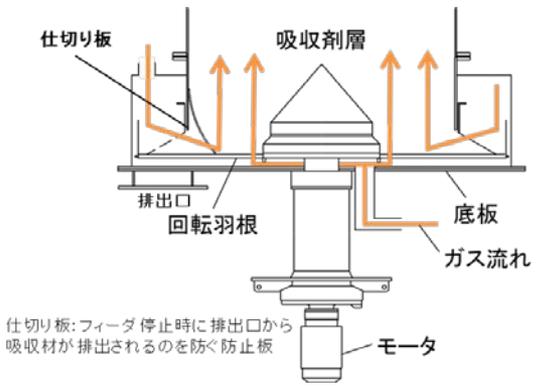
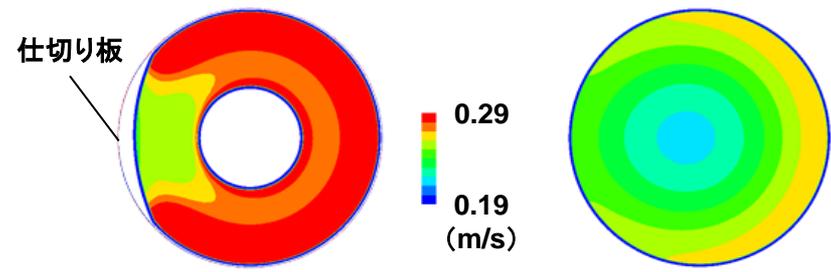
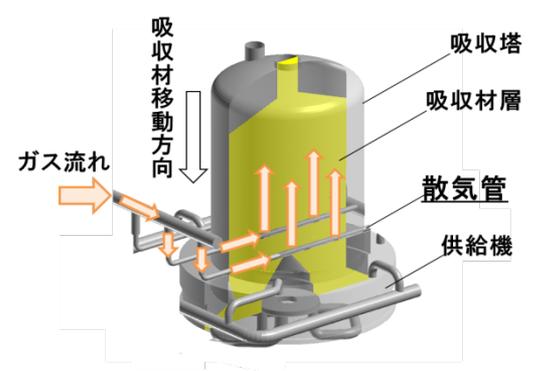
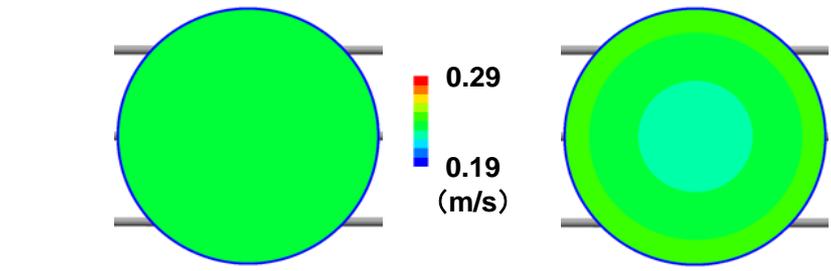
- ①定量供給性がある、②吸収材を破碎しない、③シール性がある
（排ガス等の逆流を防ぐ目的）

	供給機Ⅰ		供給機Ⅱ		供給機Ⅲ	
原理	・ロータを鉛直方向に回転させてシール性を維持しながら連続排出		・ドラムを鉛直方向に回転させて高いシール性を維持しながら連続排出		・回転する上下の弁板が異なるタイミングで開口することによりシール性を維持しながら連続排出	
特徴	・軸封部、サイドケーシングの2箇所にてエアージェットして粉を除去		・シール性が高い ・一回転に一度の締め切りのため、噛み込みによる破碎の頻度が少ない		・噛み込みが少ない ・機器内部での移動がないため付着量が少ない	
実績	フライアッシュ、石粒等		フライアッシュ、木質チップ、石灰石、汚泥等		微粉炭、消石灰等	
評価	定量供給性	◎	定量供給性	◎	定量供給性	◎
	吸収材の破碎	○	吸収材の破碎	○	吸収材の破碎	○
	シール性	◎	シール性	◎	シール性	◎
	総合：○		総合：○		総合：○	

◎：適用可能 ○：課題を解決することで適用可能 ×：構造上適用不可

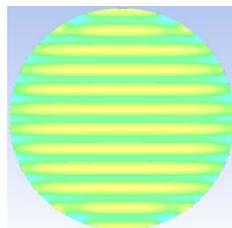
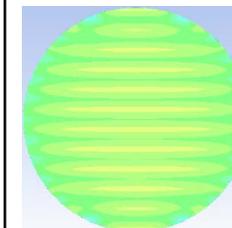
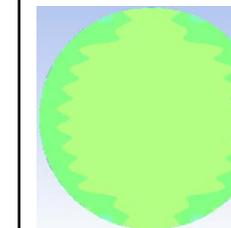
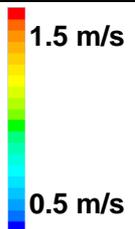
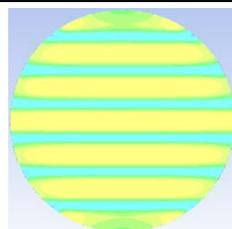
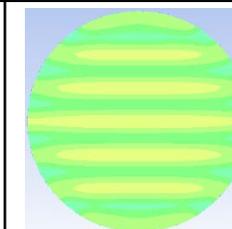
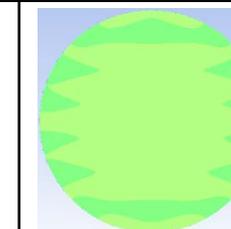
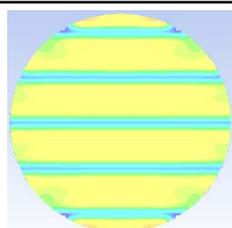
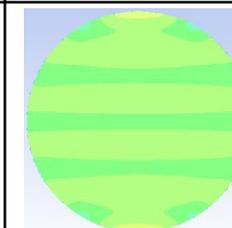
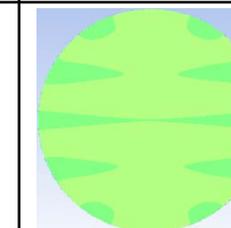
参考：固体ハンドリング技術（ガス導入方法の検討）

ガスと吸収材を効率良く接触させる**ガス導入方法を検討し、**
流れ解析を実施して散気管を用いる方法を選定した。

導入方法	検討結果
①供給機の構造を利用する導入方法	
 <p>仕切り板:フィーダ停止時に排出口から 吸収材が排出されるのを防ぐ防止板</p>	<p>仕切り板の影響でガス流れに偏りが見られる。</p>  <p>底板から0.2 mの速度分布</p> <p>底板から0.7 mの速度分布</p>
②散気管を利用する導入方法	
	<p>均一なガス流れとなっている。 → 選定</p>  <p>散気管から0.2 mの速度分布</p> <p>散気管から0.7 mの速度分布</p>

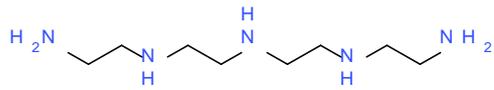
参考：固体ハンドリング技術（ガス導入方法の検討）

- 散気管の間隔をパラメータとして**商用規模の流れ解析を実施した。**
- 散気管設計に必要なデータの取得が完了した。**

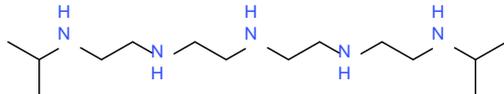
Case1					
	速度分布				
散気管からの距離	m				
分布内速度差		m/s	0.38	0.20	0.10
Case2					
	速度分布				
散気管からの距離	m				
分布内速度差		m/s	0.55	0.18	0.10
Case3					
	速度分布				
散気管からの距離	m				
分布内速度差		m/s	0.85	0.20	0.10

参考：アミンのスケールアップ合成技術の確立

	H28	H29
RITEアミン (IP-TEPA) 合成	0.5 ton	3.5 ton



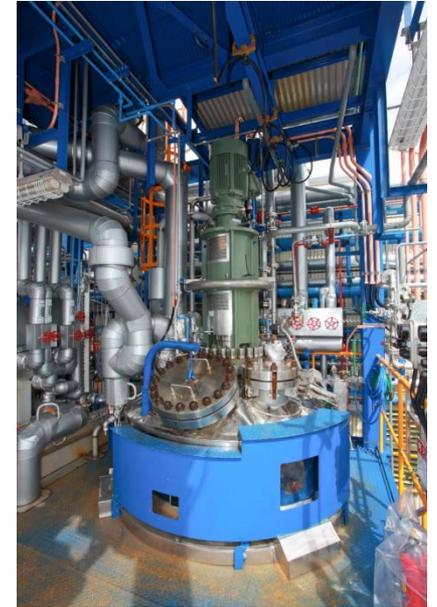
TEPA(四主成分の一つ)



IP-TEPA(目的成分の一つ)



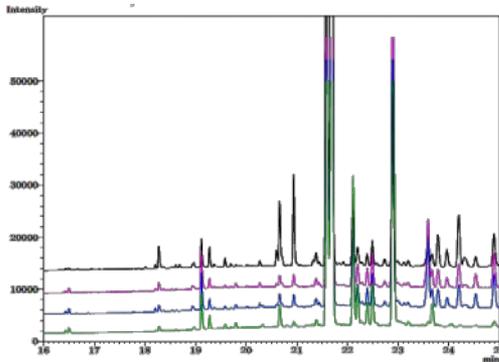
ベンチ試験用アミン合成設備



反応器



反応中



H28年度まで
(変換率~90%)

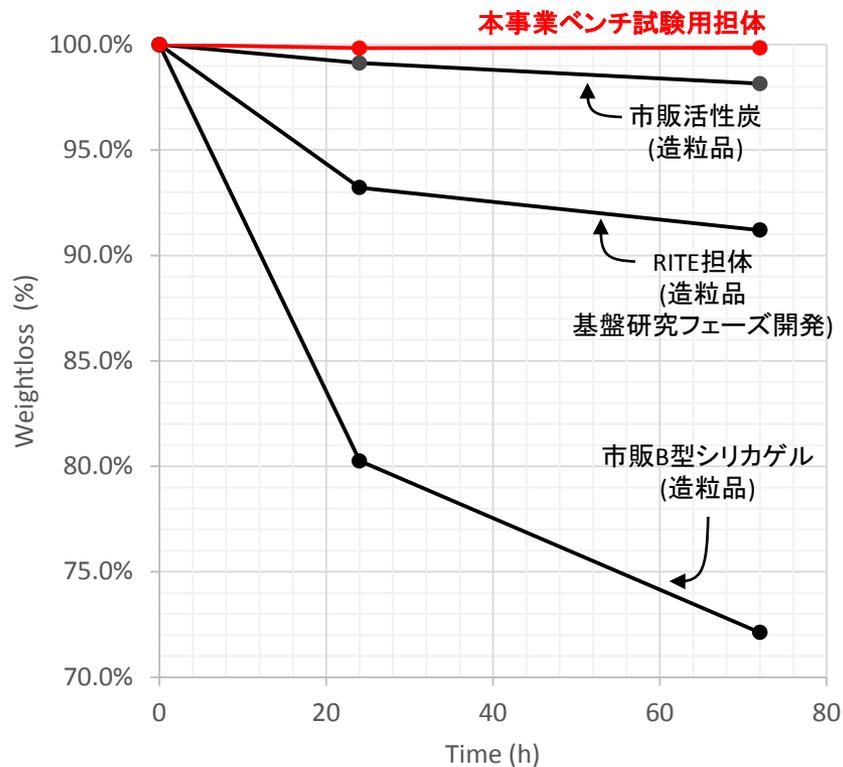
H29
(変換率>90%)

参考：固体吸収材担体の耐久性評価例（摩耗試験）

- Stainless pot: $\phi 57 \times 55$
- Sample: 10~20 g
- Rotating for ~72 h (100 rpm)
- 850 μm 以上を回収
- 80°Cにて一晩乾燥後、重量変化測定



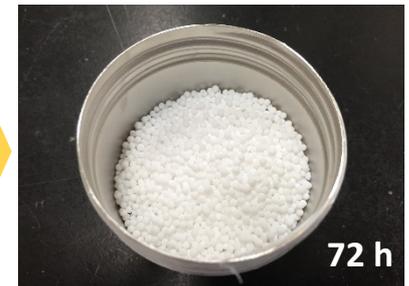
転動ボールミル



本事業ベンチ試験用担体



0 h

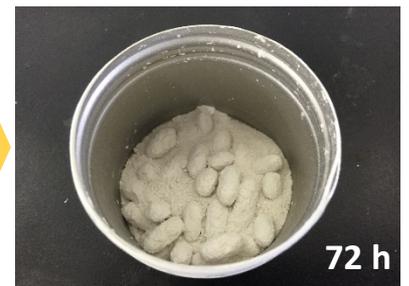


72 h

市販B型シリカゲル(造粒品)



0 h



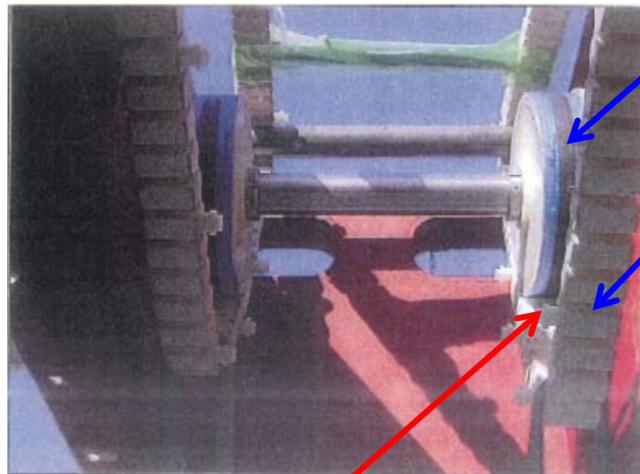
72 h

参考：ベンチスケール燃焼排ガス試験の実施・評価

＜ベンチスケール燃焼排ガス試験での課題抽出①＞

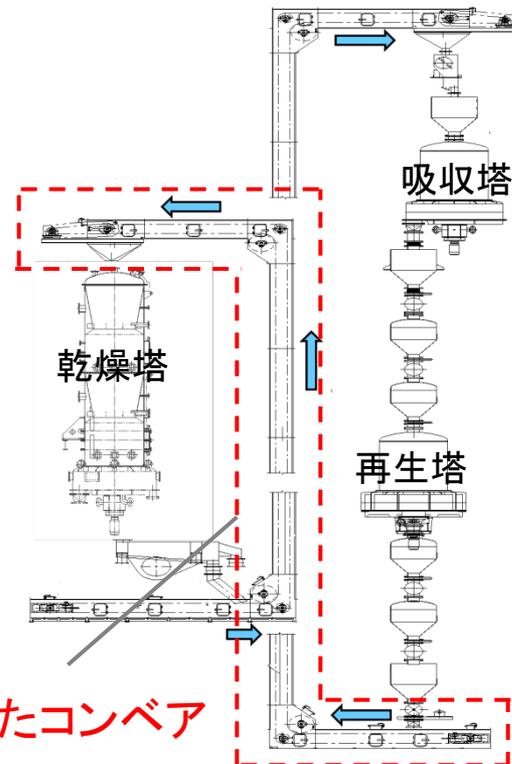
吸収材から揮発するアミンと水分は粘性があり、コンベアのスリップを引き起こすため、実用化試験設備では吸収材中アミン・水分の揮発抑制と付着物の除去が必要であることが分かった。

＜コンベアのスリップ箇所＞



揮発したアミンと水分が付着

プーリ
ラバーベルト

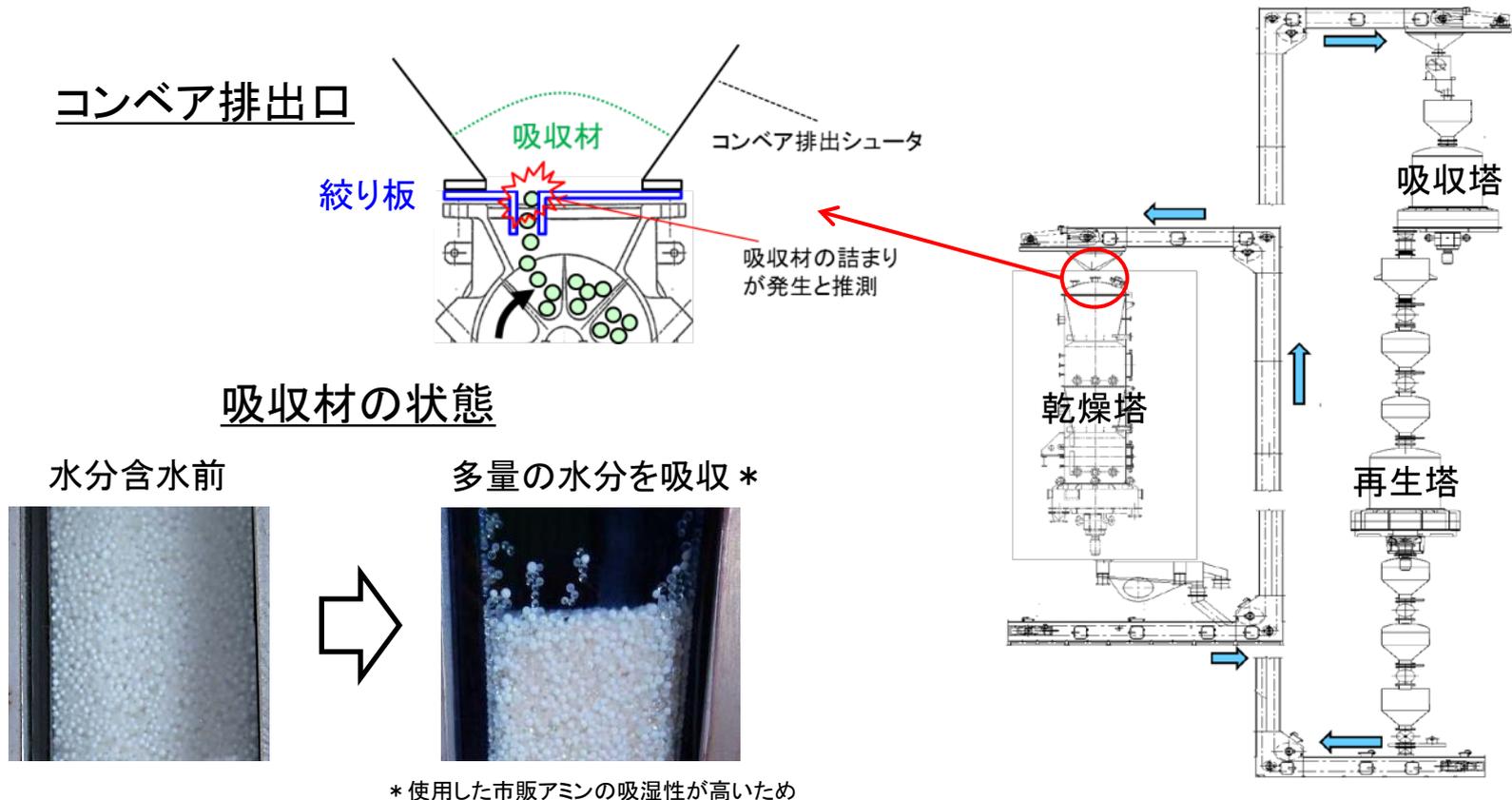


スリップしたコンベア

参考：ベンチスケール燃焼排ガス試験の実施・評価

＜ベンチスケール燃焼排ガス試験での課題抽出②＞

多量の水分会含んだ吸収材は流動性が変わり**ブリッジ**しやすくなるため、吸収材中水分と流動性の関係を把握し、吸収材改良と装置改造の両面から対策が必要であることが分かった。

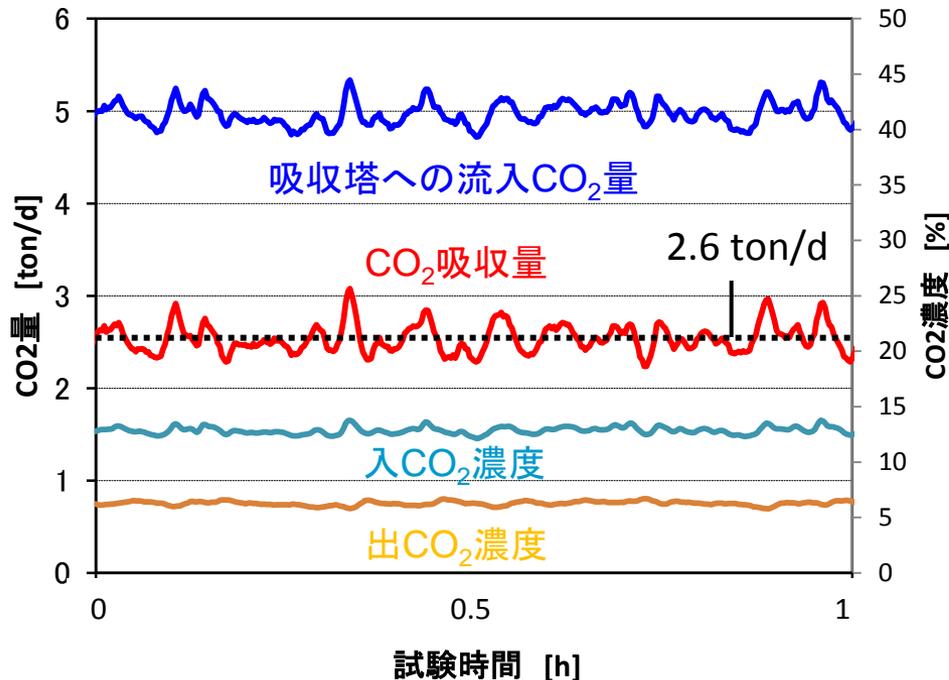


参考：ベンチスケール燃焼排ガス試験の実施・評価

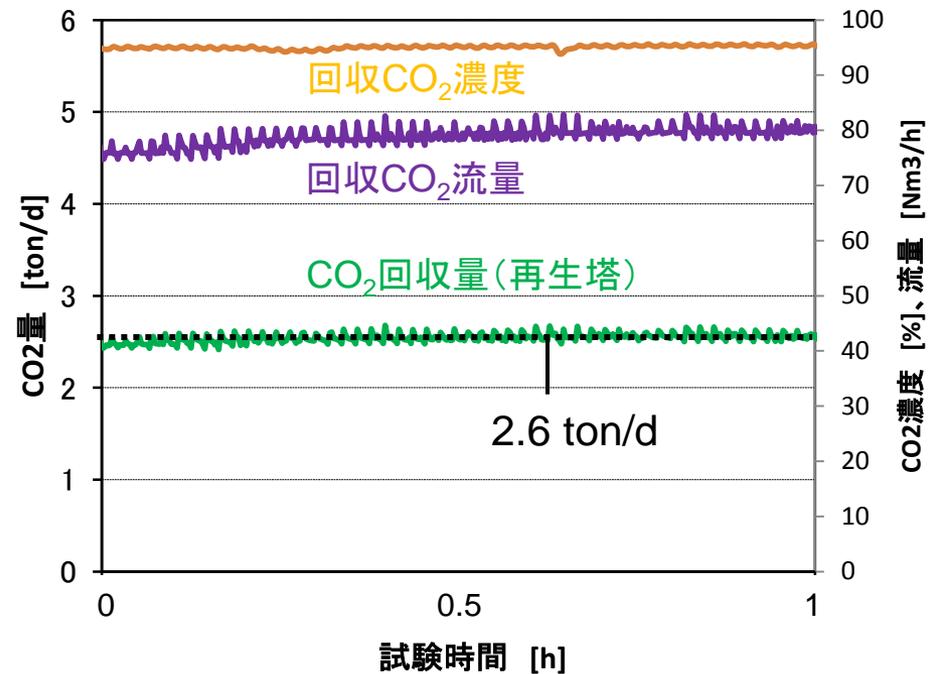
＜移動層特性把握＞

石炭燃焼排ガスを用いてCO₂分離回収試験を実施し、
2.6 ton/dのCO₂分離回収に成功した。

吸収塔の試験結果



再生塔の試験結果



※本試験では十分なCO₂を流入したため、出口CO₂濃度は6%となっている。

参考：ベンチスケール燃焼排ガス試験の実施・評価

<要素機器改善>

再生塔中間ホッパのバルブ改良により、リーク空気を48%低減でき、**CO₂回収純度が96.1%に増加した。**

グランド部カバーなし

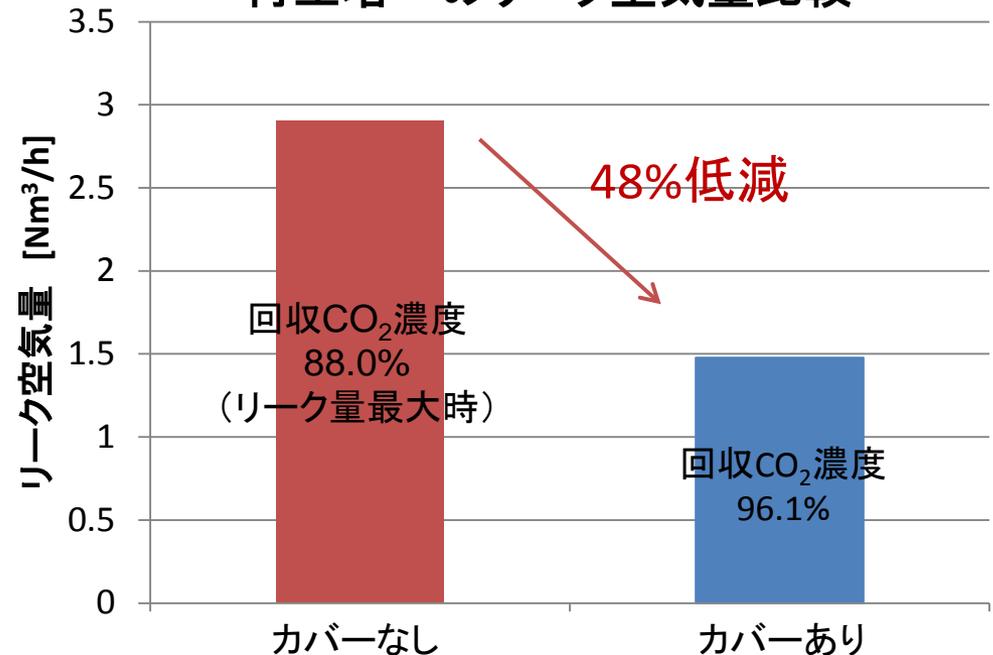


グランド部からのリーク箇所

グランド部カバーあり



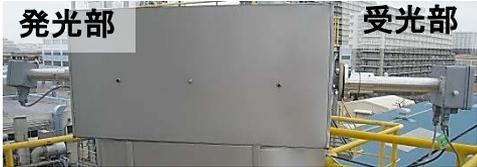
再生塔へのリーク空気量比較



参考：ベンチスケール燃焼排ガス試験の実施・評価

＜計測機器選定＞

乾燥水分量を常時監視するために**3種類の湿度計を比較し、本システムへの適用性を評価した。**

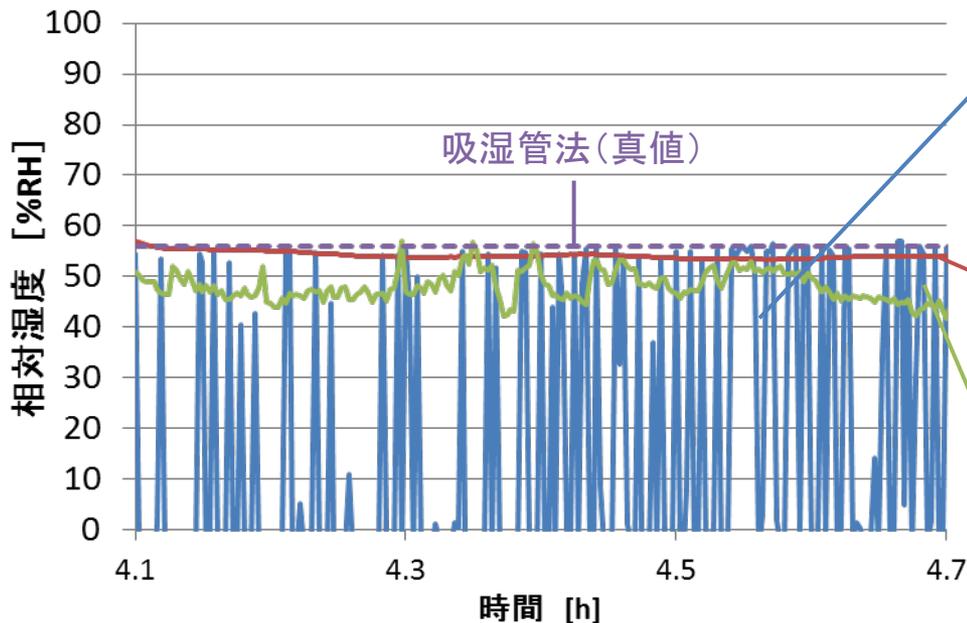
	計測方法	原理/特徴	計測機器の外観
①	静電容量式	<p>高分子膜に水分が付着して変化する電気容量値から湿度として換算する。</p> <p>計測精度：±2%RH(25℃)</p>	
②	静電容量式 (有機物除去機能付き)	<p>原理は①と同じく高分子膜の電気容量値から湿度を計測する。高分子膜に付着した化学物質を除去する機能が付いている。</p> <p>計測精度：±1%RH(15～25℃)</p>	
③	単線吸収光法 (レーザー式)	<p>・近赤外線領域でH₂Oが吸収する波長を利用した単線吸収光法で計測する。</p> <p>計測精度：数ppm (透過率により変化)</p>	

参考：ベンチスケール燃焼排ガス試験の実施・評価

＜計測機器選定＞

本システムでは、**有機物除去機能がついた静電容量式の湿度計(②)**が最も適していることが分かった。

＜測定結果と吸湿管法の比較＞



① 静電容量式

高分子膜にアミンが付着し、計測値にバラつきが見られる。

② 静電容量式

(有機物除去機能付き)

付着したアミンが除去され、測定値は吸湿管法とほぼ同じ値である。

③ 単線吸収光法(レーザ式)

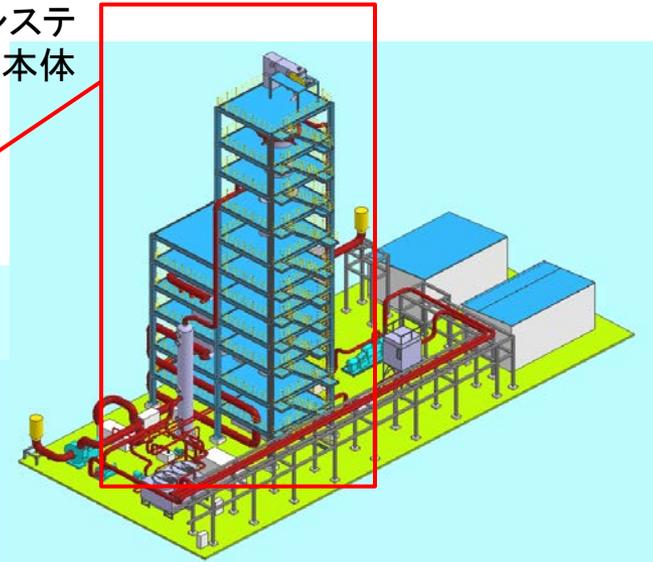
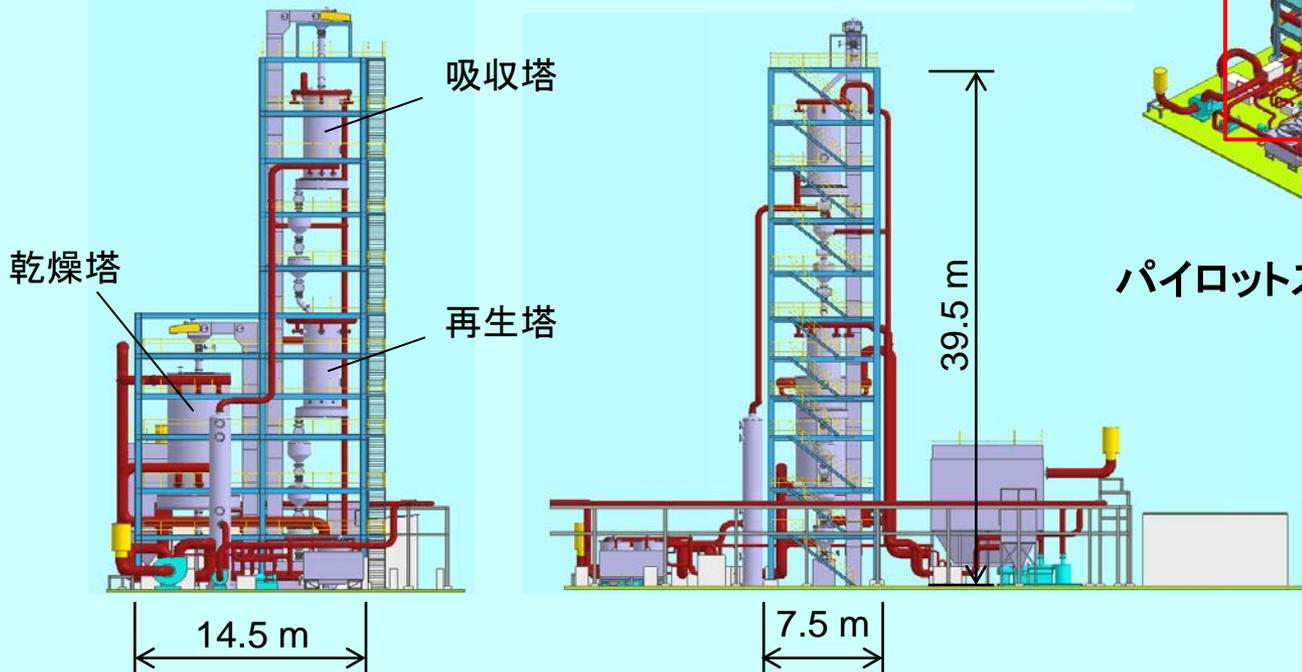
レンズが曇って透過率が減少し、10%程度の差が生じている。

参考：実ガス試験（パイロットスケール）装置の設計

実ガス試験（パイロットスケール）装置の詳細図

移動層システム
本体

- ・全体敷地面積：L53m × W23m
- ・移動層システム本体形状：L14.5m × W7.5m × H39.5m

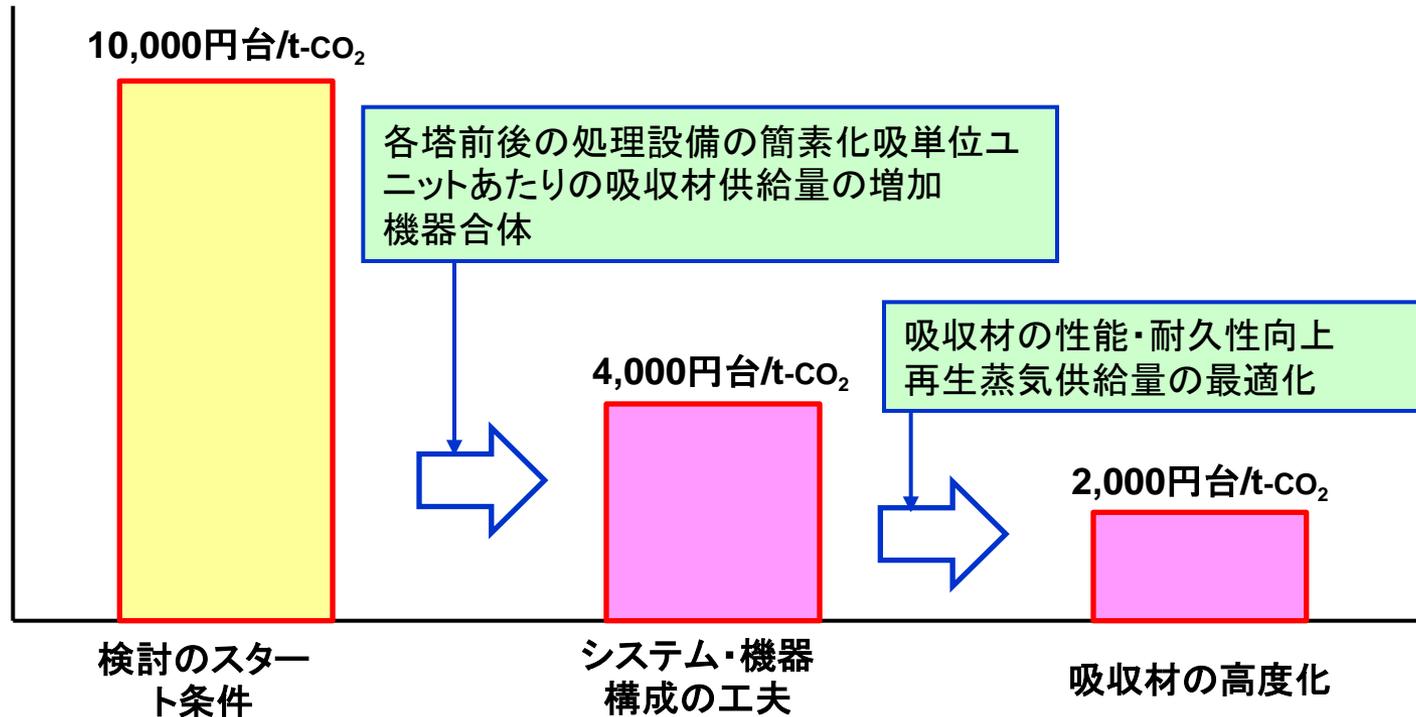


パイロットスケール試験装置 鳥瞰図

移動層システム本体図

参考：CO₂分離回収コスト評価

プラント規模	600MW
排ガス流量	1,833千Nm ³ /h
排ガス中CO ₂ 濃度	13%
CO ₂ 回収割合	55%
回収後のCO ₂ 排出原単位	369g-CO ₂ /kWh



移動層システムのCO₂分離回収コスト 検討結果

参考：外部調査機関による評価

「二酸化炭素の分離・回収技術に関する技術評価」（平成27年度）

欧米の有識者による技術評価

（コンサルティング会社（Washington CORE、Nexant）による調査）

<要点>

<p>【Washington CORE】</p>	<p>本CO₂回収技術は、技術性能とコスト目標ともに、その他の技術先進国が目指す技術水準と比較しても優秀な技術であり、導入の阻害要因に解決をもたらすポテンシャルが高い。</p> <p>最大の課題は、商用規模の実証において目標値を達成できるか否かである。今後のスケールアップによる技術性能の証明と、そのための政府の力強い支援が不可欠である。</p>
<p>【Nexant】</p>	<p>RITE固体吸収材は、低温再生を特徴とし、米国等で開発のものに比べ優れた性能を示す。ターゲット（石炭燃焼排ガス）から、特にアジアでの大規模なマーケットが期待できる。</p> <p>5年間（2015-2019）でのベンチおよびパイロット試験で、商用までという計画はアグレッシブであり、実用化に必要な課題は残るものと予想される。</p>